المرجع العربي الشامل

لهندسة الأتمتة والتحكم

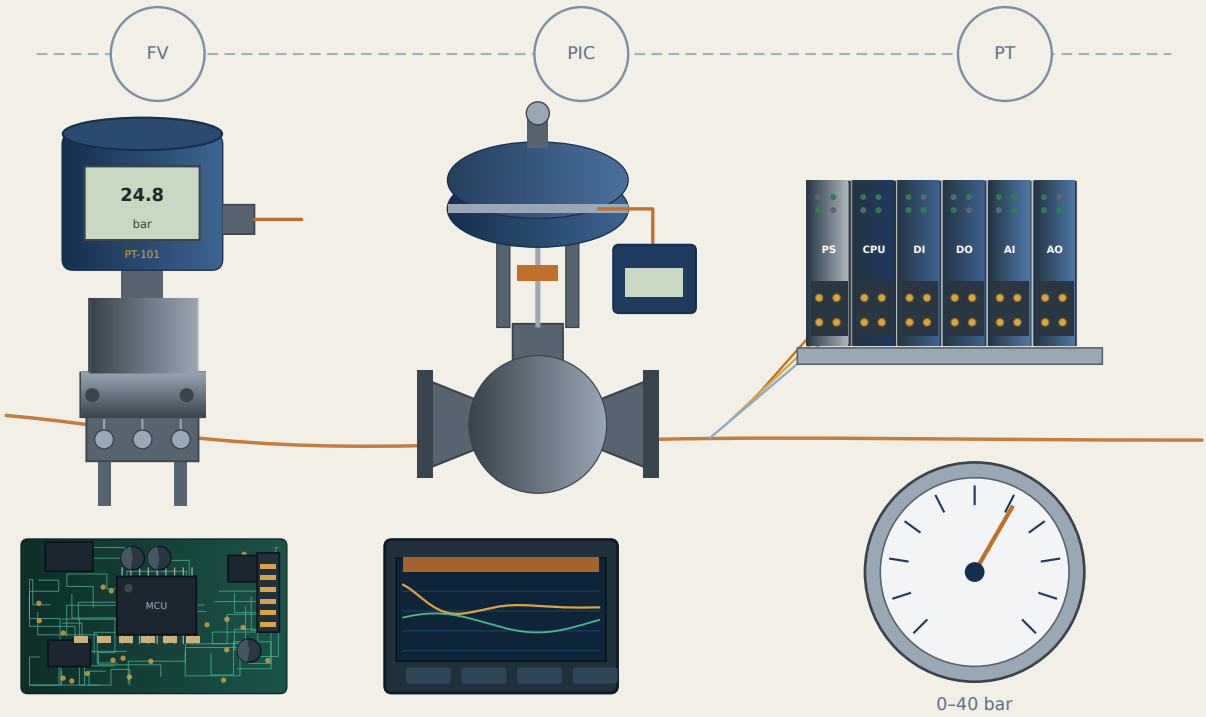
والآلات الدقيقة وأجهزة القياس

تطبيقات في النفط والغاز ومحطات توليد الطاقة والصناعة

ثمانية أبواب و44 فصلا: من الأسس والقياس إلى التحكم والسلامة والتشخيص

المهندس هاشم الخصاونة

الجزء الأول، الطبعة الأولى 2026



المرجع العربي الشامل لهندسة الأتمتة والتحكم والآلات الدقيقة وأجهزة القياس الصناعية

تطبيقات في النفط والغاز ومحطات توليد الطاقة والصناعة، مع تركيز خاص على التحكم بالتوربينات الغازية

من دراسة المشروع والتصميم إلى البرمجة والاختبارات والتشغيل والصيانة وتشخيص الأعطال

تأليف: هاشم الخصاونة

الجزء الأول — الطبعة الأولى 2026

حقوق النشر

المرجع العربي الشامل لهندسة الأتمتة والتحكم والآلات الدقيقة وأجهزة القياس الصناعية — الجزء الأول

تأليف: هاشم الخصاونة

الطبعة الأولى، 2026

الناشر: نشر المؤلف

رقم أمازون المعياري للنسخة الإلكترونية (ASIN): B0HKPFJQ3P

جميع الحقوق محفوظة.

إخلاء مسؤولية هندسي: هذا الكتاب مرجع تعليمي ومهني. القيم العددية في الأمثلة والحالات تعليمية، وقيم الفصل وتسلسلات المعدات الحرجة وضبط الحماية تُؤخذ من وثائق التصميم المعتمدة ودراسات المخاطر وتعليمات المصنّع لكل منشأة. المؤلف غير مسؤول عن أي ضرر ينشأ عن تطبيق محتوى الكتاب دون التحقق منه وفق إجراءات الموقع المعتمدة. الرسومات في الكتاب رسوم تعليمية من إعداد المؤلف وليست صورًا فوتوغرافية لمنتجات بعينها، وأسماء الشركات والمنتجات والمواصفات المذكورة ملك لأصحابها وتُذكر للتعريف فقط.

المحتويات

مقدمة الكتاب	**6**
كيف تستخدم هذا الكتاب	**9**
خطة الكتاب وما يضمه هذا الجزء	**11**
الباب الأول: الأسس واللغة الهندسية	**17**
الفصل 1: دور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم والأتمتة	19
الفصل 2: أساسيات العمليات الصناعية لمهندس التحكم	51
الفصل 3: سلسلة القياس والتحكم	65
الفصل 4: الوحدات والمديات وأخطاء القياس	101
الفصل 5: قراءة P&ID والرموز والوسوم	125
الباب الثاني: أجهزة القياس والمعايرة	**147**
الفصل 6: قياس الضغط والضغط التفاضلي	149
الفصل 7: قياس درجة الحرارة	173
الفصل 8: قياس التدفق	223
الفصل 9: قياس المستوى والسطح الفاصل	279
الفصل 10: المحللات الصناعية وأنظمة أخذ العينات	311
الفصل 11: المفاتيح والحساسات المنفصلة والمشفّرات	341
الفصل 12: القياسات المتخصصة: الكثافة واللزوجة والرطوبة والوزن والموضع والقوة	375
الفصل 13: السلامة قبل العمل الميداني: العزل الكهربائي والميكانيكي والتحكم بمصادر الطاقة (LOTO)	415
الفصل 14: المعايرة والتحقق من أجهزة القياس	439
الباب الثالث: العناصر النهائية وأسس التحكم	**485**
الفصل 15: صمامات التحكم والمشغلات والموضّعات	487
الفصل 16: صمامات العزل والتنظيم الذاتي وحماية الضغط	557

الفصل 17: الدوائر والبوابات المنطقية والتصميم المنطقي	591
الفصل 18: متحكمات PID وضبطها	619
الباب الرابع: الأنظمة والبرمجة والاتصالات	**663**
الفصل 19: المتحكم المنطقي المبرمج (PLC) ومنطق التحكم والبرمجة	665
الفصل 20: الكتل الوظيفية في برمجيات أنظمة التحكم: قراءة مخطط الكتل وبناء المنطق	709
الفصل 21: نظام التحكم الموزع (DCS) وSCADA وأنظمة التحكم الصناعية (ICS)	763
الفصل 22: واجهات التشغيل وإدارة الإنذارات	797
الفصل 23: نقل الإشارات والشبكات والبروتوكولات الصناعية	825
الفصل 24: الأمن السيبراني لأنظمة التحكم الصناعية OT	861
الباب الخامس: التصميم والسلامة	**891**
الفصل 25: أساس التصميم لأنظمة الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم (I&C Design Basis)	893
الفصل 26: المناطق الخطرة وأجهزة Ex وأنواع الحماية من الانفجار	941
الفصل 27: اختيار أجهزة القياس وإعداد أوراق البيانات	983
الفصل 28: دراسات تحديد المخاطر HAZID وHAZOP ودور مهندس التحكم فيها	1007
الفصل 29: أنظمة السلامة الآلية SIS ودراسة SIL وLOPA	1037
الفصل 30: التصميم التفصيلي لأنظمة الحريق والغاز (F&G): الكشف والإطفاء والتصويت والاختبار	1061
الفصل 31: الحمايات الآلية النموذجية لمعدات صناعة الهيدروكربونات (وفق OISD-STD-152)	1111
الباب السادس: تطبيقات المعدات والطاقة والإنتاج	**1143**
الفصل 32: قياس السرعة والاهتزاز وأجهزة الآلات الدوارة وحماية الآلات	1145
الفصل 33: تحليل الاهتزاز المتقدم وحالة الآلات	1199
الفصل 34: التحكم بالتوربينات الغازية	1225
الفصل 35: التحكم بالضواغط ومنع الانفصال الهوائي (Surge)	1299
الفصل 36: أنظمة التحكم في المراجل البخارية ومولدات البخار (HRSG)	1329

الفصل 37: التحكم بالتوربينات البخارية والتكامل في الدورة المركبة	1373
الفصل 38: أنظمة التحكم والسلامة لرؤوس الآبار ومنشآت الإنتاج	1405
الباب السابع: التشخيص والتحسين	**1451**
الفصل 39: استكشاف الأعطال (Troubleshooting) وتحليل السبب الجذري (RCA)	1453
الفصل 40: هندسة التشغيل للحلقات: أعطال الحساسات، وتمييز عطل الجهاز من اضطراب العملية، والمنطق القابل للاختبار، وقياس التحسين	1533
الفصل 41: استراتيجيات التحكم المتقدمة: التعاقبي والتغذية الأمامية والنسبة وتقسيم المدى والانتقاء وتعويض الزمن الميت	1561
الفصل 42: الذكاء الاصطناعي وأثره في مستقبل التحكم والقياس	1603
الباب الثامن (تكميلي): الخلفية الإلكترونية لأنظمة التحكم	**1635**
الفصل 43: النبائط الإلكترونية الأساسية وفحصها وقراءة الدوائر	1637
الفصل 44: المعالجات الدقيقة والمتحكمات الدقيقة والأنظمة المدمجة	1679
الملحق أ: حلول مشروحة لأسئلة مختارة	**1715**
الملحق ب: قائمة المراجع الموحدة	**1743**
الملحق ج: تجهيزات الورشة وأدوات الاختبار	**1763**
الملحق د: مسرد المصطلحات عربي–إنجليزي	**1779**
الملحق هـ: خطة الأجزاء القادمة	**1821**
الملحق و: ثبت الأشكال	**1824**
الملحق ز: الكشاف الموضوعي	**1859**

مقدمة الكتاب

لماذا هذا الكتاب: ما زالت المكتبة العربية تفتقر إلى مرجع تطبيقي شامل في هندسة أجهزة القياس والتحكم والأتمتة الصناعية. فمعظم ما يحتاجه المهندس والفني في عمله اليومي مكتوب بالإنجليزية: من اختيار المرسل ومعايرته وتحجيم الصمام، إلى ضبط الحلقة وقراءة مخططات الأنابيب والأجهزة (P&ID) ومصفوفة السبب والنتيجة وأنظمة السلامة الآلية. وهو موزع بين المواصفات الدولية وأدلة المصنّعين وخبرات ميدانية قلّما تُدوَّن. والغاية الأولى من هذا الكتاب أن يجمع هذه المعرفة في مرجع واحد بلغة عربية سليمة واضحة، يغطي المهنة من أولها إلى آخرها: القياس، والإشارة، والقرار، والتنفيذ، والحماية، ثم الوثائق والمشروعات والاختبارات والتشغيل والصيانة والقيادة. ويُكتب المصطلح الإنجليزي بين قوسين بعد العربي عند أول وروده، ليبقى القارئ على صلة بوثائق المصنّعين وشاشات التحكم وأوراق البيانات التي يعمل بها كل يوم.

من كتبه: كتبه المهندس هاشم الخصاونة، الحاصل على درجة الماجستير في هندسة الميكاترونكس (Mechatronics Engineering)، وله خبرة عملية تتجاوز اثنتين وعشرين سنة في الأتمتة الصناعية (Automation) وأنظمة التحكم (Control Systems) والآلات الدقيقة وأجهزة القياس (Instrumentation)، اكتسبها من العمل مع كبرى الشركات العالمية في دول عديدة، إلى جانب العديد من الشهادات والدورات المتخصصة؛ عمل في محطات توليد الطاقة وحقول النفط والغاز ومرافق المعالجة والمنصات البحرية، وشارك في مراحل العمل كلها: التصميم، والتركيب، والاختبار، والتشغيل الأولي، والتشغيل والصيانة، وقيادة الفرق. لذلك جاء الكتاب عمليًا قبل أن يكون نظريًا: يُربط كل مفهوم بما يراه المهندس والفني في الموقع، ويُختم كل مثال محلول بمعنى النتيجة ميدانيًا. والحالات الميدانية في هذا الجزء مركّبة في معظمها لأغراض التعليم، مبنية على أنماط أعطال تتكرر في الميدان مع إخفاء أي بيان يدل على منشأة بعينها، ويُبيَّن نوعها بعبارة «مثال تعليمي مركّب»؛ أما ما يُنقل منها كما وقع من خبرة المؤلف فيُوسم «حالة ميدانية

موثقة». ويركّز الكتاب على قطاعات الطاقة والنفط والغاز ومرافق المعالجة، وعلى التحكم بالتوربينات الغازية والضواغط والمعدات المساعدة، مع فصول للتطبيقات القطاعية الأخرى.

لمن هذا الكتاب: هو مرجع للمهندسين والفنيين والطلاب معًا. **الطالب والمهندس الجديد** يجدان فيه أساسًا متينًا يربط ما درساه بما سيلقيانه في العمل (الأبواب الأول إلى الثالث). و**فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس ومهندس الموقع والتشغيل والصيانة** يجدان فيه ما ينفعهما أمام اللوحة والمرسل والصمام والتوربين، من خطوات المعايرة والفحص إلى تشخيص الأعطال (الأبواب الثاني والسادس والسابع). و**المهندس القائد** الذي يدير التصميم والمشروعات والفرق والعقود يجد فيه ما يحتاجه للمراجعة واتخاذ القرار (البابان الرابع والخامس). ويُعنوَن كل فصل في أوله بالفئة التي يخاطبها، ويفصل قبيل «الأخطاء الشائعة» ما يقرره المهندس عمّا ينفذه الفني ويقيسه. والأمل أن يكون الكتاب رفيقًا للقارئ على المكتب وفي الموقع، وأن يفتح الباب لمزيد من التأليف الهندسي باللغة العربية.

وعد السلسلة ونطاق هذا الجزء: تعد سلسلة «المرجع العربي الشامل» بتغطية مهنة الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم كلها، من التصميم إلى التنفيذ والاختبارات والتشغيل والصيانة والقيادة، في أجزاء متتابعة. أما هذا الجزء الأول فيضم 44 فصلًا مكتوبًا كاملًا من خطة الكتاب البالغة 120 فصلًا، مرتبة في ثمانية أبواب تتبع رحلة القارئ في التعلم: الأسس واللغة الهندسية، ثم أجهزة القياس والمعايرة، ثم العناصر النهائية وأسس التحكم، ثم الأنظمة والبرمجة والاتصالات، ثم التصميم والسلامة، ثم تطبيقات المعدات والطاقة والإنتاج، ثم التشخيص والتحسين، وبابٌ تكميلي للخلفية الإلكترونية لمن أراد التعمق. ومعها ملاحق الحلول المختارة والمراجع وتجهيزات الورشة والمسرد. وتصدر بقية فصول الخطة في الأجزاء التالية، وأولها التحكم الضبابي والتنبؤي والتكيفي (الفصل 48)، ثم الاختبار والتشغيل (الفصول 107 إلى 109). والإحالات إلى فصول لم تصدر بعد تشير إلى موضعها في الخطة، وتُقرأ على أنها «سيأتي في الجزء التالي».

ما ليس هذا الكتاب: ليس إجراءات تشغيل معتمدة، ولا بديلًا عن وثائق المشروع والمصنّع ودراسات المخاطر. الأرقام في الأمثلة والتمارين تعليمية؛ أما قيم الفصل (Trip) وتسلسلات المعدات الحرجة وضبط الحماية فتُؤخذ من التصميم المعتمد لكل منشأة. ولا يغني الكتاب عن تصاريح العمل وإجراءات العزل المعتمدة في الموقع، وإن شرح أسسها في الفصل 13.

كيف تستخدم هذا الكتاب

- **اقرأ الفصول 1 و3 و4 أولًا** مهما كان مستواك؛ فهي تثبّت المصطلحات، وتطرح الأسئلة الثلاثة التي يعود إليها الكتاب كله: ماذا نريد أن نعرف؟ ما القرار المطلوب؟ كيف نثبت صحة التنفيذ؟
- **اقرأ الفصل 13 قبل أي عمل في الموقع:** فهو يشرح السلامة قبل العمل الميداني، أي العزل الكهربائي والميكانيكي والتحكم بمصادر الطاقة (LOTO). وكل إجراء ميداني في الكتاب، من المعايرة إلى تبديل المرسل وفحص الحلقة، يفترض أن العزل نُفّذ وتُحقّق منه كما يشرح ذلك الفصل.
- **المصطلحات:** يُكتب المصطلح العربي أولًا ثم الإنجليزي بين قوسين عند أول ورود في كل فصل، ثم يُستخدم الأشهر بينهما. وتُستخدم كلمة **التحكم** مقابل (Control)، و**السيطرة** مرادف مقبول. أما الاختصارات والوسوم والوحدات والرموز فتبقى كما هي (PLC، PT-101، bar، Kc). ويجمع المسرد في آخر الكتاب المصطلحات كاملة.
- **الوحدات:** النظام الدولي للوحدات (SI) أساسًا، مع ذكر الوحدات الإمبراطورية حيث يشيع استخدامها في الميدان (psi، °F، inch).
- **بنية الفصل:** لمن هذا الفصل ← الفكرة الأساسية ← الشرح مع الأمثلة الحسابية ← حالة ميدانية ← دور المهندس ودور الفني ← الأخطاء الشائعة ← ملخص يُختم بجسر إلى الفصل التالي ← عشرة أسئلة للتقييم الذاتي (حسابية أو تشخيصية أو محاكاة) ← سطر مراجع الفصل. وتسير الأمثلة المحلولة في الغالب على نسق واحد: المعطيات، والافتراضات، والحل بالوحدات، ومعنى النتيجة ميدانيًا.

- **الرسومات:** تُكتب التسميات في الرسوم بالعربية أولًا والمصطلح الإنجليزي بين قوسين بعدها، كما في المتن؛ أما الوسوم والاختصارات والوحدات (PT-101، bar، DCS) فتبقى كما تظهر على الشاشات والوثائق. ولكل شكل تعليق تحته يشرح ما يُقرأ منه.
- **الإحالات والترقيم:** رُقّمت الفصول ترقيمًا متتابعًا بترتيب ظهورها (1 إلى 44)، وتحمل فصول الأجزاء القادمة الأرقام 45 إلى 120. والإحالة تكون برقم الفصل والقسم، مثل (17.3) أي القسم 3 من الفصل 17.

خطة الكتاب وما يضمه هذا الجزء

خطة الكتاب الكاملة 120 فصلًا. يضم **هذا الجزء الأول** الفصول 1 إلى 44 كاملة بنصوصها وأشكالها وأمثلتها وحالاتها الميدانية، مرتبة في ثمانية أبواب تتبع رحلة التعلم من الأسس إلى التشخيص والتحسين، والباب الثامن تكميلي لمن أراد الخلفية الإلكترونية. رُقّمت الفصول ترقيمًا متتابعًا بترتيب ظهورها، والإحالة تكون برقم الفصل والقسم، مثل (17.3). وتحمل فصول الأجزاء القادمة الأرقام التالية حتى 120، وتُعرض خطتها في الملحق هـ «خطة الأجزاء القادمة» في آخر الكتاب.

خريطة الأبواب

- **الباب الأول: الأسس واللغة الهندسية (الفصول 1–5).** دور المهندس، وأساسيات العمليات، وسلسلة القياس والتحكم، والوحدات والأخطاء، وقراءة مخططات الأنابيب والأجهزة (P&ID). هذه اللغة المشتركة التي يقوم عليها الكتاب كله.
- **الباب الثاني: أجهزة القياس والمعايرة (الفصول 6–14).** قياس الضغط والحرارة والتدفق والمستوى، والمحللات، والمفاتيح والحساسات، والقياسات المتخصصة، ثم السلامة قبل العمل الميداني (الفصل 13)، ثم المعايرة والتحقق.
- **الباب الثالث: العناصر النهائية وأسس التحكم (الفصول 15–18).** صمامات التحكم، وصمامات العزل والتنظيم الذاتي والأمان، ثم المنطق الرقمي، ثم متحكمات PID وضبطها.
- **الباب الرابع: الأنظمة والبرمجة والاتصالات (الفصول 19–24).** المتحكم المنطقي المبرمج، والكتل الوظيفية، ونظام التحكم الموزع، وواجهات التشغيل والإنذارات، والشبكات، والأمن السيبراني.

- **الباب الخامس: التصميم والسلامة (الفصول 25–31).** أساس التصميم، والمناطق الخطرة، واختيار الأجهزة وأوراق البيانات، ودراسات المخاطر، وأنظمة السلامة الآلية، والحريق والغاز، والحمايات النموذجية.
- **الباب السادس: تطبيقات المعدات والطاقة والإنتاج (الفصول 32–38).** قياس الاهتزاز وتحليله، ثم التوربينات الغازية والضواغط والمراجل والتوربينات البخارية، ثم رؤوس الآبار ومنشآت الإنتاج.
- **الباب السابع: التشخيص والتحسين (الفصول 39–42).** منهجية استكشاف الأعطال وتحليل السبب الجذري، وهندسة التشغيل للحلقات، واستراتيجيات التحكم المتقدمة (التعاقبي والتغذية الأمامية والنسبة وتقسيم المدى والانتقاء وتعويض الزمن الميت)، والذكاء الاصطناعي في التحكم.
- **الباب الثامن (تكميلي): الخلفية الإلكترونية (الفصلان 43 و44).** النبائط الإلكترونية، والمعالجات والمتحكمات الدقيقة، لمن أراد أن يفهم ما داخل الأجهزة.

مستويات القراءة

المستوى	ما يعنيه	الفصول
أساسي	يُقرأ بلا شرط سابق، ويثبّت اللغة والمفاهيم	1–5، و13، و14
تطبيقي	يفترض المستوى الأساسي، ويعلّم الجهاز والحلقة والنظام كما تُستعمل في الموقع	6–12، و15–24، و39، و 43
متقدم	يفترض التطبيقي، ويتناول التصميم والسلامة والمعدات الكبيرة والتحسين	25–38، و40–42، و44

وداخل الفصل الواحد يتدرج المستوى من «الفكرة الأساسية» إلى الأمثلة المحلولة إلى الحالة الميدانية؛ فمن أراد المستوى الأساسي وحده قرأ افتتاح كل فصل وملخصه وأخطاءه الشائعة.

مشروع الكتاب المتصل: وحدة ضغط الغاز

يتابع الكتاب وحدة واحدة عبر فصوله: ضاغط غاز طارد مركزي بمحرك كهربائي، مع وعاء شفط V-101، وفاصل تصريف، ومبرد، وحلقتي التحكم LIC-101 وPIC-102، ومضختي التصريف P-101 وP-102. وتتكوّن منظومتها أمام القارئ مرحلةً مرحلة:

المرحلة	أين	ما يُنجز
العنصر النهائي	القسم 15.14	تحديد صمامي LV-101 وFV-102 ووضع فشلهما وحجمهما
ضبط الحلقات	القسم 18.11	نموذج كل حلقة من تجربة القفزة، ومعاملات الضبط، وسجل الضبط
المنطق	القسم 19.11	منطق تشغيل المضختين P-101 وP-102 وتبادلهما
النظام	القسم 21.11	بنية نظام التحكم وتوزيع الإشارات على المتحكمات
الحريق والغاز	القسم 30.13	كاشفات الوحدة ومنطق التصويت والإجراءات
التشخيص	القسم 39.17	ثلاثة أعطال في الوحدة من العَرَض إلى السبب الجذري
هندسة التشغيل	القسم 40.7	مؤشرات أداء الحلقات ومنطق أعطال الحساسات
التحكم المتقدم	القسم 41.13	التعاقبي على المستوى، والانتقاء على صمام إعادة التدوير

مسارات قراءة مقترحة

القارئ	المسار المقترح
الطالب والمهندس الجديد	الفصول 1–5، ثم 6–10 و14، ثم 15 و18 و41، ثم 19 و21
فني الأجهزة	الفصلان 3 و4، ثم الفصل 13 قبل أي عمل في الموقع، ثم 6–12 و14–16، ثم 39 و40

القارئ	المسار المقترح
مهندس التصميم والمشاريع	الفصلان 1 و5، ثم 25–31، ثم 21–24
مهندس محطات الطاقة والآلات الدوارة	الفصول 32–37، ثم 18 و41 و39
مهندس الإنتاج ومنشآت الآبار	الفصول 30 و31 و38، ثم 29
مهندس السلامة الوظيفية	الفصول 28–31، ثم 16 و22

الملاحق في هذا الجزء

الملحق	المحتوى
أ	حلول مشروحة لأسئلة مختارة
ب	قائمة المراجع الموحدة وخريطة المواصفات
ج	تجهيزات الورشة وأدوات الاختبار
د	مسرد المصطلحات عربي–إنجليزي
هـ	خطة الأجزاء القادمة
و	ثبت الأشكال
ز	الكشاف الموضوعي

اصطلاحات هذا الكتاب (تُقرأ قبل الفصول): (1) **الحالات الميدانية** مستمدة من خبرة المؤلف في محطات التوليد ومنشآت النفط والغاز مع إخفاء بيانات المنشآت وتعديل ما يلزم لحماية السرية، أو أمثلة تعليمية مركّبة من عدة وقائع؛ ونوع كل حالة مبيَّن في نهايتها («حالة ميدانية موثقة» أو «مثال تعليمي مركّب»)، وتُكتب الحالات الجديدة بتسلسل ثابت: العَرَض، الفرضيات، الفحوص، الدليل الحاسم، السبب الجذري، الإجراء التصحيحي. (2) **القيم العددية** في الأمثلة المحلولة افتراضات تعليمية ما لم يُذكر أنها من

مواصفة (مثل IEC/ISA/API أو من طراز محدد أو من توصية صانع؛ ولكل مثال محلول أربعة عناصر: المعطيات، والافتراضات، والحل بالوحدات، ومعنى النتيجة ميدانيًا. (3) **رموز المراجع** (...R1، R19، R50) تحيل إلى قائمة المراجع الموحدة في ملحق «قائمة المراجع» آخر الكتاب، ويدل الرمز الواحد على مصدر واحد في الكتاب كله؛ وR1 هو مسودة التأليف السابقة للمؤلف (وثيقة تتبع لا مصدرًا مستقلًا)، وR18 خبرة المؤلف الميدانية. (5) **المعادلات** تُكتب في أسطر مستقلة من اليسار إلى اليمين بالرموز اللاتينية.

الباب الأول: الأسس واللغة الهندسية

يبني هذا الباب اللغة المشتركة التي يقوم عليها الكتاب كله: من هو مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم وما حدود دوره (الفصل 1)، وكيف تعمل العمليات الصناعية التي يقيسها ويتحكم بها (الفصل 2)، وكيف تتكون سلسلة القياس والتحكم من الحساس إلى العنصر النهائي (الفصل 3)، وكيف تُكتب الوحدات والمديات وتُقدَّر الأخطاء (الفصل 4)، وكيف يُقرأ مخطط الأنابيب والأجهزة (P&ID) (الفصل 5). ومن أتم هذا الباب استطاع أن يقرأ أي فصل بعده منفردًا.

الفصل 1: دور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم والأتمتة

> **لمن هذا الفصل:** لكل القرّاء. المهندس الجديد يجد فيه خريطة المهنة، والمهندس الخبير يجد فيه اللغة المشتركة التي يبني عليها الكتاب كله.
>
> **الفكرة الأساسية:** مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم يعمل عند نقطة التقاء العملية الصناعية بالمعدات والإشارات والبرامج والناس. مهمته أن يحوّل حاجة العملية إلى منظومة قياس ومنطق وتنفيذ وحماية قابلة للاختبار والإثبات.

1.1 ثلاثة اختصاصات في مهنة واحدة

تُستخدم كلمات الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم والأتمتة معًا حتى تكاد تصير كلمة واحدة، لكن لكلٍّ منها وظيفة:

الاختصاص	السؤال الذي يجيب عنه	مثال في محطة توليد
الآلات الدقيقة وأجهزة القياس (Instrumentation)	كم قيمة المتغير الآن؟	مرسل ضغط غاز الوقود يقرأ 24.8 bar
التحكم (Control)	ما الأمر الذي يُبقي المتغير عند الهدف؟	حلقة PID تحرّك صمام تنظيم الوقود لتثبيت الضغط عند 25 bar
الأتمتة (Automation)	كيف تُنفَّذ سلسلة من القرارات دون تدخل بشري؟	تسلسل بدء التوربين: تطهير، إشعال، تسارع، تزامن

الأجهزة تُعطي المعرفة، والتحكم يتخذ القرار المستمر، والأتمتة تربط القرارات المنفصلة في تسلسل. والحماية (Protection) طبقة رابعة تراقب الثلاثة وتوقف العملية عند تجاوز الحدود. المهندس الناجح يرى الأربعة معًا في كل حلقة.

1.2 نطاق العمل

يمتد عمل المهندس على دورة حياة المنشأة كلها. الجدول يوجز ما يفعله في كل مرحلة، وتفصيله في الفصول اللاحقة:

المرحلة	ما يفعله مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم	الفصول
الدراسة والتصميم الأولي	يحدد فلسفة التحكم والحماية، ويشارك في P&ID وتقدير I/O	5، 25، 52، 53
التصميم التفصيلي	يختار الأجهزة والصمامات، يعدّ أوراق البيانات والحسابات والرسومات والمواصفات	27، 76–79
دراسات المخاطر	يشارك في HAZOP وLOPA وتحديد SIL ويكتب SRS	28، 29، 54، 81، 82
المشتريات	يقيّم العروض فنيًا ويراجع وثائق الموردين والحزم	80
التصنيع والاختبار	يحضر FAT ويختبر البرامج والمنطق	58، 107
التركيب والتشغيل	يشرف على التركيب وفحص الحلقات (Loop Check) واختبار القبول في الموقع SAT والتشغيل التجريبي (Commissioning) وبدء التشغيل (Start-up)	77، 106، 108، 109
التشغيل والصيانة	يشخّص الأعطال، يعاير، يدير الإنذارات، يصون الأنظمة والبرامج	22، 39، 59، 73، 110، 111
التحديث والتقادم	يقود ترقية الأنظمة القديمة ويدير التغيير	75، 95

يعمل المهندس في شركات الهندسة والتوريد والإنشاء (EPC) غالبًا من الدراسة حتى التركيب والتشغيل، ويعمل في شركات التشغيل (Operators) في المرحلتين الأخيرتين. غير أن أفضل مهندسي التصميم هم من عملوا في الموقع، وأفضل مهندسي الصيانة هم من فهموا لماذا صُمّم النظام على هذا النحو.

1.3 التصميم الوظيفي والتصميم المكاني

ينقسم عمل التصميم إلى نصفين مختلفين في طبيعتهما:

- **التصميم الوظيفي (Functional Design):** ماذا يقيس الجهاز، وما مداه ودقته، وما المنطق الذي يعمل به، وكيف يتصل بالنظام. مخرجاته: فهرس الأجهزة (Instrument Index)، قائمة I/O، أوراق البيانات (Datasheets)، مخططات المنطق، مصفوفة السبب والنتيجة (Cause & Effect)، بنية النظام.
- **التصميم المكاني (Spatial Design):** أين يوضع الجهاز على الأنبوب أو الوعاء، وكيف يُركّب ويُوصَل، وأين تمر الكابلات، وأين تقف اللوحات. مخرجاته: مخططات الموقع (Location Plans)، تفاصيل التركيب (Hook-up)، مسارات الكابلات، تخطيط غرفة التحكم.

الخطأ الشائع أن يُتقن المهندس أحدهما ويهمل الآخر: مرسل مستوى ممتاز المواصفات مركّب في موضع تصله الرغوة، أو صمام محسوب بدقة لا يمكن الوصول إليه للصيانة. يعالج الفصلان 25 و27 التصميم الوظيفي، ويعرض القسم 25.11 أساسيات التركيب المكاني.

الشكل 1-1: *التصميم الوظيفي والتصميم المكاني نصفان مختلفان في طبيعتهما، لكل منهما سؤاله ومخرجاته، ويلتقيان عند الجهاز الواحد؛ والخطأ الشائع أن يُتقن أحدهما ويُهمل الآخر.*

1.4 العلاقة مع التخصصات الأخرى

مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم هو أكثر التخصصات تبادلًا للمعلومات مع غيره، لأنه لا يملك متغيرًا واحدًا من عنده؛ كل ما يقيسه ويتحكم به يخص غيره:

التخصص	ما يأخذه منه مهندس التحكم	ما يعطيه له
العمليات (Process)	ظروف التشغيل والتصميم، P&ID، فلسفة التحكم، نقاط الإنذار والفصل	قابلية القياس والتحكم، ما يمكن ضبطه وما لا يمكن
الميكانيك والمعدات الدوارة	خرائط الضواغط، حدود الاهتزاز، متطلبات OEM للتوربين	حساسات الآلة، منطق الحماية، واجهات لوحة التحكم

التخصص	ما يأخذه منه مهندس التحكم	ما يعطيه له
الأنابيب (Piping)	مواصفات المواد والفلنجات، مواقع الوصلات، النموذج ثلاثي الأبعاد (3D)	مواقع الأجهزة في الخط، أطوال الأنابيب المستقيمة للعدادات
الكهرباء	التغذية، MCC وVFD، تصنيف المناطق الخطرة، التأريض	إشارات التشغيل والحالة، واجهات الحماية، أحمال أنظمة التحكم
السلامة (HSE/Process Safety)	دراسات المخاطر، متطلبات SIL، فلسفة F&G	وظائف الحماية القابلة للاختبار، توثيق SRS
المدني والهيكل	مواقع اللوحات والحوامل، مسارات الكابلات تحت الأرض	الأحمال والأبعاد ومتطلبات الوصول

مثال واحد يوضح الترابط: اختيار صمام تحكم واحد يحتاج بيانات العملية (ضغط وحرارة وتدفق وطبيعة الوسط)، ومواصفات الأنابيب (المادة والفلنجة)، وحسابات التحجيم، ومتطلبات المشغّل الآلي (Actuator) من زمن الحركة ووضع الفشل، وفلسفة التحكم والحماية (هل هو صمام تحكم أم صمام إغلاق؟). لا يستطيع مهندس التحكم أن يقرر وحده، ولا يستطيع غيره أن يقرر بدونه.

الشكل 1-2: *مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في مركز تبادل المعلومات مع التخصصات الأخرى؛ يأخذ من كل تخصص بياناته ويعطيه ما يحتاجه من قياس وتحكم وحماية.*

1.5 الأسئلة الثلاثة

عند دراسة أي وظيفة قياس أو تحكم أو حماية، اسأل:

1. **ما الذي نريد معرفته؟** ضغط، حرارة، مستوى، تدفق، سرعة، اهتزاز، وجود غاز، حالة صمام.
2. **ما القرار المطلوب؟** عرض للمشغّل فقط، تعديل خرج مستمر، تشغيل أو إيقاف معدّة، إصدار إنذار، أو تنفيذ إيقاف حماية.
3. **كيف نثبت صحة التنفيذ؟** بالحساب، والمراجعة، والمعايرة، والاختبار الوظيفي، وسجلات الأداء بعد التشغيل.

والسؤال الثالث يبيّن تكامل دورين: دور الفني أن يركّب ويوصّل ويعاير ويختبر وفق الإجراء المعتمد، وينقل ما يراه في الميدان بدقة؛ ودور المهندس أن يحدد المتطلب

وطريقة إثباته، ويراجع النتائج ليثبت أن ما رُكّب يؤدي وظيفته في كل الحالات، بما فيها حالات الفشل.

1.6 مثال: ضغط غاز الوقود في توربين غازي

عبارة «نحتاج قياس ضغط غاز الوقود» تخفي أربع وظائف مختلفة قد ترتبط كلها بالضغط نفسه:

الوظيفة	الجهاز	القرار	كيف يُثبت
عرض (Indication)	مرسل PT-101 إلى شاشة المشغّل	لا قرار آلي؛ معلومة	معايرة دورية ومقارنة بمقياس محلي
تنظيم (Control)	PT-101 + PIC-101 + صمام PCV-101	إبقاء الضغط عند 25 bar	اختبار استجابة الحلقة واتجاهات الأداء
إنذار (Alarm)	من PT-101 أو مفتاح مستقل	تنبيه المشغّل عند 21 bar	اختبار نقطة الإنذار وزمن الاستجابة
حماية (Trip)	مرسلات مستقلة PT-111A/B/C بتصويت 2oo3	إيقاف التوربين عند 20 bar	اختبار إثبات (Proof Test) موثّق بدورية محددة من دراسة SIL

كيف أختار؟ ابدأ من القرار لا من الجهاز: إن كان المطلوب معلومة للمشغّل فعرض، وإن كان تعديلًا مستمرًا فحلقة تنظيم، وإن كان تنبيهًا يتصرف عليه إنسان فإنذار، وإن كان إيقافًا لا يحتمل انتظار الإنسان فحماية بمرسلات مستقلة وتصويت. والجدول لا يحدد لك مستوى السلامة المطلوب (SIL) ولا دورية اختبار الإثبات؛ هذان يأتيان من دراسة المخاطر (الفصلان 28 و29). والخطأ الأكثر كلفة أن تُبنى وظيفتان (تنظيم وحماية) على المرسل نفسه توفيرًا في الكلفة، فيصير عطل واحد سببًا مشتركًا يُسقطهما معًا.

الوظائف الأربع لها متطلبات استقلال مختلفة: الأصل ألا تعتمد الحماية على المرسل نفسه الذي يعتمد عليه التحكم (ولا تُقبل المشاركة إلا بالشروط التي يبيّنها IEC 61511 وبتحليل

يثبت كفايتها)، لأن عطله يُسقط الاثنين معًا، وهذا فشل بسبب مشترك (Common Cause Failure). هذا المبدأ يعود في القسم 29.4 عند حساب أثر السبب المشترك.

الشكل 1-3: *القياس الواحد في مثال غاز الوقود وقد صار أربع وظائف: مرسل PT-101 للعرض والتنظيم عبر PIC-101 والصمام PCV-101، وإنذار PAL-101 من المرسل نفسه، وحماية بثلاثة مرسلات مستقلة PT-111A/B/C بتصويت 2oo3 تذهب إلى نظام السلامة. الاستقلال يمنع أن يُسقط عطل واحد التحكم والحماية معًا.*

1.7 المهارات المطلوبة

المهارات الفنية وحدها لا تكفي؛ الممارسة تُظهر أن المهندس يحتاج ثلاث حزم:

- **فنية:** مبادئ القياس، ديناميكا العمليات، PID والاستراتيجيات، PLC/DCS/SIS، الشبكات الصناعية، قراءة P&ID والرسومات الكهربائية، المناطق الخطرة، المعايير (IEC 61511، ISA-5.1، ISA-18.2، API 670).

- **إدارية:** تنسيق الواجهات مع المالك والمورّد والمقاول والتخصصات الأخرى، إدارة الوثائق والإصدارات، إدارة التغيير، تقييم العروض، تخطيط الاختبارات والتوقفات.
- **مهنية:** الفضول تجاه التقنيات الجديدة (الشبكات، البيانات، الأمن السيبراني)، والسعي إلى التحسين الكلي للمنشأة لا إلى الحل المحلي لجهاز واحد، والصدق في توثيق ما اختُبر وما لم يُختبر.

1.7.1 سلّم الكفاءة المهنية: ما الذي يتغيّر فعلًا من درجة إلى درجة

المهنة درجات، لا لأن الشركات تحب الألقاب، بل لأن **نوع الخطأ الذي يستطيع المهندس ارتكابه يتغيّر مع كل درجة**. خطأ المهندس المبتدئ يُلتقَط في المراجعة؛ وخطأ من يعتمد الوثائق يخرج إلى المصنع؛ وخطأ من يكتب المعيار يتكرر في مشاريع لم يسمع بها. ولهذا لا تُقاس الدرجة بسنوات الخدمة ولا بعدد الأنظمة التي عمل عليها، بل بأربعة أشياء: ما الذي يقرره بنفسه، وما الذي يوقّع عليه، وأمام من يقف حين يختلف الرأي، وعمّا يُسأل.

وتستعمل شركات التشغيل والهندسة الكبرى مسميات متقاربة (مهندس تحت التدريب، مهندس، مهندس أول، مهندس رئيسي أو استشاري)، والأسماء تختلف من شركة إلى أخرى ومن بلد إلى آخر، لكن مضمون هذه الأشياء الأربعة واحد تقريبًا في كل مكان:

جدول مقارنة: درجات مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم وما يتغيّر في كل درجة

المعيار	مهندس مبتدئ	مهندس	مهندس أول	مهندس رئيسي
نطاق القرار	مهمة محددة بمدخلات جاهزة؛ لا يغيّر مدى ولا نقطة ضبط ولا منطقًا بنفسه	حلقة أو نظام واحد داخل أساس تصميم قائم؛ يختار ويحسب ويبرّر	وحدة كاملة وواجهاتها؛ يوازن السلامة والكلفة وقابلية الصيانة، ويقبل انحرافًا موثّقًا	المنشأة والمعيار نفسه؛ يضع أساس التصميم والفلسفات ويحسم الخلاف الفني

المعيار	مهندس مبتدئ	مهندس	مهندس أول	مهندس رئيسي
ما يُصدره من وثائق	يملأ أوراق بيانات وفهارس وقوائم I/O وأوراق فحص حلقات تحت مراجعة	أوراق بيانات وحسابات تحجيم ومخططات حلقات ومواصفات مواد وإجراءات اختبار باسمه	فلسفة التحكم والسرد الوصفي ومصفوفة السبب والنتيجة وSRS ونطاق العمل	أساس التصميم ومواصفات الشركة والقرارات الفنية الحاكمة
ما يعتمده بتوقيعه	لا شيء؛ توقيعه «أُعدّ بواسطة»	يدقّق (Checked) عمل زميل في نطاق ضيّق يتقنه	يعتمد (Approved) مخرجات التصميم التفصيلي ووثائق الموردين وإجراءات الاختبار	يعتمد الانحراف عن المواصفة، ويغلق النقاط الخلافية، ويوقّع قبول النظام
المورّدون والمقاولون	يجمع الوثائق ويتابع حالتها ويسجّل الملاحظات	يراجع العروض فنيًا ويكتب التعليقات ويتابع إغلاقها، ويحضر FAT عضوًا	يقود التقييم الفني ويصوغ الاستفسارات الفنية، ويترأس FAT/SAT، ويحكم «مطابق/غير مطابق»	يضع معايير التأهيل والقائمة القصيرة، ويقرر قبول البديل، ويفصل في الخلاف التعاقدي الفني
دراسات المخاطر	يحضر مراقبًا، يجهّز الوثائق، ويسجّل بنود الإجراء ويتابعها	مشارك يجيب عن أنماط فشل أجهزته وأزمنة استجابتها في عقدته	عضو أساسي: يحكم على استقلال الضمانات، ويصنّف مع الفريق، ويغلق التوصيات بدليل	يعتمد منهج الدراسة وقائمة الضمانات، ويقرر متى تُعاد الدراسة بعد التعديل
المساءلة	عن دقة ما نفّذه وعن طلب المراجعة في وقتها	عن صحة حساباته ومخرجاته وقابليتها للاختبار	عن مخرجات فريق ومقاول، وعمّا اعتمده ولو لم يكتبه بيده	عن قاعدة فنية تُلزم من لم يلتقِ بهم، وعن أثرها بعد سنوات

المعيار	مهندس مبتدئ	مهندس	مهندس أول	مهندس رئيسي
الأفق الزمني للقرار	أيام إلى أسابيع	أسابيع إلى شهور	دورة المشروع من التصميم إلى التسليم	عمر الأصل: التشغيل والتحديث والإحلال

ثلاث نقلات، لا أربع درجات. المهم ليس الدرجات بل الحدود بينها؛ وكل حدّ منها انتقال في طبيعة العمل لا زيادة في كميته:

1. **من التنفيذ إلى الاستقلال.** لا تقع هذه النقلة حين يتقن المهندس الحساب، بل حين يعرف **متى يجب أن يسأل**. المهندس المستقل ليس من لا يسأل، بل من يميّز الحالة النمطية التي يُنهيها بنفسه من الحالة غير النمطية التي يرفعها، ولا يخطئ في هذا التمييز إلا نادرًا. والمبتدئ الذي لا يسأل أخطر من المبتدئ الذي يُكثر السؤال.
2. **من الاستقلال إلى مراجعة عمل الآخرين.** هنا يبدأ المهندس يُخطئ نيابةً عن غيره: يوقّع «رُوجع» على ورقة بيانات أعدّها سواه، فيصير خطؤها خطأه. والمهارة المطلوبة جديدة تمامًا ولا تأتي بالخبرة الفنية وحدها: أن يقرأ عملًا لم يكتبه ويكتشف ما ينقصه، وأن يفصل التعليق الجوهري (مدى خاطئ، وضع فشل غير آمن، ضمانة غير مستقلة) عن التعليق التجميلي (تنسيق، صياغة)، وأن يعطي زميلًا ملاحظة تُصحّح ولا تُهين. ومن يراجع بالإغراق في تعليقات شكلية يُفقد مراجعته قيمتها فيتوقف الناس عن قراءتها.
3. **من المراجعة إلى وضع المعيار.** آخر نقلة وأصعبها: أن يكتب القاعدة التي ستُطبَّق حيث لا يكون حاضرًا، على أجهزة لم يرها وفي مشروع لم يشارك فيه. ومعيار جودتها أن تكون **قابلة للتطبيق بلا وجود كاتبها**: مكتوبة بالأرقام لا بالصفات، وفيها ما يُفعل عند الاستثناء، ومن يملك الإذن بالاستثناء. وهنا أيضًا يصير المهندس **حَكَمًا**: حين يختلف تخصصان، أو يختلف المالك والمورّد، يُطلب

رأيه بوصفه فيصلًا لا طرفًا، وثمن ذلك أن يقول أحيانًا «المورّد على حق وشركتنا على خطأ».

الشكل 1-4: *سلّم الكفاءة المهنية: أربع درجات وثلاث نقلات، وكل نقلة تغيير في طبيعة العمل لا في كميته؛ ويتسع مع الصعود نطاق القرار وأفقه الزمني وما يعتمده المهندس بتوقيعه.*

أربع ملاحظات تُقال للمهندس مبكرًا:

- **الدرجة ليست أقدمية.** عشرون سنة في تكرار سنة واحدة عشرين مرة تبقي صاحبها في الدرجة الثانية. والذي يرفع الدرجة هو **اتساع نوع المشكلات** لا عددها: من حلقة، إلى وحدة، إلى منشأة، إلى قاعدة.
- **الصعود لا يعني ترك الميدان.** المهندس الرئيسي الذي لم يعد يعرف كيف تبدو الغدة الكابلية على مرسل مركّب في الشمس يكتب معايير لا تُنفَّذ. والعلاج

المعروف عمليًا: أن يبقى لكل مهندس، مهما علت درجته، عمل ميداني محدود لا يفوّضه.

- **الخطر المقابل موجود أيضًا:** مهندس أول يقضي وقته في عمل الدرجة الأولى لأنه يتقنه ويرتاح إليه، فيتراكم على الفريق ما لا يستطيع أحد غيره اعتماده. من علامات الدرجة الصحيحة أن يكون أثقل ما في يوم المهندس هو ما لا يستطيع غيره فعله.
- **الدرجات في المؤسسات تختلف في الاسم لا في المنطق.** وقد تُختصر في شركة صغيرة إلى ثلاث، وتتفرع في شركة كبيرة إلى مسارين: مسار فني (خبير، استشاري) ومسار إداري (رئيس قسم، مدير). والمسار الفني ليس مسار من لم ينجح في الإدارة؛ هو المسار الذي تُحفظ به المعرفة الفنية في المؤسسة.

1.7.2 مقياس الإتقان الأربعي: كيف تُقاس الكفاءة بندًا بندًا

الدرجة الوظيفية حكم إجمالي على الشخص، وهي وحدها لا تكفي لتخطيط تطوّر: المهندس نفسه قد يكون خبيرًا في حلقات التدفق ومبتدئًا تمامًا في المحللات. ولذلك تُقاس الكفاءة في الصناعة **بندًا بندًا** بمقياس من أربع درجات، هو الشكل الشائع في مصفوفات الكفاءة (Competency Matrix) وسجلات التقييم:

جدول مقارنة: مستويات الإتقان الأربعة وما يُقبل دليلًا على كلٍّ منها

المستوى	ما يعنيه عمليًا	الدليل الذي يُقبل	ما لا يجوز إسناده إليه
1 — معرفة نظرية	يعرف المصطلح والغرض والمبدأ، ويقرأ الوثيقة ويشرحها	شرح شفهي مقنع، اجتياز تدريب أو اختبار معرفي	أي تنفيذ منفرد، ولا مراجعة عمل غيره
2 — تطبيق تحت إشراف	نفّذ المهمة فعلًا بمرافقة، ومخرجه يُراجع قبل إصداره	مخرجات موقّعة «أُعدّ بواسطة» أُغلقت تعليقاتها	إصدار وثيقة باسمه، ولا قرار ميداني منفرد

المستوى	ما يعنيه عمليًا	الدليل الذي يُقبل	ما لا يجوز إسناده إليه
3 — تطبيق مستقل	ينفّذ ويقرر ويوثّق بلا إشراف، ويتعرّف على ما يخرج عن قدرته فيرفعه	سجل مخرجات مستقلة قُبلت، ومعالجة حالة غير نمطية واحدة على الأقل	اعتماد عمل غيره، ولا الفصل في خلاف فني
4 — توجيه ومراجعة	يراجع عمل غيره ويعتمده، ويدرّب، ويحكم في الحالات غير النمطية، ويحسّن الإجراء نفسه	عمل آخرين اعتمده، إجراء كتبه أو عدّله، حالة خلافية حسمها بدليل	—

خمس قواعد تجعل المقياس مفيدًا بدل أن يكون تعبئة استمارة:

1. **المقياس للبند لا للشخص.** لا يوجد «مهندس مستوى 3»؛ يوجد مهندس مستواه 4 في ضبط الحلقات و3 في المناطق الخطرة و1 في القياس التجاري. ومن يكتب لنفسه رقمًا واحدًا عامًا لم يفهم المقياس.
2. **المطلوب ليس دائمًا الأعلى.** لكل بند **مستوى مطلوب** بحسب الدرجة والدور، وكثير من البنود يكفي فيها المستوى 2 حتى لأعلى الدرجات، لأن التنفيذ يؤديه متخصص آخر ويكفي المهندس أن يفهمه ويحاوره. وفي المقابل، ثمة بنود لا يُقبل فيها أقل من 3 لمن يعمل عليها منفردًا مهما كانت درجته: كل ما يمسّ وظائف الحماية، والعمل داخل خزانة حيّة، وتغيير منطق أو نقطة ضبط فصل.
3. **الفجوة تُحسب طرحًا.** المطلوب ناقص الحالي لكل بند. والبنود التي فجوتها ≤ 2 تُعالَج أولًا لأنها تعني تكليفًا بما لا يُتقَن، وهي المصدر الأغلب للحوادث، لا البنود التي فجوتها 1.
4. **تقييمان لا تقييم واحد.** يقيّم المهندس نفسه ويقيّمه رئيسه المباشر، و**الاختلاف بين الرقمين هو المعلومة الأهم، لا الرقم النهائي**. فإذا كان التقييم الذاتي أعلى، فغالبًا لأن المهندس يقيس نفسه بالحالات النمطية بينما يقيسه رئيسه بحالة فشل واحدة تصرّف فيها تصرفًا خاطئًا؛ والحوار عن تلك الحالة هو الفائدة كلها. وإذا

كان الذاتي أدنى، فالسبب الشائع أن المهندس عمل في نطاق ضيّق ولم تُتح له فرصة إثبات، وعلاجه إسناد مهمة لا إرسال إلى دورة.

5. **الدليل قبل الرقم.** لا يُرفع بند من 2 إلى 3 لأن صاحبه حضر دورة؛ يُرفع بمخرج صدر باسمه وقُبل، أو بحالة عالجها، أو باختبار عملي موثّق. والشهادة تفتح باب المستوى 1 و2، ولا تُعطي 3 ولا 4 بحال.

كيف يستعملها المهندس لنفسه (خمس خطوات). لا تحتاج هذه الطريقة إلى إذن من أحد، ويستطيع المهندس تنفيذها في ورقة واحدة:

1. اكتب قائمة بنود عملك الفعلي لا بنود وصفك الوظيفي: ما الذي طُلب منك فعلًا في آخر اثني عشر شهرًا، مهمة مهمة.
2. ضع لكل بند رقمين: مستواك الحالي بصدق، والمستوى الذي يتطلبه الدور الذي تريده بعد سنتين (لا الدور الذي تشغله اليوم).
3. اشطب كل بند فجوته صفر، ورتّب الباقي بالفجوة تنازليًا، وأبقِ خمسة بنود فقط. خطة تطوير بعشرين بندًا خطة لا تُنفَّذ.
4. لكل بند من الخمسة اكتب **الدليل** الذي سيرفعه لا **النشاط**: لا تكتب «أحضر دورة في السلامة الوظيفية»، بل «أشارك في دراسة وأتولى كتابة قسم الآلات الدقيقة وأجهزة القياس في تقريرها، ويُقبل».
5. راجع الورقة كل ستة أشهر واسأل سؤالًا واحدًا: أي بند تحرّك بدليل؟ والبند الذي لم يتحرك في سنة كاملة إما أنه ليس مهمًا فعلًا، وإما أن الفرصة ليست في هذا الموقع، وكلا الجوابين قرار.

> **مثال مختصر لسطر واحد في الورقة:** بند «ضبط حلقات بطيئة الاستجابة (حرارة ومستوى)»؛ الحالي 2 (ضبطت حلقات بمرافقة زميل أول)؛ المطلوب 3؛ الفجوة 1؛ الدليل المستهدف: ضبط ثلاث حلقات في وحدة قائمة بنفسي، مع تسجيل الأداء قبل الضبط وبعده وتوثيق المعاملات وسبب اختيارها في نظام إدارة التغيير (القسم 18.8). الفرق بين هذا السطر وبين «أتعلم PID» هو الفرق بين خطة وأمنية.

الشكل 1-5: *ورقة الفجوة بمقياس الإتقان الأربعي لمهندس واحد (مثال توضيحي): الفجوة هي المطلوب ناقص الحالي، والبنود التي فجوتها 2 أو أكثر تُعالج أولًا، وتُشطب البنود التي لا فجوة فيها، ولكل بند باقٍ دليل مستهدف لا نشاط.*

1.7.3 ما لا يُقاس بالمعرفة الفنية وحدها

لو كانت المهنة معرفة فنية فقط لكان أفضل مهندس هو أكثرهم قراءة. لكن الحوادث الكبرى في الصناعة قلّما كان سببها جهلًا بمعادلة؛ كان سببها في الغالب أن أحدًا عرف شيئًا ولم يقله، أو قاله ولم يصرّ، أو غيّر شيئًا ولم يوثّقه. وهذه خمسة سلوكيات تدخل في تقييم المهندس في كل مؤسسة جادة، وهي التي تفصل بين مهندسين متساويين فنيًا:

جدول مقارنة: خمسة سلوكيات مهنية، وكيف تظهر وكيف تغيب

السلوك	كيف يظهر في العمل اليومي	صورة غيابه
المساءلة	يقول «هذا عملي» عن الخطأ قبل أن يُسأل، ويبلّغ عنه فورًا لأن كلفة التأخير أكبر	البحث عن مسؤول آخر، أو إصلاح صامت لا يعرفه أحد فيتكرر عند غيره
التواصل مع التشغيل	يشرح التغيير للوردية التي ستعيش معه قبل تنفيذه، ويقرأ ملاحظات المشغّلين بوصفها بيانات لا شكاوى	تغيير ينزل على غرفة التحكم ليلًا بلا إشعار، ثم يُعاد يدويًا بعد أسبوع
مقاومة الضغط لتمرير حل غير آمن	يميّز بين ما يقبل حلًا مؤقتًا وما لا يقبله، ويرفض الثاني كتابةً مع بديل ومهلة	«مؤقت» يُثبَّت في الخدمة سنوات لأنه نجح مرة
الاعتراف بحدود المعرفة	«لا أعرف، سأتحقق وأعود بالجواب ومصدره قبل الغد»	جواب واثق بلا مصدر، ثم بناء قرار عليه
إدارة التغيير	لا يغيّر مدى ولا نقطة ضبط ولا سطر منطق دون مسار موثّق يصل إلى «كما بُني»	فرق بين الوثيقة والواقع يُكتشف بعد سنتين في أول عطل

وبند «مقاومة الضغط» يستحق تفصيلًا لأنه أكثرها التباسًا في الواقع: الضغط نادرًا ما يأتي بصيغة «تجاهل السلامة»، بل بصيغ مقبولة الظاهر: «الإنتاج متوقف منذ ثماني ساعات»، و«المورّد لن يعود إلا بعد ثلاثة أشهر»، و«الشهادة في الطريق». والقاعدة العملية التي تحمي المهندس وتحمي المنشأة معًا **لا تبدأ برفض ولا تنتهي بموافقة صامتة**:

1. **افصل ما يقبل الحل المؤقت عمّا لا يقبله.** يقبل التأجيل: دقة أعلى، عرض إضافي، تحسين واجهة، جودة تركيب لا تمسّ الوظيفة. لا يقبله أبدًا: تعطيل وظيفة حماية، أو إسقاط استقلال بين التحكم والحماية، أو تشغيل في منطقة خطرة بجهاز غير معتمد، أو تجاوز غير مسجَّل ولا محدود المدة.
2. **اكتب تحفظك في الوقت نفسه لا بعد الحادث.** رسالة قصيرة فيها أربعة أسطر: ما المطلوب مني، ما المخاطرة كما أراها، ما البديل وكلفته وزمنه، وما الذي

أحتاجه لأتابع. الكتابة هنا ليست حماية شخصية فحسب؛ هي الوسيلة التي يتحول بها القرار من شفهي عابر إلى قرار يملكه أحد.

3. **صعّد مرة واحدة إلى من يملك قبول المخاطرة، لا إلى من يملك السلطة فقط.** قبول المخاطرة صلاحية محددة في كل منشأة؛ ومن يقبلها يوقّع عليها ويُسجَّل اسمه ومدة القبول وشروطه (تدبير تعويضي، مراقبة إضافية، تاريخ انتهاء).
4. **إن قُبلت المخاطرة نظاميًا فنفّذ وسجّل**، ولا تعتبر التوثيق نكايةً؛ فالسجل هو ما يجعل «المؤقت» ينتهي في موعده بدل أن يصبح دائمًا. وإن رُفض التوثيق نفسه، فهذه إشارة أخطر من الطلب الأصلي.

وثمة سلوك سادس لا يُكتب في الاستمارات ويُعرف في الميدان: **أن تكون شهادة المهندس على الاختبار صادقة**. ورقة فحص حلقة موقّعة على اختبار لم يُنفَّذ كاملًا، أو اختبار إثبات مُعلَّم «مقبول» وقد جُرّب فرعه المنطقي فقط، تُبطل كل منظومة الإثبات التي بُني عليها هذا الكتاب (القسم 1.5). والمهندس الذي يقول «اختبرنا هذا، ولم نختبر ذاك، وهذه وثيقته» يفعل شيئًا أصعب من الحساب.

◆ ◆ ◆

1.8 الوثائق والأدوات التي يعيش معها المهندس

يفصّل الكتاب هذه الوثائق في الفصل 52 من الجزء القادم، لكن على القارئ أن يألف أسماءها من الآن، وأن يعرف السؤال الذي تجيب عنه كل وثيقة:

الوثيقة	السؤال الذي تجيب عنه
P&ID	أين يقع كل جهاز وصمام في العملية، وما وسمه، وما الحلقة التي ينتمي إليها؟
فهرس الأجهزة (Instrument Index)	ما قائمة الأجهزة كلها بوسومها وخدماتها ومداها ووثائقها المرجعية؟

الوثيقة	السؤال الذي تجيب عنه
قائمة الإدخال والإخراج (I/O List)	أي قناة في أي بطاقة وخزانة تصل إليها إشارة كل جهاز، وما نوعها؟
ورقة البيانات (Datasheet)	ما شروط العملية والمواصفات الفنية التي يُشترى الجهاز على أساسها؟
مخطط الحلقة (Loop Diagram)	كيف تسير الإشارة سلكًا سلكًا من الجهاز إلى النظام، وبأي أرقام أطراف؟
مخطط التركيب (Hook-up)	كيف يُركب الجهاز ميكانيكيًا وهوائيًا على العملية، وبأي مواد وملحقات؟
جدول الكابلات (Cable Schedule)	ما كابلات المشروع ومساراتها وأنواعها وأطوالها وطرفاها؟
مخطط المنطق (Logic Diagram)	ما المنطق الذي يربط المدخلات بالمخرجات في الحمايات والتسلسلات؟
مصفوفة السبب والنتيجة (Cause & Effect Matrix)	أي سبب (حساس أو زر) يفعّل أي أثر (صمام أو فصل)، وبأي تصويت؟
السرد الوصفي للتحكم (Control Narrative)	كيف تعمل كل حلقة وتسلسل بلغة مقروءة يوافق عليها مهندس العمليات؟
SRS (مواصفة متطلبات السلامة)	ما وظائف السلامة الآلية ومستوى SIL ومتطلبات كل منها؟
إجراءات الاختبار (FAT/SAT Procedures)	كيف يُثبت في المصنع ثم في الموقع أن النظام يعمل كما صُمم؟
أوراق فحص الحلقات (Loop Check Sheets)	هل جُرّبت كل حلقة من الحقل إلى الشاشة ووُثّقت نتيجتها؟
كما بُني (As-Built)	ما الحالة النهائية الفعلية للتركيب بعد كل التعديلات؟

والأدوات: برمجيات هندسة الأجهزة القائمة على قاعدة بيانات (مثل SmartPlant Instrumentation)، النموذج ثلاثي الأبعاد، بيئات برمجة PLC/DCS، أدوات معايرة ومحاكاة الحلقات (HART Communicator، مولد إشارة، مضخة ضغط)، محلل الاهتزاز، وبرامج CMMS للصيانة.

ويجمع الشكل 1-6 دورة حياة المنشأة كلها في صورة واحدة: لكل مرحلة مخرجات محددة يُسأل عنها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم، وخيوط تمتد عبر المراحل جميعًا (قاعدة بيانات الأجهزة، إدارة التغيير، الوثائق كما بُني) وهي ما يميز المشروع المنضبط عن الفوضوي.

الشكل 1-6: *دورة حياة المنشأة من الدراسة إلى الإحلال، وتحت كل مرحلة أهم مخرجات مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم فيها؛ وفي الأسفل ما يمتد عبر المراحل كلها ويبقى أساس التصميم مرجعه الحاكم.*

1.8.1 مجالات الكفاءة التي يُقاس عليها المهندس عمليًا، وخريطتها في هذا الكتاب

يعود هذا القسم إلى الكفاءة التي بدأها القسم 1.7، بعد أن عرّف القسم 1.8 بالوثائق التي تظهر فيها كثير من هذه الكفاءات. وحين تقيس مؤسسة كفاءة مهندس أجهزة وتحكم — عند التوظيف، أو الترقية، أو قبل إسناد دور جديد — فهي لا تسأل عن كل ما في الكتب، بل تقيس على قائمة محدودة تتكرر بصياغات متقاربة في شركات التشغيل والمقاولات

والاستشارات. وتنتظم هذه القائمة في ثلاثة أصناف، ومن لم ينتبه إلى الصنفين الأول والثاني ظنّ أن الترقية تُنال بالمعرفة التقنية وحدها ثم فوجئ:

الصنف الأول: كفاءات سلوكية ومهنية — وهي أول ما يُلاحَظ وآخر ما يُعالَج، وتُقاس بالسلوك المتكرر لا بالشهادات:

المجال	ما يُقاس فيه عمليًا	أين يعالجه هذا الكتاب
التخطيط وترتيب الأولويات	تمييز الحرج من المستعجل، والوفاء بموعد مع جودة	114، 120
التواصل الكتابي والعرض الفني	تقرير يُقرأ ويُقرَّر بناءً عليه، لا يُعاد شرحه شفهيًا	52، 119
العمل عبر التخصصات وخدمة التشغيل	يُطلب في الاجتماعات لأنه يقرّب المواقف لا لأنه يُلزَم	120، 1.4
تطوير الآخرين ونقل المعرفة	فنيون ومهندسون جدد يستطيعون العمل بعده بلا وصاية	117، 119
الوعي بالكلفة وأثر القرار	يقارن بتكلفة دورة الحياة لا بسعر الشراء	27، 114
قيادة التغيير وتقبّله	يقود ترقية نظام قديم دون إسقاط ما يعمل	75، 95
المساءلة والصدق المهني	يُبلغ عن خطئه، ولا يوقّع على اختبار لم يُنفَّذ	1.5، 1.7.3

الصنف الثاني: كفاءات مساندة تنظيمية — نظم المؤسسة التي يعمل داخلها المهندس. والإتقان الفني لا يغني عنها: أفضل حلّ هندسي مُنفَّذ خارج تصريح عمل أو خارج إدارة التغيير هو مخالفة، لا إنجاز:

المجال	ما يُقاس فيه عمليًا	أين يعالجه هذا الكتاب
السلامة العامة وتصاريح العمل والعزل	التصريح والعزل والدخول للأماكن المغلقة والعمل على ارتفاع والرفع	13، 84
إدارة التغيير (MOC)	لا تعديل بلا مسار موثّق يصل إلى «كما بُني»	75، 81، 27.9
بوابات المشروع وضمان القيمة	مراحل القرار، ومن يقرر عند كل بوابة، وما تحتاجه البوابة من وثائق	53، 114
نظام إدارة الصيانة المحوسب	أوامر العمل وأولوياتها، وسجل الأصل، وقطع الغيار وطلباتها	59، 110، 25.12
إدارة سلامة الأصول	العناصر الحرجة للسلامة، ومصفوفة المخاطر، ودورية اختبارها	31، 59، 28.2
المواصفات والرسومات والأدلة	قراءة P&ID وPFD، وتسلسل الأكواد، وأدلة الموردين ومراجعتها	5، 52، 62، 25.4
تقييم المخاطر وHAZID و HAZOP	المشاركة الفعالة، وتصنيف المناطق الخطرة، والسلامة الوظيفية	26، 28، 29، 81، 82

الصنف الثالث: كفاءات تقنية أساسية — وهي قلب المهنة، ولهذا تشغل معظم صفحات الكتاب:

المجال	ما يُقاس فيه عمليًا	أين يعالجه هذا الكتاب
القياس وأجهزته ومعايرتها	اختيار الجهاز المناسب للخدمة، وإثبات صحة قراءته	6–12، 14
الصمامات والمشغلات والعناصر النهائية	التحجيم، ووضع الفشل، وزمن الحركة، والموضع	15، 76

المجال	ما يُقاس فيه عمليًا	أين يعالجه هذا الكتاب
PID والاستراتيجيات وأنظمة PLC وDCS	بنية النظام، والمنطق وتشخيصه، والفرض والتجاوز، والحلقات المتقدمة	17–19، 21، 41، 85، 87
مراجعة حزم التصميم الهندسي	أساس التصميم، وأوراق البيانات، ومصفوفة السبب والنتيجة، ومعمارية النظام، ووثائق المورّد	25، 27، 52، 80
تنسيق المشروع والواجهات والربط بالقائم	الجداول والمسار الحرج، والربط بمنشأة عاملة، وجاهزية التشغيل	53، 75، 106
مراجعات النموذج ثلاثي الأبعاد	الوصول والصيانة ومواقع الأجهزة واللوحات قبل أن يتجمّد التصميم	52، 77
التركيب والاختبار والتشغيل التجريبي	FAT وSAT وفحص الحلقات والتشغيل التجريبي والبدء	58، 77، 107–109
أدلة التشغيل وإجراءات الصيانة	كتابة إجراء يُنفَّذ كما كُتب، ومراجعة إجراءات المورّد	14، 110، 119
إدارة الصيانة وتشخيص الأعطال	الوقائية والتصحيحية، ومراقبة الحالة، وتحليل السبب الجذري	33، 39، 59، 110، 111
الشبكات والأمن السيبراني والموازنات	البروتوكولات والطبولوجيا، وفصل المناطق، وإعداد تقديرات الكلفة	23، 24، 114

كيف يُقرأ هذا الجدول. ليس ترتيب قراءة، بل **أداة فجوة**: ضع أمام كل صف مستواك الحالي والمطلوب بمقياس القسم 1.7.2، ثم اذهب إلى الفصول المقابلة لأكبر فجوتين فقط. ويُلاحَظ أن الصنف الثالث وحده هو المكتوب بكثافة في هذا الكتاب وفي أغلب المراجع الهندسية، بينما الصنفان الأول والثاني هما اللذان يُسقطان المرشحين في الترقيات فعليًا؛ فمن أراد أن يستفيد من هذه الخريطة استفادة حقيقية بدأ من حيث لا تبدأ الكتب عادة.

قائمة تحقق: هل أنا جاهز لدرجة أعلى أو لدور جديد؟

تُقرأ الإجابات بشرط واحد: **لكل «نعم» دليل يمكن إبرازه** (وثيقة، أو حالة، أو سجل)، وإلا فهي «لا».

1. هل أصدرت وثائق باسمي في نطاق الدور الجديد، وقُبلت بتعليقات شكلية فقط؟
2. هل عالجت حالة **غير نمطية** واحدة على الأقل من نوع ما سيُسند إليّ، لا حالات نمطية متكررة؟
3. هل راجعت عمل غيري واكتشفت فيه خطأ جوهريًا — لا شكليًا — وأغلقته بالحوار؟
4. هل أعرف أي قراراتي يجب أن تُرفع وأيها أنهيه بنفسي، وهل أخطأت في هذا التمييز في آخر سنة؟
5. هل شاركت في دراسة مخاطر مشاركةً أجابت عن أسئلة لم يكن يجيب عنها غيري، وتابعت إغلاق توصياتي بدليل؟
6. هل أتقنت الأنظمة التنظيمية بقدر إتقاني الفني: التصريح والعزل، وإدارة التغيير، وأوامر العمل، وحدود صلاحيتي؟
7. هل أستطيع شرح قرار فني لمهندس عمليات أو لمشغّل بلغة يتصرف بها، لا بلغة أفهمها وحدي؟
8. هل واجهت ضغطًا لتمرير حل غير آمن، وكيف تصرفت؟ وهل بقي من تصرفي أثر مكتوب؟
9. هل قلت «لا أعرف» في موقف كان السكوت فيه أسهل، وأتبعتها بجواب موثّق في وقت معقول؟
10. هل درّبت أحدًا فعلًا حتى صار يعمل بلا وصايتي؟
11. هل أعرف كلفة قراري: كلفة الشراء، وكلفة التوقف، وكلفة الصيانة على عمر الأصل؟

12. هل لديّ مصفوفة كفاءة مكتوبة لنفسي، تحرّك فيها بندان على الأقل بدليل خلال آخر اثني عشر شهرًا؟
13. هل تركت خلفي في الدور الحالي ما يستمر بعدي: إجراء، أو وثيقة مرجعية، أو شخصًا مؤهَّلًا؟

من جمع تسعًا فأكثر بأدلة فهو جاهز للنقاش لا للترقية التلقائية؛ ومن لم تتجاوز أدلته الخمس فما ينقصه فرصة إثبات في موقعه الحالي قبل أي انتقال. والسؤال 13 هو الذي يفصل عادةً، لأنه الوحيد الذي لا يمكن تحصيله في الشهر الأخير قبل التقييم.

◆ ◆ ◆

مثال محلول (الأسئلة الثلاثة على عداد تدفق): نعود هنا إلى الأسئلة الثلاثة (القسم 1.5) لنطبقها على طلب فعلي. يطلب قسم العمليات قياس تدفق غاز الوقود إلى سخان لمحاسبة الاستهلاك الداخلي، بشرط ألا يزيد عدم اليقين على ±1% من القراءة بين 20% و100% من التدفق الأقصى. والمقترح لوح فتحة ومرسل ضغط تفاضلي دقته ±0.075% من المدى، وعدم يقين معامل التصريف للوح ±0.6%.

- **ماذا نريد أن نعرف؟** كمية الغاز بخطأ ±1% من القراءة، لا من المدى، في مدى تشغيل 5:1.
- **الافتراضات:** التدفق يتناسب مع الجذر التربيعي للضغط التفاضلي، فالخطأ النسبي في التدفق نصف الخطأ النسبي في الضغط التفاضلي. وتُجمع المصادر المستقلة بالجذر التربيعي لمجموع المربعات (القسم 4.7). والحساب مبسط يقتصر على مصدرين؛ أما في قياس المحاسبة الفعلي فتُضاف مصادر أخرى، مثل الكثافة وتعويض الضغط والحرارة ومعامل التمدد وأبعاد الفتحة والأنبوب، فيرتفع المجموع.
- **الحل عند 30% من التدفق:**
  - نسبة الضغط التفاضلي = (نسبة التدفق)² = 0.3² = 9% من المدى.

- خطأ المرسل في التدفق = 0.5 × (دقة المرسل من المدى) ÷ (نسبة الضغط التفاضلي)
- = 0.42% = 0.09 ÷ 0.075 × 0.5 من القراءة.
- المجموع = $\sqrt{(0.42^2 + 0.6^2)}$ = **0.73%** من القراءة، وهو مقبول.

- **الحل عند 20% من التدفق:**
  - نسبة الضغط التفاضلي = 0.2^2 = 4% من المدى.
  - خطأ المرسل في التدفق = 0.94% = 0.04 ÷ 0.075 × 0.5 من القراءة.
  - المجموع = $\sqrt{(0.94^2 + 0.6^2)}$ = **1.11%** من القراءة، وهو يتجاوز الحد.
- **كيف نثبت صحة التنفيذ؟** يُكتب في ورقة البيانات شرط الدقة عند 20% صراحة، ويُختار أحد حلين: مرسلان بمديين مختلفين (مرسل منخفض المدى للتدفقات الصغيرة)، أو عداد كتلي من نوع كوريوليس دقته من القراءة. ثم يُثبت الاختيار بحساب عدم اليقين في ملف الحلقة وبشهادة معايرة العداد.
- **المعنى ميدانيًا:** رقم «0.075%» في النشرة لا يجيب وحده عن السؤال الأول؛ الذي يجيب هو ترجمته إلى القراءة عند أصغر تدفق يهم القرار. وهذا هو معنى أن يبدأ المهندس بالسؤال لا بالجهاز.

الشكل 1-7: عدم اليقين في قياس التدفق بلوح الفتحة في المثال المحلول: خطأ المرسل ±0.075% من المدى) يتضخم عند التدفقات المنخفضة لأن الضغط التفاضلي يتناسب مع مربع التدفق، فيتجاوز المجموع حد ±1% من القراءة دون نحو 22% من التدفق الأقصى.

1.9 حالة ميدانية: قراءة صحيحة وقرار خاطئ

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في محطة توليد، أطلق نظام التحكم بعد صيانةٍ إنذار تفاوت حرارة العادم (Exhaust Temperature Spread) على توربين Frame 9E. عايَر الفنيون المزدوجات الحرارية (Thermocouples) فوجدوها سليمة، فطُلب رفع حد الإنذار. راجع المهندس المسار من الحساس إلى الشاشة (القسم 3.7)، فوجد أن اثنتين من المزدوجات الحرارية أُعيد توصيل كابل التمديد لهما بعد الصيانة بقطبية معكوسة في طرفيه (في صندوق التوصيل

وعند أطراف البطاقة)؛ فكانت القراءة «معقولة» لكنها خاطئة. الدرس: لا تعالج الإنذار بتغيير حده قبل أن تثبت صحة القياس، ولا تعدّ معايرة الحساس وحدها إثباتًا لصحة الحلقة كاملة.

الشكل 1-8: *الحالة الميدانية: مزدوجة حرارية سليمة ومعايَرة، لكن قطبية كابل التمديد معكوسة في صندوق التوصيل وعند البطاقة معًا، فيطرح الكابل ضعف القوة الدافعة المتولدة على مقطعه بدل أن يضيفها، وتخرج قراءة «معقولة» وخاطئة تطلق إنذار تفاوت حرارة العادم (Spread).*

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
تعريف الوظيفة	يجيب عن الأسئلة الثلاثة: ما القياس، وما القرار، وكيف يُثبت (القسم 1.5)	ينقل من الميدان ما يؤثر في الجواب: موضع الوصلة، وحالة الوسط، وإمكانية الوصول للصيانة
الاستقلال بين التحكم والحماية	يحدد مرسلات التحكم ومرسلات الحماية وتصويتها (القسم 1.6)	يتحقق من أن كل مرسل موصول بالنظام المخصص له كما في مخطط الحلقة
الإثبات	يكتب معيار القبول وإجراء الاختبار، ويراجع النتائج ويعتمدها	يعاير ويفحص الحلقة من الحقل إلى الشاشة، ويسجل ما اختُبر وما لم يُختبر
التعديل الميداني	يفتح طلب إدارة التغيير ويتابع تحديث الوثائق حتى «كما بُني»	لا ينفذ تعديلًا بلا تصريح، ويبلغ عن كل فرق بين الرسم والواقع

1.10 الأخطاء الشائعة

- اعتبار الجهاز هدفًا لا وسيلة: «نحتاج مرسلًا» قبل معرفة القرار الذي ستُبنى عليه القراءة.
- الخلط بين نقطة الإنذار ونقطة الفصل، أو استخدام مرسل واحد لهما.
- إتقان التصميم الوظيفي وإهمال المكاني، أو العكس.
- الاعتماد على وثائق المورّد دون مراجعة، أو على الخبرة دون وثائق.
- تجاهل أن كل تعديل ميداني «صغير» يجب أن يمر بإدارة التغيير ويصل إلى وثائق «كما بُني» (As-Built).

1.11 ملخص

مهنة واحدة بأربع طبقات: قياس، تحكم، أتمتة، حماية. عمل يمتد على دورة حياة المنشأة كلها، ونصفه وظيفي ونصفه مكاني. ثلاثة أسئلة تحكم كل قرار، وأهمها: كيف نثبت؟ والمهندس هو من يستطيع أن يقول: اختبرنا هذا، ولم نختبر ذاك، وهذه وثيقته.

وفي الفصل التالي: الفصل 2 «أساسيات العمليات الصناعية لمهندس التحكم»؛ لأن السؤال الأول «ماذا نريد أن نعرف؟» لا يُجاب عنه دون فهم ما يجري داخل الأنبوب والوعاء.

1.12 أسئلة التقييم الذاتي

1. ميّز بين وظائف الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم والأتمتة والحماية في نظام تسخين وعاء بالبخار.
2. لماذا الأصل ألا يشترك التحكم والحماية في مرسل واحد؟ وما اسم نوع الفشل الذي يمنعه الفصل بينهما؟
3. عدّد ثلاث وثائق يُنتجها التصميم الوظيفي وثلاثًا يُنتجها التصميم المكاني.
4. مهندس عمليات يطلب «حلقة تحكم بالمستوى». اكتب الأسئلة الثلاثة التي تطرحها قبل اختيار أي جهاز.
5. ما الفرق بين معايرة الجهاز وإثبات صحة الحلقة (Loop Check)؟
6. في المثال 1.6، لماذا اختير تصويت 2oo3 للحماية ولم يُختر مرسل واحد؟
7. اذكر تخصصين تحتاج بياناتهما لاختيار صمام تحكم، وما البيانات تحديدًا.
8. ما الذي يجب أن يحدث وثائقيًا بعد تعديل ميداني في توصيل مزدوجة حرارية؟
9. لماذا يُعد الفضول تجاه تقنيات الشبكات والأمن السيبراني مهارة مهنية لمهندس أجهزة؟
10. صف حالة من خبرتك كانت فيها القراءة «معقولة» لكنها خاطئة، وكيف اكتُشفت.

مراجع الفصل: R1 (المسودة الموحدة)، وR5 (أنظمة التحكم الصناعية)، وR10 (الشامل في هندسة الميكاترونكس)، و(Introduction to C&I Engineering) R14، وISA-5.1 لرموز الأجهزة، وخبرة المؤلف الميدانية (R18)؛ وR66 (معيار كفاءات مهندس أجهزة وتحكم، 1.7.1 إلى 1.8.1).

الفصل 2: أساسيات العمليات الصناعية لمهندس التحكم

> **لمن هذا الفصل:** المهندس الجديد، ومهندس التحكم القادم من خلفية كهربائية أو إلكترونية لم يدرس هندسة العمليات.
>
> **الفكرة الأساسية:** الجهاز تابع للخدمة، والتحكم تابع للعملية. من لا يفهم ما يجري داخل الأنبوب والوعاء سيختار جهازًا خاطئًا ويضبط حلقة على عملية لا يعرف ديناميكاها.

2.1 الجهاز تابع للخدمة

عبارة «نحتاج مرسل ضغط» ناقصة حتى تعرف ما الذي سيلامسه الجهاز:

طبيعة الوسط	ما يترتب عليها في القياس
غاز جاف	أبسط الحالات؛ يبقى خطر التكاثف عند انخفاض الحرارة
غاز يحمل سوائل	تجمع السائل في خطوط النبض يسبب خطأ ارتفاع ساكن؛ يلزم الميل والتصريف
بخار	يلزم وعاء التكثيف (Condensate Pot) وملء خطوط النبض بالماء لحماية الحساس من الحرارة
سائل لزج أو يتجمد	عازل غشائي (Diaphragm Seal) أو تسخين مصاحب (Heat Tracing)
وسط أكّال أو حامض (H_2S)	مواد الأجزاء الملامسة وفق NACE MR0175/ISO 15156؛ Hastelloy أو Monel أحيانًا

طبيعة الوسط	ما يترتب عليها في القياس
رمال أو ترسبات	تجنب الفتحات الضيقة؛ الكسح بمائع نظيف (Purge) أو عزل بالغشاء
منطقة خطرة	شهادة Ex مناسبة (الفصل 26)

كيف أختار؟ ابدأ من عمود «طبيعة الوسط» في ورقة بيانات العملية لا من كتالوج المرسل: الوسط يفرض التركيب (خطوط نبض بميل وتصريف، أو وعاء تكثيف، أو عازل غشائي) والمواد (NACE للخدمة الحامضية) وشهادة المنطقة قبل أي حديث عن الدقة والمدى. والجدول يعرض الحالة الغالبة، ولا يبين ما يتغير بين حالات التشغيل: غاز جاف صيفًا يحمل سوائل شتاءً، وبخار البدء أرطب من بخار التشغيل، فاطلب من مهندس العمليات الحالة الأسوأ لا الطبيعية فقط. وأكثر الأخطاء كلفة افتراض أن «الماء ماء» و«الغاز غاز»، فيُركّب مرسل بلا ميل ولا عازل ثم تُحمَّل قراءته الخاطئة على المعايرة.

هذه المعلومات تأتي من مهندس العمليات في ورقة بيانات العملية (Process Datasheet)، وعلى مهندس التحكم أن يطلبها لا أن يفترضها.

2.2 ظروف التشغيل والتصميم

تتداخل في الوثائق ست قيم مختلفة للمتغير نفسه، والخلط بينها من أكثر أخطاء المبتدئين:

المصطلح	المعنى	من يحدده
القيمة الطبيعية (Normal)	القيمة المعتادة في حالة تشغيل محددة	العمليات
حدود التشغيل (Operating Range)	المجال المتوقع بين أدنى وأقصى حمل	العمليات
ضغط وحرارة التصميم (Design)	أساس تحمّل المعدة والأنابيب؛ أعلى من التشغيل بهامش	العمليات والميكانيك

المصطلح	المعنى	من يحدده
مدى الجهاز (Instrument Range)	المجال الذي يُهيّأ عليه المرسل؛ يغطي التشغيل بهامش ولا يلزم أن يساوي التصميم	التحكم
نقطة الإنذار (Alarm)	قيمة تستدعي استجابة من المشغّل	العمليات + التحكم (ورشة الإنذارات)
نقطة الفصل (Trip)	قيمة مرتبطة بوظيفة حماية معتمدة	دراسة المخاطر وSRS

مثال: خط غاز وقود ضغطه الطبيعي 25 bar، حدود التشغيل 22–28 bar، ضغط التصميم 40 bar. المدى المناسب للمرسل 0–40 bar (ليبقى القياس الطبيعي في الثلث الأوسط ويغطي حدود التشغيل بهامش واسع)، الإنذار المنخفض عند 21 bar (تحت الحد الأدنى للتشغيل بهامش يمنع الإنذار عند كل حمل منخفض طبيعي)، والفصل عند 20 bar. لو اختير مدى 0–100 bar «للاحتياط» لضاعت الدقة؛ خطأ ±0.1% من الاتساع (Span) يساوي 0.04 bar في المدى الصغير و0.1 bar في الكبير، ويظهر الفرق أيضًا في التمييز (Resolution) والاستجابة للتغيرات الصغيرة.

مثال محلول (ترتيب القيم على محور واحد): وعاء فصل يعمل عادة عند 20 bar، وحدود تشغيله من 17 إلى 23 bar، وضغط تصميمه 30 bar، وصمام الأمان مضبوط على 28 bar. يضع مهندس التحكم إنذار الضغط العالي عند 24.5 bar ليعطي المشغل وقتًا قبل الفصل بالضغط العالي عند 26 bar، ويبقي هامشًا تحت صمام الأمان حتى لا يفتح الصمام قبل أن يتدخل الفصل. وفي الجهة الأخرى إنذار منخفض عند 15.5 bar وفصل عند 14 bar. ويُختار مدى المرسل من 0 إلى 40 bar، فيقع التشغيل العادي قرب منتصفه، ويبقى الفصل العالي وضغط التصميم داخل المدى بهامش. وهذا الترتيب نفسه، من العادي إلى الإنذار إلى الفصل إلى صمام الأمان إلى التصميم، هو ما تبحث عنه في ورقة بيانات كل وعاء قبل اختيار أي جهاز.

الشكل 2-1: *ظروف التشغيل والتصميم لوعاء واحد على محور الضغط: نطاق التشغيل حول القيمة العادية، ثم الإنذاران، ثم نقطتا الفصل، ثم صمام الأمان، ثم ضغط التصميم، ومدى المرسل الذي يحتوي ذلك كله.*

2.3 المتغيرات الأربعة الكبرى

أغلب حلقات التحكم في النفط والغاز والطاقة تدور حول أربعة متغيرات:

- **الضغط (Pressure):** قوة على مساحة. مطلق أو نسبي أو تفاضلي (الفصل 6). سريع الاستجابة عادةً، وأسرع في السوائل منه في الغازات، ويحدد السلامة الميكانيكية.
- **درجة الحرارة (Temperature):** أبطأ المتغيرات استجابة بسبب السعة الحرارية والغمد الحراري (Thermowell) (الفصل 7). تحدد كفاءة الاحتراق وعمر المواد.
- **التدفق (Flow):** أسرع المتغيرات في الغالب؛ قياسه حجمي أو كتلي (الفصل 8). وهو المتغير المعالَج (Manipulated Variable) في كثير من الحلقات الأخرى، إذ يكون الحلقة الداخلية في التحكم التعاقبي.
- **المستوى (Level):** يعبّر عن توازن كتلي؛ كثير من عمليات المستوى تكاملية لا ذاتية التنظيم (الفصل 9).

ويضاف إليها الكثافة والتركيب واللزوجة والرطوبة (الفصلان 10 و12)، والسرعة والاهتزاز في الآلات الدوارة (الفصل 32).

2.4 موازنة الكتلة

في خزان بسائل ثابت الكثافة ومساحة مقطع ثابتة:

$$A \cdot dh/dt = Q_{in} - Q_{out}$$

حيث A مساحة المقطع (m^2)، وh المستوى (m)، وQ التدفق (m^3/h).

> **مثال:** $A = 10\ m^2$، $Q_{in} = 30\ m^3/h$، $Q_{out} = 20\ m^3/h$، فيكون
>
> $$dh/dt = (30 - 20)/10 = 1\ m/h.$$

يرتفع المستوى مترًا كل ساعة ما دام الفرق ثابتًا؛ ولا يستقر المستوى من تلقاء نفسه، وهذا معنى «العملية التكاملية» الذي نعود إليه عند ضبط الحلقات في الفصل 18.

الشكل 2-2: *موازنة الكتلة في خزان المثال: فرق $10\ m^3/h$ بين الداخل والخارج يرفع المستوى مترًا كل ساعة حتى يتدخل التحكم.*

2.5 موازنة الطاقة

في تسخين سائل دون تغير طور وبخواص ثابتة تقريبًا:

$$Q = \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_{out} - T_{in})$$

> **مثال:** $\dot{m}$ = 2 kg/s، Cp = 4.2 kJ/(kg·K)، ΔT = 20 K، فيكون $\dot{Q}$ = 168 kW. يفيد الحساب في فهم الحمل الحراري وتقدير سعة صمام البخار، لكنه لا يشمل الفواقد ولا الديناميكا؛ فالمبادل لا يستجيب فورًا لتغير البخار.

2.6 خواص الغازات والسوائل والبخار التي تؤثر في القياس

- **الانضغاطية:** حجم الغاز يتغير مع الضغط والحرارة، لذلك يجب تحديد شروط القياس (Actual) وشروط المرجع (Standard/Normal) عند ذكر أي تدفق حجمي للغاز، والتعويض في الحسابات (الفصل 8).
- **الكثافة:** تدخل في قياس المستوى الهيدروستاتيكي والتدفق بالضغط التفاضلي؛ تغيّرها مع الحرارة أو التركيب يسبب خطأ إن لم يُعوَّض.
- **اللزوجة:** تؤثر في عدادات التوربين والإزاحة الموجبة وفي فقد الضغط عبر الصمامات.
- **نقطة الندى (Dew Point):** في غاز الوقود تحدد خطر تكاثف الهيدروكربونات الثقيلة في خطوط النبض وفي الفوهات؛ ولها فصل خاص (الفصل 67).
- **البخار المشبع والمحمّص:** في المشبع لكل ضغط درجة حرارة تشبع واحدة، أما في المحمّص فالضغط والحرارة مستقلان، فيلزم قياسهما معًا لحساب المحتوى الحراري (Enthalpy).

2.7 المعدات التي يتعامل معها مهندس التحكم

المعدة	ما تفعله	ما يهم مهندس التحكم
المضخة الطاردة المركزية	ترفع ضغط السائل	منحنى الأداء، الحد الأدنى للتدفق، NPSH، التكهف
الضاغط الطارد المركزي	يرفع ضغط الغاز	خريطة الأداء، الانفصال الهوائي (Surge) والتحكم بمنعه (Anti-surge) (الفصل 35)
المبادل الحراري	ينقل الحرارة بين مائعين	التأخير الزمني، التلوث (Fouling) وتدهور الأداء
الفاصل (Separator)	يفصل الغاز والنفط والماء	مستويات متعددة وواجهات، الدفعات السائلة (Slugging)
الوعاء والخزان	تخزين ومعالجة	المستوى، الضغط، الحماية من الامتلاء
الفرن والمرجل	احتراق وتوليد بخار	التحكم بالاحتراق BMS، (Combustion Control)، مستوى الدرم (Drum Level) (الفصل 36)
التوربين الغازي	تحويل الوقود إلى قدرة	الفصل 34

2.8 اقرأ العملية قبل اختيار الاستراتيجية

قبل أن تقرر PID بسيطًا أو التحكم التعاقبي (Cascade) أو التغذية الأمامية (Feedforward)، أجب:

1. هل العملية ذاتية التنظيم (تستقر عند قيمة جديدة بعد الاضطراب) أم تكاملية (تستمر في التغير)؟
2. ما ثابت الزمن والتأخير الميت تقريبًا؟ عملية ثوانٍ (ضغط غاز) أم دقائق (حرارة مبادل) أم ساعات (مستوى خزان كبير)؟

3. ما الاضطرابات الرئيسية ومن أين تأتي؟ هل يمكن قياسها قبل أن تؤثر؟
4. ما القيود؟ حدود المعدة، الحد الأدنى للتدفق، سرعة تغير الحرارة المسموحة للمواد.
5. ما الذي يحدث عند فشل الجهاز أو الصمام؟ هل الوضع الآمن مفتوح أم مغلق؟

الإجابات تحدد الاستراتيجية (الفصلان 18 و41) وتحدد أيضًا الجهاز: مستوى تكاملي بطيء لا يحتاج مرسلًا سريعًا، لكنه يحتاج مرسلًا لا ينجرف.

وأول ما يُقرأ في العملية هو طبيعة استجابتها لخطوة في الصمام (الشكل 2-3): العملية **ذاتية التنظيم** (ضغط غاز في خط، تدفق، حرارة مبادل) تستقر عند قيمة جديدة بعد تأخير ميت وثابت زمن، فيُعرَّف لها كسب ويُضبط لها متحكم PID بالطرق العادية. أما العملية **التكاملية** (مستوى خزان، ضغط وعاء مغلق بلا منفذ) فلا تستقر بل تستمر في الصعود أو الهبوط ما دام الدخل والخرج غير متساويين، والفعل التكاملي القوي (زمن تكامل قصير) في متحكمها يسبب التذبذب ولا يعالجه، ولذلك تُضبط بزمن تكامل طويل وكسب يناسب هدف الحلقة أو بالتحكم التوسيطي للمستوى (Averaging Level Control) حين يكون الخزان مخصصًا لامتصاص التغيرات (الفصل 18).

الشكل 2-3: *استجابة الخطوة في نوعي العمليات: (أ) ذاتية التنظيم تستقر عند قيمة جديدة ويُقرأ منها التأخير الميت وثابت الزمن والكسب؛ (ب) تكاملية تستمر في التغير بميل ثابت ولا تستقر إلا حين يتساوى الدخل والخرج.*

مثال محلول (موازنة الكتلة وزمن الإنذار): وعاء رأسي قطره 2.0 m، ومدى مرسل المستوى 2.0 m، وتدفق السائل الداخل 12 m^3/h. التصق صمام التصريف مغلقًا والمستوى عند 50%. والإنذار العالي LAH عند 70% والفصل LAHH عند 85%.

- **الافتراضات:** التدفق الداخل ثابت، والتصريف صفر، والمقطع ثابت على طول المدى.
- **الحل:**
  - مساحة المقطع: $A = \pi \times r^2 = \pi \times 1.0^2 = 3.14\ m^2$.
  - معدل ارتفاع المستوى: $dh/dt = Q \div A = 12 \div 3.14 = 3.82\ m/h$، أي 6.4 cm/min.
  - الزمن من 50% (1.0 m) إلى LAH عند 70% (1.4 m): $0.4 \div 0.064 \approx$ **6.3 min**.
  - الزمن من LAH إلى LAHH عند 85% (1.7 m): $0.3 \div 0.064 \approx$ **4.7 min**.
  - أي أن المستوى يصعد نحو ستة سنتيمترات في الدقيقة، وبين الإنذار والفصل أقل من خمس دقائق.
- **المعنى ميدانيًا:** أمام المشغل نحو خمس دقائق بين الإنذار والفصل. وهذه المدة هي ما يُقارن بزمن استجابة المشغل المطلوب في فلسفة الإنذارات (القسم 22.3، وتُفصَّل في الفصل 73 من الجزء القادم): إن كان الإجراء المطلوب يستغرق عشر دقائق (الذهاب إلى الميدان وفتح صمام التجاوز اليدوي)، فالإنذار في غير موضعه ويجب خفضه، أو يُضاف إنذار مبكر بمعدل تغير المستوى.

مثال محلول (موازنة الطاقة وحمل المسخن): مسخن ماء بالبخار يرفع 20 m^3/h من الماء من 20 °C إلى 60 °C، بالبخار المشبع عند نحو 5 barg (الحرارة الكامنة نحو 2086 kJ/kg).

- **الافتراضات:** كثافة الماء 1000 kg/m^3 وحرارته النوعية 4.18 kJ/(kg·K)، والمكثفات تخرج مشبعة، والفقد الحراري مهمل.
- **الحل:**
  - التدفق الكتلي للماء: $\dot{m} = 20{,}000 \div 3600 = 5.56$ kg/s.
  - الحمل الحراري: $\dot{Q} = \dot{m} \times Cp \times \Delta T = 5.56 \times 4.18 \times 40 =$ **929 kW**.
  - تدفق البخار = الحمل ÷ الحرارة الكامنة = 929 ÷ 2086 = 0.445 kg/s، أي **نحو 1.6 t/h**.
  - أي أن الحمل الحراري للماء هو ما يحدد كمية البخار، لا العكس.
- **المعنى ميدانيًا:** هذا الرقم يحدد مدى عداد البخار وحجم صمام التحكم بالحرارة. فإذا طُلب مستقبلًا رفع التدفق إلى 30 m^3/h، فالبخار المطلوب نحو 2.4 t/h، ويُراجع الصمام والعداد معًا قبل أن يُعدَّل أي ضبط في المتحكم.

2.9 حالة ميدانية: صمام صحيح على عملية غير مفهومة

نوع الحالة: مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في فاصل ثلاثي الأطوار، اشتكى فريق التشغيل من تذبذب مستوى النفط، وأُعيد ضبط حلقة PID مرارًا دون جدوى. وعند مراجعة العملية تبيّن أن الفاصل يستقبل من خط الأنابيب دفعات سائلة (Slugs) كل بضع دقائق، وأن الحلقة المضبوطة ضبطًا محكمًا كانت

تطارد اضطرابًا لا يستطيع صمام المخرج بحجمه أن يعوّضه. ولم يكن الحل ضبطًا أحكم، بل التحكم التوسيطي للمستوى (Averaging Level Control): كسب منخفض يسمح للمستوى بالتحرك داخل نطاق أوسع بين الإنذارين، فتصير سعة الفاصل مخمِّدًا للدفعات بدل أن تنتقل إلى المعدات اللاحقة. الدرس: ديناميكا العملية أولًا، ثم الحلقة.

دور المهندس ودور الفني:

- **المهندس** يطلب ورقة بيانات العملية ولا يفترض محتواها، ويرتب القيم الست لكل متغير على محور واحد (القسم 2.2). ويحسب بموازنتي الكتلة والطاقة سعة الصمام والعداد والزمن المتاح بين الإنذار والفصل، ويقرر هل العملية ذاتية التنظيم أم تكاملية قبل أن يختار الاستراتيجية.
- **الفني** يتحقق في الميدان من شروط الخدمة التي بُني عليها الاختيار: ميل خطوط النبض وتصريفها، وامتلاء أوعية التكثيف في خدمة البخار، وعمل التسخين المصاحب. ويسجل ما يلاحظه من سلوك العملية (دفعات سائلة، تذبذب دوري، هبوط عند تبديل المضخات)، لأن هذا السجل هو ما يميّز مشكلة العملية من مشكلة الجهاز.

2.10 الأخطاء الشائعة

- اختيار مدى المرسل من ضغط التصميم دون النظر إلى حدود التشغيل، أو العكس.
- ذكر تدفق غاز دون شروط المرجع.
- افتراض أن كل عملية ذاتية التنظيم وضبط المستوى كما يُضبط التدفق.
- تجاهل طبيعة الوسط (رطوبة، رمال، H_2S) عند اختيار المواد والتركيب.
- طلب دقة عالية من الجهاز في عملية لا تحتاجها، وإهمال الاستقرار طويل الأمد الذي تحتاجه فعلًا.

2.11 ملخص

ستة أرقام لكل متغير (طبيعي، تشغيل، تصميم، مدى، إنذار، فصل)، وموازنتان (كتلة وطاقة) تفسّران أغلب السلوك، وخمسة أسئلة تسبق اختيار أي استراتيجية. الجهاز تابع للخدمة، والتحكم تابع للعملية.

وفي الفصل التالي: الفصل 3 «سلسلة القياس والتحكم»؛ فبعد فهم العملية نتتبع الطريق الذي تسلكه قيمتها من الحساس إلى الشاشة ثم إلى الصمام.

2.12 أسئلة التقييم الذاتي

1. خزان مساحته 25 m^2 يدخله 60 m^3/h ويخرج منه 45 m^3/h. بكم يرتفع المستوى في 20 دقيقة؟
2. سائل $\dot{m}$ = 5 kg/s وCp = 2.1 kJ/(kg·K) يُسخَّن 15 K. ما القدرة الحرارية المطلوبة؟
3. لماذا يجب تحديد شروط المرجع عند ذكر تدفق غاز حجمي ولا يلزم ذلك للسائل عادة؟
4. خط ضغطه الطبيعي 8 bar وحدود تشغيله 6–10 bar وضغط تصميمه 16 bar. اقترح مدى المرسل وعلّل.
5. ما الفرق العملي بين عملية ذاتية التنظيم وعملية تكاملية من حيث ضبط الحلقة؟
6. اذكر ثلاثة تأثيرات لوجود سوائل في غاز على قياس ضغطه التفاضلي.
7. لماذا يُملأ خط نبض مرسل ضغط البخار بالماء؟
8. ما الذي يهم مهندس التحكم في منحنى أداء المضخة الطاردة المركزية؟
9. في الحالة 2.9، لماذا فشل ضبط PID؟ وما البديل؟
10. من يحدد نقطة الفصل (Trip) ومن يحدد نقطة الإنذار؟ ولماذا يختلفان في المصدر؟

مراجع الفصل: R1 (المسودة الموحدة)، وR20 (Process Engineer's Pocket Handbook)، وR16 (Process Control Fundamentals)، وR17 (Instrumentation and Process Control)، وجداول البخار ومعادلة الغاز الحقيقي (AGA 8) لخواص الموائع، وخبرة المؤلف الميدانية (R18).

الفصل 3: سلسلة القياس والتحكم

> **لمن هذا الفصل:** لكل القرّاء؛ هو الفصل الذي يثبّت صورة الحلقة التي يتكرر ذكرها في كل الكتاب.
>
> **الفكرة الأساسية:** بين العملية وشاشة المشغّل سلسلة من ثمانية عناصر على الأقل، وكل واحد منها يمكن أن يخطئ. من يعرف السلسلة يعرف أين يبحث حين تكون القراءة خاطئة أو الحلقة لا تستقر.

3.1 حلقة القياس والتحكم

الشكل 3-1: *حلقة القياس والتحكم: مسار القياس من العملية إلى المتحكم، ومسار الأمر من المتحكم إلى العنصر النهائي الذي يغلق الحلقة.*

المسار من العملية إلى الشاشة وحده **سلسلة قياس ومراقبة**: عملية ← حساس ← مرسل ← مؤشر ← إنسان. وحين يُضاف المتحكم والعنصر النهائي ويعود الأمر إلى العملية محسوبًا من القياس نفسه، تصبح **حلقة مغلقة للتحكم (Closed Loop)**. أما إذا صدر الأمر

دون أن يعتمد على قياس الناتج فهو **تحكم بحلقة مفتوحة (Open Loop)** (القسم 3.1-أ). المصطلحات القياسية على طول المسار: المتغير المقاس (Measured Variable)، الإشارة المقاسة (Measured Signal)، القيمة المقاسة (Measured Value)، نقطة الضبط (Setpoint / Desired Value)، الإشارة المعالجة (Manipulated Signal)، والمتغير المعالَج (Manipulated Variable).

3.1-أ التحكم بالحلقة المفتوحة والتحكم بالحلقة المغلقة

الفرق بين النوعين يلخصه سؤال واحد: **هل يعرف المتحكم نتيجة أمره؟** فإن كان الأمر يُحسب ثم يُرسل ولا يعود قياس الناتج ليصححه، فالتحكم بحلقة مفتوحة. وإن كان الناتج يُقاس ويُقارن بالهدف ويُعدَّل الأمر بحسب الفرق، فالتحكم بحلقة مغلقة (الشكل 3-2).

الشكل 3-2: *ثلاث بنى للتحكم: (أ) الحلقة المفتوحة تحسب الأمر من الهدف أو من جدول مسبق ولا تقيس الناتج؛ (ب) الحلقة المغلقة تقيس المتغير المتحكم فيه (PV) وتطرحه من نقطة الضبط (SP) وتحسب الأمر من الخطأ؛ (ج) التغذية الأمامية تقيس الاضطراب وتصحح قبل أن يظهر أثره، والتغذية الراجعة تزيل ما بقي من الخطأ.*

التحكم بالحلقة المفتوحة (Open-Loop Control): يحسب المتحكم الأمر من الهدف ومن نموذج أو جدول معد مسبقًا، ثم يرسله إلى العنصر النهائي، ولا يقيس المتغير

المتحكم فيه. فإذا تغيرت العملية أو دخلها اضطراب لم يُحسب له، بقي الأمر كما هو وبقي الخطأ. ومن أمثلته في المنشآت:

- **جدول الوقود في بدء التوربين الغازي:** في مراحل الإشعال والتسخين والتسارع الأولى يُحدَّد أمر الوقود بمستويات مسبقة، لا بالسرعة المقاسة، إلى أن تنتقل السيطرة إلى حلقة السرعة (الفصل 34).
- **مضخة جرعات كيميائية** تعمل بسرعة ثابتة، أو بنسبة ثابتة من تدفق آخر، دون تحليل لتركيز المادة في الناتج.
- **مؤقت يشغّل الغسيل العكسي للمرشحات (Backwash)** كل ثماني ساعات مهما كان فرق الضغط عليها.
- **صمام في الوضع اليدوي (MAN):** يضع المشغّل فتحته، فتبقى الحلقة مفتوحة، والإنسان هو الذي يغلقها حين ينظر إلى القراءة ويعدّل الفتحة.
- **التغذية الأمامية (Feedforward):** تقيس الاضطراب لا الناتج، وتصحح قبل أن يظهر أثره. فهي تحكم بحلقة مفتوحة بالنسبة إلى المتغير المتحكم فيه، ولا تُستعمل وحدها إلا نادرًا.

التحكم بالحلقة المغلقة (Closed-Loop / Feedback Control): يقيس المتغير المتحكم فيه (PV)، ويقارنه بنقطة الضبط (SP)، ويحسب الأمر (OP) من الخطأ e = SP − PV. والتغذية الراجعة هنا **سالبة (Negative Feedback)**: إذا زاد PV على الهدف تحرك الأمر في الاتجاه الذي يعيده. أما **التغذية الراجعة الموجبة (Positive Feedback)** فتزيد الانحراف ولا تصلح للتنظيم. وتظهر في الميدان خطأً حين يُضبط فعل المتحكم عكس ما يلزم (مباشر بدل عكسي أو العكس، القسم 18.6)، فيندفع الصمام إلى أحد طرفيه ويبقى هناك.

جدول مقارنة: الحلقة المفتوحة والحلقة المغلقة

المعيار	حلقة مفتوحة	حلقة مغلقة
قياس المتغير المتحكم فيه	لا يحتاج إليه	يحتاج إليه؛ ودقة الحلقة لا تتجاوز دقة حساسها
الوصول إلى الهدف	بقدر دقة النموذج أو الجدول والمعايرة	تصحح نفسها، ويصير الانحراف الدائم صفرًا مع الفعل التكاملي
رفض الاضطرابات	لا ترفض اضطرابًا لم يُحسب له	ترفض كل اضطراب يؤثر في PV، ولو لم يُعرف مصدره
تغير خصائص العملية (اتساخ مبادل، تآكل صمام)	يتراكم خطؤها	تعوّض ضمن حدود الضبط
خطر التذبذب وعدم الاستقرار	لا تضيفه؛ العملية المستقرة تبقى مستقرة	قائم إذا كبر الكسب أو طال التأخير (الفصل 18)
سرعة الاستجابة	بقدر سرعة العنصر النهائي	تنتظر حتى يظهر الخطأ في القياس
أثر عطل الحساس	لا يغيّر الأمر	خطير: قراءة مجمدة أو منخفضة قد تدفع الصمام إلى الفتح الكامل
الكلفة والتعقيد	أقل	حساس ومرسل ومتحكم وضبط وصيانة
أين تُختار	التسلسلات المؤقتة، ومراحل البدء، والجرعات البسيطة، وحين لا يُقاس الناتج بسرعة كافية	أغلب حلقات العمليات المستمرة: الضغط والتدفق والمستوى والحرارة

لماذا تغلب الحلقة المغلقة، ولماذا لا تكفي وحدها؟ الحلقة المغلقة لا تحتاج إلى معرفة مصدر الاضطراب، وهذا سر انتشارها. لكنها لا تتحرك قبل أن يقع الخطأ ويصل إلى القياس، فإذا كان التأخير طويلًا أو الاضطراب كبيرًا وسريعًا، جاء التصحيح متأخرًا. لذلك تُجمع البنيتان في الحلقات الحساسة: التغذية الأمامية تعطي السرعة، والراجعة تعطي الدقة وتصحح أخطاء النموذج. ومن أشهر الأمثلة التحكم ثلاثي العناصر بمستوى درم المرجل: تدفق البخار تغذية أمامية، وتدفق ماء التغذية حلقة داخلية، والمستوى حلقة خارجية تصحح (القسم 36.7).

مثال محلول (اضطراب واحد على ثلاث حلقات):

- **المعطيات:**
  - سخان زيت، نقطة ضبط حرارة المخرج 180 °C، وصمام الوقود مفتوح 40% في الحالة المستقرة.
  - كسب العملية K = 2 °C لكل 1% من فتحة الصمام.
  - زاد تدفق الزيت فجأة، ولو بقي الصمام على حاله لانخفضت الحرارة 12 °C.
- **الحل:**
  - **(أ) حلقة مفتوحة (يدوي على 40%):** لا يتغير الأمر، فتستقر الحرارة عند 180 − 12 = **168 °C**، ويبقى الخطأ حتى يتدخل المشغّل.
  - **(ب) حلقة مغلقة بفعل تناسبي فقط، Kc = 2 لكل °C):**
    - الاضطراب ÷ (1 + Kc × K) = الانحراف الدائم
    - 12 ÷ (1 + 4) = **2.4 °C**، فتستقر الحرارة عند 177.6 °C.
    - فتحة الصمام = 40 + Kc × الانحراف = 40 + 2 ×

.2.4 = 44.8%

- التحقق: 9.6 °C = 2 × 4.8% رفع، و− = 12 + 9.6 −2.4 °C، فالحساب متسق.

- **(ج) حلقة مغلقة بفعل تناسبي تكاملي (PI):** يستمر التكامل ما دام الخطأ موجودًا، فتعود الحرارة إلى **180 °C** ويستقر الصمام عند 40 ÷ 2 + 12 = **46%**.

- **معنى النتيجة:** الحلقة المغلقة قلّصت أثر الاضطراب من 12 °C إلى 2.4 °C بالفعل التناسبي، وأزالته بالفعل التكاملي (الشكل 3-3). ولو رُفع Kc لتقليل الانحراف الدائم بدل إضافة التكامل، لاقتربت الحلقة من التذبذب مع وجود التأخير (القسم 18.2)، والفعل التكاملي مشروح في (القسم 18.3).

الشكل 3-3: *استجابة السخان في المثال المحلول لاضطراب قدره 12 °C عند الدقيقة 5: الحلقة المفتوحة تبقى عند 168 °C، والتناسبية وحدها تستقر عند 177.6 °C بانحراف دائم 2.4 °C، وPI تعيد الحرارة إلى 180 °C بفتح الصمام إلى 46%. (نموذج توضيحي: ثابت زمن 6 min وتأخير 1 min.)*

حالة ميدانية (مثال تعليمي مركّب): العَرَض: فصلت حماية الحرارة العالية سخانًا، مع أن شاشة التحكم كانت تعرض حرارة 175 °C، أي أقل من الهدف. **الفحص:** اتجاه القراءة كان خطًا مسطحًا تمامًا منذ ساعتين، بينما خرج المتحكم يرتفع ببطء حتى 100%. **السبب:** مرسل الحرارة فقد جزءًا من تغذيته فتجمدت قراءته. فرأى المتحكم (PI) خطأً دائمًا لا يزول، وظل يزيد الوقود، وارتفعت الحرارة الحقيقية حتى فصلها حساس الحماية المستقل. **الدرس:** الحلقة المغلقة تثق بقياسها ثقة كاملة. لذلك يُراقب سلوك القياس (حدود NE43، وحالة الجودة، وإنذار القراءة المسطحة (Flatline) إن كان النظام يدعمه)، ويُحدَّد سلوك المتحكم عند سوء القياس: تجميد الخرج، أو التحويل إلى اليدوي، أو الذهاب إلى خرج آمن. ويبقى حساس الحماية مستقلًا عن حساس التحكم (القسم 1.6).

ما يُخطئ فيه الناس:

- الظن أن الحلقة المغلقة أدق دائمًا: دقتها محدودة بدقة حساسها ومعايرته.
- رفع الكسب لتقليل الانحراف الدائم بدل إضافة الفعل التكاملي، فتتذبذب الحلقة.
- ترك الحلقات في الوضع اليدوي بعد الصيانة أو التشغيل التجريبي. فالحلقة المفتوحة لا تنبّه أحدًا حين تنجرف العملية، ولذلك يُتابَع عدد الحلقات العاملة يدويًا مقياسًا للأداء (القسم 18.10).
- عكس فعل المتحكم، فتنقلب التغذية الراجعة إلى موجبة.

دور المهندس ودور الفني: المهندس يقرر لكل وظيفة البنية المناسبة: حلقة مفتوحة، أو مغلقة، أو تغذية أمامية مع راجعة. ويحدد سلوك المتحكم عند سوء القياس، ويكتب ذلك في فلسفة التحكم. والفني يتحقق من اتجاه الفعل في اختبار الحلقة (Loop Check)، ويتأكد من إعادة الحلقة إلى الوضع الآلي بعد الصيانة، ويبلّغ عن كل حلقة تعمل يدويًا باستمرار، لأنها علامة على مشكلة في الحساس أو الصمام أو الضبط.

3.2 مكوّنات السلسلة

المكوّن	وظيفته	أمثلة	ما يمكن أن يخطئ فيه
العنصر الأولي / الحساس (Primary Element / Sensor)	يتأثر مباشرة بالمتغير الفيزيائي ويحوّله إلى أثر قابل للقياس	لوح الفتحة (Orifice)، المزدوج الحراري (Thermocouple)، غشاء الضغط، مجس القرب (Proximity Probe)	التركيب، التلوث، الانجراف، الاستجابة البطيئة
المحوّل (Transducer)	يحوّل شكل الطاقة إلى آخر	I/P، P/I، مكبر الجهد	التغذية، الخطية
المرسل (Transmitter)	يحوّل القياس إلى إشارة قياسية قابلة للنقل	4–20 mA، HART، الشبكات الحقلية (Fieldbus)	التهيئة، المدى، التغذية، الرطوبة
مكيّف الإشارة (Signal Conditioner)	يغذي أو يضخم أو يعزل أو يرشّح أو يحوّل	حاجز IS، عازل جلفاني، مضخم Proximitor	العزل، التأريض، الضوضاء
قناة الإدخال (Input Channel)	تحوّل الإشارة إلى رقم في النظام	بطاقة AI، عدّاد تردد، بطاقة RTD	التحجيم، الجذر التربيعي، دقة A/D
المتحكم (Controller)	يحسب الأمر من الفرق بين القياس والهدف	PID في DCS، منطق في PLC، Mark VIe	الضبط، الأوضاع، التشبع
قناة الإخراج (Output Channel)	تحوّل الأمر إلى إشارة	بطاقة AO، DO، مخرج نبضي	الحمل الأقصى، التوصيل
العنصر النهائي (Final Control Element)	يؤثر في العملية	صمام تحكم، VFD، مسخن، خانق (Damper)	الالتصاق، القدرة غير الكافية، وضع الفشل

المكوّن	وظيفته	أمثلة	ما يمكن أن يخطئ فيه
العرض والتسجيل (HMI / Historian)	يعرض ويؤرشف	شاشة المشغّل، منحنى الاتجاه (Trend)، سجل الأحداث	الضغط الزمني للبيانات، الطابع الزمني

قد تُدمج وظائف في جهاز واحد (مرسل ذكي يضم الحساس والمكيّف والاتصال)، لكن فصل الوظائف ذهنيًا هو ما يجعل التشخيص ممكنًا.

والمكان الذي تلتقي فيه هذه المكونات ماديًا هو خزانة التوزيع (Marshalling Cabinet) في غرفة الأجهزة: تدخل إليها كابلات الحقل متعددة الأزواج فتُنهى على أطراف، ثم تُوزَّع الحلقات فرادى إلى حواجز الأمان الجوهري أو العوازل ومنها إلى بطاقات الإدخال والإخراج في نظام التحكم (الشكل 3-4). ومعرفة هذا المسار المادي ضرورية لتتبع الأعطال: فكثير من «أعطال الحساسات» طرف مفكوك في هذه الخزانة.

الشكل 3-4: *نموذج ثلاثي الأبعاد لخزانة توزيع وتجميع الإشارات: كابلات الحقل تدخل من الأسفل عبر لوحة الغدد إلى أطراف الحقل، ثم أطراف الأمان الجوهري والعوازل، فبطاقات الإدخال والإخراج ومصدر التغذية 24 V وقضيب التأريض.*

3.3 أنواع الإشارات

الإشارة هي لغة السلسلة، ولها أربعة أشكال:

النوع	الوصف	الاستخدام	ملاحظات
هوائية (Pneumatic)	3–15 psi (0.2–1.0 bar)	المشغّلات والموضّعات (Positioners)، الأنظمة القديمة	ما زالت لغة الصمامات؛ القسم 15.9
تناظرية (Analog)	4–20 mA أساسًا، 0–10 V أحيانًا	القياسات والأوامر المستمرة	الصفر الحي (4 mA) يكشف انقطاع السلك؛ القسم 23.1
منفصلة (Discrete / Binary)	تلامس جاف أو جهد 24 V DC	الحالات والأوامر: مفتوح/مغلق، تشغيل/إيقاف	رطب/جاف (Wet/Dry)، PNP/NPN؛ الفصل 11
رقمية (Digital)	HART، Foundation Fieldbus، PROFIBUS، Modbus (وفي المستويات الأعلى Ethernet الصناعي وOPC UA)	البيانات المتعددة والتشخيص والتهيئة	الفصل 23

كيف أختار؟ القاعدة في المنشآت: 4–20 mA مع HART للقياسات والأوامر المستمرة، وتلامس أو NAMUR للحالات والأوامر المنفصلة، والهوائية 3–15 psi بين الموضّع والمشغّل فقط، والشبكة الحقلية حيث اعتُمدت في أساس التصميم لوحدة كاملة لا لحلقة منفردة. والجدول لا يبيّن كلفة التهيئة والتشخيص التي تأتي مع الإشارة الرقمية، ولا حاجة الحماية إلى إشارة يمكن فحصها بمقياس تيار في الميدان. والخطأ الأكثر كلفة خلط أنواع الإشارة في اللوحة الواحدة (تلامس رطب على بطاقة تبلّل من داخلها، أو مصدران في حلقة واحدة)، فتتلف بطاقة لا يُكتشف تلفها إلا عند التشغيل.

ويُضاف إليها إشارة التردد (Frequency) لمراقبة السرعة (Speed Pickup، الفصل 32)، والإشارة التسلسلية (Serial) لواجهات الحزم (Packages).

> **ملاحظة تاريخية لا تزال مفيدة:** قبل الإلكترونيات كانت المرسلات الهوائية تعمل بمبدأ **اتزان القوى (Force Balance)**: الضغط أو الضغط التفاضلي يدفع غشاءً فيحرّك ذراعًا تقترب من فوهة نفث (Flapper-Nozzle) فيرتفع ضغط الخرج 3–15 psi ويغذي منفاخ تغذية راجعة يعيد الذراع إلى موضعها، فيتناسب ضغط الخرج مع القوة المقاسة لا مع الإزاحة (R51). وما زالت هذه الأجهزة موجودة في وحدات قديمة وفي مواقع لا كهرباء فيها، ومبدأها نفسه هو مبدأ موضّعات الصمامات الهوائية (القسم 15.9)، لذلك يجدر بالمهندس أن يعرف كيف يعايرها (صفر بضبط زنبرك، ومدى بضبط موضع نقطة الارتكاز) وأن يميّز عيبها الأول: انسداد الفوهة بالزيت أو الرطوبة في هواء الأجهزة.

الإشارة التناظرية مستمرة في الزمن والقيمة؛ والنظام الرقمي يأخذ منها عيّنات (Sampling) ويحوّلها إلى أرقام (A/D Conversion). وفي هذا التحويل تضيع ثلاثة أشياء يفصّلها القسم 3.3.3. لذلك زمن المسح ودقة البطاقة جزء من مواصفات الحلقة لا تفاصيل داخلية.

الشكل 3-5: *حلقة 4–20 mA ثنائية الأسلاك: مصدر 24 V في بطاقة الإدخال يغذي المرسل، والتيار نفسه يمر في مقاومة 250 Ω فيعطي 1–5 V.*

3.3.1 الإشارة التناظرية 4–20 mA بالتفصيل

لماذا تيار لا جهد؟ لأن التيار في حلقة متسلسلة واحد في كل نقطة منها مهما كانت مقاومة الكابل (ما دام جهد المصدر يكفي)، فلا يضيع شيء على مئات الأمتار، ويمكن أن يُدخَل في الحلقة نفسها أكثر من جهاز (مؤشر محلي، مسجل، بطاقة الدخل) على التوالي. أما الجهد فيهبط على الكابل ويتأثر بالضوضاء. و**الصفر الحي (Live Zero)** عند 4 mA يجعل الصفر مميزًا عن العطل: انقطاع السلك يعطي 0 mA لا 4 mA. وتحدد توصية **NAMUR NE43** نطاقات العطل التي يستخدمها المرسل ليعلن عطله الداخلي عمدًا: 3.6 mA أو أقل، أو 21 mA أو أكثر، بينما 3.8 إلى 20.5 mA هي منطقة القياس مع تشبع صغير خارج المدى. وتُهيأ بطاقة الدخل لتعامل هذه النطاقات على أنها «قيمة سيئة» لا قراءة.

ثنائي وثلاثي ورباعي الأسلاك: المرسل **ثنائي الأسلاك (Loop-Powered)** يتغذى من الحلقة نفسها: يأخذ من التيار المار فيه ما يشغّل إلكترونياته ويضبط الباقي؛ ولذلك لا يمكنه أن يستهلك أكثر من نحو 3.5 mA، ولا بد أن يبقى على طرفيه جهد أدنى للتشغيل (عادة 10.5 إلى 12 V، وأكثر مع HART أو شاشة). والمرسل **رباعي الأسلاك** له تغذية منفصلة (24 V DC أو 230 V AC) وخرج تيار معزول، ويلزم للأجهزة الأكبر استهلاكًا (المغناطيسي، الكوريوليس، المحللات). والثلاثي الأسلاك شكل وسيط للحساسات الصغيرة (تغذية مشتركة وخرج). والخطأ الأشيع في الميدان هو **مصدران في حلقة واحدة**: بطاقة دخل «نشطة» تغذي الحلقة موصولة بمرسل رباعي الأسلاك يغذيها هو أيضًا، فتتلف البطاقة أو تُقرأ قيمة عشوائية؛ القاعدة: مصدر واحد لكل حلقة، وبطاقة «سلبية» مع الأجهزة الرباعية.

ميزانية جهد الحلقة: كل عنصر في الحلقة يأخذ نصيبه من جهد المصدر عند أقصى تيار (نأخذ 22 mA احتياطًا): مقاومة الدخل (250 Ω تعطي 5.5 V)، ومقاومة الكابل ذهابًا وإيابًا، وحاجز الأمان الجوهري إن وُجد (مقاومته من 100 إلى 350 Ω)، والمؤشرات المتسلسلة. ما يتبقى يجب أن يفوق الجهد الأدنى للمرسل.

مثال محلول (ميزانية جهد حلقة):

- **المعطيات:** مصدر 24 V، دخل 250 Ω، كابل 500 m بمقطع 1.5 mm² (نحو 12 Ω/km للموصل، أي 12 Ω ذهابًا وإيابًا)، ومرسل يحتاج 12 V.
- **الحل بلا حاجز:**
  - هبوط الجهد = التيار الأقصى × (مقاومة الدخل + مقاومة الكابل)
  - $= 0.022 \times (250 + 12) = 5.8 \text{ V}$
  - المتبقي للمرسل = 24 − 5.8 = 18.2 V، وهو أكبر من 12 V، فالحلقة سليمة.
- **الحل مع حاجز مقاومته 300 Ω:**
  - هبوط الحاجز = 0.022 × 300 = 6.6 V
  - المتبقي للمرسل = 18.2 − 6.6 = 11.6 V، وهو أقل من 12 V، فيضيع هامش التصميم.
  - عند 20 mA لا يتبقى للمرسل إلا 12.8 V، وتفشل الحلقة فوق نحو 21.3 mA، فلا تصل إشارة العطل العالي وفق NAMUR NE43 إلى البطاقة.
- **الحل الهندسي:** عازل جلفاني بدل الحاجز، أو مرسل بجهد أدنى أقل، أو خفض مقاومة الدخل.

الأشكال الأخرى: 1–5 V هي الصورة الجهدية للتيار على 250 Ω داخل الخزانة، و0–10 V تُستخدم في أنظمة المباني والمحركات القريبة، وإشارة 0–20 mA (بلا صفر حي) تُتجنب في العمليات. وتكون المخارج التناظرية للبطاقات مصدرًا (Source) أو مصرفًا (Sink)، ويجب أن يُعرف نوعها قبل توصيل الجهاز المستقبِل (كالموضّع أو المحوّل I/P)، حتى لا تبقى الحلقة بلا مصدر تغذية أو بمصدرين. ودقة الحلقة كلها تُحسب من دقة المرسل وبطاقة الدخل معًا (القسم 3.6)، وأي مقاومة إضافية غير محسوبة (وصلة

متآكلة، طرفية مفكوكة) لا تغيّر التيار ما دام الجهد كافيًا، لكنها تأكل هامش الجهد فتظهر عند التيارات العالية قراءةً مقصوصة أو متقطعة.

3.3.2 الإشارات المنفصلة: تلامس جاف ورطب، *PNP* و*NPN*، و*NAMUR*

الإشارة المنفصلة (Discrete أو Binary) تحمل حالة واحدة من اثنتين، لكن التفاصيل الكهربائية لها هي التي تقرر نجاح التوصيل (الشكل 3-6):

- **التلامس الجاف (Dry Contact):** تلامس مفتاح أو مرحّل بلا جهد من جهته؛ **تبليل التلامس (Wetting)** أي إمرار جهد وتيار صغيرين فيه يأتي من بطاقة الدخل. والحد الأدنى لهذا التيار مهم: فالتلامس الذي لا يمر فيه إلا ميكروأمبيرات يتأكسد ويفشل، ولذلك تحدد البطاقات تيار تبليل من بضعة ميلي أمبيرات.
- **التلامس الرطب (Wet Contact):** الجهد يأتي من الميدان (مصدر خاص بالحزمة أو 110 V AC)، فتُستخدم بطاقة دخل معزولة تقبل جهدًا خارجيًا؛ وربط تلامس رطب ببطاقة تبلّل من داخلها يجمع جهدين في دائرة واحدة ويتلف البطاقة.
- **الحساسات ثلاثية الأسلاك (PNP أو NPN):** الحساس الحثي أو السعوي أو الضوئي فيه إلكترونيات تحتاج إلى تغذية (سلكان) وخرج ترانزستوري (سلك ثالث). **PNP (مصدر)** يوصل الخرج إلى +24 V عند التفعيل، ويلائم بطاقة دخل من نوع الساحب (Sinking) (الأشيع في أوروبا وفي معظم أنظمة العمليات)؛ **NPN (مصرف)** يسحب الخرج إلى 0 V ويلائم بطاقة المصدِّر (Sourcing) (شائع في الآلات اليابانية). الخلط بينهما هو السبب الأول لمدخل «لا يرى» الحساس مع أن مصباحه يضيء.
- **حساسات NAMUR ثنائية الأسلاك (EN 60947-5-6):** تُغذى بجهد 8.2 V DC من مضخم أو حاجز، وتغيّر تيارها بين ما لا يزيد على 1.2 mA عند وجود الهدف أمام الحساس (Damped) وما لا يقل عن 2.1 mA عند غيابه (Undamped). وميزتها أن تيارًا أقل من نحو 0.15 mA يعني انقطاع الخط وأكثر من نحو 6

mA يعني قصرًا (قيم نموذجية تختلف قليلًا بين الصانعين)، فيُكشف عطل الكابل على مدار الساعة، وقدرتها الصغيرة تجعلها الأنسب للمناطق الخطرة. وتُستخدم كثيرًا في مفاتيح موضع الصمامات وحساسات السرعة.

- **اصطلاح الفشل الآمن:** في الحمايات يكون التلامس **مغلقًا في الحالة السليمة ويفتح للفصل**، فيعطي انقطاع السلك فصلًا آمنًا لا صمتًا. وتُسمى التلامسات بحالتها بلا تغذية (NO/NC) لا بحالتها أثناء التشغيل، وهذا مصدر التباس دائم في مخططات الحلقات.
- **المخارج المنفصلة:** إما مرحّل (تلامس جاف يتحمل تيارًا أكبر ويعزل) أو ترانزستور (أسرع وبلا تآكل لكنه محدود التيار). وأي حمل حثي (ملف صمام ملفي، مرحّل) يحتاج إلى ثنائي حر أو كابح على طرفيه وإلا أتلف جهد القطع مخرج البطاقة (القسم 15.11).
- **الارتداد (Bounce) وإزالته:** التلامس الميكانيكي يرتد بضع ميلي ثوانٍ عند التبديل، وبطاقات الدخل السريعة تعدّ ذلك عدة تبديلات؛ ولذلك تُهيأ مرشحات إزالة الارتداد (Debounce) بزمن يلائم الإشارة، ويُوثَّق زمنها لأنه يدخل في زمن استجابة الحماية.

الشكل 3-6: *الإشارات المنفصلة: (أ) تلامس جاف تبلّله بطاقة الدخل، مقابل تلامس رطب يأتي جهده من الميدان ويحتاج إلى مدخل معزول؛ (ب) الحساس ثلاثي الأسلاك PNP يوصل +24 V إلى الحمل بينما NPN يسحبه إلى 0 V، ولكل منهما نوع بطاقة يلائمه؛ (ج) نطاقات تيار حساس NAMUR ثنائي الأسلاك: الحالة والعطل معًا في تيار واحد.*

3.3.3 الإشارة الرقمية والتحويل بين التناظري والرقمي

ما بين الحساس والشاشة تُحوَّل الإشارة مرتين على الأقل: من تناظرية إلى رقمية في بطاقة الدخل (أو داخل المرسل الذكي)، ومن رقمية إلى تناظرية في بطاقة الإخراج (أو داخل الموضّع). وثلاثة أشياء تضيع في هذا التحويل (الشكل 3-7): **ما بين العيّنات** (زمن المسح: بطاقة تقرأ كل 100 ms قد تفوتها قمة استمرت 30 ms)، و**ما دون التمييز** (12 bit تقسّم المدى إلى 4096 درجة أي نحو 0.024%، و16 bit إلى 65536 درجة؛ وتيار 20 mA على 12 bit يعني خطوة نحو 5 µA)، و**التعرج (Aliasing)**: إشارة أسرع من نصف معدل أخذ العيّنات تظهر ترددًا وهميًا بطيئًا لا وجود له، ولذلك يسبق المحول مرشح تناظري مضاد للتعرج ويُختار زمن المسح وفق أسرع تغير حقيقي في العملية (القسم 3.6، والقسم 44.7).

ما تضيفه الإشارة الرقمية: فوق التيار يركب **HART** إشارة ترددية صغيرة (1200 Hz و 2200 Hz) تنقل التشخيص والتهيئة والمتغيرات الثانوية من دون أن تمس القياس (الفصل 23). وفي الشبكات الحقلية (Foundation Fieldbus وPROFIBUS PA) تُنقل القيمة مع **حالة (Status)**: جيدة أو غير مؤكدة أو سيئة، فيعرف المتحكم متى يثق بها ومتى يتحول إلى اليدوي أو إلى قيمة بديلة (الفصل 40)؛ وفي Ethernet الصناعي و OPC UA تُنقل مئات القيم مع ختم زمني. والثمن: كل إشارة رقمية تحتاج إلى تهيئة (عنوان، سرعة، صيغة) وإلى تشخيص من نوع مختلف حين تتوقف، فبدل الفولتميتر يلزم محلل بروتوكول (القسم 23.12).

الشكل 3-7: *ما يضيع في التحويل التناظري الرقمي: (أ) ما بين العيّنات حين يكون زمن المسح أبطأ من التغير؛ (ب) درجات التمييز التي يحددها عدد البتات (3 و6 بت للإيضاح، والعملي 12 إلى 16 بت)؛ (ج) التعرج: موجة 1.9 Hz تُقرأ بمعدل 2 Hz فتبدو موجة بطيئة وهمية.*

جدول مقارنة: طرق نقل إشارة القياس إلى نظام التحكم

المعيار	تناظرية 4–20 mA	4–20 mA + HART	حقلية رقمية (FF H1 / PROFIBUS PA)	إشارة منفصلة (تلامس / NAMUR)
ما يُنقل	قيمة واحدة مستمرة	القيمة + تهيئة وتشخيص	قيم متعددة وتشخيص وتهيئة	حالة (فتح/غلق)
الزمن حتى الوصول	لحظي	القيمة لحظية، HART بطيء (ثوانٍ)	دوري بدورة كبرى (Macrocycle) من 0.25 إلى 1 s	لحظي
كشف عطل الحلقة	NE43 (≤ 3.6 أو ≥ 21 mA)	كذلك + حالة الجهاز	حالة القيمة (Good/Bad) مع كل قراءة	مراقبة الخط بمقاومتين (NAMUR)
أسلاك وتغذية	زوج واحد يغذي ويقرأ	الزوج نفسه	زوج واحد لعدة أجهزة (عادةً 4 إلى 8 في المقاطع الآمنة جوهريًا)	زوج لكل نقطة
ما يخدمه أفضل	حلقات التحكم والحماية	حلقات التحكم مع صيانة عن بعد	الوحدات الجديدة كثيفة الأجهزة	التعشيق والحماية والأوامر
نقطة الضعف	لا تشخيص للجهاز نفسه	التهيئة قد تُغيّر من الميدان بلا رقابة	يحتاج إلى تدريب وأدوات وتصميم للمقاطع (Segments)	تلامس يتأكسد، ارتداد

كيف أختار؟ لحلقات التحكم والحماية في منشأة قائمة: 4–20 mA + HART هو الافتراضي، ولا تُختار الشبكة الحقلية إلا لوحدة جديدة كاملة لها مقاطع مصممة وفريق مدرّب وأدوات تشخيص؛ والإشارة المنفصلة للتعشيق والأوامر لا للقياس المستمر. وما لا يظهر في الجدول أن الحكم الحقيقي هو من سيصون الحلقة بعد خمس سنوات: الإشارة

التي لا يملك فريق الصيانة أدواتها تصير أبطأ إصلاحًا مهما كانت أغنى بالتشخيص. والخطأ الأكثر كلفة ترك تهيئة HART مفتوحة من الميدان بلا صلاحيات ولا سجل، فيتغير مدى مرسل حماية «أثناء الفحص» ولا يعرف أحد.

3.3.4 الحلقة المحلية مقابل المركزية، والمديان الهوائيان

مدى الإشارة الهوائية ليس واحدًا. المدى الشائع **20 إلى 100 kPa (3 إلى 15 psig)**، ويقابله مدى ثانٍ مستعمل على نطاق واسع في صمامات وحلقات الإنتاج: **40 إلى 200 kPa (6 إلى 30 psig)**. والثاني يعطي ضعف القوة تقريبًا لمساحة الغشاء نفسها، فيُختار للمشغّلات الكبيرة ولصمامات الإغلاق ذات فرق الضغط العالي، ولتقصير زمن الشوط. وينبني على ذلك أثران عمليان:

- **العنصر النهائي والمتحكم والموضّع يجب أن تكون على المدى نفسه.** ومتحكم 20–100 kPa يقود مشغّلًا نوابضه معايرة لـ 40–200 kPa سيتحرك في الجزء الأدنى من الشوط فقط ولن يبلغ الإغلاق أو الفتح الكامل. وهذا من أشيع ما يُكتشف في التشغيل التجريبي لحلقة هوائية مركّبة من قطع مخلوطة.
- **محوّل التيار إلى ضغط (I/P) يُطلب بمدى خرجه** لا بمدى دخله وحده، ويُذكر المدى في ورقة البيانات وفي وسم الجهاز.

ومتى تُختار الحلقة المحلية أصلًا؟ المتحكم المحلي يستشعر المتغيّر مباشرة (بلا مرسل) ويولّد إشارة هوائية تقود صمامًا، ويُركَّب قرب نقطة الاستشعار: على حامل الصمام (Yoke)، أو على الوعاء، أو على عمود أنبوبي، أو على جسر (Bridle). ويُغذّى بهواء أو بغاز أجهزة عبر مرشح ومنظّم.

جدول مقارنة: الحلقة المحلية مقابل الحلقة المركزية

المعيار	حلقة محلية هوائية	حلقة مركزية (مرسل ← غرفة تحكم)
المكوّنات اللازمة	متحكم + عنصر نهائي فقط	مرسل + كابل/أنبوب + متحكم + عنصر نهائي
الحاجة إلى مرسل وموضّع/محوّل	لا؛ يُستغنى عنهما غالبًا	نعم
كلفة المتحكم مفردًا	أعلى من متحكم لوحة	أقل
كلفة الحلقة كاملة	الأدنى	الأعلى
الحاجة إلى مسارات كابلات أو أنابيب إلى غرفة التحكم	لا	نعم
المراقبة والاتجاه والتسجيل	لا شيء؛ قراءة محلية فقط	كاملة
اكتشاف المشكلات	متأخر؛ لا صورة كلّية	مبكر
أين يُختار	منشآت إنتاج صغيرة، حلقات غير حرجة، مواقع بلا كهرباء	منشآت متوسطة وكبيرة، حلقات حرجة ومترابطة

والقاعدة العملية: **كلما صغرت المنشأة وقلّت حرجية الحلقة رجحت الحلقة المحلية.** ومنشآت إنتاج النفط والغاز الصغيرة تعمل بالكامل على تحكم محلي في كثير من الأحيان. وحتى المجمّعات الكبيرة ذات التحكم المركزي المكثّف تحتفظ بحلقات يبقى التحكم فيها محليًا لأنه أكثر عملية وأبسط. **والعيب الجوهري للتحكم المحلي ليس تقنيًا بل إدراكي:** لا أحد يرى الصورة الكاملة، فتتأخر ملاحظة المشكلة وتصحيحها.

3.3.5 التحويل بين الإشارة والقيمة الهندسية: الصيغة الواحدة لكل الإشارات

كل الإشارات الخطية تتبع صيغة واحدة، سواء كانت 4–20 mA أو 1–5 V أو 3–15 psi أو 20–100 kPa. تُحسب أولًا **نسبة الإشارة (r)**، أي موقعها بين حدها الأدنى وحدها الأعلى، ثم تُنقل هذه النسبة إلى مدى القياس (الشكل 3-8):

- **من الإشارة إلى القيمة:** $r = (S - S_0) \div (S_{100} - S_0)$، ثم $PV = LRV + r \times (URV - LRV)$.
- **من القيمة إلى الإشارة:** $r = (PV - LRV) \div (URV - LRV)$، ثم $S = S_0 + r \times (S_{100} - S_0)$.

حيث S_0 وS_{100} حدا الإشارة (4 و20 mA مثلًا)، وLRV وURV حدا مدى القياس (القسم 4.3). ولـ 4–20 mA تصير النسبة $r = (I - 4) \div 16$، ولـ 3–15 psi تصير $r = (P - 3) \div 12$.

الشكل 3-8: *مقاييس الإشارات القياسية متراصفة: كل مستوى أفقي يقابل النسبة نفسها من المدى في كل إشارة. والخط البرتقالي مثال: 13.2 mA تقابل 57.5% من المدى، أي 3.3 V و9.9 psi و66 kPa، وفي مرسل مداه 0–400 °C تقابل 230 °C. وحدود NE43 على عمود التيار تبين نطاق التشبع ونطاق العطل.*

جدول: القيم المتقابلة في الإشارات القياسية

نسبة المدى	4–20 mA	1–5 V (على 250 Ω)	3–15 psi	20–100 kPa	6–30 psi
0%	4	1	3	20	6
25%	8	2	6	40	12
50%	12	3	9	60	18
75%	16	4	12	80	24
100%	20	5	15	100	30

وتُكتب الإشارة الهوائية في بعض الوثائق 0.2–1.0 kg/cm² على وجه التقريب، والدقيق أن 3 psi = 0.211 kg/cm² و15 psi = 1.055 kg/cm²، والمقابل المتري المعياري 20–100 kPa.

مثال محلول (أربع حالات يواجهها الفني):

- **(أ) من التيار إلى القراءة:** مرسل حرارة مداه 0–400 °C يعطي 13.2 mA. r = (13.2 − 4) ÷ 16 = 0.575، والحرارة = 400 × 0.575 = **230 °C**.
- **(ب) مدى لا يبدأ من الصفر:** مرسل ضغط مركّب مداه −1 إلى +3 bar يعطي r = 3 ÷ 16 = 0.1875 mA. 7، والضغط = −1 + 4 × 0.1875 = **−0.25 bar**. والخطأ الشائع هنا ضرب النسبة في URV وحده، فيخرج 0.56 bar.
- **(ج) هوائي:** مرسل مستوى هوائي مداه 0–2.5 m يعطي r = 10.2 psi. 0.6 = 12 ÷ (10.2 − 3)، والمستوى = **1.5 m**.
- **(د) من الأمر إلى الإشارة:** المطلوب فتح صمام 35%. تيار الأمر = 4 + 0.35 × 16 = **9.6 mA**. ولو كان المشغّل على المدى 6–30 psi، فضغط الإشارة = 6 + 24 × 0.35 = **14.4 psi**.

فخ التدفق بالضغط التفاضلي: إذا كان الجذر التربيعي يُستخرج في النظام لا في المرسل، فالتيار يمثل الضغط التفاضلي لا التدفق. مرسل مداه 0–250 mbar لتدفق أقصى 80 m³/h يعطي 8 mA. نسبة الضغط التفاضلي = 25% = 16 ÷ (4 − 8)، ونسبة التدفق = 50% = √0.25، أي **20 m³/h لا 40 m³/h.** وتفصيل الجذر في قياس التدفق (الفصل 8).

الصمام الذي يفتح بانقطاع الهواء (Air-to-Close): في كثير من الأنظمة يُعرَّف الخرج بنسبة فتح الصمام، ويُعكس في كتلة الخرج أو في الموضّع. فيبقى 0% «مغلق» على الشاشة، بينما الإشارة الفعلية إلى الصمام 20 mA. لذلك يُكتب في ورقة بيانات الحلقة: هل الخرج نسبة فتح أم نسبة إشارة؟ ويُتحقق من ذلك في اختبار الحلقة بقياس التيار الفعلي عند 0% و100%.

> **دور المهندس ودور الفني:** المهندس يحدد المدى في ورقة البيانات، ويحدد أين يُستخرج الجذر، وتعريف الخرج (فتح أم إشارة). والفني يحسب القيمة المتوقعة لكل نقطة اختبار قبل أن يبدأ، ويقيس التيار أو الجهد أو الضغط الفعلي، ويقارنه بالشاشة عند 0% و50% و100% على الأقل.

◆ ◆ ◆

3.4 هرم الأتمتة

الشكل 3-9: *هرم الأتمتة وفق ISA-95 من الحساسات في المستوى 0 إلى تخطيط الأعمال في المستوى 4.*

يرتّب معيار ISA-95 المنشأة في مستويات؛ كلما نزلنا صار الزمن أقصر (ميلي ثوانٍ في المستوى 1، أيام في المستوى 4) والاعتمادية المطلوبة أعلى. مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم يعمل في المستويات 0–2 أساسًا، لكن بياناته تصعد إلى 3 و4، ومتطلبات الأمن السيبراني تنزل منها (الفصل 24). ومكوّنات المستوى 1 وحدات التحكم (PLC وDCS) وبطاقات الإدخال والإخراج، ومكوّنات المستوى 2 محطات التشغيل والهندسة والمؤرِّخ (تُفصَّل في الفصل 21).

3.4.1 واجهة الإنسان والآلة وأنظمة التحكم: تعريف مختصر

واجهة الإنسان والآلة (Human–Machine Interface – HMI) هي الحدّ الذي يعبر منه كل ما يراه المشغّل وكل ما يأمر به: القيم والحالات والإنذارات من الآلة إليه، والأوامر

ونقاط الضبط والإقرار منه إلى الآلة. وتقع في المستوى 2 من الهرم، أما المنطق فيبقى في المستوى 1، ولذلك تستمر الوحدة في العمل إذا تجمدت الشاشة. ويُفصَّل تصميم الواجهات وصلاحياتها وإدارة الإنذارات في الفصل 22. أما نظاما DCS وSCADA، ولأي مشكلة صُمم كل منهما، فيُشرحان في الفصل 21.

3.5 جودة البيانات

الرقم المعقول على الشاشة لا يثبت جودة القياس. يجب أن يميّز النظام والمشغّل بين قيمة:

- صالحة وحديثة (Good).
- خارج النطاق (Out of Range: خارج منطقة القياس 3.8–20.5 mA؛ وإشارة العطل المتعمدة 3.6 mA أو أقل، أو 21 mA أو أكثر، وفق NAMUR NE43).
- قديمة بسبب فقد الاتصال (Stale).
- غير متاحة (Bad / Not Connected).
- مفروضة أثناء اختبار أو صيانة (Forced / Simulated).
- بديلة عن مصدر آخر (Substituted / Fallback).

أنظمة DCS تحمل هذه الحالة مع القيمة (Quality Status) وتلوّن العرض بحسبها؛ ومن مسؤولية مهندس التحكم أن تُستخدم هذه الحالة في المنطق: لا يُبنى قرار حماية على قيمة Bad.

3.6 الدقة والاستجابة والتأخير على طول السلسلة

خطأ الحلقة ليس خطأ المرسل وحده؛ هو مجموع مساهمات الحساس والمرسل والبطاقة والتحجيم. وزمن استجابة الحلقة هو تقريبًا مجموع زمن الحساس (الغمد الحراري Thermowell) قد يضيف عشرات الثواني) وزمن تخميد المرسل (Damping) وزمن المسح وزمن حركة المشغّل (Actuator). ويعالج الفصل 4 الدقة، والقسم 3.6.1 تأخيرات

العملية، والقسم 18.8 تجارب القفزة؛ هنا يكفي المبدأ: أبطأ عنصر في السلسلة يحدد سرعتها، وأسوأ عنصر يحدد دقتها.

مثال محلول (كم يتأخر ما يراه المشغل؟): حساس حرارة في غمد صغير رقيق الجدار ثابته الزمني 3 s (وهي قيمة سريعة للإيضاح؛ فالغمد الصناعي المعتاد أبطأ كثيرًا وقد يبلغ عشرات الثواني)، ومرسل بتخميد 1 s، وبطاقة إدخال ومتحكم يمسحان كل 0.5 s، وشبكة تنقل القيمة إلى محطة التشغيل خلال 1 s، وشاشة تُحدَّث كل 1 s. فحين تتغير الحرارة الحقيقية فجأة يرى المتحكم نحو ثلثي التغير بعد نحو 4.5 s، ويراه المشغل بعد نحو 6.5 s، ثم يحتاج هو نفسه إلى ثوانٍ أو دقائق ليدرك ويتصرف. ولهذا لا تُضبط حلقة سريعة على حساس بطيء، ولا يُلام المشغل على إنذار وصل بعد فوات الوقت، ويُراجع أطول عنصر في السلسلة، وهو هنا الغمد، قبل أي تحسين آخر.

الشكل 3-10: *ميزانية التأخير على طول سلسلة القياس من الحساس إلى تصرف المشغل: الغمد والحساس أكبر المساهمين في هذا المثال، وزمن إدراك المشغل أكبر من كل ما قبله.*

3.6.1 تأخيرات العملية نفسها: السعة والمقاومة وتأخر النقل

ما سبق يخص التأخير على طول سلسلة القياس؛ لكن أكبر التأخيرات غالبًا في **العملية** التي نقيسها، وهي ثلاثة أنواع يجب أن يميزها المهندس لأنها تحدد قابلية الحلقة للضبط (الشكل 3-11):

نوع التأخير	من أين يأتي	كيف يبدو في الاستجابة	مثال
السعة (Capacitance)	قدرة العملية على تخزين كتلة أو طاقة: حجم الخزان، كتلة المعدن والمائع	تباطؤ أسّي يبدأ فورًا: منحنى الرتبة الأولى بثابت زمن τ	خزان كبير يستجيب مستواه ببطء لتغير التدفق
المقاومة (Resistance)	ما يعارض الانتقال: الصمام والأنبوب، انتقال الحرارة عبر الغمد والجدار	تُضرب في السعة لتعطي ثابت الزمن: τ = R × C، فكلما كبرت كبر	غمد حراري سميك يجعل الحساس يرى الحرارة بعد دقائق
تأخر النقل (Transportation / Dead Time)	زمن انتقال المادة أو الإشارة من مكان التغير إلى مكان القياس	لا استجابة إطلاقًا لمدة θ ثم تبدأ	محلل على خط عينة طوله 20 m، أو ناقل حزام إلى الميزان

القاعدة العملية: **السعة والمقاومة تُبطئ الحلقة لكنها لا تمنع ضبطها؛ الزمن الميت هو ما يحدّ كسب المتحكم**، لأن المتحكم لا يستطيع تصحيح ما لم يره بعد. لذلك يُلخَّص سلوك معظم الحلقات بنموذج «رتبة أولى مع زمن ميت» (FOPDT) بثلاثة أرقام: الكسب K، وثابت الزمن τ، والزمن الميت θ، وتُبنى عليه طرق الضبط (القسم 18.7).

مثال محلول (تقدير التأخيرات من الرسم):

- **المعطيات:** خطوة في خرج المتحكم عند t = 0؛ لم تتحرك PV حتى t = 8 s، ثم بلغت 63.2% من تغيرها الكلي عند t = 20 s.
- **الافتراضات:** لا اضطراب آخر أثناء الاختبار؛ الصمام استجاب فورًا.
- **الحل بالوحدات:** θ = 8 s؛ τ = 20 − 8 = 12 s؛ النسبة θ/τ = 0.67.

- **معنى النتيجة:** حلقة متوسطة الصعوبة: نسبة أقل من 0.3 سهلة الضبط وتحتمل كسبًا عاليًا، وأعلى من 1 صعبة وتحتاج إلى كسب منخفض أو تعويض زمن ميت. وإذا كان θ من خط عينة طويل فالحل الهندسي تقصيره أو زيادة سرعة السحب، لا «ضبط أفضل».

الشكل 3-11: *تأخيرات العملية: (أ) استجابة الرتبة الأولى لسعات مختلفة؛ (ب) تأخر النقل في خط عينة محلل؛ (ج) نموذج FOPDT وقراءة θ وτ من الرسم؛ (د) مصادر التأخير في الحلقات الشائعة.*

3.7 قاعدة التشخيص: تتبع المسار

حين تكون القراءة غير صحيحة، تتبع المسار من العملية إلى الشاشة ولا تقفز:

1. القيمة الفعلية في العملية (قياس مرجعي محلي).
2. قراءة الجهاز نفسه (شاشة المرسل أو HART).
3. الإشارة على الأطراف (mA بالمقياس).
4. القناة الخام في النظام (Raw Counts).

5. التحجيم (Scaling) والجذر التربيعي والترشيح.
6. المتغير المستخدم في المنطق (قد يكون نسخة أخرى أو مُختارًا من عدة مرسلات).
7. العرض والتسجيل (الشاشة والمؤرخ قد يعرضان قيمًا بمعالجة مختلفة).

أغلب الأعطال «الغامضة» تُحل في الخطوات 3 و5 و6. ويُطبَّق هذا التتبع على الحساسات في القسم 40.3، ويُوسَّع إلى منهجية كاملة في الفصل 39، وإلى دليل ميداني مفصل في الفصل 111 من الجزء القادم.

3.8 حالة ميدانية: الخوارزمية صحيحة والصمام عالق

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

حلقة تحكم بحرارة مخرج مبادل تتذبذب ببطء. أُعيد ضبط PID مرات، ثم بُدّل المرسل، ولم يتغير شيء. عند تتبع السلسلة من الجهة الأخرى (المتحكم ← قناة الإخراج ← الصمام) تبيّن أن أمر الخرج يتغير بسلاسة، لكن موضع الصمام يتحرك على قفزات 3–4% بسبب احتكاك سكوني (Stiction) في الحشوة. الخوارزمية كانت تعوّض صمامًا لا يستجيب، فتتذبذب. الحل صيانة الصمام والموضّع (Positioner)، لا المتحكم. الدرس: السلسلة لها اتجاهان، والتشخيص يشمل جهة التنفيذ كما يشمل جهة القياس.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
نوع الإشارة والتغذية	يختار نوع الإشارة لكل جهاز (ثنائي أو رباعي الأسلاك، تلامس أو NAMUR)، ويحدد مصدرًا واحدًا لتغذية كل حلقة ونوع البطاقة المطابق	يتحقق قبل التوصيل من نوع البطاقة (نشطة أو سلبية، ساحبة أو مصدِّرة) ومن عدم وجود مصدرين في الحلقة

المهمة	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
ميزانية الجهد	يحسب جهد الحلقة عند 22 mA مع الكابل والحاجز والمؤشرات	يقيس الجهد على طرفي المرسل عند أعلى تيار، ويبلغ عن أي مقاومة غير محسوبة
جودة البيانات	يحدد سلوك المنطق عند القيمة Bad أو Stale، ولا يبني حماية على قيمة غير صالحة	يفصل السلك في الاختبار ويتحقق من ظهور «قيمة سيئة» على الشاشة لا صفر
التأخير والاستجابة	يقدّر θ وτ، ويقرر هل العلاج في العملية أم في الضبط	ينفذ تجربة القفزة ويسجل الأزمنة والقيم، ويضبط تخميد المرسل كما في ورقة البيانات
التشخيص	يرتب نقاط الفحص على المسار في جهتي القياس والتنفيذ	يقيس عند كل نقطة (mA على الأطراف، وموضع الصمام الفعلي مقابل الأمر) ويسجل ما وجده

3.9 الأخطاء الشائعة

- اعتبار المرسل «الحلقة» وإهمال بقية السلسلة عند تحديد الدقة أو زمن الاستجابة.
- تجاهل حالة الجودة (Quality) في المنطق واستخدام قيمة Bad كأنها صفر.
- تطبيق الجذر التربيعي مرتين (في المرسل وفي النظام) لقياس تدفق بالضغط التفاضلي.
- ضبط PID لتعويض عيب في الصمام أو في التركيب.
- الخلط بين سرعة تحديث الشاشة وزمن مسح المتحكم.

3.10 ملخص

القيمة التي تراها على الشاشة مرت بسلسلة من العناصر (حساس، مرسل، كابل، تكييف، بطاقة، تحويل، قاعدة بيانات، شاشة)، وكل عنصر يضيف تأخيرًا وخطأً ويحمل احتمال عطل. أبطأ عنصر يحدد سرعة الحلقة، وأسوأ عنصر يحدد دقتها، وأطول تأخير كثيرًا ما يكون في العملية نفسها لا في السلسلة. وحالة الجودة الملحقة بالقيمة تخبرك هل يجوز الوثوق بها. وعند التشخيص اتبع نقاط الفحص المرتبة في القسم 3.7 ولا تقفز بينها؛ وإذا طالت السلسلة فقسّمها عند نقطة يمكن القياس فيها (صندوق التوصيل، طرف الخزانة) واسأل: «هل الإشارة هنا صحيحة؟»، فينحصر العطل في نصف السلسلة ثم في ربعها. وتذكّر عند التطبيق ثلاثًا: اعرف نوع الإشارة ومعناها قبل قياسها، وقارن دائمًا بقيمة مستقلة (مقياس محلي، عداد مرجعي)، وسجّل ما وجدته حتى لا يعيد غيرك الطريق نفسه.

وفي الفصل التالي: الفصل 4 «الوحدات والمديات وأخطاء القياس»؛ لأن الحكم على خطأ كل عنصر في السلسلة يحتاج إلى لغة دقيقة للوحدات والمدى وأساس التعبير عن الخطأ.

3.11 أسئلة التقييم الذاتي

1. ارسم سلسلة القياس والتحكم لحلقة ضغط بخار بصمام تحكم هوائي وسمِّ إشارة كل وصلة.
2. ما الفرق بين الحساس (Sensor) والمحوّل (Transducer) والمرسل (Transmitter)؟ أعطِ مثالًا يجمعها في جهاز واحد.
3. لماذا يُفضَّل 4–20 mA على 0–20 mA؟
4. بطاقة AI بدقة 12 bit على مدى 0–100 bar؛ ما أصغر تغير يمكن تمييزه؟
5. اذكر ثلاثة أشياء تُفقد عند تحويل إشارة تناظرية إلى رقمية.
6. في أي مستوى من هرم الأتمتة يقع SIS؟ ولماذا لا يوضع في المستوى 2؟

7. كيف تتصرف حلقة تحكم إذا صارت قيمة القياس Bad؟ وما الذي يجب أن يحدده المصمم؟
8. مرسل تدفق DP يُخرج إشارة خطية بالضغط التفاضلي، وبطاقة النظام مهيأة على استخراج الجذر التربيعي (Square Root). ماذا ينتج؟
9. رتّب الخطوات السبع للتشخيص وحدّد أيها يحتاج مقياس تيار.
10. في الحالة 3.8، ما القياس الذي كان سيكشف العطل من أول يوم؟

مراجع الفصل: مخطط حلقة القياس والتحكم ومقارنة التصميم الوظيفي/المكاني (Toyo Engineering، مدخل هندسة C&I)؛ مكوّنات الحلقة وأنواع الإشارات، (PAControl Fundamentals of Control)؛ هرم الأتمتة وأنواع الإشارات والتحويل A/D (Shardt، Automation Engineering)؛ NAMUR NE43؛ ISA-95؛ R51 (Field Instrumentation في المرسلات الهوائية)؛ وR64 (مبادئ الأجهزة: التحكم المحلي والمديان الهوائيان، 3.3)؛ وANSI/ISA-101.01 (واجهات الإنسان والآلة في أنظمة الأتمتة)؛ وEEMUA 201 (تصميم واجهات المشغّل)؛ وIEC 61511-1 البند 11.7 (وتُراجع البنود المقابلة في الطبعة المعتمدة، فمتطلبات إعادة الضبط اليدوي موزعة أيضًا على البند 11.2) (واجهة المشغّل لنظام السلامة)؛ وR60 (DOE Fundamentals Handbook، تأخيرات العملية، 3.6.1).

الفصل 4: الوحدات والمديات وأخطاء القياس

> **لمن هذا الفصل:** المهندس الجديد والفني المتقدم؛ ويعود إليه الجميع عند قراءة ورقة بيانات أو شهادة معايرة.
>
> **الفكرة الأساسية:** عدد الخانات على الشاشة ليس دقة، والدقة المكتوبة في الكتالوج مشروطة، والمدى الصحيح يُختار من حدود التشغيل لا من ضغط التصميم.

4.1 نظام الوحدات

تُثبَّت وحدات المشروع في وثيقة أساس التصميم (الفصل 25) ولا تُترك لاجتهاد كل مورد. النظام الدولي للوحدات (SI) هو الأصل في أغلب العالم، والإمبراطوري يسود في المشاريع الأمريكية وفي جزء من وثائق مصنّعي التوربينات. الجدول يوضح ما يشيع في الميدان:

المتغير	SI	شائع في الميدان	تحويل مفيد
الضغط	Pa، kPa، MPa	bar، barg، psi، kg/cm²، mmH₂O، inH₂O	1 bar = 100 kPa = 14.504 psi = 1.0197 kg/cm²
الحرارة	K، °C	°C، °F	°F = 1.8·°C + 32
التدفق الحجمي	m³/s	m³/h، Nm³/h، Sm³/h، MMSCFD، l/min، GPM	1 m³/h = 4.403 GPM
التدفق الكتلي	kg/s	kg/h، t/h، lb/h	1 t/h = 2204.6 lb/h

المتغير	SI	شائع في الميدان	تحويل مفيد
المستوى	m	mm، %، inH_2O (هيدروستاتيكي)	—
القدرة	W	kW، MW، hp	1 hp = 0.7457 kW
الاهتزاز	m/s^2	mm/s (سرعة)، µm p-p (إزاحة)، g (تسارع)	—

يجب ذكر شروط المرجع مع كل تدفق غاز: الشروط النظامية (Normal: 0 °C، 1.01325 bar) في الممارسة الأوروبية (DIN 1343)، والشروط القياسية (Standard: 15 °C أو 60 °F) في النفط والغاز الأمريكي؛ الفرق بينهما نحو 5.5% عند 15 °C ونحو 5.7% عند 60 °F، وهذا وحده سبب أخطاء في حسابات تجارية كثيرة.

4.1-أ مقاييس الحرارة الأربعة، ووحدات الطاقة الحرارية، والحرارة النوعية

درجة الحرارة (Temperature) شدةُ الطاقة الحرارية في الجسم، وهي ما يحدد اتجاه سريان الحرارة: إذا تلامس جسمان سرت الحرارة من الأعلى حرارةً إلى الأدنى. أما **الحرارة (Heat)** بالمعنى الطاقي فكميةٌ من الطاقة لا شدة، وهي التي تُحسب في الأحمال الحرارية وتحجيم صمامات البخار والوقود. والخلط بين الاثنين من أشيع مصادر أخطاء الوحدات في أوراق البيانات.

المقاييس الأربعة:

المقياس	الرمز	الصفر عنده	الاستعمال في الميدان
السيلزي (Celsius)	°C	نقطة انصهار الجليد	مقياس العمليات الافتراضي في وثائق المشاريع

المقياس	الرمز	الصفر عنده	الاستعمال في الميدان
الفهرنهايتي (Fahrenheit)	°F	مرجع تاريخي	أوراق بيانات ووثائق أمريكية، وأجهزة قديمة
الكلفن (Kelvin)	K	الصفر المطلق	مقياس SI المطلق؛ يلزم في قوانين الغازات وحسابات التدفق والانضغاطية
الرانكيني (Rankine)	°R	الصفر المطلق	المقابل المطلق للفهرنهايتي في الوثائق الإمبراطورية

التحويلات: °C = (°F − 32) ÷ 1.8، و°F = 1.8 × °C + 32، وK = °C + 273.15، و°R = °F + 459.67.

الفخّ الأول (فرق الحرارة لا يُحوَّل كالحرارة): إزاحة الأصل (32) تخصّ **قيمة** الحرارة لا **فرقها**. فارتفاع قدره 10 °F يساوي 10 ÷ 1.8 = 5.56 °C وليس −12.2 °C. وينطبق هذا على كل ما يُكتب في أوراق البيانات على صورة فرق: ارتفاع الحرارة عبر مبادل، والمنطقة الميتة لمفتاح، وحدّ أثر الحرارة المحيطة على مرسل. والقاعدة: **1 K = 1 °C**، و**1 °R = 1 °F** حين يكون الحديث عن فرق.

وحدات الطاقة الحرارية:

الوحدة	التعريف	التكافؤ
الجول (J)	وحدة SI للطاقة	الأساس
الوحدة الحرارية البريطانية (Btu)	الطاقة اللازمة لرفع حرارة رطل واحد من الماء درجة فهرنهايت واحدة عند الضغط الجوي	1 Btu = 1055.06 J
السعر (Calorie، cal)	الطاقة اللازمة لرفع حرارة غرام واحد من الماء درجة سيلزية واحدة عند الضغط الجوي	1 cal = 4.184 J
السعر الكبير (kcal)	ألف سعر	1 kcal = 4.184 kJ

الوحدة	التعريف	التكافؤ
الثيرم (Therm)	وحدة فوترة الغاز	1 therm = 10^5 Btu = 105.5 MJ
طن التبريد (Ton of Refrigeration)	وحدة قدرة تبريدية	1 TR = 12,000 Btu/h = 3.517 kW

وللقدرة الحرارية: **1 kW = 3412.1 Btu/h**، و**1 MMBtu/h = 293.07 kW**. ولفظ MMBtu يعني مليون Btu (M الرومانية للألف مكررة)، وهو من أكثر ما يُخطئ فيه المهندس الجديد حين يقرؤه «ميغا».

الحرارة النوعية (Specific Heat): تُعرَّف في الوثائق الإمبراطورية بأنها **نسبة** الحرارة اللازمة لرفع حرارة وزن معين من مادة درجة فهرنهايت واحدة، إلى ما يلزم لرفع حرارة الوزن نفسه من الماء درجة فهرنهايت واحدة — فهي عدد بلا وحدة. وفي SI تُعطى قيمةً بالوحدات kJ/(kg·K). والمريح أن النسبة تساوي عدديًا القيمة بوحدة Btu/(lb·°F)، ويُحوَّل إلى SI بالضرب في 4.1868: **1 Btu/(lb·°F) = 4.1868 kJ/(kg·K)**، فالماء حرارته النوعية 1.00 في النظام الأول و4.19 في الثاني.

المادة	Btu/(lb·°F) (= النسبة)	kJ/(kg·K)
الماء السائل	1.00	4.19
البخار المحمَّص (ضغط معتدل)	0.48	2.0
هيدروكربون سائل خفيف	0.50	2.1
الهواء (عند ضغط ثابت)	0.24	1.005
الفولاذ الكربوني	0.117	0.49
الزيت الحراري	0.45	1.9

مثال محلول — قراءة حمل حراري بوحدتين والتحقق منه

المعطيات: ورقة بيانات مبادل تذكر الحمل 4.2 MMBtu/h، وماء تبريد حرارته النوعية 1.00 Btu/(lb·°F)، وارتفاع حرارة مسموح 10 °F.

الافتراضات: لا فواقد إلى المحيط؛ الحرارة النوعية ثابتة في المدى؛ الماء لا يتبخر.

الحل بالوحدات:

- القدرة: 4.2×10^6 Btu/h ÷ 3412.1 = **1231 kW ≈ 1.23 MW.**
- التدفق الكتلي بالوحدات الإمبراطورية:

- $\dot{m} = Q \div (Cp \times \Delta T)$
- $= 4.2 \times 10^6 \div (1.00 \times 10) = 420{,}000$ lb/h
- $= 190{,}500$ kg/h = **52.9 kg/s**.

- التحقق بالوحدات SI:

– $\Delta T = 10 \div 1.8 = 5.56$ K، و$Cp = 4.19$ kJ/(kg·K)

- $\dot{m} = Q \div (Cp \times \Delta T)$
- $= 1231 \div (4.19 \times 5.56) = 1231 \div 23.3 =$ **52.9 kg/s**.

معنى النتيجة: الطريقان يعطيان الرقم نفسه، وهذا هو التحقق الصحيح. ولو حُوِّل ΔT بالمعادلة الكاملة (10 °F ← −12.2 °C) لخرج تدفق سالب بلا معنى. وهذا الرقم — 52.9 kg/s عند 1000 kg/m³ أي نحو 190 m³/h — هو ما يُبنى عليه اختيار مدى عداد ماء التبريد وسعة صمام التحكم، فخطأ في الوحدات هنا ينتقل مباشرة إلى وسم الجهاز.

◆ ◆ ◆

4.1-ب جداول التحويل المرجعية للوحدات الهندسية

هذه الجداول مرجع سريع يعود إليه المهندس والفني عند قراءة ورقة بيانات أو شهادة معايرة أو مخطط من مورد يعمل بنظام وحدات آخر. وقيمها محسوبة من التعريفات

الدولية: القدم 0.3048 m بالضبط، والرطل 0.45359237 kg بالضبط، وتسارع الجاذبية المعياري 9.80665 m/s². ويكفي في العمل الميداني أربعة أرقام معنوية، أما في حسابات قياس المحاسبة (Custody Transfer) فتُستعمل القيم الكاملة من المعيار المعتمد في العقد.

جدول: الضغط (أ): الوحدات الرئيسة. يُقرأ كل صف هكذا: وحدة واحدة من وحدة أول الصف تساوي ما في الأعمدة

الوحدة	bar	kPa	psi	kg/cm²	atm
1 bar	1	100	14.504	1.0197	0.98692
1 psi	0.068948	6.8948	1	0.070307	0.068046
1 kg/cm²	0.98067	98.067	14.223	1	0.96784
1 atm	1.01325	101.325	14.696	1.0332	1
1 mmHg (≈ 1 torr)	0.0013332	0.13332	0.019337	0.0013595	0.0013158
1 mH_2O	0.098067	9.8067	1.4223	0.1	0.096784
1 inH_2O	0.0024909	0.24909	0.036127	0.00254	0.0024583

جدول: الضغط (ب): أعمدة السوائل

الوحدة	mmHg	mH_2O	inH_2O	mmH_2O
1 bar	750.06	10.197	401.46	10,197
1 psi	51.715	0.70307	27.680	703.07
1 kg/cm²	735.56	10.000	393.70	10,000
1 atm	760	10.332	406.78	10,332
1 kPa	7.5006	0.10197	4.0146	101.97
1 inH_2O	1.8683	0.0254	1	25.4

تنبيه: وحدات عمود الماء (mmH_2O وinH_2O) تتغير قليلًا بحرارة الماء المرجعية. فالجدول مبني على المرجع الاصطلاحي (4 °C)، وفيه 1 inH_2O = 249.09 Pa. وعند 60 °F تكون 248.84 Pa، وعند 20 °C تكون 248.64 Pa، والفرق يقارب 0.2%. وهو فرق يدخل في معايرة مرسل ضغط تفاضلي دقيق، فتُكتب الحرارة المرجعية في ورقة البيانات وفي المعايِر.

والضغط المطلق = الضغط النسبي + الضغط الجوي الفعلي، ويساوي 1.01325 bar عند سطح البحر فقط (القسم 4.2). فكتابة bara = barg + 1 تقريب يخطئ في مقدار الضغط الجوي بنحو 1.3%، ويزيد الخطأ في المواقع المرتفعة.

جدول: الطول والمساحة والحجم

الكمية	التحويل
الطول	1 in = 25.4 mm (بالضبط)؛ 1 ft = 12 in = 0.3048 m (بالضبط)؛ 1 m = 3.2808 ft = 39.370 in؛ 1 mile = 5280 ft = 1.6093 km
الأطوال الصغيرة	1 mil = 0.001 in = 25.4 µm (شائع في إزاحة الاهتزاز وسماكة الطلاء)
المساحة	1 in^2 = 645.16 mm^2 ؛ 1 m^2 = 10.764 ft^2
الحجم	1 m^3 = 1000 L = 35.315 ft^3 = 264.17 US gal = 6.2898 bbl
الغالونات	1 US gal = 3.7854 L = 231 in^3؛ 1 gal إمبراطوري (UK) = 4.5461 L
البرميل النفطي	1 bbl = 42 US gal = 158.99 L
وحدات أخرى	1 in^3 = 16.387 cm^3 ؛ 1 L = 61.024 in^3 ؛ 1 ft^3 = 28.317 L = 7.4805 US gal

جدول: الكتلة والقوة والكثافة واللزوجة

الكمية	التحويل
الكتلة	1 kg = 2.2046 lb؛ 1 lb = 0.45359 kg؛ 1 oz = 28.350 g؛ 1 t (متري) = 1000 kg؛ 1 slug = 14.594 kg = 32.174 lb
القوة	1 N = 1 kg·m/s²؛ 1 lbf = 4.4482 N؛ 1 kgf = 9.80665 N؛ 1 dyne = 10^{-5} N
العزم	1 N·m = 0.73756 lbf·ft
الكثافة	1 g/cm³ = 1000 kg/m³ = 62.428 lb/ft³ = 8.3454 lb/US gal
الكثافة النسبية للسوائل	SG = ρ ÷ ρ(الماء عند الحرارة المرجعية)، ويُذكر المرجع (60 °F أو 15 °C)
درجة API للنفط	API = 141.5 ÷ SG(60 °F) − 131.5؛ وعكسها SG = 141.5 ÷ (API + 131.5). فنفط 35° API كثافته النسبية 0.8498
الكثافة النسبية للغاز	نسبة الوزن الجزيئي للغاز إلى 28.96 (الهواء)
اللزوجة الديناميكية	1 cP = 1 mPa·s؛ 1 Pa·s = 1000 cP = 10 P
اللزوجة الكينماتيكية	1 cSt = 1 mm²/s؛ 1 St = 1 cm²/s = 100 cSt
العلاقة بينهما	اللزوجة الكينماتيكية (cSt) = الديناميكية (cP) ÷ الكثافة (g/cm³)

جدول: التدفق

الكمية	التحويل
تدفق السوائل	1 m³/h = 4.4029 US gpm = 0.27778 L/s = 150.96 bbl/d؛ US gpm = 0.22712 m³/h
تدفق الغاز الفعلي	1 ft³/min (cfm) = 1.6990 m³/h
التدفق الكتلي	1 kg/s = 3.6 t/h = 7936.6 lb/h؛ t/h = 2204.6 lb/h

الكمية	التحويل
تدفق الغاز القياسي	1 MMSCFD (60 °F، 14.696 psia) = 28,317 m^3/d عند الشروط نفسها ≈ 1.01325 bar، 1.01325 bar) ≈ 26,791 Nm^3/d (0 °C، 28,262 Sm^3/d (15 °C bar) ≈ 1,116 Nm^3/h

والحرف M في MSCF يعني ألف قدم مكعب قياسي، وفي MMSCF مليونًا؛ وهو الالتباس نفسه بين M الرومانية للألف وبادئة ميغا في النظام الدولي (انظر القسم 4.1-أ).

جدول: الطاقة والقدرة

الكمية	التحويل
الطاقة	1 kWh = 3.6 MJ = 3412.1 Btu؛ 1 Btu = 1055.06 J = 778.17 ft·lbf = 252.0 cal؛ 1 cal = 4.184 J؛ 1 J = 10^7 erg
القدرة	1 kW = 1.3410 hp = 737.56 ft·lbf/s = 3412.1 Btu/h = 239.0 cal/s
الحصان	1 hp (ميكانيكي) = 550 ft·lbf/s = 745.70 W؛ 1 حصان متري (PS) = 735.50 W
القدرة الحرارية	1 Btu/h = 0.29307 W؛ 1 Btu/min = 17.584 W؛ MMBtu/h = 293.07 kW
معدل الحرارة (Heat Rate) للتوربينات	1 Btu/kWh = 1.0551 kJ/kWh؛ والكفاءة = 3600 ÷ معدل الحرارة (kJ/kWh). فمعدل 9,800 kJ/kWh يعني كفاءة 36.7%، ويساوي 9,289 Btu/kWh

جدول: السرعة والاهتزاز

الكمية	التحويل
السرعة الخطية	1 m/s = 3.2808 ft/s = 196.85 ft/min
سرعة الاهتزاز	1 in/s = 25.4 mm/s

الكمية	التحويل
إزاحة الاهتزاز	1 mil = 25.4 µm
التسارع	1 g = 9.80665 m/s²

جدول: بادئات النظام الدولي

البادئة	الرمز	القيمة	البادئة	الرمز	القيمة
تيرا (tera)	T	10^{12}	ميلي (milli)	m	10^{-3}
جيجا (giga)	G	10^{9}	ميكرو (micro)	µ	10^{-6}
ميغا (mega)	M	10^{6}	نانو (nano)	n	10^{-9}
كيلو (kilo)	k	10^{3}	بيكو (pico)	p	10^{-12}

تنبيه: أخطاء متكررة في جداول التحويل المتداولة. تنتشر بين الفنيين أوراق تحويل مختصرة، وفي بعضها أخطاء تنتقل من نسخة إلى نسخة. ومما يتكرر:

ما يُكتب خطأً	الصحيح
1 m = 2.28 ft	1 m = 3.2808 ft
1 ft = 0.4048 m	1 ft = 0.3048 m
1 oz = 28.24 g	1 oz = 28.350 g
1 atm = 1 bar	1 atm = 1.01325 bar (الفرق 1.3%)
1 Btu = 778 ft·lbf/s	1 Btu = 778 ft·lbf (طاقة لا قدرة)
1 St = 100 cm²/s	1 St = 1 cm²/s = 100 cSt
1 Btu = 17.58 W	1 Btu/min = 17.58 W (القدرة لا الطاقة)
°R = °F + 460	R = °F + 459.67° (والتقريب 460 مقبول في الميدان)

ما يُكتب خطأً	الصحيح
البادئة «تترا»	«تيرا» 10^{12} = (tera)

والقاعدة: لا يُعتمد جدول تحويل في حساب يُبنى عليه قرار قبل مراجعته بالوحدات نفسها. أي أن كل تحويل يُكتب بوحداته كاملة، وتُختصر الوحدات حتى تبقى الوحدة المطلوبة وحدها.

مثال محلول (مرسل ضغط تفاضلي من مورد أمريكي):

- **المعطيات:** مدى المرسل في ورقة البيانات 0–100 inH_2O (عند 60 °F)، وبطاقة الإدخال في النظام معرّفة بـ mbar.
- **الحل بالوحدات:** 100 inH_2O × 248.84 Pa/inH_2O = 24,884 Pa = **248.8 mbar**. ولو استُعمل مرجع 4 °C (249.09 Pa) لخرج 249.1 mbar، والفرق 0.1% من المدى.
- **معنى النتيجة:** الفرق صغير في حلقة تحكم، لكنه أكبر من دقة مرسل صنفه ±0.075% من المدى. لذلك تُنسخ الحرارة المرجعية من ورقة البيانات إلى إعداد المرسل وإلى شهادة المعايرة كما هي.

4.2 الضغط المطلق والنسبي والتفاضلي

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm}$$

يُستخدم الضغط المطلق حيث تتطلبه المعادلة (قانون الغازات، حسابات التدفق، الفراغ). لا يُدخل ضغط نسبي في معادلة تتطلب مطلقًا: عند 1 barg يكون المطلق نحو 2.013 bara، والخطأ مضاعف. الضغط التفاضلي فرق بين نقطتين $P = P_H - P_L$، ولا علاقة له بالضغط الجوي. وجداول التحويل المرجعية في القسم 4.1-ب.

الشكل 4-1: *مراجع الضغط الثلاثة: المطلق يُقاس من الفراغ التام، والنسبي من الضغط الجوي، والتفاضلي بين نقطتين.*

4.3 المدى: LRV وURV والاتساع (Span)

- **LRV (Lower Range Value):** القيمة المقابلة لـ 4 mA.
- **URV (Upper Range Value):** القيمة المقابلة لـ 20 mA.
- **الاتساع = URV − LRV.**
- **المدى المهيأ (Range):** من LRV إلى URV؛ و**حدود المدى (Range Limits):** أقصى ما يستطيعه الجهاز (من الكتالوج)؛ و**نسبة المدى (Turndown):** نسبة أقصى اتساع (Span) إلى الاتساع المهيأ.

> **مثال:** مرسل مداه من −100 إلى +300 mbar، فيكون الاتساع = 400 mbar، ويكون الصفر «مرتفعًا» (Elevated Zero) لأن 4 mA تقابل قيمة سالبة. والعكس (Suppressed Zero) حين تقابل 4 mA قيمة موجبة، كما في قياس مستوى وعاء يُركَّب مرسله أسفل الوصلة السفلى.

الشكل 4-2: *تحويل الضغط إلى تيار لمرسل مداه من −100 إلى +300 mbar؛ الصفر مرتفع لأن 4 mA تقابل قيمة سالبة.*

> **قاعدة الاختيار:** يُختار الاتساع بحيث تقع القيمة الطبيعية في الثلث الأوسط من المدى، ويغطي المدى حدود التشغيل بهامش 10–20%، ولا يتجاوز نسبة المدى ما يحفظ الدقة (مرسلات الضغط الحديثة تحفظ دقتها حتى نحو 10:1، وبعضها أكثر بشروط).

تحويل القيمة إلى تيار:

$$\mathrm{I} = 4 + 16 \cdot (\mathrm{PV} - \mathrm{LRV}) / \mathrm{Span}.$$

عند PV = 25 bar على مدى 0–40 bar:

$$\mathrm{I} = 4 + 16 \times 25/40 = 14 \ \mathrm{mA}.$$

4.4 خصائص القياس

الخاصية	التعريف	ما يعنيه عمليًا
الدقة / حد الخطأ (Accuracy / Error Limit)	قرب القياس من المرجع ضمن شروط محددة	يُعبَّر عنها نسبةً من الاتساع أو من القراءة أو من الحد الأعلى للمدى (URL)؛ يجب معرفة الأساس
التكرارية (Repeatability)	تقارب النتائج عند إعادة القياس نفسه	قد تكون التكرارية ممتازة والدقة سيئة (انحياز ثابت)
التمييز (Resolution)	أصغر تغير يمكن اكتشافه	يحدده الحساس وA/D معًا، لا عدد الخانات
الخطية (Linearity)	انحراف المنحنى عن الخط المستقيم	تقل أهميتها إن كان النظام يعوّض بالمنحنى
التخلف (Hysteresis)	اختلاف القراءة عند الصعود والهبوط للقيمة نفسها	يُقاس في المعايرة بنقاط صاعدة وهابطة
الانجراف (Drift)	تغير الاستجابة مع الزمن أو الحرارة أو الضغط الساكن	يحدد دورية المعايرة (الفصل 14)
الحساسية (Sensitivity)	تغير الخرج لكل تغير في المدخل	مثال: RTD Pt100 نحو 0.385 Ω/°C
زمن الاستجابة (Response Time)	زمن بلوغ 63.2% (ثابت الزمن) أو 90% من التغير	يحدده الحساس والتركيب أكثر من الإلكترونيات
المنطقة الميتة (Dead Band)	مجال تغير المدخل الذي لا يُنتج تغيرًا في الخرج	مهمة في الموضّعات (Positioners) والمفاتيح

كيف أختار؟ اقرأ من ورقة البيانات ثلاث خصائص بترتيبها: أساس الدقة (من الاتساع أم من القراءة) وشروطها، ثم الانجراف مع الزمن والحرارة لأنه يحدد دورية المعايرة، ثم زمن الاستجابة إن كانت الحلقة سريعة أو للحماية. والجدول يعرّف الخصائص ولا يقول أيها

يهم في خدمتك: حلقة مستوى بطيئة لا تكترث لزمن الاستجابة، ومرسل فصل حماية لا يكترث للتمييز بل للخطأ الكلي عند نقطة الفصل. والخطأ الأكثر كلفة مقارنة دقتين بأساسين مختلفين، أو قبول تكرارية ممتازة دليلًا على الدقة، فيُشترى جهاز منزاح انزياحًا ثابتًا لا تكشفه إلا معايرة مرجعية.

4.5 أنواع الأخطاء

تميّز الممارسة الصناعية ثلاثة أنواع من الأخطاء، وهو تصنيف تشترك فيه المراجع على اختلاف مجالاتها (ومنها مرجع Bosch في حساسات السيارات):

- **خطأ منهجي (Systematic):** ثابت أو قابل للتنبؤ: انزياح صفر (Offset)، خطأ الاتساع، لاخطية، أثر الحرارة والضغط الساكن. يُعالَج بالمعايرة والتعويض.
- **خطأ عشوائي (Random):** ضوضاء وتذبذب لا يُتنبأ بقيمته. يُعالَج بالترشيح والمتوسط، ويُعبَّر عنه إحصائيًا.
- **خطأ جسيم (Gross):** خطأ توصيل، تهيئة خاطئة، عكس قطبية، وحدة خاطئة. لا تعالجه المعايرة بل التحقق (Verification) والاختبار الوظيفي.

الشكل 4-3: *الفرق بين الخطأ المنهجي والخطأ العشوائي: جهاز متكرر لكنه منزاح يُصحَّح بالمعايرة، أما التشتت فلا يُصحَّح إلا بالترشيح أو بجهاز أفضل.*

وتُحدَّد متطلبات التفاوت المسموح (Tolerance) في ورقة البيانات بالإجابة عن ثلاثة أسئلة: كم؟ (±0.1% من Span)، وفي أي شروط؟ (20–30 °C، ضغط ساكن مرجعي)، وعلى مدى كم من الزمن؟ (استقرار 0.2% لخمس سنوات). مرسل بدقة 0.05% لكنه ينجرف 0.5% في السنة أسوأ عمليًا من مرسل 0.1% مستقر.

4.6 أساس التعبير عن الخطأ

جهاز مداه 0–100 bar وحد خطئه ±0.5% من الاتساع، فحد الخطأ = 0.5 bar في كل نقاط المدى. عند قراءة 10 bar تمثل هذه القيمة 5% من القراءة. الجدول يوضح كيف يتضاعف الخطأ النسبي أسفل المدى:

القراءة (bar)	الخطأ (bar)	الخطأ % من القراءة
100	0.5	0.5
50	0.5	1.0
20	0.5	2.5
10	0.5	5.0

لذلك يُكتب في الكتالوجات أحيانًا «% من القراءة» (% of Reading) للعدادات الجيدة (Coriolis، Ultrasonic) و«% من الاتساع» (% of Span) للمرسلات؛ ولا تُقارن دقتان بأساسين مختلفين. القياس التجاري (القسم 8.15) يعتمد «% من القراءة» (% of Reading) ويحسب عدم اليقين المركّب.

4.7 الخطأ المركّب لحلقة

إن كانت مساهمات الخطأ مستقلة، تُجمع تربيعيًا لا جبريًا:

$$E_{loop} = \sqrt{(E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots)}$$

> **مثال:** مرسل ±0.1%، بطاقة AI ±0.1%، أثر حرارة ±0.15%. الجمع الخطي للقيم المطلقة 0.35%، والتربيعي

$$\sqrt{(0.01 + 0.01 + 0.0225)} = 0.21\%.$$

الجمع الخطي تقدير محافظ يُستخدم في الحماية أحيانًا؛ التربيعي هو الأساس المترولوجي.

الشكل 4-4: *(أ) الخطأ المركب لحلقة من أربعة مصادر مستقلة (مصادر المثال 4.7 الثلاثة ومصدر رابع 0.05% لبيان أثر المصادر الصغيرة) بالجمع الخطي (0.40%) والتربيعي (0.21%). (ب) لماذا يهم أساس التعبير: خطأ ثابت 0.5% من المدى يصبح 5% من القراءة عند 10% من المدى.*

4.8 عدد الخانات ليس دقة

شاشة تعرض 25.0000 bar من مرسل حد خطئه ±0.1 bar تُظهر ثلاث خانات عشرية لا معنى لها؛ فالخانة العشرية الأولى وحدها في حدود الخطأ. تُضبط الخانات المعروضة

لتطابق الدقة الفعلية؛ الخانات الزائدة تُوهم المشغّل بتغيرات ليست حقيقية وقد تُغري بضبط حدود إنذار أضيق من الدقة الحقيقية فتكثر الإنذارات الكاذبة.

4.9 تقييم أداء الأجهزة واختبارها: ما وراء رقم الدقة في الكتالوج

يغفل كثيرون عن أمرين في تقييم الأجهزة: **دقة النظام** و**تقييم الأجهزة**. الأول عالجناه في 4.7 (الخطأ المركّب لحلقة). أما الثاني فخلاصته أن رقم الدقة في الكتالوج يُقاس عند **شروط مرجعية** (حرارة 20 ± 2 °C، رطوبة نسبية نحو 65% ضمن سماح يحدده المعيار، ضغط ساكن صفر، تغذية اسمية، بلا اهتزاز) لا يكاد الميدان يحققها؛ ولذلك وضعت الهيئات الدولية إجراءات اختبار موحدة تُقاس بها **التأثيرات** كل على حدة: **IEC 61298** (الأجزاء 1 إلى 4) و**IEC 60770** للمرسلات. ويلخص الجدول الآتي هذه التأثيرات وكيف تُعطى في ورقة البيانات:

التأثير	كيف يُعطى عادة في ورقة البيانات
الحرارة المحيطة	نسبة من المدى (أو من الاتساع والقراءة معًا) لكل 28 °C (أي 50 °F) من التغير
الضغط الساكن (مرسلات الضغط التفاضلي)	أثر على الصفر (قابل للتصحيح) وأثر على الاتساع لكل 70 bar أو 100 bar
جهد التغذية	نسبة من المدى لكل فولت من التغير ضمن مدى التغذية المسموح
الاهتزاز	نسبة من المدى عند ترددات وسعات محددة (مثلًا 10 إلى 60 Hz بسعة 0.21 mm)
الوضع (Mounting Position)	إزاحة صفر بالملي بار أو بنسبة من المدى لكل درجة ميل، تُصحح عند التركيب
الانجراف طويل الأمد	نسبة من الحد الأعلى للمدى (URL) لكل سنة (أو لكل 5 سنوات) عند شروط مرجعية

التأثير	كيف يُعطى عادة في ورقة البيانات
الاستجابة الديناميكية	الثابت الزمني وزمن الاستجابة (63% و90% من الخطوة) وزمن تحديث الخرج
التوافق الكهرومغناطيسي	مطابقة IEC 61326 مع أثر أقصى على الخرج أثناء التداخل

و**خطأ التركيب الكلي (Total Installed Error)** الذي يعنيك في الميدان هو مجموع هذه التأثيرات في ظروف موقعك مع الدقة المرجعية (بالجذر التربيعي لمجموع المربعات إن كانت مستقلة وعشوائية، وبالجمع الخطي إن أردت الحد الأسوأ)، وهو ما تحسبه الحالة الميدانية في 4.10 ويعود إليه اختيار الأجهزة في الفصل 27.

كيف تستخدم ذلك عمليًا:

1. اطلب من المورد في ورقة البيانات الدقة **عند شروط تركيبك** لا عند الشروط المرجعية فقط (القسم 27.7).
2. عند اختيار مرسل لفصل حماية، احسب الخطأ الكلي عند نقطة الفصل، واطرحه من الهامش بين حد الفصل والحد الآمن للعملية.
3. عند تقييم عرضين، قارن المواصفات الكاملة (الدقة، وأثر الحرارة، والانجراف السنوي) لا رقم الدقة وحده؛ فمرسل «0.075%» بانجراف 0.2% سنويًا قد يصير بعد ثلاث سنوات أسوأ من مرسل «0.1%» بانجراف 0.05%.
4. اسأل المورد عمّا يشمله رقم «الدقة» في كتالوجه؛ فبعض الكتالوجات تعني به **الخطية مع التخلف والتكرارية معًا**، وبعضها الخطية وحدها. وتُطلب في المواصفات أيضًا **المدى الأدنى (Minimum Span)** و**نسبة المدى (Rangeability)**، إلى جانب الخصائص التي عرّفها القسم 4.4 (التكرارية والتخلف والمنطقة الميتة).

مثال محلول (بوصة الماء عند أي حرارة؟): مرسل ضغط تفاضلي مداه 0–100 inH_2O، مهيأ في المرسل بوحدة «inH_2O عند 4 °C»، ويُعاير بمعاير يعرض الوحدة « inH_2O عند 20 °C (68 °F)». دقة المرسل ±0.075% من المدى.

- **المعطيات:** 1 inH_2O عند 4 °C = 249.09 Pa، وعند 60 °F = 248.84 Pa، وعند 68 °F = 248.64 Pa.
- **الحل:** 100 inH_2O في المرسل تعادل 24,909 Pa، وفي المعاير 24,864 Pa. الفرق 45 Pa، أي **0.18% من المدى**.
- **المعنى ميدانيًا:** خطأ الوحدة وحده يبلغ نحو 2.4 ضعف دقة المرسل كلها، ويظهر في شهادة المعايرة على أنه انحراف «يحتاج ضبطًا»، فيُضبط مرسل سليم على خطأ. والقاعدة: تُكتب الوحدة وحرارتها المرجعية في ورقة البيانات وسجل المعايرة، وتُطابق بين المرسل والمعاير قبل أي قراءة، أو تُستعمل الوحدات الدولية (Pa وmbar) التي لا تحمل هذا اللبس.

4.10 حالة ميدانية: مدى «احتياطي» أضاع الحماية

نوع الحالة: مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

المعطيات: خط تصريف ضغطه الطبيعي 3 barg، ويهبط لثوانٍ إلى نحو 2.7 barg عند تبديل المضخات. اختير له مرسل 0–60 bar لأن ضغط التصميم 50 bar، ونقطة الإنذار المنخفض 2.5 barg.

الافتراضات (قيم نموذجية لمرسل ذكي شائع، تُؤخذ من ورقة بيانات الطراز): الدقة المرجعية ±0.25% من المدى؛ وأثر الحرارة المحيطة ±0.15% من المدى لكل تغير 28 °C (وتغير الحرارة بين ليل الشتاء وظهيرة الصيف نحو 28 °C)؛ وانجراف الصفر بين معايرتين ±0.1% من المدى.

الحل:

- الدقة المرجعية = ±0.15 bar = 0.0025 × 60
- أثر الحرارة = ±0.09 bar = 0.0015 × 60
- الانجراف = ±0.06 bar = 0.001 × 60
- الخطأ المركب في الحد الأسوأ (جمع خطي) = = 0.06 + 0.09 + 0.15 = ±0.30 bar، أي 10% من القراءة الطبيعية.
- القراءة عند هبوط تبديل المضخات مع خطأ سالب كامل = = 0.30 − 2.7 = 2.4 bar، أي تحت نقطة الإنذار مع أن الضغط الحقيقي فوقها بمقدار 0.2 bar.

التفسير: مع الدقة المرجعية وحدها (±0.15 bar) لا يقع الإنذار؛ فالسبب اجتماع الهبوط الحقيقي مع الخطأ المركب. تكررت الإنذارات الكاذبة فعُطّل الإنذار. والأخطر هو العكس: ضغط حقيقي 2.3 bar قد يُقرأ 2.6 bar فلا يُنذر.

معنى النتيجة ميدانيًا: الحل مرسل بمدى 0–6 bar (فتقع القيمة الطبيعية عند 50% من المدى)، وبالنسب نفسها يصير الخطأ المركب ±0.03 bar (1% من القراءة)، مع تحمّل ضغط زائد (Overrange) حتى 60 bar. فالمدى شيء، وتحمّل الضغط شيء آخر.

دور المهندس ودور الفني:

- **المهندس** يثبّت الوحدات وشروط المرجع في أساس التصميم، ويختار المدى من حدود التشغيل لا من ضغط التصميم، ويحسب الخطأ الكلي عند نقطة الإنذار أو الفصل من الدقة المرجعية وأثر الحرارة والانجراف. ويكتب في ورقة البيانات أساس التعبير عن الدقة وشروطها، وحد تحمّل الضغط الزائد.
- **الفني** يطابق الوحدة ومرجعها (مثل inH_2O عند 4 °C أو عند 20 °C) بين المرسل والمعاير قبل أي قراءة، ويعاير بنقاط صاعدة وهابطة ليكشف التخلف، ويسجل القراءات قبل الضبط وبعده ليُحسب الانجراف. وإذا وجد

> مدى لا يطابق ورقة البيانات أبلغ عنه ولم يغيّره بنفسه.

4.11 الأخطاء الشائعة

- إدخال ضغط نسبي في معادلة تتطلب المطلق.
- ذكر تدفق غاز دون شروط المرجع، أو الخلط بين الشروط النظامية (Normal) والقياسية (Standard).
- اختيار المدى من ضغط التصميم بدل حدود التشغيل.
- مقارنة دقتين بأساسين مختلفين (Span مقابل Reading).
- الاعتماد على التكرارية الجيدة دليلًا على الدقة.
- عرض خانات أكثر من الدقة.

4.12 ملخص

ثبّت الوحدات وشروط المرجع في أساس التصميم؛ اختر الاتساع من حدود التشغيل وضع القيمة الطبيعية في ثلثه الأوسط؛ اقرأ الدقة مع أساسها وشروطها وزمنها؛ ميّز بين الخطأ المنهجي (يُعالَج بالمعايرة) والعشوائي (بالترشيح) والجسيم (بالتحقق)؛ واجمع الأخطاء المستقلة تربيعيًا.

وفي الفصل التالي: الفصل 5 «قراءة P&ID والرموز والوسوم»؛ فبعد لغة الوحدات والأخطاء ننتقل إلى لغة المخطط الذي يحدد لكل جهاز وسمه ووظيفته ومكانه.

4.13 أسئلة التقييم الذاتي

1. حوّل 350 psig إلى barg وbara (الجو 1.013 bar).
2. مرسل مداه −50 إلى 150 mbar. احسب الاتساع، وما نوع الصفر؟ وما التيار عند 0 mbar؟

3. مرسل 0–25 bar بدقة ±0.075% من الاتساع؛ ما حد الخطأ بوحدة bar، وكم نسبته من قراءة 5 bar؟

4. عدّاد كوريوليس دقته ±0.1% من القراءة ومرسل DP دقته ±0.1% من الاتساع على مدى 0–200 mbar. أيهما أدق عند 20% من المدى؟

5. ثلاث مساهمات خطأ 0.2% و0.1% و0.1%؛ احسب الخطأ المركّب تربيعيًا وجبريًا.

6. ما الفرق بين المدى المهيأ وحدود المدى ونسبة المدى؟

7. جهاز تكراريته ممتازة لكن قراءته أعلى من المرجع بـ 0.8 bar دائمًا. ما نوع الخطأ وكيف يُعالج؟

8. لماذا يختلف تدفق Nm^3/h عن Sm^3/h للغاز نفسه؟ وبكم تقريبًا؟

9. الغمد الحراري (Thermowell) يجعل زمن الاستجابة 40 ثانية بينما المرسل 0.2 ثانية. ما زمن استجابة الحلقة تقريبًا، ولماذا؟

10. في الحالة 4.10، اذكر مواصفتين مختلفتين خلط بينهما المصمم.

مراجع الفصل: وثيقة أساس التصميم (I&C Design Basis) (نظام الوحدات)؛ تصنيف أنواع الأخطاء ومتطلبات السماحية والاعتمادية للحساسات (Bosch، Automotive Mechatronics)؛ Shardt (منحنى المعايرة والحساسية)؛ NAMUR NE43؛ R1 (المسودة الموحدة)؛ وR63 (عرض قياس الحرارة: وحدات الطاقة الحرارية، 4.1-أ).

الفصل 5: قراءة P&ID والرموز والوسوم

لمن هذا الفصل: المهندس الجديد أولًا، وكل من يتعامل مع المخططات في التصميم أو التشغيل. فمخطط الأنابيب والأجهزة هو اللغة المشتركة بين مهندس العمليات ومهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والمشغل وفني الصيانة.

الفكرة الأساسية: كل رمز في المخطط جملة مكتملة: الحروف تقول ماذا يُقاس وماذا يُفعل به، والشكل يقول أين تُنفَّذ الوظيفة، والخط يقول كيف تنتقل الإشارة. ومن يتقن هذه القواعد يقرأ أي مخطط في أي مشروع، بشرط أن يبدأ بمفتاح الرموز الخاص بالمشروع.

5.1 من PFD إلى P&ID

المخطط	الغرض	ما يظهر فيه
مخطط تدفق العملية (Process Flow Diagram – PFD)	فهم العملية وموازناتها	المعدات الرئيسية، التيارات الرئيسية بأرقامها، جداول التدفق والضغط والحرارة، وحلقات التحكم الرئيسية فقط
مخطط الأنابيب والأجهزة (Piping and Instrumentation Diagram – P&ID)	التصميم التفصيلي والتشغيل ودراسات المخاطر	كل المعدات والأنابيب بأقطارها وفئاتها وموادها، والصمامات، والمحركات، وكل جهاز قياس وتحكم وحماية
مخطط المرافق (Utility Flow Diagram – UFD)	توزيع الخدمات	الهواء، والنيتروجين، والبخار، ومياه التبريد على مستوى المصنع

كيف أختار؟ اسأل ما الذي تبحث عنه: موازنات ومراحل رئيسية فابدأ بـ PFD؛ صمامًا أو جهازًا أو وظيفة تحكم وحماية فـ P&ID؛ مصدر هواء الأجهزة أو النيتروجين أو البخار فـ

UFD. والجدول لا يبين ما لا يوجد في أي منها: أرقام الأطراف والكابلات في مخطط الحلقة، والتعشيقات والتأخيرات في مخطط المنطق ومصفوفة السبب والنتيجة (القسم 5.7.1)، فلا تطالب P&ID بها. وأكثر الأخطاء كلفة العزل أو التشغيل بمخطط PFD أو بمراجعة قديمة من P&ID، لأن الصمام الذي لا يظهر فيهما موجود في الميدان.

ويبدأ كل مشروع بمجموعة أوراق مفتاح الرموز (Legend Sheets) تحدد الرموز والاختصارات ونظام الترقيم المعتمدة. وهذه الأوراق هي المرجع الملزم؛ لأن الشركات تضيف إلى المواصفة القياسية رموزًا خاصة بها.

5.2 رموز الأجهزة وفق ANSI/ISA-5.1

يحدّد شكل الرمز **نوع التنفيذ**، ويحدد الخط الأفقي داخله **موقعه وإمكانية الوصول إليه**:

الشكل	المعنى
دائرة (Circle)	جهاز مستقل أو وظيفة منفصلة (Discrete Instrument)
دائرة داخل مربع	وظيفة عرض أو تحكم مشتركة (Shared Display / Shared Control)، كما في نظام DCS عادةً
معيّن داخل مربع	وظيفة في متحكم منطقي مبرمج (PLC)
سداسي (Hexagon)	وظيفة حاسوبية (Computer Function)

الخط داخل الرمز	الموقع
بلا خط	في الميدان (Field Mounted)
خط متصل واحد	في الموقع الرئيسي (غرفة التحكم عادةً)، متاح للمشغل
خط متقطع واحد	في الموقع الرئيسي خلف اللوحة، غير متاح للمشغل عادةً
خطان متصلان	في موقع مساعد، كلوحة محلية (Local Panel)، متاح للمشغل

الخط داخل الرمز	الموقع
خطان متقطعان	في موقع مساعد خلف اللوحة، غير متاح للمشغل عادةً

الشكل 5-1: *رموز الأجهزة وفق ANSI/ISA-5.1: شكل الرمز يبيّن نوع التنفيذ، والخط داخله يبيّن مكان الوصول.*

وتميّز خطوط الإشارة نوع الوصلة:

شكل الخط	الإشارة
خط متصل رفيع	توصيل بالعملية أو تغذية الجهاز
خط تقطعه شرطتان مائلتان متكررتان (//)	إشارة هوائية (Pneumatic)
خط متقطع	إشارة كهربائية (Electric)
خط تتخلله دوائر صغيرة (o—o—o)	رابط بيانات أو برمجيات (Data Link)
خط تتخلله علامات X	أنبوب شعري (Capillary)
خط يتخلله الحرف L	إشارة هيدروليكية (Hydraulic)

شكل الخط	الإشارة
خط متموّج	إشارة كهرومغناطيسية أو صوتية غير موجّهة (مثل الرادار واللاسلكي)

الشكل 5-2: *أنواع خطوط الإشارة على مخطط P&ID كما في الجدول السابق.*

5.3 نظام الوسوم: الحروف الوظيفية

يتكون وسم الجهاز (Instrument Tag) من حروف وظيفية (Functional Identification) ورقم حلقة (Loop Number). الحرف الأول يحدد **المتغير المقيس**، وقد يتبعه حرف معدِّل، ثم تأتي الحروف اللاحقة التي تحدد **الوظيفة**.

الحرف الأول (المتغير المقيس) — الأكثر استخدامًا:

الحرف	المتغير	الحرف	المتغير
A	تحليل (Analysis)	P	ضغط (Pressure)
B	احتراق أو لهب (Burner / Combustion)	Q	كمية (Quantity)

الحرف	المتغير	الحرف	المتغير
E	جهد (Voltage)	R	إشعاع (Radiation)
F	تدفق (Flow)	S	سرعة أو تردد (Speed / Frequency)
H	يدوي (Hand)	T	حرارة (Temperature)
I	تيار (Current)	U	متعدد المتغيرات (Multivariable)
J	قدرة (Power)	V	اهتزاز (Vibration)
K	زمن (Time)	W	وزن أو قوة (Weight / Force)
L	مستوى (Level)	Y	حدث أو حالة (Event / State)
M، N، O، C، D، G	يحددها المستخدم (User's Choice) وتُشرح في المفتاح	Z	موضع أو بُعد (Position / Dimension)

الحروف المعدِّلة للمتغير (Modifiers): D فرق (Differential)، وF نسبة (Ratio)، وQ تكامل أو عدّ (Totalize)، وK معدل تغيّر زمني. مثل: PDT مرسل ضغط تفاضلي، وFQI مؤشر تدفق تراكمي.

الحروف اللاحقة (الوظيفة):

الحرف	الوظيفة	الحرف	الوظيفة
A	إنذار (Alarm)	R	تسجيل (Record)
C	تحكم (Control)	S	مفتاح (Switch)
E	عنصر أولي (Primary Element)	T	إرسال (Transmit)

الحرف	الوظيفة	الحرف	الوظيفة
G	زجاج أو مقياس مرئي (Glass / Gauge)	V	صمام (Valve)
I	بيان (Indicate)	W	غمد أو مجس (Well / Probe)
L	مصباح (Light)	Y	مرحل أو حساب أو تحويل (Relay / Compute / Convert)
O	تضييق (Orifice / Restriction)	Z	مشغِّل أو عنصر نهائي (Driver / Actuator)

وتُضاف إلى الإنذارات والمفاتيح حروف الحدود: H مرتفع (High)، وL منخفض (Low)، وتُكرَّر للدلالة على المستوى الثاني: HH مرتفع جدًا، وLL منخفض جدًا.

أمثلة محلولة:

- **FIC-101:** متحكم تدفق مع بيان (Flow Indicating Controller) في الحلقة 101.
- **PDT-205:** مرسل ضغط تفاضلي (Pressure Differential Transmitter)، كأن يقيس انسداد مرشح.
- **LAHH-310:** إنذار مستوى مرتفع جدًا (Level Alarm High-High).
- **TT-402 / TE-402 / TW-402:** الغمد الحراري ثم العنصر ثم المرسل، وكلها في الحلقة نفسها.
- **FY-101:** محول التيار إلى ضغط (I/P) في حلقة FIC-101، و**FV-101** صمام التحكم الخاص بها.
- **XV / SDV / BDV:** وسوم شائعة تضيفها الشركات لصمامات الفتح والإغلاق (On/Off Valve)، وصمامات الإيقاف (Shutdown Valve)، وصمامات تفريغ الضغط (Blowdown Valve)؛ وتُؤخذ دلالتها من مفتاح المشروع.

والقاعدة المهمة: الحرف الأول يتبع **المتغير المقيس** لا المتغير المتحكَّم فيه. فصمام يتحكم في تدفق الوقود بناءً على الحرارة يُوسَم TV لا FV.

الشكل 5-3: *تشريح الوسم FIC-101A-20: رقم الوحدة، ثم الحرف الأول للمتغير المقاس، ثم حروف الوظائف بترتيبها، ثم رقم الحلقة، ثم لاحقة تميز أجهزة الحلقة نفسها؛ مع أمثلة على وسوم شائعة.*

5.4 أنظمة الترقيم الشائعة

ترقيم ISA الموسَّع: تضيف معظم المشاريع رمز الوحدة أو المنطقة قبل الوسم، مثل **FIC-101A-20**: الوحدة 20، والوظيفة FIC، والحلقة 101، واللاحقة A للتمييز بين أجهزة متكررة في الحلقة (مثل المرسلات الثلاثة A وB وC في تصويت 2oo3).

نظام KKS في محطات التوليد: نظام ترميز أوروبي المنشأ (Kraftwerk-Kennzeichensystem) شائع في محطات الطاقة، وتستخدمه وثائق الاختبار والتشغيل التجريبي في كثير من مشاريع الدورة المركبة. مثال مبسَّط: **1 LAB10 CP001**

الجزء	المعنى
1	الوحدة أو المحطة الفرعية
LAB10	النظام: LAB منظومة مياه التغذية، و10 رقم الفرع
CP001	وحدة المعدات: CP حلقة قياس ضغط، و001 التسلسل (ومن الرموز المشابهة: CT حرارة، CL مستوى، CF تدفق، AA صمام)

وميزة KKS أنه ينظم المحطة حسب **الوظيفة والنظام**، فيجمع الأجهزة والمعدات والوثائق تحت شجرة واحدة تخدم التشغيل ونظام الصيانة معًا. وتفاصيل الرموز تُؤخذ من دليل الترميز المعتمد في المشروع.

أنظمة الشركات النفطية: تعتمد معظم شركات النفط الوطنية والعالمية مواصفات ترقيم خاصة مبنية على ISA-5.1 مع رموز للحقل والمنشأة والوحدة. ويجب أن يتطابق الوسم حرفيًا في المخطط، وقائمة الأجهزة، وقاعدة بيانات النظام، ولوحة الجهاز المعدنية في الميدان، ونظام إدارة الصيانة.

5.5 رموز الصمامات والمشغلات وأوضاع الفشل

يُرسم جسم الصمام برمز يبيّن نوعه (كروي، كرة، فراشة، ثلاثي المنافذ)، ويعلوه رمز المشغل (غشائي، مكبسي، كهربائي، ملفي، يدوي). وتُكتب بجانبه حالة الفشل عند انقطاع الهواء أو الإشارة:

الاختصار	المعنى
FO (Fail Open)	ينفتح عند الفشل

الاختصار	المعنى
FC (Fail Closed)	يغلق عند الفشل
FL (Fail Lock / Last)	يبقى في موضعه الأخير
FI (Fail Indeterminate)	غير محدد

حالة الفشل قرار سلامة يُتخذ في التصميم وتراجعه دراسة HAZOP، وليست تفصيلًا في الرسم: صمام وقود الفرن FC، وصمام مياه تبريد المفاعل FO، وصمام تفريغ الضغط إلى الشعلة FO. ويجب أن يتطابق الرمز مع ورقة بيانات الصمام ومع المشغل المركّب فعليًا (الفصل 15).

الشكل 5-4: *أوضاع الفشل لصمام التحكم. الأسهم هنا للتوضيح فقط، وعلى المخطط يُكتب الاختصار FC أو FO أو FL بجانب الصمام.*

5.6 تمثيل وظائف التحكم والسلامة والإنذارات

- **التحكم في DCS:** رمز الدائرة داخل المربع بخط متصل، موصولًا بالمرسل بخط إشارة كهربائية، وبالصمام بخط آخر.

- **وظائف السلامة الآلية (SIS):** تُميَّز برمز خاص يحدده مفتاح المشروع، وغالبًا برمز المعيّن داخل المربع مع الإشارة إلى رقم مستوى الإيقاف (مثل ESD-2) أو رقم الوظيفة في مصفوفة السبب والنتيجة.
- **الإنذارات والإيقافات:** تُكتب الحروف حول الرمز (مثل H وHH وL وLL)، وقد تُذكر قيمها أو تُحال إلى قائمة الإنذارات والإيقافات.
- **المنطق المعقَّد:** لا يُرسم تفصيليًا في P&ID، بل يُرمَز إليه بمعيّن المنطق (Interlock) مع رقمه، وتفصيله في المخططات المنطقية ومصفوفة السبب والنتيجة (القسم 30.8).

5.7 IEC 62424 وتبادل البيانات

تستخدم المشاريع الأوروبية المواصفة IEC 62424 (وهي امتداد للمواصفة الألمانية القديمة DIN 19227 القريبة من ISA). وتسمّي وظائف الأجهزة «طلبات هندسة التحكم بالعمليات» (Process Control Engineering Requests – PCE Requests). أبرز الفروق العملية عن ISA-5.1:

- حروف إضافية لبعض المعدات والوظائف المتعددة (Multivariable)، تختلف عن ISA-5.1 في مواضع، ويُرجع إلى نص المواصفة المعتمدة في المشروع ولا يُعتمد على الذاكرة.
- للنص حول الرمز حقول محددة: الوظيفة والوسم في الوسط، وإنذارات الحدود العليا والدنيا على الجانبين.
- علامات تبيّن أهمية الوظيفة: ذات صلة بالسلامة، أو خاضعة لمتطلبات ممارسات التصنيع الجيدة (GMP)، أو ذات صلة بالجودة؛ وتُؤخذ أشكال هذه العلامات من الطبعة المعتمدة من المواصفة.

والقيمة الأكبر لهذه المواصفة هي تعريف صيغة موحدة لتبادل البيانات بين أدوات التصميم (CAEX، وهي أساس AutomationML)، فتنتقل الوسوم والعلاقات من برنامج

رسم P&ID إلى برنامج هندسة الأجهزة دون إعادة إدخال. والقاعدة العملية: اعرف المواصفة التي بُني عليها المخطط قبل أن تفسّر حروفه.

5.7.1 قراءة مخطط *P&ID* خطوة بخطوة: من مفتاح الرموز إلى «قصة التشغيل»

قراءة P&ID ليست معرفة أسماء الرموز؛ بل فهم **مسار المائع**، و**مسار إشارات القياس والتحكم**، وكيف ترتبط المعدات بعضها ببعض. هذا القسم طريقة عملية مرتبة استخدمها المؤلف في تدريب المهندسين الجدد (R61)، وتُقرأ مع الأقسام 5.2 إلى 5.6.

الخطوة 1: حدد أي وثيقة بين يديك. الجدول التالي يبين ما يجيب عنه كل مستند، فلا تبحث في P&ID عن أرقام أطراف التوصيل ولا عن منطق البرنامج:

المستند	السؤال الذي يجيب عنه
PFD	ما المراحل الرئيسية للعملية وموازناتها؟
P&ID	كيف ترتبط الأنابيب والصمامات والأجهزة ووظائف التحكم؟
مخطط التوصيلات / (Wiring Loop Diagram)	كيف تتصل الأسلاك والأطراف وبطاقات المداخل والمخارج؟
مخطط المنطق (ISA-5.2) ومصفوفة السبب والنتيجة	ما شروط التعشيق والفصل والتأخيرات والتصويت؟

الخطوة 2: اقرأ بيانات الرسم ومفتاح الرموز قبل أي شيء. اسم النظام، ورقم الرسم، ورقم المراجعة، والملاحظات، ثم صفحة مفتاح الرموز **(Legend)** الخاصة بالمشروع. مواصفة ISA-5.1 توحّد النظام لكنها تترك خيارات، وبعض الحروف معرّفة «باختيار المستخدم» (User's Choice)؛ فالقاعدة: **اقرأ الرمز حسب تعريفه في مشروعك، لا حسب شكله الذي تتذكره من مشروع آخر.** وفي دليل الرموز الذي اعتمده المؤلف مثالًا (خمس صفحات: الخطوط والمعدات؛ الصمامات ومشغلاتها؛ المضخات ومعدات الحريق؛ الصمامات الهيدروليكية والتهوية؛ تعريف الأجهزة) كانت جداول مواقع اللوحات ووجهات

الإشارات فارغة، فلا يجوز افتراض أن الرمز «1» يعني غرفة التحكم أو أن «C» يعني نظام PLC معينًا قبل تعبئتها.

الخطوة 3: تتبّع مسار المائع أولًا، ثم مسار الإشارة. المرحلة الأولى ميكانيكية: من نقطة الدخول عبر المعدات والصمامات إلى الخروج (خزان ← صمام عزل ← مضخة ← صمام عدم رجوع ← العملية)؛ والثانية: قياس ← مرسل ← قرار تحكم ← عنصر تحكم نهائي. انتبه إلى سهم اتجاه التدفق وسهم المصدر/الوجهة (Source/Destination) ورقم الرسم المكتوب بجواره.

الخطوة 4: ميّز الأنبوب من الإشارة من الحدود (الشكل 5-5 أ). الخط قد يكون أنبوبًا أو إشارة كهربائية أو هوائية أو هيدروليكية أو خطًا شعريًا أو ارتباطًا ميكانيكيًا أو **حدود حزمة معدات** ليست مسارًا أصلًا. ملاحظتان: (1) ليس كل خط متقطع إشارة كهربائية، وعبارة «إشارة كهربائية» لا تعني وحدها 4–20 mA؛ (2) **تقاطع خطين لا يعني اتصالهما**: النقطة تعني الاتصال، والقوس أو الفجوة تعني عدمه. وحين ترى إطارًا حول مجموعة معدات اسأل: حد حزمة؟ أم حد نطاق توريد (توريد المورد / بواسطة الآخرين)؟ أم نقطة واجهة؟

الخطوة 5: فكّ الوسم موضعًا موضعًا. الحرف الأول للمتغير، والحروف التالية للوظيفة والصفات؛ وموقع الحرف جزء من معناه: T في TT الأولى حرارة والثانية مرسل؛ L في LAL الأولى مستوى والأخيرة منخفض. والرقم يتبع نظام ترقيم المشروع (القسم 5.4) لا قاعدة عامة.

الخطوة 6: اقرأ شكل الرمز وخطوطه (الشكل 5-5 ب). الشكل يبين أين تُنفَّذ الوظيفة، وعدد الخطوط الأفقية يبين الموقع (انظر القسم 5.2)؛ وتنبيهان يكثر الخطأ فيهما: ليس كل رمز داخل مربع PLC، فالدائرة داخل المربع عرض وتحكم مشتركان (DCS) والمعيّن داخل المربع هو المتحكم المنطقي المبرمج؛ وكون الخط **متصلًا أو متقطعًا** يبين هل يصل إليه المشغل عادة أم لا، فخطان لا يعنيان «غير متاح».

الخطوة 7: اقرأ الصمام من ثلاث جهات (الشكل 5-5 ج). نوع الجسم (بوابة، كروي، فراشة، إبري، عدم رجوع، ثلاثي أو رباعي المسارات، تنفيس)، ثم المشغل (M محرك، S ملفي، G تروس، غشائي، أسطوانة، يدوي؛ والحرف هنا تابع لرمز المشغل لا لجدول حروف الأجهزة)، ثم الحالة ووضع الفشل المكتوب بجواره:

الاختصار	معناه	ما يُخلط به
NO / NC	مفتوح / مغلق في الحالة الطبيعية المحددة	ليس FO / FC
FO / FC	يفتح / يغلق عند حالة الفشل المحددة (فقد الهواء أو الكهرباء)	«الإغلاق عند العطل» لا يضمن الإغلاق عند كل عطل ممكن؛ راجع وثائق الصمام
FL	يبقى في وضعه الأخير عند الفشل (Fail Last / Locked)	يحتاج إلى إجراء تشغيل يحدد ما يفعله المشغل
LO / LC	مُقفَل على الفتح / مُقفَل على الإغلاق (Car-Seal أو قفل)	تغييره يحتاج إلى إذن عمل
NT	خانق عادة (Normally Throttling)	ليس صمام تحكم بالضرورة

وتنبه إلى السياق: **FC في وسم جهاز = متحكم تدفق، وFC بجوار صمام = يغلق عند الفشل.**

الخطوة 8: اقرأ الحلقة كاملة مع مسار العملية. في مثال FT-201 ← FIC-201 ← FV-201 اسأل: أين القياس بالنسبة إلى الصمام؟ ما نوع الإشارة والمشغل ووضع الفشل؟ وهل الوظيفة ميدانية أم داخل نظام التحكم؟ ولا تقل «LIC يغلق الصمام عند ارتفاع المستوى» قبل أن تعرف **أي صمام**: على خط الدخول يُغلق، وعلى خط الخروج يُفتح.

الخطوة 9: أرقام الخطوط والحدود. رقم الخط (مثل 4"-FW-101-A1) يُقرأ بمفتاح ترقيم المشروع: مقاس، ورمز خدمة، ورقم تسلسلي، وفئة مواصفات؛ ولا تفترض أن FW تعني ماء التغذية أو أن A1 تعني مادة وضغطًا معينين دون تعريف المشروع.

الخطوة 10: الصمامات الاتجاهية ورمز التعشيق (الشكل 5-5 د). في الصمامات الهيدروليكية والهوائية ميّز **عدد الأوضاع** (عدد المربعات) من **عدد المنافذ** (الخطوط الداخلة)؛ فالصمام الموسوم (2 Position, 3 Way) له وضعان وثلاثة منافذ، ووسيلة التشغيل (ملف، دليل، نابض) مرسومة على الجانبين. ورمز التعشيق «غير المحدد» يخبرك بوجود منطق حماية ولا يشرحه؛ شروط الفصل والتأخير والتصويت في مخطط المنطق أو مصفوفة السبب والنتيجة (القسم 17.10.1).

طريقة التدرّب (خطوات):

1. اختر جزءًا صغيرًا من مخطط فعلي (مضخة وخطوطها مثلًا).
2. عرّف المسار: من أين يأتي المائع وإلى أين يذهب، وما المعدات التي يمر بها.
3. عرّف الأجهزة: فك حروف كل وسم، ثم اقرأ شكل الرمز وموقعه ونوع خط الإشارة.
4. عرّف الاستجابة: أي جهاز يقيس؟ أي وظيفة تقرر؟ أي صمام أو معدة تنفذ؟ وما الذي يحتاج إلى مستند آخر؟
5. اكتب «قصة التشغيل» في خمسة أسطر ثم قارنها بوصف التشغيل (Control Narrative).
6. لا تستخدم مخططًا تعليميًا أو تفسير الرموز وحده لإجراء عزل أو تشغيل ميداني؛ طابق الرسم المعتمد بمراجعته الأخيرة مع حالة المعدة وإجراءات الموقع.

الخلاصة: **اقرأ P&ID كقصة تشغيل مترابطة: مائع يتحرك، وأجهزة تقيس، ووظائف تقرر، ومعدات تستجيب؛ أما مفتاح الرموز فهو قاموس هذه القصة لا القصة كاملة.**

الشكل 5-5: *أدوات قراءة P&ID. (أ) الاتصال والتقاطع، وحدود الحزمة والنطاق ونقطة الواجهة؛ (ب) شكل الرمز وخطوطه: مكان التنفيذ والموقع وإمكانية وصول المشغل؛ (ج) قراءة الصمام: الجسم والمشغل والحالة/وضع الفشل؛ (د) الصمامات الاتجاهية ورمز التعشيق غير المحدد (رسوم على نمط ISA-5.1، R61).*

5.8 تمرين: قراءة مخطط فاصل إنتاج ثلاثي الأطوار

في مخطط فاصل إنتاج ثلاثي الأطوار (V-100) ظهرت الرموز التالية. المطلوب قراءة كل وسم ومكان تنفيذه، ثم مقارنة إجابتك بالعمود الأخير:

الوسم وشكله	القراءة
PT-101 (دائرة بلا خط) ← PIC-101 (دائرة داخل مربع) ← PV-101 (FO) على خط الغاز	حلقة تحكم بضغط الفاصل في DCS عبر صمام خروج الغاز، والصمام ينفتح عند الفشل حتى لا يرتفع الضغط
LT-102 ← LIC-102 ← LV-102 (FC) على خط الزيت	تحكم بمستوى الزيت، والصمام يغلق عند الفشل حتى لا يعبر الغاز إلى خط الزيت (Gas Blow-by)
LT-103 ← LIC-103 ← LV-103 (FC) على خط الماء	تحكم بالسطح الفاصل بين الزيت والماء عبر صمام تصريف الماء
LG-104	مقياس مستوى مرئي محلي
PT-105A/B/C (برمز نظام السلامة) ومكتوب بجانبها HH ← SDV-105 (FC) على مدخل الفاصل	وظيفة سلامة بثلاثة مرسلات مستقلة عن حلقة التحكم، تُغلق صمام المدخل عند الضغط المرتفع جدًا
LT-106A/B ومكتوب بجانبها LL ← SDV-107 (FC) على خط الزيت	حماية من انخفاض المستوى انخفاضًا شديدًا ومنع مرور الغاز إلى المعدات اللاحقة
PSV-108	صمام أمان ميكانيكي، وهو آخر طبقات الوقاية الظاهرة في المخطط ولا يعتمد على أي نظام تحكم

لاحظ أن المخطط يكشف فلسفة الحماية كلها على هيئة طبقات: تحكم في DCS، ثم إنذارات، ثم وظائف سلامة بمرسلات مستقلة، ثم حماية ميكانيكية (القسم 29.2).

مثال محلول (عدّ الإشارات من المخطط): من مخطط الفاصل ثلاثي الأطوار V-100 في التمرين السابق نعدّ الإشارات التي يحتاجها كل نظام، ثم نضيف احتياطيًا مركبًا 20% لكل نوع.

الأداة	النظام	مدخل تناظري	مخرج تناظري	مدخل منفصل	مخرج منفصل
PT-101 و-PV 101	نظام التحكم الأساسي	1	1	0	0
LT-102 و-LV 102	نظام التحكم الأساسي	1	1	0	0
LT-103 و-LV 103	نظام التحكم الأساسي	1	1	0	0
LG-104	محلي	0	0	0	0
PT-105A/ B/C	نظام السلامة	3	0	0	0
LT-106A/B	نظام السلامة	2	0	0	0
SDV-105 و SDV-107	نظام السلامة	0	0	4 (مفتاحا نهاية شوط لكل صمام)	2
PSV-108	ميكانيكي	0	0	0	0

- **الحل:** نظام التحكم الأساسي: 3 مداخل و3 مخارج تناظرية، ومع 20% تصير 3.6، أي 4 قنوات لكل نوع. نظام السلامة: 5 مداخل تناظرية تصير 6، و4 مداخل منفصلة تصير 5، ومخرجان منفصلان يصيران 3.
- **المعنى ميدانيًا:** العدّ من المخطط هو أول نسخة من قائمة الإشارات (تُفصَّل في الفصل 52 من الجزء القادم)، ويُظهر أن ما يبدو «فاصلًا بسيطًا» يحتاج نظامين

منفصلين؛ فالمرسلات الثلاثة PT-105A/B/C لا تُحسب على نظام التحكم ولو كانت تُعرض على شاشته. وأي أداة لا يظهر لها في المخطط مسار إشارة (مثل LG-104 وPSV-108) لا تدخل قائمة الإشارات، لكنها تدخل قائمة الأجهزة.

5.9 حالة ميدانية: حرفان على المخطط ومشغِّل مختلف في الميدان

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

بعد استبدال مشغِّل تالف لصمام مستوى على خط الماء بمشغِّل من المخزن، نجح اختبار شوط الصمام من 0 إلى 100%، وعاد إلى الخدمة. وخلال اختبار وظيفي لاحق لفقدان هواء الأجهزة انفتح الصمام بدل أن يغلق، بينما يظهر في المخطط FC. كان المشغِّل الجديد من الطراز نفسه، لكنه مجمَّع بوضع النابض المعكوس (هواء للإغلاق)، والفني عكس اتجاه عمل الموضّع ليجعل الشوط يبدو سليمًا. فالتحكم العادي بدا صحيحًا، بينما كانت حالة الفشل معكوسة، وهي حالة لا تظهر إلا عند الحاجة إليها.

الدروس: المخطط يحدد المتطلب، والميدان هو الذي يجب أن يُثبت المطابقة؛ وكل استبدال لمشغِّل أو موضّع ينتهي باختبار وضع الفشل فعليًا (بقطع الهواء والإشارة) لا باختبار الشوط وحده.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويتحقق منه
مفتاح الرموز والترقيم	يعتمد أوراق مفتاح الرموز ونظام الترقيم، ويعرّف ما تتركه المواصفة «باختيار المستخدم»	يقرأ الرمز بتعريف المشروع، ويبلغ عن أي رمز أو وسم غير معرّف
الوسوم	يضمن تطابق الوسم في P&ID وفهرس الأجهزة وقاعدة بيانات النظام	يطابق لوحة الجهاز المعدنية في الميدان مع الوسم، ويسجل كل اختلاف

المهمة	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويتحقق منه
وضع الفشل	يحدد FO أو FC أو FL لكل صمام، ويتأكد من مراجعته في HAZOP ومطابقته لورقة البيانات	يختبر وضع الفشل فعليًا بقطع الهواء والإشارة بعد كل استبدال لمشغّل أو موضّع
عدّ الإشارات	يعدّ الإشارات من المخطط ويوزعها بين نظام التحكم ونظام السلامة ويضيف الاحتياطي	يتحقق في فحص الحلقات من أن كل إشارة وصلت إلى النظام المخصص لها
العمل الميداني	يوفّر المخطط المعتمد بآخر مراجعة، ويتابع تحديث «كما بُني» بعد كل تعديل	لا يعزل ولا يشغّل بمخطط تعليمي أو قديم، ويطابق الرسم مع حالة المعدة (الفصل 13)

5.10 الأخطاء الشائعة

- تفسير المخطط دون مراجعة أوراق مفتاح الرموز الخاصة بالمشروع.
- اختيار الحرف الأول حسب المتغير المتحكَّم فيه بدل المتغير المقيس.
- اختلاف الوسم بين المخطط وقائمة الأجهزة وقاعدة بيانات النظام واللوحة الميدانية.
- إهمال حالة الفشل أو عدم مطابقتها مع المشغِّل المركَّب.
- العمل على مخطط بمراجعة قديمة أو غير محدَّث بالتعديلات المنفذة (As-Built).
- الخلط بين رموز التحكم ورموز السلامة، أو استخدام مرسل واحد للوظيفتين خلافًا للمخطط.

5.11 ملخص

يبدأ فهم العملية من PFD، ويكتمل التصميم في P&ID. شكل الرمز يحدد مكان تنفيذ الوظيفة والوصول إليها، والحرف الأول يحدد المتغير المقيس، والحروف اللاحقة تحدد الوظيفة، والخطوط تحدد نوع الإشارة. وتتعدد أنظمة الترقيم بين ISA وKKS ومواصفات الشركات، لكن المبدأ واحد: وسم واحد متطابق في كل وثيقة وفي الميدان. وحالة الفشل المكتوبة بجانب الصمام قرار سلامة يُختبَر فعليًا.

وفي الفصل التالي: الفصل 6 «قياس الضغط والضغط التفاضلي»؛ فبعد أن عرفنا كيف يُسمّى الجهاز ويُرسم، نبدأ الباب الثاني بأكثر القياسات انتشارًا، وهو أساس كثير من قياسات التدفق والمستوى.

5.12 أسئلة التقييم الذاتي

1. اشرح معنى كل من: TIC-210، وPDAH-305، وFQI-120، وZSC-450.
2. صمام يتحكم في تدفق البخار بناءً على حرارة مخرج مبادل. ما وسمه الصحيح وفق ISA-5.1؟ ولماذا؟
3. ما الفرق بين دائرة بخط متصل، ودائرة بخط متقطع، ودائرة داخل مربع؟
4. ارسم بالكلمات سلسلة حلقة تحكم بالمستوى من المرسل إلى الصمام مع وسومها وأنواع خطوط الإشارة.
5. فسّر الوسم LAB10 CT002 1 وفق منطق KKS.
6. لماذا تُستخدم اللواحق A وB وC في وسوم مرسلات السلامة؟
7. في التمرين 5.8، لماذا كان صمام خروج الغاز FO بينما صمام الزيت FC؟
8. اذكر ثلاثة فروق بين IEC 62424 وISA-5.1.
9. ما المعلومات التي تجدها في P&ID ولا تجدها في PFD؟
10. في الحالة 5.9، ما الاختبار الذي كان يجب إجراؤه فور تركيب المشغِّل؟

مراجع الفصل: محتوى P&ID ورموز المعدات والوصلات وحقول التسمية وفئات PCE وعلامات الأهمية وفق IEC 62424 (Shardt، Automation Engineering، القسم 4.3)؛ وحدة P&ID في دورة (Instrumentation and Process Control)؛ مكونات الحلقة ورموز (ISA (PAControl، Process Control Fundamentals؛ استخدام ترميز KKS في نماذج الاختبار (I&C Commissioning Instruction، MAPNA/Monenco)؛ ANSI/ISA-5.1؛ IEC 62424؛ R61 (مذكرة المؤلف في قراءة P&ID، 5.7.1).

الباب الثاني: أجهزة القياس والمعايرة

ينتقل هذا الباب من الفكرة إلى الجهاز: قياس الضغط والحرارة والتدفق والمستوى (الفصول 6–9)، ثم المحللات وأنظمة أخذ العينات (الفصل 10)، والمفاتيح والحساسات المنفصلة (الفصل 11)، والقياسات المتخصصة (الفصل 12). ثم يتوقف عند السلامة قبل وضع اليد على أي جهاز في الموقع (الفصل 13)، لأن ما يليه، المعايرة والتحقق (الفصل 14)، عمل ميداني يبدأ بعزل آمن. ولكل تقنية في الباب: المبدأ، والاختيار، والتركيب، والمعايرة، والأعطال.

الفصل 6: قياس الضغط والضغط التفاضلي

لمن هذا الفصل: المهندس الجديد ومهندس الموقع؛ الضغط أكثر المتغيرات قياسًا، والضغط التفاضلي أساس نصف قياسات التدفق والمستوى.

الفكرة الأساسية: المرسل نادرًا ما يكون هو المشكلة؛ خطوط النبض والمانيفولد والتركيب هي مصدر أغلب أخطاء الضغط في الميدان.

6.1 المبدأ

الضغط قوة على مساحة: P = F/A. والتفاضلي فرق بين جانبين: ΔP = P_H − P_L. تحوّل الحساسات الضغط إلى إزاحة غشاء (Diaphragm) ثم إلى إشارة كهربائية بأحد المبادئ:

المبدأ	كيف يعمل	ميزاته وحدوده
المقاومة الإجهادية (Piezoresistive) بمقياس انفعال (Strain Gauge) على السيليكون	تغيّر مقاومة عناصر على الغشاء	الأكثر شيوعًا؛ حساس للحرارة ويعوَّض داخليًا
السعوي (Capacitive)	تغيّر السعة بين الغشاء ولوح ثابت	ممتاز لفرق الضغط الصغير والاستقرار طويل الأمد
الرنيني (Resonant) برنّان سيليكوني (Silicon Resonator)	تغيّر تردد عنصر رنّان	دقة عالية جدًا واستقرار؛ أغلى
الكهرضغطي (Piezoelectric)	شحنة كهربائية من الإجهاد	للضغط الديناميكي فقط (ديناميكا الاحتراق) لا الساكن

المبدأ	كيف يعمل	ميزاته وحدوده
ميكانيكي: أنبوب بوردون أو منفاخ أو غشاء (Bourdon / Bellows / Diaphragm)	إزاحة ميكانيكية إلى مؤشر	المقاييس المحلية (Gauges) والمفاتيح

كيف أختار؟ المرسل الصناعي العام مقاومة إجهادية أو سعوي، والسعوي أفضل للضغط التفاضلي الصغير مع ضغط ساكن عالٍ وللاستقرار طويل الأمد، والرنيني حين تكون الدقة والاستقرار مطلبًا يُدفع ثمنه (القياس التجاري والمراجع)، والكهرضغطي للنبضات الديناميكية فقط ولا يقرأ ضغطًا ساكنًا. والجدول لا يبيّن أثر التركيب وخطوط النبض الذي يفوق فروق المبادئ كلها (القسم 6.3)، ولا حدود حرارة الإلكترونيات عند الحساس. والخطأ الأكثر كلفة اختيار حساس كهرضغطي أو مقياس ميكانيكي لخدمة تحتاج قيمة ساكنة مستمرة إلى النظام، أو دفع ثمن الرنيني لحلقة تحكم عادية لا يُترجم فيها فارق الدقة إلى قرار.

المرسل الذكي يضم الحساس والتعويض الحراري وA/D ومعالجًا واتصال HART، ويعطي مع الضغط قيمة حرارة الحساس وحالة التشخيص.

جدول مقارنة: أنواع قياس الضغط بحسب المرجع

النوع	المرجع	ما يقيسه	أين يُستخدم	ما يُخطئ فيه الناس
المقياس (Gauge)	الجو المحلي	الفرق عن الضغط الجوي	غالبية العمليات (barg)	قراءته لضغط مطلق ثابت تتغير مع الطقس (نحو ±30 mbar) ومع الارتفاع عن سطح البحر
المطلق (Absolute)	الفراغ التام	الضغط الكلي	الفراغ، المكثفات، تعويض الغازات	قراءة 1.013 bar عند الجو ليست عطلًا

النوع	المرجع	ما يقيسه	أين يُستخدم	ما يُخطئ فيه الناس
التفاضلي (DP)	ضغط ثانٍ من العملية	الفرق بين نقطتين	التدفق، المستوى، المرشحات	الضغط الساكن العالي يزيح الصفر إن لم يُصحح
المحكم (Sealed Gauge)	ضغط مرجعي محبوس داخل الحساس	الفرق عن مرجع ثابت (نحو 1 bar)	الضغوط العالية والبيئات الرطبة حيث لا يمكن ترك فتحة تنفيس	لا يقرأ صفرًا عند الجو تمامًا

كيف أختار؟ ابدأ من المعادلة التي ستستهلك القياس: النسبي لأغلب العمليات والحمايات (barg)، والمطلق حيث تدخل القيمة في قانون الغازات أو التعويض أو الفراغ (المكثفات وأبراج الفراغ، القسم 6.10)، والتفاضلي حيث المطلوب فرق بين نقطتين (تدفق، مستوى، مرشح)، والمحكم للضغوط العالية والبيئات الرطبة التي لا تسمح بفتحة تنفيس. والجدول لا يبيّن أن مرسل DP يحتاج تحمّل ضغط ساكن مستقلًا عن مداه التفاضلي (القسم 6.2). والخطأ الأكثر كلفة قياس فراغ بمرسل نسبي ثم طرح ضغط جوي ثابت، فيدخل تغير الطقس والارتفاع كله في قيمة صغيرة أصلًا.

6.2 اختيار الجهاز

يُراجع عند الاختيار (تفصيل ورقة البيانات في الفصل 27):

- الاتساع (Span) والقاعدة في الفصل 4، وحدود المدى (Range Limits) ونسبة المدى (Turndown).
- الضغط الساكن (Static / Line Pressure) الذي يتحمله الجسم، وهو غير حد الضغط التفاضلي الذي يتحمله العنصر: مرسل DP يتحمل 250 bar ساكنًا قد يتلف عند تعرض جانب واحد للضغط الكامل والآخر للجو، وهو تجاوز للمدى من جانب واحد (Overrange).

- الحرارة عند الحساس (حدود الإلكترونيات نحو 85 °C غالبًا) وحرارة العملية (تحتاج خط نبض أو حاجزًا غشائيًا (Diaphragm Seal)).
- الوسط والمواد: SS316L كحد أدنى؛ Hastelloy C للكلوريدات؛ NACE MR0175 للخدمة الحامضة (H_2S).
- الوصلة: ½" NPT أو فلنجة؛ ¼" NPT للمقاييس الصغيرة.
- الدقة وزمن الاستجابة والتخميد (Damping) المهيأ.
- التغذية والإشارة: سلكان 4–20 mA + HART هو المعيار؛ الشبكات الحقلية (Fieldbus) حيث اعتُمد.
- البيئة والمنطقة الخطرة: IP66، Ex ia أو Ex d (الفصل 26)، الحرارة المحيطة.

6.3 خطوط النبض (Impulse Lines)

خط النبض أنبوب صغير (عادة ½" أو ⅜" SS) ينقل الضغط من الوصلة إلى المرسل. أخطاؤه تفوق أخطاء المرسل:

المشكلة	الأثر	الوقاية
انسداد	قراءة ثابتة أو بطيئة	تصريف دوري، تطهير بالنفخ (Purge)، حاجز غشائي (Diaphragm Seal) للأوساط القذرة
تسرب	قراءة منخفضة، خطر بيئي	اختبار ضغط بعد التركيب، وصلات ضغط (Compression Fittings) مركّبة تركيبًا سليمًا
تجمع سائل في خط غاز	خطأ ارتفاع ساكن يعادل عمود السائل	ميل الخط إلى الأسفل نحو العملية (Slope 1:12)، المرسل فوق نقطة القياس
جيوب غاز في خط سائل	تذبذب وخطأ	ميل الخط إلى الأسفل نحو المرسل (أي إلى الأعلى نحو العملية) لتعود الفقاعات إلى الخط، المرسل أسفل نقطة القياس، تنفيس

المشكلة	الأثر	الوقاية
أثر حراري	تغير كثافة سائل الملء	خطوط متساوية الطول ومعرّضة للظروف نفسها في DP
تجمد أو تبلور	انسداد وتلف	تتبع حراري (Heat Tracing) وعزل
خطأ ارتفاع	انزياح ثابت	يُعوَّض بإزاحة المدى (Zero Elevation / Suppression) في التهيئة، لا بتصفير الحساس (Zero Trim) الذي يُجرى بعد موازنة الجانبين

في البخار تُملأ الخطوط بالماء ويوضع وعاء تكثيف (Condensate Pot) عند مستوى واحد للجانبين؛ ويُعاير المرسل مع احتساب عمود الماء.

الشكل 6-1: *القواعد الأساسية لتركيب خطوط النبض: المرسل فوق نقطة الأخذ في الغاز، وأسفلها في السائل، ووعاءا تكثيف على مستوى واحد في البخار.*

جدول مقارنة: توصيل المرسل بالعملية

المعيار	خط نبض (Impulse Line)	حاجز غشائي (Diaphragm Seal)	تركيب مباشر (Direct Mount)
ما يناسبه	غاز نظيف، بخار مع أوعية تكثيف	سوائل لزجة أو أكالة أو متبلورة، حرارة عالية	هواء الأجهزة والخطوط القريبة الباردة
الاستجابة	سريعة إن كان الخط قصيرًا	تبطئ مع طول الشعيرة وبرودة السائل	الأسرع
مصادر الخطأ	انسداد، فقاعات، تجمد، فرق ارتفاع	تمدد سائل الملء مع الحرارة، تسرب الملء	حرارة العملية تصل إلى الإلكترونيات
الصيانة	تنظيف ونفخ دوري، عزل عند التبديل	لا يُفتح؛ يُبدَّل بالكامل	بسيطة
الكلفة	الأقل	الأعلى (خاصة الشعيرات المزدوجة)	متوسطة
قاعدة عملية	ميل 1:12 في الاتجاه الصحيح (نحو العملية في الغاز، ونحو المرسل في السائل والبخار)، صمام نفخ	شعيرتان متساويتا الطول في DP	لا للبخار ولا فوق 85 °C عند الإلكترونيات

كيف أختار؟ خط النبض هو الافتراضي للغاز النظيف والبخار (مع وعاءي تكثيف)، والتركيب المباشر حيث يكون الوسط باردًا نظيفًا وقريبًا، والحاجز الغشائي حين يمنع الوسط (لزج، أكّال، متبلور، ساخن) الخيارين الأولين مهما كان ثمنه. والجدول لا يبيّن أن الحاجز يغيّر مواصفة الجهاز كله: زمن استجابة أبطأ، وأثر حرارة يُحسب من طول الشعيرة وسائل الملء، ولا يُصلَح في الموقع بل يُستبدل. والخطأ الأكثر كلفة تركيب المرسل بخط نبض في الاتجاه الخاطئ (فوق الخط في السائل أو تحته في الغاز)، فتعيش الحلقة سنوات على خطأ ارتفاع أو فقاعات يُعالَج كل مرة بإعادة تصفير.

6.4 أنماط التركيب

تحدد وثيقة أساس التصميم (الفصل 25) النمط الافتراضي للمشروع:

- **التركيب المباشر:** المرسل على الوصلة مباشرة عبر المانيفولد؛ أقل أنابيب وأقل أخطاء، ويحتاج وصلة في مكان يمكن الوصول إليه.
- **التركيب البعيد (Remote Mount):** المرسل على حامل (Stand) مع خط نبض؛ لتسهيل الوصول أو تجنب الاهتزاز والحرارة.
- **التركيب المتقارب (Close-Coupled):** ترتيب مضغوط بين المباشر والبعيد.

التفاصيل تُرسم في مخطط التركيب (Hook-up Drawing) وتُحسب منها كميات المواد (MTO). والقاعدة أن تُثبَّت أنابيب النبض على حوامل مستقلة لا يحمل الجهاز وزنها، وأن تُعزل أو تُتبَّع حراريًا حيث يُخشى التجمد أو التكثف (يُفصَّل في الفصل 77 من الجزء القادم).

6.5 المانيفولد (Manifolds)

مجموعة صمامات مدمجة بين الوصلة والمرسل:

النوع	الصمامات	الاستخدام
ثنائي الصمامات (2-Valve)	عزل + تنفيس/اختبار	مرسل ضغط (PT)
ثلاثي الصمامات (3-Valve)	عزلان + موازنة (Equalize)	مرسل DP للتدفق

النوع	الصمامات	الاستخدام
خماسي الصمامات (5-Valve)	نوعان شائعان: (أ) عزلان + موازنة + تنفيس لكل جانب؛ (ب) عزلان + موازنتان + تنفيس/اختبار أوسط (شائع في قياس الغاز التجاري)	مرسل DP للمستوى أو حيث يلزم تصريف كل جانب أو توصيل معاير من منفذ واحد؛ يُتبع دليل صانع المانيفولد لأن ترتيب الصمامات يختلف

تسلسل التعامل مع المانيفولد الثلاثي (3-Valve): هذا هو التسلسل الموحد في الكتاب، ويتطابق مع القسم 14.12 والشكل 14-9 وأدلة صانعي المرسلات.

- **لإخراج المرسل من الخدمة:** أغلق عزل الجانب العالي، ثم افتح الموازنة، ثم أغلق عزل الجانب المنخفض، ثم نفّس.
- **لإعادته إلى الخدمة:** تأكد أن الموازنة مفتوحة، ثم افتح عزل الجانب العالي ببطء (فيصل الضغط إلى الجانبين معًا عبر الموازنة)، ثم أغلق الموازنة، ثم افتح عزل الجانب المنخفض.

لماذا لا نفتح الموازنة أولًا والعزلان مفتوحان؟ لأن ذلك يفتح مسارًا للجريان من الجانب العالي إلى المنخفض يتجاوز العنصر الأولي. فيتحرك السائل في خطوط النبض، وتفرغ الساق المملوءة في خدمات البخار والمستوى، ويدخل السائل إلى الخطوط في خدمة الغاز. أما إغلاق عزل الجانب العالي أولًا فيمنع ذلك دون أن يعرّض الغشاء لضغط أحادي الجانب، لأن الضغط المحبوس على الجانب العالي يساوي ضغط الخط تقريبًا. وعكس أي خطوة يعرّض العنصر لضغط الخط كاملًا على جانب واحد أو يطلق مادة إلى الجو. لذلك يُكتب التسلسل في إجراء الصيانة ولا يُترك للذاكرة، ويُراجع مقابل دليل صانع المانيفولد إذا اختلف تصميمه (النوع ب في الشكل 6-2).

الشكل 6-2: *ثلاثة تصاميم شائعة لمانيفولد مرسل الضغط التفاضلي: الثلاثي، والخماسي بتنفيس لكل جانب (النوع أ)، والخماسي بموازنتين وتنفيس أوسط (النوع ب)؛ وتسلسل تشغيل واحد لإخراج المرسل من الخدمة وإعادته.*

6.6 الحواجز الغشائية (Diaphragm Seals / Remote Seals)

تفصل الوسط عن المرسل بغشاء وسائل ملء عبر أنبوب شعري (Capillary). تُستخدم للأوساط القذرة أو اللزجة أو الساخنة أو السامة. يتأثر أداؤها بـ:

- مادة الغشاء وقطره (الغشاء الصغير أشد حساسية للحرارة).
- سائل الملء (سيليكون، Halocarbon للأكسجين، نباتي للأغذية) وحدود حرارته وضغطه.
- طول الشعري (يبطئ الاستجابة ويزيد أثر الحرارة) وفرق الارتفاع بين الغشاء والمرسل (انزياح ثابت يُعوَّض).
- تعرض الشعريين لظروف مختلفة في DP (شمس على أحدهما دون الآخر).

حالة تشخيصية: قراءة مستوى تتغير مع ساعات النهار دون تغير في الوعاء؛ السبب غالبًا تمدد سائل الملء في شعري معرّض للشمس أطول من الآخر. الحل تسوية الأطوال والعزل والتظليل، أو الحاجز الإلكتروني البعيد (Electronic Remote Seal): حساسان موصولان بكابل يحسب المرسل الرئيس فرق قراءتيهما.

6.7 المفاتيح والمقاييس المحلية

مفتاح الضغط (Pressure Switch) يعطي تلامسًا عند نقطة ضبط؛ يُستبدل بمرسل ومنطق تحكم في أغلب التصاميم الحديثة لسهولة التشخيص، لكنه يبقى في الحزم (Packages) والأنظمة البسيطة. أما المقياس المحلي (Gauge) فمرجع سريع للتحقق، ويُفضَّل اختياره وحمايته وفئات دقته في القسم 6.9.

6.8 المعايرة والتحقق في الميدان

وفق إجراءات المعايرة الميدانية النموذجية (كما في وثائق التشغيل لمحطات الدورة المركبة):

1. عزل المرسل بالتسلسل الصحيح وتنفيسه، مع تصريح عمل وعزل وفق الفصل 13؛ والخطوات التفصيلية في القسم 14.12.
2. توصيل مصدر ضغط مرجعي، كمضخة يدوية أو مختبر الأثقال (Deadweight Tester)، ومعاير رقمي دقته أفضل من دقة المرسل أربع مرات على الأقل (نسبة 4:1).
3. تسجيل القراءات كما وُجدت (As-Found) عند 0، 25، 50، 75، 100% صعودًا ثم هبوطًا (يكشف التخلف).
4. ضبط الصفر (Zero) والاتساع (Span) إن لزم بالتصحيح (Trim) عبر HART، ثم تسجيل القراءات كما تُركت (As-Left).
5. إعادة الخدمة بالتسلسل الصحيح، والتحقق من القراءة على النظام بفحص مختصر للحلقة (Loop Check).

تصفير الحساس (Zero Trim) تحت ضغط الخط الساكن يلزم عادة لمرسلات DP ذات الضغط الساكن العالي والمدى الصغير، لأن ارتفاع الضغط على الجانبين معًا يشوّه جسم الخلية الحساسة ويُظهر عدم تماثل جانبيها فيزيح الصفر؛ ويُتبع فيه دليل الصانع، إذ

يعوّض بعض المرسلات هذا الأثر داخليًا. التفاصيل والسجلات في الفصل 14 وملحق نماذج التشغيل والصيانة (مخطط).

ولفهم ما يُعايَر فعلًا يحسن تصور ما يجري داخل مرسل الضغط التفاضلي (الشكل 6-3): يدخل الضغطان من الجانبين على غشاءين عازلين، وينقل سائل ملء (زيت سيليكون عادة) الفرق بينهما إلى غشاء الاستشعار في المنتصف، فيتغير موضعه بمقدار ميكرونات، وتُقاس هذه الإزاحة الدقيقة سعويًا بين لوحين ثابتين، ثم تحوّلها الإلكترونيات إلى تيار 4–20 mA.

الشكل 6-3: *مقطع ثلاثي الأبعاد في مرسل ضغط تفاضلي سعوي: غشاءا العزل HP وLP، وسائل الملء الذي ينقل فرق الضغط إلى غشاء الاستشعار بين لوحين سعويين، وبطاقة الإلكترونيات ومعالج HART في الرأس.*

6.9 المقاييس الميكانيكية المحلية

المقياس المحلي (Pressure Gauge) أرخص أجهزة الضغط وأكثرها عددًا في أي منشأة، وهو أول ما ينظر إليه المشغل حين يشك في قراءة غرفة التحكم. ولأنه بسيط يُهمل

اختياره كثيرًا، فيُركب بمدى غير مناسب أو دون حماية، فيتلف خلال أشهر أو يعطي قراءة لا يُعتمد عليها.

العناصر الحساسة: أنبوب بوردون (Bourdon Tube) على شكل حرف C هو الأكثر شيوعًا من نحو 1 bar إلى مئات البارات، ويُلف حلزونيًا للضغوط الأعلى أو لزيادة الإزاحة. وللضغوط المنخفضة يُستخدم الغشاء (Diaphragm) أو الكبسولة (Capsule) أو المنفاخ (Bellows)، لأنها تعطي إزاحة كافية بقوة صغيرة.

فئات الدقة: تُحدد دقة المقياس بنسبة مئوية من المدى الكامل، وأشهر تصنيفين:

المعيار	الفئات	الاستخدام النموذجي
EN 837-1	الفئة 0.1 و0.25 و0.6 للمقاييس المرجعية، والفئة 1.0 و1.6 و2.5 للمقاييس الصناعية	الفئة 1.0 أو 1.6 للمقاييس الصناعية العادية
ASME B40.100	4A بدقة 0.1%، و3A بدقة 0.25%، و2A بدقة 0.5%، و1A بدقة 1%	2A و3A و4A لمقاييس الاختبار
ASME B40.100 (تابع)	الفئة A: 2% في الربع الأول والأخير و1% في النصف الأوسط، ثم B وC وD بدقة أقل	الفئة A للمقاييس الصناعية العامة

والدقة الفعلية للقراءة تتوقف أيضًا على حجم القرص وعدد تقسيماته. فمقياس بقطر 63 mm لا يُقرأ بدقة 0.25% مهما كانت فئته، ولذلك تُستخدم أقطار 100 mm و150 mm في الخدمة العامة، وأكبر منها لمقاييس الاختبار.

اختيار المدى: القاعدة العملية أن يقع ضغط التشغيل العادي في الثلث الأوسط من التدريج. وألا يتجاوز أقصى ضغط ثابت نحو 75% من المدى، ولا أقصى ضغط نابض نحو 65%. فالمقياس الذي يعمل دائمًا قرب نهاية تدريجه يُجهد أنبوبه ويفقد معايرته، والمقياس الذي يعمل قرب الصفر يعطي قراءة ضعيفة الدقة.

مثال محلول (اختيار مدى المقياس): خط تصريف مضخة ضغطه العادي 12 bar، وأعلى ضغط عند الإغلاق 16 bar (Shut-off)، والضغط نابض.

- أقل مدى يحقق شرط النبض: 16 ÷ 0.65 = 24.6 bar.
- المديات القياسية القريبة: 0–25 bar و0–40 bar.
- مع المدى 0–25 bar يقع الضغط العادي عند 48%، أي في الثلث الأوسط، والضغط الأقصى عند 64%. فهذا هو الاختيار الصحيح.
- أما المدى 0–40 bar فيضع الضغط العادي عند 30%، داخل الثلث الأول قرب حافته، وتقل دقة القراءة. وأما 0–16 bar فمرفوض لأن الضغط الأقصى يبلغ نهاية التدريج.

السلامة والملحقات:

- **المقياس الآمن (Safety Pattern):** فيه جدار صلب بين العنصر الحساس والزجاج، وظهر ينفصل للخلف إذا انفجر الأنبوب، فيندفع الضغط بعيدًا عن وجه الواقف أمامه. ويسميه EN 837-1 مستوى الأمان S3، ويوصى به للغازات والضغوط العالية.
- **التعبئة بالسائل:** يُملأ الغلاف بالجليسرين أو بالسيليكون للمقاييس المركبة على خطوط فيها اهتزاز أو نبض، فيخمد اهتزاز المؤشر ويحمي الآلية من التآكل. ويُفضل السيليكون حين تكون الحرارة المحيطة منخفضة جدًا؛ أما مع الأوساط المؤكسدة (الأكسجين والكلور وحمض النتريك) فلا يجوز الجليسرين ولا السيليكون، بل ملء هالوكربوني (Halocarbon).
- **مخمّد النبض (Snubber):** قطعة مسامية أو فتحة صغيرة تحد التغيرات السريعة في الضغط، وتُستخدم على تصريف المضخات الترددية والضواغط.

- **الأنبوب الملفوف (Siphon):** يُركب على خطوط البخار، فيتجمع فيه متكثف يحمي أنبوب بوردون من حرارة البخار المباشرة. ويُملأ بالماء قبل فتح صمام العزل أول مرة.
- **الحاجز الغشائي:** يعزل المواد الأكالة أو اللزجة أو التي تتصلب عن المقياس، كما في مرسلات الضغط (6.6).
- **صمام العزل والتنفيس:** يُركب صمام عزل مع منفذ تنفيس أو صمام مقياس (Gauge Valve)، ليُفك المقياس ويُفحص دون إيقاف الخط.

الشكل 6-4: *اختيار مدى المقياس بحيث يقع التشغيل العادي في الثلث الأوسط، وثلاثة ملحقات شائعة لحمايته: الأنبوب الملفوف للبخار، ومخمّد النبض، والحاجز الغشائي.*

الشكل 6-5: *مقطع ثلاثي الأبعاد في مقياس ضغط بأنبوب بوردون: يدخل الضغط من الوصلة الملولبة إلى أنبوب مسطح المقطع منحنٍ على شكل C، فيميل إلى الاستقامة ويتحرك طرفه الحر، وتنقل وصلة وقطاع مسنن هذه الحركة الصغيرة مكبرة إلى ترس صغير يدير محور المؤشر على القرص المدرج.*

6.10 قياس الفراغ

الفراغ (Vacuum) ضغط أقل من الضغط الجوي، ويصادفه مهندس التحكم في مكثفات التوربينات البخارية، وأبراج التقطير تحت الفراغ في المصافي، ونازعات الهواء الفراغية (Vacuum Deaerators) في معالجة المياه، وأنظمة التجفيف والتعبئة. وأول ما يجب ضبطه في قياس الفراغ هو المرجع: هل نقيس الضغط المطلق أم الفرق عن الضغط الجوي؟

لماذا يُقاس الفراغ بالضغط المطلق؟ مقياس الفراغ النسبي يقرأ الفرق بين ضغط العملية والضغط الجوي. والضغط الجوي يتغير مع الطقس والارتفاع. فإذا حسبنا الضغط المطلق بطرح القراءة من قيمة ثابتة للضغط الجوي، دخل الخطأ كله إلى النتيجة. وفي عمليات الفراغ العميق يكون هذا الخطأ من رتبة القيمة المقاسة نفسها.

> **مثال محلول (خطأ الفراغ النسبي):** مكثف توربين بخاري يقرأ مرسله النسبي −0.920 barg.
>
> - إذا افترض النظام ضغطًا جويًا ثابتًا 1.013 bar، فالضغط المطلق المحسوب 1.013 − 0.920 = 0.093 bar، أي 93 mbar.
> - لكن المحطة على ارتفاع يجعل الضغط الجوي الفعلي في ذلك اليوم 0.980 bar. فالضغط المطلق الحقيقي 0.980 − 0.920 = 0.060 bar، أي 60 mbar.
> - الخطأ 33 mbar، أي أكثر من 50% من القيمة الحقيقية. وقد يؤدي ذلك إلى إنذار انخفاض فراغ كاذب، أو إلى إخفاء انخفاض حقيقي في يوم آخر.

لذلك تُستخدم مرسلات الضغط المطلق في المكثفات وأبراج الفراغ، وتُعاير بمرجع مطلق.

حساسات الفراغ بحسب المدى:

نوع الحساس	المبدأ	المدى التقريبي (مطلق mbar)	ملاحظات
المقاييس الميكانيكية (بوردون والكبسولة)	إزاحة عنصر مرن	من الجوي إلى نحو 1	للقراءة المحلية التقريبية
مرسلات الضغط المطلق الصناعية	غشاء سعوي أو سيليكوني مع فراغ مرجعي	من الجوي إلى نحو 1	الاختيار المعتاد للمكثفات وأبراج الفراغ

نوع الحساس	المبدأ	المدى التقريبي (mbar مطلق)	ملاحظات
المانومتر السعوي (Capacitance Manometer)	غشاء رقيق يشكل مكثفًا مع فراغ مرجعي	من الجوي إلى نحو 10^{-4}، وكل رأس يغطي أربع أو خمس رتب	لا يتأثر بنوع الغاز، ودقيق
حساس بيراني (Pirani) الحراري	فقد حرارة سلك ساخن بتوصيل الغاز	من نحو 10^{-4} إلى الجوي في الطرازات الحديثة	يتأثر بنوع الغاز ويحتاج معامل تصحيح
المزدوج الحراري للفراغ	حرارة سلك مسخن بتيار ثابت	من نحو 10^{-3} إلى 1	بسيط ورخيص، ودقته محدودة
مقاييس التأين (الكاثود الساخن والبارد)	تأين جزيئات الغاز وقياس التيار	من نحو 10^{-3} إلى 10^{-10}	للفراغ العالي في المختبرات والصناعات الدقيقة
مقياس ماكلويد (McLeod)	ضغط حجم معلوم من الغاز وقياس ارتفاع الزئبق	من نحو 1 إلى 10^{-5}	مرجع مختبري، لا يُستخدم للتحكم

كيف أختار؟ لمكثفات التوربينات وأبراج الفراغ يكفي مرسل ضغط مطلق صناعي (سعوي أو سيليكوني بفراغ مرجعي) يغطي من الجوي إلى نحو 1 mbar، والمانومتر السعوي حين يلزم عدم التأثر بنوع الغاز في التجفيف والتعبئة، أما بيراني والتأين وماكلويد فللفراغ العميق في المختبرات والصناعات الدقيقة لا للتحكم في العمليات. والجدول يعطي المدى لا التركيب: في الفراغ يضيف عمود متكثف ارتفاعه 10 cm نحو 10 mbar، وكل وصلة مصدر تسريب هواء يرفع القراءة (ملاحظات التركيب أدناه). والخطأ الأكثر كلفة معايرة مرسل مطلق بمرجع نسبي دون تصحيح الضغط الجوي، فيُثبَّت في الحلقة خطأ بحجم القيمة المقاسة نفسها.

الشكل 6-6: *مجالات عمل حساسات الفراغ الشائعة على مقياس لوغاريتمي، مع النطاق النموذجي لضغط مكثف التوربين البخاري.*

ملاحظات التركيب في الفراغ:

- يُركب المرسل أعلى من نقطة القياس، ويميل خط النبض نحو الوعاء، حتى يعود أي متكثف إليه ولا يتجمع في الخط. فعمود ماء ارتفاعه 10 cm يضيف نحو 10 mbar، وهي قيمة كبيرة حين يكون الضغط المقاس 50 mbar.
- كل وصلة في خط النبض مصدر محتمل لتسريب هواء، والتسريب يرفع القراءة فوق الضغط الحقيقي. لذلك تُقلل الوصلات وتُجرى لها اختبارات تسرب.
- في المكثفات تُستخدم عادة ثلاثة مرسلات مطلقة لحماية انخفاض الفراغ بتصويت اثنين من ثلاثة (الفصل 37).
- عند معايرة مرسل مطلق يجب أن يكون المرجع مطلقًا أيضًا، أو يُصحح بمقياس ضغط جوي معاير. ولا يُعاير مرسل مطلق بمضخة يدوية ومعاير نسبي دون هذا التصحيح.

6.11 حالة ميدانية: ضغطان صحيحان وتدفق خاطئ

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

العَرَض: مرسل ضغط تفاضلي على لوح فتحة في خط غاز وقود يقرأ تدفقًا أعلى من عدّاد مرجعي في المصب بنحو 7.5% باستمرار. **الفرضيات:** خطأ في معامل الجذر أو المدى في DCS؛ خطأ في المرسل؛ خطأ في خطوط النبض والتركيب. **الفحوص:** (1) المدى ومعامل الجذر في DCS مطابقان لورقة الحساب؛ (2) المرسل على المنضدة صحيح ضمن 0.1%؛ (3) عند فتح صمامات التصريف خرج سائل متكثف من خط النبض الموصول بمنفذ L، لأن المرسل مركّب تحت الخط (خطأ في خدمة الغاز) والخطوط تنحدر إليه فيتجمع فيها المتكثف؛ (4) لكن عمود سائل على الجانب المنخفض يجب أن **يقلل** ΔP الظاهر فتقرأ أقل، لا أكثر. فتُتبعت الخطوط من مآخذ اللوح: مأخذ **المنبع** (P_1) موصول بمنفذ **L** ومأخذ **المصب** (P_2) بمنفذ **H**، أي متصالبان منذ التركيب، وسجل التشغيل التجريبي يبين أن الفني رأى قراءة سالبة يومها فـ«أصلحها» بتهيئة المرسل على مدى معكوس (الخرج يتناسب مع L − H بدل تصحيح التوصيل. **الدليل الحاسم:** الشكل 6-7 يتتبع الحساب: منفذ $P = H_2$، ومنفذ $L = P_1 + \rho g h$، والخرج $\propto (L - H) = \Delta P + \rho g h$؛ فعمود متكثف ارتفاعه 0.4 m (نحو 39 mbar) على ΔP حقيقي 250 mbar يعطي 289 mbar ظاهريًا، والتدفق يتناسب مع الجذر: $\sqrt{(289 \div 250)} = 1.075$، أي نحو +7.5% وهو ما لوحظ. **السبب الجذري:** توصيل معكوس عولج بتهيئة معكوسة بدل تصحيحه، فصار عمود المتكثف يزيد القراءة بدل أن ينقصها؛ خطآن أخفيا بعضهما. **الإجراء:** أُعيد التوصيل الصحيح وأُلغي المدى المعكوس، ونُقل المرسل فوق الخط بخطوط تنحدر نحو الخط، وأُضيف فحص التوصيل وفق مخطط التركيب (Hook-up) إلى قائمة فحص الحلقة قبل تحميل المرسل مسؤولية الخطأ. (مثال تعليمي مركّب؛ الأرقام نموذجية.)

الشكل 6-7: *تتبع الحالة الميدانية 6.11: مآخذ لوح الفتحة متصالبة على منفذي المرسل، وعمود متكثف في خط المنبع، ومدى معكوس في التهيئة؛ فيرتفع الضغط التفاضلي الظاهر من 250 إلى 289 mbar وتقرأ الحلقة تدفقًا أعلى بنحو 7.5%.*

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
الاختيار	المبدأ والمرجع (نسبي أو مطلق أو تفاضلي) والمدى وتحمّل الضغط الساكن والمواد	يطابق اللوحة الاسمية مع ورقة البيانات قبل التركيب
التركيب	النمط ومخطط التركيب (Hook-up) وموضع المرسل واتجاه ميل خطوط النبض	يمدّ الخطوط بالميل الصحيح، ويختبرها ضد التسرب، ويتتبع توصيل H وL إلى المآخذ
المانيفولد	يعتمد التسلسل المكتوب في إجراء الصيانة	ينفذه خطوة خطوة ولا يعتمد على الذاكرة

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
المعايرة	حدود القبول ونسبة دقة المعاير وضرورة ضبط الصفر تحت الضغط الساكن	يسجل القراءات كما وُجدت (As-Found) وكما تُركت (As-Left) صعودًا وهبوطًا، ثم يفحص الحلقة
التشخيص	يحلل السبب ويعتمد الإصلاح الدائم في الوثائق	يصرّف الخطوط، ويقرأ تشخيص HART، ويقارن بالمقياس المحلي

6.12 الأخطاء الشائعة

- خلط تحمّل الضغط الساكن بتحمّل الضغط التفاضلي.
- ميل خط النبض في الاتجاه الخاطئ للغاز أو السائل.
- ترتيب خاطئ في تشغيل المانيفولد.
- شعريان بطولين مختلفين أو معرّضان لظروف مختلفة.
- معايرة مرسل DP دون ضبط الصفر تحت الضغط الساكن.
- تخميد (Damping) مرتفع يخفي التذبذب الحقيقي أو يبطئ الحماية.
- «إصلاح» توصيل معكوس بعكس المدى في التهيئة بدل تصحيح الأنابيب (القسم 6.11).
- قياس الفراغ بمرسل نسبي ثم طرح ضغط جوي ثابت (القسم 6.10).

6.13 ملخص

خمسة مبادئ للحساسات، وثمانية بنود للاختيار، وسبع مشكلات لخطوط النبض، وثلاثة أنماط تركيب، وثلاثة أنواع من المانيفولد بتسلسل تشغيل لا يُخالف. ثم المقاييس المحلية وفئات دقتها، وقياس الفراغ، وحالة ميدانية تُظهر كيف يخفي خطآن أحدهما الآخر. وأغلب أعطال الضغط خارج المرسل.

وفي الفصل التالي: الفصل 7 «قياس درجة الحرارة»؛ فالحرارة هي المتغير الثاني بعد الضغط في عدد نقاط القياس، وهي تدخل في تعويض قياسات الضغط والتدفق نفسها.

6.14 أسئلة التقييم الذاتي

1. مرسل DP يتحمل 160 bar ساكنًا؛ هل يجوز فتح عزل الجانب العالي بينما الجانب المنخفض مفتوح إلى الجو أثناء الاختبار؟ لماذا؟
2. اكتب تسلسل إعادة مرسل DP بثلاثي الصمامات إلى الخدمة.
3. خط نبض غاز طوله 3 m تجمع فيه ماء بعمود 0.5 m على الجانب المنخفض. ما الخطأ في ΔP بوحدة mbar؟
4. لماذا يُضبط صفر مرسل DP تحت ضغط الخط؟
5. اختر مبدأ الحساس لقياس ديناميكا الاحتراق في غرفة احتراق توربين، وعلّل.
6. متى تختار الحاجز الغشائي، وما ثمنه في زمن الاستجابة؟
7. لماذا يوضع المرسل فوق نقطة القياس في الغاز وتحتها في السائل؟
8. ما نسبة الدقة المطلوبة بين المعاير المرجعي والمرسل؟ وماذا لو لم تتوفر؟
9. اشرح لماذا لا يظهر التخلف (Hysteresis) إلا عند المعايرة صعودًا وهبوطًا.
10. في الحالة 6.11، ما الوثيقة التي كان الرجوع إليها يكشف الخطأ الأول؟

مراجع الفصل: R1 (المسودة الموحدة)؛ مبادئ حساسات الضغط الميكروميكانيكية وعالية الضغط (Bosch)؛ ترتيبات قياس الضغط التفاضلي والمطلق (Shardt)؛ أنماط التركيب والمانيفولد ووصلات العملية (I&C Design Basis)؛ إجراءات المعايرة الميدانية النموذجية (I&C Commissioning Instruction، MAPNA/Monenco).

الفصل 7: قياس درجة الحرارة

لمن هذا الفصل: المهندس الجديد ومهندس الموقع؛ الحرارة من أكثر المتغيرات قياسًا في الصناعة، وهي أساس حماية العمليات الصناعية والخطوط الرئيسية والآلات الدوارة والمبادلات الحرارية والأفران.

الفكرة الأساسية: الحساس يقيس حرارة نفسه لا حرارة العملية. كل ما بينهما — الغمد، والتلامس، والكابل، والوصلة الباردة — جزء من القياس ومصدر محتمل للخطأ.

7.1 المبدأ والاختيار

تنتقل الحرارة إلى الحساس بالتوصيل (Conduction) والحمل (Convection) والإشعاع (Radiation). الحساس الملامس يصل إلى حرارة الوسط بعد زمن يحدده ثابت الزمن τ: الزمن اللازم لبلوغ 63% من القفزة (ويُذكر أحيانًا t90، وهو زمن بلوغ 90% من القفزة ويساوي نحو 2.3τ). يعتمد τ على كتلة الحساس وعلى معامل انتقال الحرارة، الذي يزداد مع سرعة الوسط تقريبًا بجذرها التربيعي؛ لذلك يُذكر زمن الاستجابة دائمًا مع وسط وسرعة محددين، وهو في السوائل أسرع منه كثيرًا في الغازات.

الشكل 7-1: *استجابة حساس الحرارة لقفزة في حرارة الوسط وفق نموذج الرتبة الأولى: تبلغ القراءة 63.2% من القفزة عند ثابت الزمن τ، و90% (t90) عند نحو 2.3τ، و95% عند 3τ؛ ويطول τ كثيرًا في الغاز وفي غمد به فجوة هوائية.*

التقنية	المدى النموذجي	الدقة	الاستخدام الغالب
المزدوج الحراري (Thermocouple، T/C)	−200 إلى 1700 °C حسب النوع	±1 إلى ±2.5 °C	الحرارة العالية، العادم، الأفران، الاهتزاز
RTD (Pt100)	−200 إلى 600 °C (حتى 850 °C لعناصر خاصة)	±0.15 إلى ±0.3 °C عند 0 °C	الدقة، التحكم، المحامل، الحسابات التجارية
الثرمستور (Thermistor، NTC/PTC)	−50 إلى 150 °C غالبًا	عالية في نافذة ضيقة	حماية ملفات المحركات، الإلكترونيات

التقنية	المدى النموذجي	الدقة	الاستخدام الغالب
ثنائي المعدن (Bimetal)	−70 إلى 500 °C	±1% من المدى	مقاييس محلية
النظام المملوء (Filled System) (غاز/سائل)	−200 إلى 700 °C	±1% من المدى	مقاييس ومفاتيح محلية بلا كهرباء
الأشعة تحت الحمراء (Infrared) / البيرومتر (Pyrometer)	−50 إلى 3000 °C	تعتمد على الانبعاثية	أجسام متحركة أو بعيدة، لهب، أفران

قاعدة الاختيار: RTD حتى نحو 500 °C (وحتى 600 °C بعناصر مناسبة) حين تهم الدقة والاستقرار؛ المزدوج الحراري فوق ذلك أو حين يلزم حساس صغير سريع متين ضد الاهتزاز؛ IR حين يستحيل التلامس.

7.2 المزدوجات الحرارية (Thermocouples)

سلكان من معدنين مختلفين موصولان عند طرف القياس (الوصلة الساخنة، Hot Junction). ينشأ جهد صغير (تأثير Seebeck) يتناسب مع فرق الحرارة بين الوصلة الساخنة ونقطة اتصال السلكين بالنحاس (الوصلة الباردة أو المرجعية، Cold/Reference Junction) . المزدوج إذن يقيس **فرقًا**، ولا بد من معرفة حرارة الوصلة الباردة وإضافتها: هذا هو التعويض (Cold Junction Compensation – CJC)، ويتم داخل المرسل أو بطاقة الإدخال بحساس حرارة عند الأطراف.

النوع	المعدنان (+/−)	المدى المستمر النموذجي	الحساسية التقريبية	ملاحظات
K	NiCr / NiAl	−200 إلى 1260 °C	~41 µV/°C	الأكثر شيوعًا؛ عادم التوربينات
N	NiCrSi / NiSi	0 إلى 1260 °C	~39 µV/°C	أكثر استقرارًا من K عند الحرارة العالية

النوع	المعدنان (+/−)	المدى المستمر النموذجي	الحساسية التقريبية	ملاحظات
J	Fe / CuNi	0 إلى 760 °C	~52 µV/°C	يتأكسد الحديد؛ للأجواء المختزلة
T	Cu / CuNi	−200 إلى 370 °C	~43 µV/°C	الحرارة المنخفضة
E	NiCr / CuNi	−200 إلى 900 °C	~68 µV/°C	أعلى حساسية
R، S	PtRh / Pt	0 إلى 1480 °C للخدمة المستمرة (حتى 1600 °C لمدة قصيرة)	~7–12 µV/°C	عالية الدقة والثمن؛ مرجع معايرة
B	PtRh30 / PtRh6	600 إلى 1700 °C	منخفضة جدًا تحت 600 °C	الأفران شديدة الحرارة

كيف أختار؟ النوع K هو الافتراضي في المنشآت حتى نحو 1200 °C، وN بديله الأكثر استقرارًا عند الحرارة العالية والدورات الحرارية، وT للحرارة المنخفضة، وJ في الأجواء المختزلة فقط، وR وS وB للأفران فوق 1200 °C وللمراجع. والجدول لا يبيّن حساسية الأنواع النبيلة المنخفضة التي تحوّل أي جهد طفيلي إلى درجات (القسم 7.2-أ)، ولا سماحية الكابل التي تُضاف إلى سماحية الحساس (القسم 7.3). والخطأ الأكثر كلفة تعدد الأنواع في المنشأة الواحدة، فكل نوع إضافي فرصة لتهيئة مرسل على نوع خاطئ تخرج منه قراءة معقولة الشكل خاطئة بأكثر من مئة درجة.

السماحيات وفق IEC 60584-1 للنوع K: الفئة 1 أو ±1.5 °C أو ±0.004·|t|، والفئة 2 ±2.5 °C أو ±0.0075·|t| (أيهما أكبر). عند 800 °C تعني الفئة 2 نحو ±6 °C، وهذا خطأ مسموح قبل احتساب الكابل والمرسل.

أشكال طرف القياس:

- **المكشوف (Exposed):** أسرع استجابة وأضعف ميكانيكيًا؛ للغازات النظيفة.

- **المؤرَّض (Grounded):** الوصلة ملحومة بالغمد؛ استجابة أسرع، لكنها معرضة للحلقات الأرضية والتشويش.
- **غير المؤرَّض (Ungrounded):** الوصلة معزولة عن الغمد؛ الخيار الصناعي الافتراضي، ويسمح بفحص العزل.

معظم المزدوجات الصناعية من نوع المعزول بالمعادن (Mineral Insulated – MI): سلكان داخل مسحوق أكسيد المغنيسيوم وغمد معدني، متينة وقابلة للثني.

مثال محلول — أثر التعويض:

- **المعطيات:** مرسل يقرأ من مزدوج K جهدًا صافيًا 16.40 mV، وحرارة الأطراف 30 °C. من جداول IEC 60584: E(30 °C) = 1.203 mV.
- **الحل:**
  - الجهد المكافئ = الجهد المقاس + جهد الوصلة الباردة
  - $= 16.40 + 1.203 = 17.603 \text{ mV}$
  - من الجدول: 17.243 mV عند 420 °C و17.667 mV عند 430 °C، والاستكمال يعطي نحو **428.5 °C**.
  - لو أُهمل التعويض لقُرئت 16.40 mV مباشرة ≈ 400 °C، أي خطأ نحو 28.5 °C.
- **التفسير:** الخطأ ليس 30 °C بالضبط لأن العلاقة غير خطية؛ لذلك يُجمع **الجهد** ثم يُحوَّل، ولا تُجمع الحرارتان.

الشكل 7-2: *دائرة المزدوج الحراري من الوصلة الساخنة إلى أطراف المرسل، حيث تقع الوصلة الباردة ويقيس حساس التعويض حرارتها.*

الشكل 7-3: *منحنيات الجهد مقابل الحرارة للأنواع الشائعة من المزدوجات الحرارية بوصلة مرجعية عند 0 °C. النوع E أعلى حساسية، وK وN الأشيع في الصناعة حتى 1200 °C، وJ وT للمديات المنخفضة، وR وS للحرارات العالية بحساسية منخفضة تحتاج مرسلًا دقيقًا.*

مثال ثانٍ للتثبيت: مزدوج K يعطي 24.91 mV، والوصلة الباردة عند 25 °C (نحو 1.00 mV). الجهد الكلي 25.91 mV يقابل نحو 624 °C، ولو أُهمل التعويض لقُرئت 600 °C، أي خطأ 24 درجة. وهذا ما يفعله المرسل تلقائيًا بحساس التعويض في الشكل 7-2.

7.2-أ المزدوجات النبيلة والمعدنية: التركيب والخدمة وخطأ تهيئة النوع

تنقسم المزدوجات الحرارية قسمين لا يجوز الخلط بينهما في الشراء ولا في المعايرة:

- **المزدوجات المعدنية (Base Metal):** J وT وE وK (وN)، من الحديد والنحاس والنيكل وسبائكها. رخيصة، عالية الخرج، وهي الغالبية العظمى مما يُركّب في منشآت الطاقة والنفط والغاز والكيماويات.
- **المزدوجات النبيلة (Noble Metal):** S وR وB، أحد سلكيها على الأقل بلاتين. مقاومتها للتآكل والأكسدة ممتازة، وخواصها الكهروحرارية مستقرة جدًا عند الحرارات العالية، وخرجها **منخفض** وثمنها مرتفع.

النوع	التصنيف	السلك الموجب	السلك السالب	المدى النموذجي	الخرج عند 540 °C
S	نبيل	بلاتين + 10% روديوم	بلاتين نقي	0 إلى 1600 °C	نحو 4.6 mV
R	نبيل	بلاتين + 13% روديوم	بلاتين نقي	0 إلى 1600 °C	نحو 4.9 mV
B	نبيل	بلاتين + 30% روديوم	بلاتين + 6% روديوم	600 إلى 1700 °C	نحو 1.5 mV

النوع	التصنيف	السلك الموجب	السلك السالب	المدى النموذجي	الخرج عند 540 °C
J	معدني	حديد	كونستانتان (نحو 57% نحاس + 43% نيكل)	0 إلى 760 °C	نحو 30 mV
T	معدني	نحاس	كونستانتان	−200 إلى 370 °C	خارج المدى
E	معدني	كروميل (Ni-Cr)	كونستانتان	−200 إلى 900 °C	نحو 40 mV
K	معدني	كروميل (Ni-Cr)	ألوميل (نحو 95% نيكل، والباقي ألومنيوم ومنغنيز وسيليكون)	−200 إلى 1260 °C	نحو 22 mV

عمود الخرج وحده يفسّر معظم قرارات الخدمة: خرج النوع E يقارب ضعف خرج النوع K، وخرج النوع B أقلّ من خرج K بنحو خمسة عشر ضعفًا. ومعنى ذلك أن المزدوج النبيل يحتاج مرسلًا منخفض الضجيج وكابلًا قصيرًا معزولًا جيدًا، وأن أي جهد طفيلي (حلقة أرضية، تآكل طرف، حرارة غير متجانسة على الأطراف) يصير خطأً كبيرًا بالدرجات.

متى يُختار النبيل ومتى لا يُختار:

- يُختار فوق نحو 1200 °C حيث ينهار النوع K بسرعة، وفي الأفران ذات الدورات الحرارية الطويلة، وفي المعادن المنصهرة والزجاج والسيراميك، وفي مختبرات المعايرة كمرجع ثانوي.
- **لا** يُختار في منشآت الإنتاج والمعالجة العادية: الكلفة عالية، والخرج منخفض، والبلاتين يتسمم بسرعة بالأجواء المختزلة وبأبخرة المعادن وبالسيليكا من الأغماد السيراميكية، فيفقد معايرته بصمت.
- للنوع B خاصية عملية مفيدة: خرجه قرب حرارة المحيط يكاد ينعدم (يمرّ بالصفر مرتين بين 0 و42 °C تقريبًا)، فلا يحتاج تعويض وصلة باردة عمليًا تحت

نحو 50 °C — ولكن للسبب نفسه لا يصلح عمليًا للقراءة تحت نحو 600 °C لضعف الميز.

- أغماد المزدوجات النبيلة من ألومينا عالية النقاوة (نحو 99.7%) لا معدنية، لأن السيليكا في السيراميك العادي تسمّم البلاتين، ولا يجوز تمريرها في غمد فولاذي فوق حدود المادة.

اختيار مادة غمد المزدوج بالحرارة: الفولاذ المقاوم للصدأ (عادة 316) حتى نحو 870 °C؛ وسبائك النيكل-كروم (مثل Inconel) بين 870 و1150 °C؛ والألومينا أو السيراميك فوق ذلك. وفي مراقبة شعلات الأفران والمشاعل — وهي أقسى خدمة معتادة — يكفي 304 أو 316 إذا وُضع الطرف في منطقة أبرد من اللهب؛ ولا حاجة لوضعه في أسخن نقطة.

مثال محلول — خطأ تهيئة نوع المزدوج في المرسل

المعطيات: مزدوج من النوع K مركّب على عادم، وحرارته الحقيقية 540 °C، ومرسل مهيّأ خطأً على النوع J مع تعويض وصلة باردة سليم.

الافتراضات: الكابل من النوع الصحيح KX؛ التعويض يعمل؛ لا خطأ آخر في الحلقة.

الحل بالوحدات:

1. الجهد الذي يولّده المزدوج الفعلي عند 540 °C بوصلة مرجعية عند 0 °C: نحو **22.35 mV** (من جداول النوع K).
2. المرسل يبحث عن هذه القيمة في جدول النوع **J**: عند 400 °C يعطي النوع J نحو 21.85 mV، وعند 500 °C نحو 27.39 mV.
3. الاستكمال: $400 + 100 \times (22.35 - 21.85) \div (27.39 - 21.85)$ $= 400 + 100 \times 0.090$ = **نحو 409 °C**.

معنى النتيجة: الخطأ نحو **−131 °C**، والقراءة **معقولة الشكل** ومستقرة ولا تطلق أي إنذار عطل حساس. هذا أخطر أنواع الأخطاء: لا يكشفه الفحص البصري ولا منطق

كشف القطع، بل تكشفه المقارنة بحساس مجاور أو بمعايرة. ولهذا تُقيَّد تهيئة نوع المزدوج في شهادة المعايرة (الإجراء 3 في القسم 7.9)، ويُحدّ من خلط الأنواع في المنشأة الواحدة: كل نوع إضافي هو فرصة إضافية لهذا الخطأ.

◆ ◆ ◆

7.3 كابلات التمديد والتعويض

بين المزدوج والمرسل البعيد يجب أن تستمر الدائرة بموصلات لها خصائص كهروحرارية مماثلة، وإلا تنشأ وصلة باردة جديدة في المكان الخطأ:

- **كابل التمديد (Extension Cable) (رمز X، مثل KX):** من سبائك المزدوج نفسها؛ دقة أعلى ومدى حرارة أوسع للكابل (نموذجيًا 25− إلى 200 °C).
- **كابل التعويض (Compensating Cable) (رمز C، مثل KCA/KCB):** سبائك أرخص تحاكي المزدوج في مدى ضيق من حرارة الكابل (0 إلى 100 أو 150 °C).

وفق BS 4937-30 / IEC 60584-3 تتراوح سماحية كابل KX بين ±60 µV (الفئة 1، نحو ±1.5 °C) و±100 µV (الفئة 2، نحو ±2.5 °C). ويكون الموصل السالب أبيض لكل الأنواع، والموجب ملونًا حسب النوع (K أخضر، J أسود، T بني، N وردي، E بنفسجي، R وS برتقالي)، أما غلاف دوائر الأمان الجوهري فأزرق. تختلف ألوان المواصفة الأمريكية ANSI MC96.1 (مثلًا K أصفر موجب وأحمر سالب)؛ لذلك يُكتب النظام المعتمد في وثيقة أساس التصميم (الفصل 25) ولا يُفترض.

أثر عكس القطبية في الكابل: إذا رُكّب زوج التعويض معكوس القطبية في طرفيه، وصندوق التوصيل عند T_jb والأطراف عند T_cj، ينتج خطأ يقارب ضعف (T_jb − T_cj). صندوق في الشمس عند 55 °C وغرفة تحكم عند 25 °C يعنيان خطأ نحو 60 °C، وقد يتغير مع ساعات النهار فيظنه المشغل تغيرًا في العملية.

قاعدة ميدانية: لا يُسمح بأي وصلة نحاسية وسيطة (أطراف عادية، أسلاك قفز) في مسار المزدوج إلا عند نقطة يقاس فيها التعويض.

7.4 مقاومات القياس الحراري (RTD)

تزداد مقاومة البلاتين مع الحرارة بعلاقة مستقرة ومعروفة. العنصر القياسي Pt100: مقاومته 100 Ω عند 0 °C، ومعامله $\alpha = 0.00385\ ^\circ C^{-1}$ (وفق IEC 60751)، أي نحو 0.385 Ω لكل درجة. وفوق الصفر تُعطى المقاومة بمعادلة كالندر–فان دوسن (Callendar–Van Dusen):

$$R(t) = R_0\,(1 + A\cdot t + B\cdot t^2)$$،

حيث $A = 3.9083\times10^{-3}$ و$B = -5.775\times10^{-7}$

عند 100 °C: $R = 138.51\ \Omega$. ويوجد Pt1000 (1000 Ω عند 0 °C) لتقليل أثر الأسلاك في الدوائر البسيطة.

فئات السماحية وفق IEC 60751:

الفئة	السماحية (t بالقيمة المطلقة)	عند 100 °C
AA	±(0.10 + 0.0017·t) °C	±0.27 °C
A	±(0.15 + 0.002·t) °C	±0.35 °C
B	±(0.30 + 0.005·t) °C	±0.80 °C

طرق التوصيل:

- **سلكان:** مقاومة السلكين تُضاف إلى القراءة. مقبول فقط للمسافات القصيرة جدًا أو مع Pt1000.
- **ثلاثة أسلاك:** يقيس مقاومة سلك واحد ويطرحها من مقاومة السلكين معًا مفترضًا تساوي الأسلاك؛ المعيار الصناعي مع المرسلات والبطاقات.

- **أربعة أسلاك:** مسار للتيار ومسار مستقل لقياس الجهد؛ يلغي أثر الأسلاك تقريبًا، للدقة العالية والمعايرة.

مثال خطأ السلكين بالأرقام (100 m بكابل 0.75 mm²، خطأ نحو 13.8 °C) محلول كاملًا مع مقارنة الدوائر الأربع في القسم 7.4-أ؛ وهو سبب تركيب المرسل في رأس الحساس (Head-Mounted) أو قريبًا منه ونقل 4–20 mA بدل نقل المقاومة.

الشكل 7-4: *توصيل RTD بسلكين وثلاثة وأربعة أسلاك؛ مقاومات الأسلاك R_L تُضاف كاملة في الأول، ويُلغى أثرها تقريبًا في الثالث.*

التسخين الذاتي: تيار القياس يسخن العنصر ($P = I^2R$). بتيار 1 mA في 100 Ω تكون القدرة 0.1 mW، وبمعامل تسخين ذاتي 0.05 °C/mW يكون الخطأ 0.005 °C فقط؛ أما تيار 5 mA فيعطي 2.5 mW ونحو 0.13 °C، ويتضاعف الأثر في الغاز الساكن. تحدد بطاقات القياس تيار الإثارة، ويُراجع عند استخدام معايرات يدوية.

7.4-أ خطأ أسلاك التوصيل في RTD بالأرقام: السلكان والثلاثة والأربعة

المزدوج الحراري يولّد جهدًا، فمقاومة أسلاكه لا تهم كثيرًا. أما RTD فالمقيس نفسه **مقاومة**، فكل أوم في المسار يُقرأ حرارةً. وحساسية Pt100 هي 0.385 Ω/°C، أي أن **كل 0.385 Ω في الدائرة تساوي درجة كاملة**.

نظام التوصيل	ما يُقاس فعلًا	الخطأ المتبقي النموذجي	متى يُقبل
سلكان	مقاومة العنصر + مقاومة السلكين كاملةً	بمقدار مقاومة الحلقة ÷ 0.385 (درجات كثيرة)	مسافة أقل من بضعة أمتار، أو Pt1000، أو مرسل في رأس الحساس
ثلاثة أسلاك	مقاومة العنصر بعد طرح مقاومة سلك واحد مفترضًا تساوي الأسلاك	نحو **0.1 °C** إذا تساوت الأسلاك فعلًا	المعيار الصناعي مع المرسلات وبطاقات الإدخال
أربعة أسلاك	مقاومة العنصر وحدها (مسار تيار ومسار جهد منفصلان)	نحو **0.03 °C**	المعايرة، المراجع، القياسات التجارية والحرجة

وإلى جانب مقاومة السلك الساكنة هناك خطأ ثانٍ أقلّ شهرة: **خطأ الحرارة المحيطة في الأسلاك النحاسية**. فمقاومة النحاس نفسها تتغير بمعامل نحو 0.00393 لكل درجة، فمقاومة الكابل تنجرف مع حرارة المسار (شمس الظهيرة، مسار قرب خط بخار، ليل الشتاء)، وتُقرأ هذه الزحزحة على أنها تغير في العملية. وهذا هو السبب الجذري لحالات «الحرارة التي تتبع الساعة» في حلقات RTD بسلكين.

مثال محلول — أربع دوائر للحساس نفسه

المعطيات: Pt100 على بعد 100 m، كابل نحاسي 0.75 mm² بمقاومة موصل 26.5 Ω/km ، وحرارة المسار تتغير 30 °C بين الليل والنهار.

الافتراضات: الأسلاك من البكرة نفسها ومتساوية الطول؛ أطراف نظيفة مشدودة؛ تيار إثارة 1 mA فأقل فلا تسخين ذاتي معتبر.

الحل بالوحدات:

- مقاومة السلك الواحد: 100 m × 26.5 Ω/km ÷ 1000 = **2.65 Ω**؛ والحلقة (ذهابًا وإيابًا) = **5.30 Ω**.
- **بسلكين، Pt100:** الخطأ = 5.30 ÷ 0.385 = **+13.8 °C** ثابت.

- **بسلكين، انجراف المحيط:** ΔR = 5.30 × 0.00393 × 30 = 0.625 Ω، أي **±1.6 °C إضافية** تتنفس مع اليوم.
- **بسلكين، Pt1000:** الحساسية 3.85 Ω/°C، فالخطأ = 5.30 ÷ 3.85 = **+1.4 °C**، وانجراف المحيط يصير 0.16 °C.
- **بثلاثة أسلاك مع عدم تطابق:** لو زادت مقاومة أحد السيقان 0.1 Ω فقط (طرف مؤكسد، أو برغي غير مشدود، أو وصلة إضافية في صندوق) لصار الخطأ = 0.1 ÷ 0.385 = **0.26 °C**؛ ولو كان عدم التطابق 1 Ω (سلك بمقطع مختلف بعد إصلاح) لصار **2.6 °C**.
- **بأربعة أسلاك:** الخطأ من الأسلاك مهمل عمليًا، ولا يتأثر بانجراف المحيط.

معنى النتيجة: ترتيب العلاج معروف: **المرسل في رأس الحساس** يلغي المسألة من أصلها لأنه ينقل 4–20 mA لا مقاومة؛ فإن تعذّر فثلاثة أسلاك من الكابل نفسه وبالمقطع نفسه ومن دون وصلات وسيطة؛ وأربعة أسلاك للقياسات التي تدخل في الحسابات التجارية أو في حد حماية ضيق. والسلكان لا يُقبلان إلا مع Pt1000 أو مسافة تُقاس بالأمتار. ولاحظ أن **عدم التطابق** — لا الطول — هو عدو نظام الثلاثة أسلاك، فالفحص عند الشك هو قياس مقاومة كل سلك على حدة إلى الحساس المقصور، لا قياس الحلقة.

◆ ◆ ◆

7.5 الثرمستورات والمقاييس المحلية

- **ثرمستور NTC (NTC Thermistor):** مقاومته تنخفض بشدة مع الحرارة (من مئات kΩ إلى عشرات Ω)، وفق علاقة أسية R(T) = R₀·e^(B(1/T − 1/T₀))، حيث B بين 2000 و5000 K. حساسية عالية جدًا في نافذة نحو 200 K، وخطية ضعيفة.

- **ثرمستور PTC (PTC Thermistor):** ترتفع مقاومته بحدة عند حرارة معينة؛ ويُستخدم مفتاحَ حماية مدمجًا في ملفات المحركات ويوصل إلى مرحل حماية.
- **ثنائي المعدن:** شريطان بمعاملي تمدد مختلفين ينحنيان ويحركان مؤشرًا؛ رخيص ومتين للمقاييس المحلية (التفصيل في القسم 7.10-أ).
- **النظام المملوء:** بصيلة وأنبوب شعري مملوءان بغاز أو سائل؛ يعمل دون كهرباء، ويتأثر بحرارة الشعري وطوله (كما في الحواجز الغشائية، القسم 6.6)؛ والتفصيل في القسم 7.5-أ.

جدول مقارنة: المزدوج الحراري مقابل RTD مقابل الثرمستور

المعيار	المزدوج الحراري (TC)	مقاومة القياس (RTD Pt100)	الثرمستور (NTC)
المدى العملي	−200 إلى +1,700 °C (حسب النوع)	−200 إلى +600 °C (فعليًا حتى نحو 450 إلى 500 °C لـ Pt100 رقيق الفلم)	−50 إلى +150 °C
الدقة النموذجية عند 100 °C	±1.5 °C (فئة 1، نوع K)	±0.35 °C (الفئة A)	±0.1 إلى ±0.2 °C
الانحراف مع الزمن	ملحوظ فوق 500 °C (تلوث المعدن)	ضعيف	ضعيف ضمن مداه
زمن الاستجابة	الأسرع (وصلة مكشوفة أقل من 1 s)	أبطأ (كتلة العنصر)	سريع (حبة صغيرة)
الخطية	غير خطي، جداول IEC 60584	شبه خطي، كالندر–فان دوسن	غير خطي جدًا
التسخين الذاتي	لا يوجد	يوجد؛ تيار ≥ 1 mA	يوجد؛ حساس

المعيار	المزدوج الحراري (TC)	مقاومة القياس (RTD Pt100)	الثرمستور (NTC)
الأسلاك	كابل تمديد من سبائك المزدوج نفسها أو كابل تعويض يحاكيها (القسم 7.3)	نحاس عادي بثلاثة أو أربعة أسلاك	نحاس؛ سلكان يكفيان
الاهتزاز والحرارة العالية	يتحملهما (المفضل للتوربينات)	حساس للاهتزاز فوق نحو 300 °C	لا يناسبهما
الكلفة	الأقل	متوسطة	منخفضة
الاختيار المعتاد	عادم التوربينات، الأفران، الحرارات العالية	حرارات العمليات والمحامل والزيوت (الدقة)	الإلكترونيات، التعويض، الغرف

كيف أختار؟ RTD Pt100 بثلاثة أسلاك لحرارات العمليات والمحامل والزيوت حين تهم الدقة والاستقرار تحت نحو 500 °C، والمزدوج K أو N فوق ذلك أو حيث الاهتزاز والحجم الصغير والاستجابة السريعة، والثرمستور في الإلكترونيات والتعويض لا في العمليات. والجدول لا يبيّن أن الغمد والتركيب يحددان زمن الاستجابة أكثر من نوع الحساس (القسم 7.7)، ولا أن دقة RTD تُهدر بسلكين على مسافة طويلة (القسم 7.4-أ). والخطأ الأكثر كلفة وضع RTD في خدمة اهتزاز وحرارة عالية (عادم أو فرن) لأنه «أدق» على الورق، فينقطع سلك البلاتين بعد أشهر ويعود الفريق إلى المزدوج.

7.5-أ الأنظمة المملوءة: التصنيف SAMA وأنواع البصيلات وأخطاء الشعري والارتفاع

النظام المملوء (Filled System) كتلةٌ ثابتة من مائع محبوسة في حجم شبه ثابت: بصيلة في العملية، وأنبوب شعري، وعنصر ضغط (بوردون أو منفاخ أو لولب) في الجهاز. تغيّر حرارة البصيلة ضغطَ المائع أو حجمَه، فيتحرك عنصر الضغط ويحرك المؤشر أو القلم أو

آلية المفتاح. وهو الحل الوحيد الذي يعطي **بيانًا وتحكمًا موضعيًا بلا كهرباء** ولا يزال يُصادَف في المقاييس القرصية ومسجلات النقل التجاري ومفاتيح الحرارة الميكانيكية.

وقد وضعت جمعية مصنّعي أجهزة القياس العلمية (SAMA) تصنيفًا لهذه الأنظمة ما زال هو اللغة المشتركة في أوراق البيانات وكتالوجات المصنّعين، وإن تقلّص استعماله مع سيطرة القياس الإلكتروني وتقليص المصنّعين لخياراتهم:

جدول مقارنة: فئات الأنظمة المملوءة وفق SAMA

الفئة	المائع	المبدأ	المدى النموذجي
I (IA, IB)	سائل عضوي (تولوين، زيلين)	تمدد حجمي	−87 إلى +371 °C
II (IIA, IIB, IIC, IID)	سائل متطاير يتبخر جزئيًا	ضغط بخار عند سطح الفصل	−18 إلى +320 °C تقريبًا
III (IIIA, IIIB)	غاز خامل (نيتروجين)	لغاز محبوس P = k·T	−268 إلى +760 °C
V (VA, VB)	زئبق	تمدد حجمي	−39 إلى +650 °C

جدول مقارنة: فئات الأنظمة المملوءة وفق SAMA (تابع): التدريج والتعويض والاختيار

الفئة	التدريج	تعويض المحيط	ملاحظة الاختيار
I (IA, IB)	خطي	لازم: IA معوَّضة كليًا (شعري + علبة)، IB معوَّضة في العلبة فقط	بصيلة صغيرة، شعري حتى نحو 30 m
II (IIA, IIB, IIC, IID)	**غير خطي** (مزدحم في الأسفل)	غير لازم مبدئيًا: القراءة تتبع البصيلة وحدها	الأرخص والأسرع؛ وله مشكلة عبور المحيط

الفئة	التدريج	تعويض المحيط	ملاحظة الاختيار
III (IIIA, IIIB)	خطي	لازم	أوسع مدى؛ بصيلة **كبيرة**؛ شعري حتى نحو 60 m
V (VA, VB)	خطي	لازم	أدقّها وبصيلتها صغيرة؛ الزئبق محظور أو مقيَّد في كثير من المنشآت

كيف أختار؟ الفئة III (غاز) حين يلزم أوسع مدى أو شعري طويل أو حين لا يمكن ضبط فرق الارتفاع؛ والفئة I (سائل) للمدى المتوسط ببصيلة صغيرة؛ والفئة II (بخار) للأرخص والأسرع بشرط أن تعرف علاقة حرارة العملية بحرارة المحيط: IIA فوقها دائمًا، وIIB تحتها دائمًا، وIID إن كانت تعبرها؛ والفئة V لا تُطلب حيث يُقيَّد الزئبق. والجدول لا يبيّن أخطاء الرأس والارتفاع في الأنظمة المملوءة بسائل، ولا أن الشعري جزء من المعايرة لا يُقصّر في الموقع. والخطأ الأكثر كلفة شراء IIA لخدمة تعبر حرارة المحيط مرتين في اليوم، فتقفز القراءة عند كل عبور ويُظن العيب في العملية.

(الفئة IV غير مستعملة في التصنيف القياسي.) واللاحقة **A** تعني نظامًا معوَّضًا كليًا بشعري تعويض ثانٍ يسري بجانب الأصلي إلى عنصر ضغط معاكس يلغي أثر حرارة المسار؛ واللاحقة **B** تعني تعويضًا داخل العلبة فقط بشريط ثنائي المعدن، وهو أرخص ويكفي حين يكون الشعري قصيرًا أو حرارة مساره مستقرة.

الفئة II وفخّ عبور المحيط: نظام ضغط البخار يقرأ ضغط البخار عند **سطح الفصل بين السائل والبخار**، وموضع هذا السطح يتحرك مع الحرارة. فما دامت حرارة البصيلة أعلى من حرارة الشعري والعلبة (الفئة IIA) أو أقل منها دائمًا (IIB)، بقي السطح في البصيلة والقراءة صحيحة. أما إذا عبرت حرارة العملية حرارة المحيط صعودًا وهبوطًا فينتقل السطح بين البصيلة والشعري، فتقفز القراءة وتتأخر عند كل عبور. والحل: **IIC** (مصممة للعبور) أو **IID** المفضّلة، وفيها سائل نقل غير متطاير يملأ الشعري وعنصر الضغط ويفصل

البخار عن باقي النظام. وهذه هي النقطة التي تُغفل في أوراق الطلب فتُشترى IIA لخدمة تعبر المحيط مرتين في اليوم.

أنواع البصيلات:

- **البصيلة العادية (Plain Bulb):** أسطوانة قصيرة قطرها أكبر من الشعري، تُركّب في غمد؛ الخيار الافتراضي لقياس نقطة واحدة في سائل أو وعاء.
- **بصيلة المتوسط (Averaging Bulb):** أنبوب طويل مرن يُمدّ عبر مقطع المجرى أو المبادل، فيقرأ **متوسط** الحرارة على طوله لا نقطةً منها. وهي الحل الصحيح لمجاري الهواء والمبادلات ذات التوزيع غير المنتظم، حيث يعطي حساس النقطة الواحدة رقمًا لا يمثل شيئًا.
- **البصيلة الشعرية (Capillary Bulb):** قطرها من قطر الشعري نفسه، للمواضع الضيقة وقياس السطوح والملامسة المباشرة؛ استجابتها أسرع وسعتها الحرارية أقل، لكن مداها أضيق.

أخطاء الارتفاع والرأس في الشعري: في الأنظمة المملوءة بسائل (الفئتان I وV) وفي أنظمة ضغط البخار التي يملأ السائل شعريّها (IIA وIID) يضيف عمود المائع بين البصيلة والجهاز **ضغطًا ساكنًا** يُقرأ على أنه حرارة. لذلك يُذكر في ورقة الطلب **فرق الارتفاع بين البصيلة والجهاز**، ويُعاير النظام عليه، ولا يُنقل الجهاز رأسيًا بعد المعايرة. أما أنظمة الغاز (الفئة III) فمحصّنة عمليًا لأن كثافة الغاز مهملة.

> **مثال محلول — أثر إعادة تركيب الجهاز على ارتفاع مختلف**
>
> **المعطيات:** نظام ضغط بخار (الفئة IID) بصيلته على وعاء، وجهازه كان على المنصة نفسها ثم نُقل إلى لوحة محلية أعلى بعشرة أمتار. سائل النقل كثافته $900\ kg/m^3$.
>
> **الافتراضات:** ميل منحنى ضغط البخار للمائع في مدى التشغيل نحو 0.05 bar/°C (يُؤخذ الرقم الفعلي من منحنى المصنّع)؛ لا تغيّر آخر.
>
> **الحل بالوحدات:**

- تغيّر الضغط الساكن: $\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 900 \times 9.81 \times 10 = 88{,}290$ Pa = **0.883 bar**.
- الخطأ في الحرارة: 0.05 ÷ 0.883 = **نحو 17.7 °C**، والقراءة تنخفض لأن الجهاز صار أعلى من البصيلة.
- وللمقارنة، لو كان النظام غازيًا (الفئة III) بنيتروجين عند 10 bar وكثافة نحو 11.5 kg/m³: $\Delta P = 11.5 \times 9.81 \times 10 = 1128$ Pa = 0.011 bar، أي **نحو 0.3 °C** — مهمل.

معنى النتيجة: نقل جهاز نظام مملوء بسائل أو ببخار رأسيًا **يبطل معايرته**، ومقدار الخطأ يُحسب لا يُخمَّن. ولهذا يُسجَّل فرق الارتفاع في ورقة بيانات الجهاز (الفصل 27) ويُعاد فحص النظام بعد أي نقل، بينما لا يحتاج النظام الغازي إلى ذلك. ومقدار 17.7 °C هنا أكبر بكثير من دقة النظام نفسها (±0.5 إلى 1% من المدى).

قائمة تحقق قبل طلب نظام مملوء:

1. فئة SAMA المطلوبة، ولماذا (هل تعبر حرارة العملية حرارة المحيط؟).
2. نوع البصيلة (عادية أم متوسط أم شعرية) وقطرها وطولها، ومطابقتها لتجويف الغمد.
3. طول الشعري بالضبط — فهو جزء من المعايرة ولا يُقطع ولا يُقصّر في الموقع — وهل له درع معدني مرن.
4. فرق الارتفاع بين البصيلة والجهاز، واتجاهه.
5. نوع التعويض (A كلي أم B في العلبة)، ومدى حرارة المسار المتوقع.
6. أقصى حرارة يحتملها الشعري ومسار تمديده بعيدًا عن مصادر الحرارة.
7. ماذا يحدث عند العطل: النظام المملوء **يُستبدل كاملًا** عند تسرّب الملء، إذ لا يمكن إعادة ملئه في الموقع — وهذا أهم عيوبه مقابل رخصه ومتانته واستغنائه عن الكهرباء.

◆ ◆ ◆

7.6 القياس بالأشعة تحت الحمراء

يقيس البيرومتر (Pyrometer) الإشعاع الحراري الصادر عن السطح دون تلامس. نلخص هنا أهم مصادر الخطأ، ونفصّلها بالأرقام في القسم 7.6-أ:

- **الانبعاثية (Emissivity):** المعادن اللامعة ذات انبعاثية منخفضة (نحو 0.03 إلى 0.3) فتظهر أبرد من حقيقتها. يُضبط المعامل أو يُستخدم بيرومتر بطولين موجيين (Ratio Pyrometer).
- **نسبة المسافة إلى البقعة (D:S):** إن كانت البقعة أكبر من الهدف دخلت خلفية الهدف في القياس.
- **الوسط بين الجهاز والهدف:** بخار، أو غبار، أو زجاج نافذة.

الكاميرا الحرارية أداة تشخيص ممتازة للوحات والكابلات والعزل، لكنها ليست بديلًا عن حساس معاير في حلقة تحكم.

7.6-أ عائلات البيرومترات الثلاث والانبعاثية العملية ونسبة المسافة إلى البقعة

كل جسم فوق الصفر المطلق يُصدر إشعاعًا كهرومغناطيسيًا تزداد شدّته وينزاح طيفه نحو الأطوال القصيرة كلما ارتفعت حرارته. والبيرومتري (Pyrometry) قياسُ حرارة الجسم من هذا الإشعاع دون ملامسته. وتنقسم الأجهزة ثلاث عائلات يُخلط بينها كثيرًا:

جدول مقارنة: عائلات البيرومترات

المعيار	البصري / (Optical Disappearing Filament)	الإشعاعي (Radiation / Wavelength-Single IR)	نسبة اللونين (Two-Colour / Ratio)
المبدأ	مطابقة يدوية لسطوع خيط مصباح مع سطوع الهدف عند طول موجي واحد	تجميع الإشعاع على كاشف يحوّله إلى إشارة كهربائية	قياس الإشعاع عند طولين موجيين وأخذ **نسبتهما**
المدى النموذجي	700 إلى 3000 °C	−50 إلى 3000 °C	600 إلى 3000 °C
أثر الانبعاثية	يجب إدخالها؛ خطأ مباشر	يجب إدخالها؛ خطأ مباشر	**يلغى تقريبًا** إن كان الجسم رماديًا
أثر الغبار والبخار والنافذة المتسخة	خطأ كبير	خطأ كبير	**يلغى تقريبًا** إن أثّر على الطولين بالقدر نفسه
الهدف الأصغر من البقعة	خطأ كبير	خطأ كبير	يتحمّل امتلاءً جزئيًا للبقعة
الخرج	قراءة بشرية، لا إشارة	4–20 mA أو رقمي	4–20 mA أو رقمي
الاستعمال اليوم	مرجع محمول في الأفران والزجاج والمعالجة الحرارية	الأشيع صناعيًا؛ التحكم والمراقبة والكاميرات الحرارية	المعادن المنصهرة والسكب والأفران المغبرة والأهداف الصغيرة المتحركة
القيد الأساسي	يدوي وبطيء ويعتمد على عين المشغّل	حساس جدًا للانبعاثية ونظافة المسار	يفشل مع الأجسام **الانتقائية طيفيًا** (الزجاج، بعض الغازات، بعض الطلاءات)

كيف أختار؟ الإشعاعي أحادي الطول الموجي هو الافتراضي صناعيًا للأسطح ذات الانبعاثية المعلومة والمسار النظيف، ونسبة اللونين حين تكون الانبعاثية مجهولة أو متغيرة أو المسار مغبرًا أو الهدف صغيرًا متحركًا (المعادن المنصهرة والسكب)، والبصري مرجع محمول لا حلقة قياس. والجدول لا يبيّن أن نسبة اللونين تفشل مع الأجسام الانتقائية طيفيًا (الزجاج وبعض الطلاءات)، ولا أن النافذة بين الجهاز والهدف يجب أن تطابق طول موجته وتُدرج نفاذيتها في التهيئة. والخطأ الأكثر كلفة الاعتماد على مخروط 90% ومسافة الكتالوج، فتدخل خلفية أسخن من الهدف في البقعة ويخرج رقم خاطئ بعشرات الدرجات دون أي إنذار.

الانبعاثية (Emissivity) عمليًا: هي نسبة ما يشعّه السطح إلى ما يشعّه الجسم الأسود المثالي عند الحرارة نفسها، بين 0 و1. وهي أكبر مصدر خطأ في القياس أحادي الطول الموجي، وتتغير مع المادة وخشونة السطح ودرجة الأكسدة وزاوية النظر وطول الموجة.

السطح	الانبعاثية التقريبية
فولاذ مؤكسد أو صدئ	0.80 إلى 0.90
فولاذ مقاوم للصدأ مصقول	0.15 إلى 0.20
ألومنيوم مصقول	0.04 إلى 0.06
ألومنيوم مؤكسد	0.20 إلى 0.30
نحاس مصقول / نحاس مؤكسد	0.03 إلى 0.60 / 0.05 إلى 0.80
طوب حراري	0.85 إلى 0.95
طلاء (بأي لون، لامعًا أو مطفأً)	0.90 إلى 0.95
شريط لاصق مطفأ أو ماء أو جليد	0.95 إلى 0.98

ثلاث حيل ميدانية تُخرج المهندس من ورطة الانبعاثية المجهولة: **ألصق** شريطًا مطفأً أو ادهن بقعة صغيرة بطلاء مطفأ ذي انبعاثية معلومة واقرأ عليها؛ أو **اثقب** تجويفًا صغيرًا

عميقًا في الجسم (عمقه ستة أضعاف قطره) فيسلك كجسم أسود انبعاثيته تقارب 0.95؛ أو **عاير** الانبعاثية على الجهاز بضبطها حتى تطابق قراءة مزدوج ملامس على الموضع نفسه، ثم ثبّتها لذلك السطح.

نسبة المسافة إلى البقعة (D:S) ومخروطا الطاقة: لا يقيس الجهاز نقطة بل بقعة، وقطر البقعة يتسع مع المسافة. وتُعطي أوراق البيانات مخروطين: مخروط **90%** من الطاقة ومخروط **99%**. والفرق بينهما كبير وحاسم:

الموضع	قطر البقعة عند 90% من الطاقة	قطر البقعة عند 99% من الطاقة
عند البؤرة (نحو 915 mm)	نحو 15 mm	نحو 23 mm
بعد البؤرة (نحو 1980 mm)	نحو 17 mm	نحو 34 mm
بعيدًا عن البؤرة (قاعدة تقريبية)	المسافة ÷ 120	المسافة ÷ 60

القاعدة العملية: **استعمل مخروط 99% لا 90%**، واشترط أن يكون قطر الهدف ضعفَي قطر بقعة 99% على الأقل (وثلاثة أضعاف إن كان ما حول الهدف أسخن منه، كأنبوب داخل فرن). فالنسبة 1% المتسربة من خارج الهدف تكفي لخطأ بعشرات الدرجات حين تكون الخلفية لهبًا. واحسب دائمًا من **المسافة الفعلية** لا من مسافة الكتالوج.

الشكل 7-5: *مخروطا الطاقة 90% و99% لبيرومتر تحت الأحمر: عند البؤرة (نحو 915 mm) قطر البقعة نحو 15 و23 mm، وعند نحو 1980 mm نحو 17 و34 mm؛ ويجب أن يكون قطر الهدف ضعفي بقعة 99% على الأقل، وثلاثة أضعافها إن كانت الخلفية أسخن منه.*

مصادر خطأ أخرى تُنسى: الإشعاع المنعكس من جدار ساخن مجاور على سطح منخفض الانبعاثية (ظاهرة أشدّ ما تكون على المعادن اللامعة). ونافذة المراقبة (الزجاج العادي يحجب معظم الأشعة تحت الحمراء البعيدة، فتلزم نافذة مطابقة لطول موجة الجهاز: كوارتز أو ياقوت للأطوال القصيرة، وسيلينيد الزنك أو الجرمانيوم لمدى 8 إلى 14 µm، وتُدرج نفاذيتها في التهيئة)؛ وتغيّر الانبعاثية نفسها مع تقدّم أكسدة السطح خلال عمر المعدة، وهو انجراف بطيء لا يظهر في أي فحص لحظي.

◆ ◆ ◆

7.7 الأغماد الحرارية (Thermowells)

يحمي الغمد الحساس ويسمح بسحبه دون إيقاف العملية، لكنه يضيف كتلة وتأخيرًا ويتعرض لقوى الجريان.

الشكل 7-6: *تجميعة غمد حراري مشفه على أنبوب: فوهة ملحومة، وشفة الغمد بمساميرها، وغمد مستدق يمتد طرفه إلى ثلث القطر الأوسط حيث الجريان ممثل، ووصلة تمديد تُبعد رأس التوصيل أو المرسل عن حرارة الأنبوب.*

- **الأنواع:** ملولب، ملحوم، مشفه (Flanged)؛ مستقيم أو مستدق (Tapered) أو متدرج (Stepped). المستدق أفضل ميكانيكيًا وأسرع استجابة من المستقيم السميك.

- **المادة:** تتبع مواصفة الأنابيب على الأقل (SS316 شائع، وسبائك خاصة للخدمات الأكالة والحرارة العالية).
- **الغمر:** يجب أن يصل الطرف الحساس إلى منطقة تمثل حرارة الجريان؛ قاعدة تقريبية: غمر لا يقل عن نحو 10 أضعاف قطر الغمد، وتجنب الأطوال الزائدة التي تضعفه ميكانيكيًا.
- **الحساب الميكانيكي:** الجريان يولد دوامات منفصلة بتردد (Wake Frequency) قد يقترب من التردد الطبيعي للغمد فيحدث رنين وكسر. تُجرى الحسابات وفق **ASME PTC 19.3 TW** (حدود نسبة التردد، والإجهاد الساكن والديناميكي، والضغط الخارجي)، وتُطلب في أوراق البيانات لكل غمد في خطوط الغاز والبخار عالية السرعة. انكسار غمد يعني قطعة معدنية في الأنبوب قد تدخل ضاغطًا أو توربينًا، ومسار تسرب مباشر.
- **التلامس الداخلي:** فراغ هوائي بين الحساس وجدار الغمد يبطئ الاستجابة كثيرًا؛ يُستخدم حساس بقطر مناسب ونابض ضاغط يضمن التلامس مع القاع، وأحيانًا معجون ناقل للحرارة حيث تسمح الحرارة.

الاستجابة البطيئة الناتجة عن الغمد لا تُعالَج بزيادة كسب PID؛ هذا يجعل الحلقة متذبذبة دون أن يسرّع القياس (الفصل 18).

7.7-أ أبعاد الغمد ومصطلحاتها ووصلاته وحدود السرعة التمهيدية

القسم 7.7 عرض مبدأ الغمد وحسابه الميكانيكي وفق ASME PTC 19.3 TW. وما يلي هو **اللغة التي تُكتب بها ورقة طلب الغمد**: من دونها تصل الأغماد بأبعاد لا تصلح للحساسات المشتراة أو لا تصل إلى موضع القياس الصحيح.

المصطلحات الستة لأبعاد الغمد:

المصطلح	ما يقيسه	القيمة المعتادة
طول العنصر (Element Length)	عمق التجويف من أعلى الغمد إلى قاع التجويف	أقلّ من الطول الكلي بنحو 6 mm
طول الغمر (Insertion Length، البُعد **U**)	الطول المعرّض للمائع: من أسفل السن أو أسفل الشفة أو أسفل التجويف الملحوم إلى الطرف	يُختار بالقطر وبحدود السرعة
بدل السن (Thread Allowance)	طول السن الخارجي على الغمد	نحو 25 mm (للغمد الملولب فقط)
بدل المفتاح (Wrench Allowance)	طول السطوح المستوية للمفتاح فوق السن	نحو 19 mm (للغمد الملولب فقط)
امتداد العزل (Lagging Extension، البُعد **T**)	الطول بين بدل السن وبدل المفتاح، ليخرج رأس الغمد من العزل الحراري	نحو 75 mm، ويُطلب فقط حين يوجد عزل
امتداد فوق الشفة	ما يعلو وجه الشفة في الغمد المشفه	نحو 56 mm

تجويف الغمد ومطابقته للحساس: أقطار التجويف القياسية نحو 6.6 mm و9.8 mm (0.260 و0.385 in) لحساسات قطرها 6.35 mm و9.53 mm (1/4 و3/8 in)؛ والحساس ثنائي المعدن والحساسات الإلكترونية تأتي بهذين القطرين، والثرمومتر الزجاجي بقطر 7 mm ويدخل في التجويف الأكبر. والخلوص المعتاد بين الحساس والتجويف **0.25 mm**: أقلّ منه يصعّب الإدخال والسحب، وأكثر منه يخلق فجوة هواء عازلة تبطئ الاستجابة كثيرًا. فإن اضطررت إلى خلوص زائد فاملأ الفراغ بغلاف معدني رقيق (Shim)، أو بقليل من الزيت أو الشحم حين يكون زمن الاستجابة حرجًا — على أن تعلم أن الزيت يجمع الأوساخ ويتحلل بالحرارة فلا يُستعمل روتينيًا. **وأهم شرط على الإطلاق: أن يلامس طرف الحساس قاع التجويف**، ولذلك تُستعمل تجميعة نابضية أو وصلة ضاغطة.

الشكل 7-7: *أبعاد الغمد الحراري الملولب المستدق ومصطلحاتها في ورقة الطلب: طول الغمر U، وبدل السن، وامتداد العزل T، وبدل المفتاح، وطول العنصر؛ والتجويف 6.6 أو 9.8 mm بخلوص نحو 0.25 mm عن الحساس الذي يجب أن يلامس القاع.*

ثلاث طرق لتثبيت غلاف الحساس في الغمد:

الطريقة	كيف تعمل	متى تُختار
وصلة نابضة (Spring-Loaded)	وصلة مسنّنة من طرفيها، ونابض يدفع الغلاف إلى قاع التجويف باستمرار	الخيار الافتراضي: يضمن التلامس ويعوّض التمدد الحراري
لحام فضي (Silver Solder)	الغلاف ملحوم في الوصلة بطول ثابت	تجميعة صلبة متينة، لكنها تترك خلوصًا صغيرًا عن القاع وتلزم مطابقة الطول بدقة

الطريقة	كيف تعمل	متى تُختار
وصلة ضاغطة (Compression Fitting)	يُدفع الغلاف إلى القاع بعد ربط الوصلة ثم تُشدّ الصامولة	مجس عام (Universal Probe) يخدم أعماق أغماد مختلفة

رأس التوصيل وتجميعة نبل-قارنة-نبل: فوق الغمد يوضع رأس (Head) فيه أطراف توصيل وغطاء وفوهة مجرى كابل. وتُوصَّل هذه القطع تقليديًا بترتيب **نبل ثم قارنة وصل ثم نبل (Nipple-Union-Nipple)**، وفائدته أن الحساس يُستبدل بفكّ القارنة وحدها من دون تفكيك مجرى الكابل. وإن لم تُستعمل قارنة في تجميعة الحساس وجب وضع واحدة في مجرى الكابل، وإلا لم يمكن سحب الحساس أصلًا. والبُعد بين الرأس والأنبوب الساخن يحمي الأطراف والمرسل من حرارة الخط ويقلّل خطأ الوصلة الباردة (القسم 7.3).

وصلات الغمد بالعملية:

الوصلة	المقاس المعتاد	المزية	القيد
ملولبة (Threaded)	3/4 in NPT (نحو 19 mm)؛ و1 in NPT أقوى بقليل	الأرخص وأقصر غمد ممكن للغمر المطلوب	1/2 in NPT غير متين بما يكفي لخدمة الهيدروكربونات
مشفهة (Flanged)	DN 25 و40 و50 بتصنيف يطابق الخط	أمان أعلى ضد التسرب	أغلى، ويلزم إضافة طول الفوهة إلى البُعد U
مشفهة بوصلة حرّة (Lap Joint/-Van Stone)	مثل المشفهة	الشفة تُستبدل في الموقع، وتُصنع من فولاذ كربوني بينما الغمد من سبيكة غالية	أكثر شيوعًا في الكيماويات منها في الإنتاج
ملحومة في تجويف (Socket-Welded)	حسب الخط	أفضل منع للتسرب	لا يُبرَّر إلا للموائع الغالية جدًا أو شديدة السمّية

التصنيع: الغمد **المخروط من قضيب صلد (Drilled / Barstock)** أغلى لكنه أوثق وأمتن، ويتوفر بالأشكال الثلاثة (مستقيم، متدرج، مستدق). والغمد **الملحوم / (Welded Drawn)** — أنبوب مسحوب يُغلق طرفه باللحام وتُلحم عليه وصلة العملية — أرخص ولا يتوفر إلا مستقيمًا أو متدرجًا. وهذا سبب عملي إضافي لتفضيل المستدق: أنت تشتري معه تصنيعًا من قضيب صلد.

قواعد الموضع:

- الوصلة إلى الخط بقطعة ملحومة (Threadolet أو Latrolet أو Elbolet)، والغمد **عموديًا على الجريان** حيثما أمكن؛ وإن رُكّب في كوع وُجّه طرفه لمواجهة الجريان.
- أقصر بُعد U عملي 64 mm، ومعناه أن أصغر خط يقبل غمدًا قياسيًا هو **75 mm اسميًا**. وفي خط 50 mm تُستعمل وصلة تكبير أو تي مصغّرة، مع الانتباه إلى أن الغمد يسدّ جزءًا معتبرًا من المقطع.
- في الخطوط 100 mm فأكبر يُختار الغمد ليصل إلى **مركز الأنبوب أو يتجاوزه قليلًا**. وفي الخطوط فوق 305 mm قد تفرض السرعة غمدًا **أقصر**، ولا ضير: الجريان مضطرب بما يكفي لتكون الحرارة ممثلة قرب الجدار نسبيًا.
- في الأوعية يكفي بروز نحو 305 mm عادة، ويُضاف طول الفوهة إلى الحساب، ويُتحقق من عدم تعارض الغمد مع الأجزاء الداخلية. وفي وعاء متعدد الأطوار يُوضع الغمد بحيث ينغمر في الطور المقصود قياسه.
- **ممنوع** وضع غمد في خط يمرّ فيه كاشط (Pig أو Scraper)؛ يُنقل إلى ما قبل قاذف الكاشط أو ما بعد مستقبِله.
- أغماد الاختبار الدورية (حيث لا يلزم قياس مستمر) بتجويف 6.6 mm للثرمومتر القرصي أو 9.8 mm للزجاجي، **بسدادة أو غطاء** يمنع دخول الحشرات والأتربة إلى التجويف.

حدود السرعة كفحص تمهيدي: قبل إجراء حساب ASME PTC 19.3 TW الكامل يفيد فحص تمهيدي سريع بجداول المصنّعين لأقصى سرعة مائع مقبولة. الأرقام التالية لأغماد الفولاذ المقاوم للصدأ 304/316 بوصلة ملولبة 3/4 in NPT، بالمتر في الثانية، والقيمة بين قوسين هي المسموح **إن وُجد سائل**:

شكل الغمد	U = 64 mm	114 mm	190 mm	267 mm
متدرج (Stepped)	91 (45)	39 (30)	14.1	7.2
مستدق (Tapered)	134 (74)	60 (41)	21.7	11.0

جدول: حدود السرعة التمهيدية للأغماد (تابع): أطوال الغمر الأكبر

شكل الغمد	U = 343 mm	419 mm	572 mm
متدرج (Stepped)	4.4	2.9	1.6
مستدق (Tapered)	6.7	4.5	2.4

ويُقرأ من الجدول ما يلي: الممارسة المعتادة أن تُحجَّم خطوط السوائل لسرعات دون 4.6 m/s وخطوط الغاز دون 18.3 m/s. وعند هذه الحدود يكون الغمد **المستدق** من الفولاذ المقاوم للصدأ بـ U = 190 mm آمنًا (21.7 m/s > 18.3)، بينما **المتدرج** بالطول نفسه **ليس آمنًا** للغاز (14.1 m/s < 18.3) — وهذا بالضبط نوع الفرق الذي يضيع حين يُكتب في ورقة الطلب «غمد 190 mm» بلا شكل. والبُعد 190 mm يكفي عمومًا لخطوط حتى 400 mm بوصلة ملولبة، ويلزم أطول منه مع الوصلة المشفهة لأن طول الفوهة يُقتطع من الغمر. ويمكن بلوغ U = 254 mm بالغمد المستدق إذا كانت سرعة الغاز دون نحو 12 m/s (بالاستكمال في الجدول)، مع التحقق بحساب ASME PTC 19.3 TW. وفي الأوعية والخزانات، حيث السرعات دون 3 m/s عادة، يُقبل U حتى 572 mm.

الشكل 7-8: *أقصى سرعة مائع مقبولة كفحص تمهيدي لأغماد الفولاذ المقاوم للصدأ الملولبة 3/4 in N PT بحسب طول الغمر U. الغمد المستدق بطول 190 mm يتحمل 21.7 m/s فيجتاز حد خطوط الغاز 18.3 m/s، والمتدرج بالطول نفسه (14.1 m/s) لا يجتازه.*

> **تنبيه:** هذا الجدول **فحص تمهيدي لفرز الحالات الواضحة فقط**، ولا يغني عن حساب ASME PTC 19.3 TW في خطوط الغاز والبخار عالية السرعة ولا عن بيانات المصنّع لمنتجه. وأنظمة التنفيس وخطوط الأنابيب تتجاوز هذه السرعات أحيانًا بكثير.

◆ ◆ ◆

7.8 الحرارة في التوربينات الغازية والمحامل

يعتمد التحكم والحماية في التوربين الغازي على قياسات حرارة كثيرة:

- **حرارة العادم (Exhaust Temperature):** حلقة من مزدوجات K أو N موزعة على محيط مجرى العادم، عددها يتراوح عادة بين نحو 12 و27 حسب الطراز. يُستخدم المتوسط (بعد استبعاد القراءات غير المنطقية) في حلقة التحكم بالحرارة (الفصل 34)، ويُستخدم **الانتشار (Spread)** — الفرق بين أعلى وأدنى القراءات — لكشف مشكلات الاحتراق والمزدوجات التالفة (القسم 34.6).
- **حرارة فراغات العجلات (Wheel Space):** مزدوجات لمراقبة تسرب الغازات الساخنة وتبريد الأقراص.
- **حرارة المحامل (Bearing Metal/Drain):** RTD أو مزدوجات مدمجة في وسادة المحمل (Embedded) أو في خط زيت الصرف؛ للإنذار والإيقاف.
- **حرارة هواء الدخول (Compressor Inlet):** RTD عادة، لأنها تدخل في حسابات الحدود والأداء وتصحيح منحنيات التحكم، والدقة فيها مهمة.
- **حرارة ملفات المولد:** RTD مدمجة في الملفات.

للمزدوجات الحرارية ومقاومات RTD في هذه الأنظمة ترتيبات تصويت أو مقارنة، وتُكشف الأعطال (القطع، والقصر، والانحراف عن المجموعة) قبل استخدام القراءة في الحماية. وتحدد إعدادات كشف القطع (Burnout) اتجاه القراءة عند انقطاع الحساس — إلى أعلى المدى أو أسفله — ويُختار الاتجاه الذي يقود إلى الحالة الآمنة في منطق الحماية، ويُوثَّق.

والأعطال في الجدول التالي لا تخص التوربينات وحدها، بل يصادفها المهندس في كل حلقة حرارة؛ أما التمييز بين عطل الحساس واضطراب العملية فيُفصَّل في الفصل 40.

جدول مقارنة: أعطال كواشف الحرارة، أسبابها البيئية، وما يراه المشغل

العطل	RTD	المزدوج الحراري	السبب البيئي الغالب	ما يراه المشغل وما يفعله المرسل
فتح الدائرة (Open)	قطع سلك البلاتين أو الوصلة بالاهتزاز	قطع الوصلة الساخنة بالتعب الحراري	اهتزاز، تمدد، تآكل	قراءة تذهب إلى أعلى أو أسفل المدى حسب إعداد كشف القطع؛ إنذار عطل حساس
القصر (Short)	بين سلكي التغذية	بين سلكي المزدوج قبل الوصلة (وصلة ثانوية)	رطوبة في الرأس، سحق العازل	RTD: قراءة منخفضة جدًا؛ TC: يقرأ حرارة موضع القصر لا الطرف
هبوط مقاومة العزل	تسرب تيار إلى الغمد ← قراءة منخفضة	تيار أرضي ← قراءة متذبذبة	حرارة عالية ورطوبة، عازل MgO امتص الماء	انزياح بطيء أو ضجيج؛ يُقاس العزل بميغر 50 إلى 100 V DC (لا أكثر)؛ يُتوقع أكثر من 100 MΩ للحساس الجديد باردًا، ويُرفض في الخدمة دون نحو 1 MΩ (القسم 7.9)
الانجراف (Drift)	تلوث البلاتين، إجهاد السلك	تغير تركيب السبيكة عند الحرارة العالية (خاصة النوع K فوق 800 °C)	دورات حرارية متكررة، أجواء مختزلة	خطأ منتظم يظهر بالمقارنة مع حساس مرجعي؛ لا يُكشف بمجرد النظر
التسخين الذاتي	تيار القياس يرفع حرارة العنصر	لا ينطبق	مائع ساكن أو غاز (تبريد ضعيف)	خطأ يزيد مع تيار المرسل؛ يُحدَّد التيار بـ 1 mA أو أقل
خطأ الوصلة المرجعية	لا ينطبق	تعويض خاطئ أو كابل تمديد من معدن مختلف	حرارة رأس الحساس والصندوق	خطأ ثابت بحجم فرق حرارة الرأس؛ راجع القسم 7.3

العطل	RTD	المزدوج الحراري	السبب البيئي الغالب	ما يراه المشغل وما يفعله المرسل
زمن الاستجابة الطويل	غمد سميك أو فجوة هواء	الشيء نفسه	سوء ملامسة الغمد، ترسبات	تأخر يفسد الحلقة ويخفي التذبذب الحقيقي؛ راجع القسم 7.7

القاعدة الميدانية عند تعليق قراءة حرارة: افصل الحساس في الرأس وقس **المقاومة وعزل الأرض** (RTD) أو **الجهد المحمّل ومقاومة الحلقة وعزل الغمد** (TC) قبل استبدال أي شيء؛ فمعظم «أعطال الحساس» تنشأ في الرأس والكابل لا في العنصر.

7.9 المعايرة والتحقق

تُعامَل حساسات الحرارة على ثلاث مراحل: فحص الحساس قبل التركيب، وفحص المرسل وحده، ثم التحقق من السلسلة كاملة. والإجراءات التالية مستخلصة من إجراءات المعايرة الميدانية النموذجية لمحطات الدورة المركبة، وتُنفَّذ بترتيبها.

الإجراء 1: فحص المزدوج الحراري قبل التركيب

1. طابق رقم الوسم ونوع المزدوج (K أو J أو غيرهما) وطول الحساس وقطره مع ورقة البيانات وأبعاد الغمد.
2. صل المزدوج بمؤشر حرارة رقمي مضبوط على النوع نفسه، واتركه يستقر عند حرارة المحيط خمس دقائق على الأقل.
3. قارن القراءة بحرارة مرجعية موثوقة؛ يُقبل المزدوج إذا كانت القراءة ضمن نحو ±3 °C.
4. قِس مقاومة العزل بين الموصلين مجتمعين والغمد بجهد اختبار منخفض (لا يزيد على 100 V DC، ويُتبع دليل المصنّع)؛ يُتوقع عادة أكثر من 100 MΩ للحساس الجديد، ويُرفض دون 1 MΩ.

5. افحص الغمد بصريًا: لا انبعاج ولا شقوق، والوصلة الباردة ورأس التوصيل سليمان.
6. سجّل النتائج، ولا يُركَّب مزدوج لا يحقق أحد هذه المعايير.

الإجراء 2: فحص *RTD* قبل التركيب

1. قِس مقاومة الحساس بعد استقراره عند حرارة المحيط بمقياس دقيق (بأربعة أسلاك حيث أمكن).
2. قارنها بقيمة جدول IEC 60751 للحرارة نفسها؛ فمقاومة Pt100 نحو 100 Ω عند 0 °C ونحو 109.7 Ω عند 25 °C، ويُقبل الحساس ضمن سماحية فئته (A أو B).
3. قِس مقاومة العزل بين الأسلاك مجتمعة والغمد بجهد لا يزيد على 100 V DC؛ يُتوقع عادة أكثر من 100 MΩ للحساس الجديد، ويُرفض دون 1 MΩ.
4. تحقق من مطابقة عدد الأسلاك (3 أو 4) لتهيئة المرسل، وسجّل النتائج.

الإجراء 3: فحص المرسل وحده بالمحاكاة

1. افصل الحساس عن المرسل وصل معايرًا يحاكي المزدوج (mV مع تعويض الوصلة الباردة) أو صندوق مقاومات (Decade Box بدقة 0.02% أو أفضل) لحساس RTD.
2. تأكد من أن تعويض الوصلة الباردة مُفعَّل في جهة واحدة فقط: إما في المحاكي أو في المرسل، لا في كليهما.
3. طبّق 0 و25 و50 و75 و100% من المدى، وسجّل خرج التيار «كما وُجد» (As-Found) عند كل نقطة.
4. إذا تجاوز الخطأ السماحية فاضبط المرسل (Trim) عبر HART، وأعد النقاط وسجّل «كما تُرك» (As-Left).

5. للمرسلات الذكية: طابق نوع الحساس وعدد الأسلاك، وأدخل معاملات كالندر–فان دوسن الخاصة بالحساس إن وُجدت (Sensor Matching)، وراجع إعداد كشف القطع (أعلى أم أسفل) وزمن التخميد.

الإجراء 4: التحقق من السلسلة كاملة بفرن جاف أو حمام حرارة

1. أدخل الحساس (مع الغمد إن أمكن) في فرن جاف (Dry Block) أو حمام سائل مع مؤشر مرجعي معتمد، بعمق غمر كافٍ (عادة 15 ضعف القطر على الأقل).
2. اضبط الفرن على 3 إلى 5 نقاط تغطي مدى التشغيل، وانتظر الاستقرار عند كل نقطة (لا تتغير القراءة أكثر من 0.1 °C في دقيقة).
3. سجّل قراءة المرجع وقراءة النظام على الشاشة (لا خرج المرسل وحده) عند كل نقطة.
4. قارن الفرق بالسماحية المتفق عليها (في حرارة العادم مثلًا ±2.5 °C أو 0.75% أيهما أكبر لمزدوج K من الفئة 2).
5. أعد الحساس إلى الغمد، وشدّ الرأس والغدة، وتحقق من القراءة على الشاشة عند حرارة العملية، ووثّق الشهادة.

الشكل 7-9: *ترتيبان لفحص حلقات الحرارة: محاكاة الحساس بمعاير mV أو صندوق مقاومات لفحص المرسل وحده، ومعايرة الحساس والمرسل معًا في فرن جاف مع مؤشر مرجعي معتمد.*

التفاصيل والنماذج في الفصل 14 وملحق نماذج التشغيل والصيانة (مخطط).

7.10 حساسات حرارة أخرى ودليل المدى الكامل

ما غطيناه في 7.2 إلى 7.8 يحمل الغالبية العظمى من نقاط قياس الحرارة في المصنع، لكن المهندس يصادف الباقي في العمليات الصناعية والأفران والمختبرات والتشغيل التجريبي:

الحساس	المبدأ	المدى النموذجي	أين يُستخدم	تنبيه
ثنائي المعدن (Bimetallic)	شريطان ملحومان بمعاملي تمدد مختلفين ينحنيان أو يلتفان حلزونيًا	−70 إلى +540 °C	المقاييس المحلية القرصية، الثرموستاتات، قواطع الحماية الحرارية	دقة ±1 إلى 2% من المدى؛ يتأثر بالاهتزاز؛ يُركب بغمد
الثرموستات ومفاتيح الحرارة	ثنائي معدن أو بصيلة مملوءة تفتح تلامسًا عند نقطة ضبط	حتى نحو 600 °C	تدفئة الخزائن، حماية المحركات، التتبع الحراري	المنطقة الميتة (Dead Band) الثابتة؛ في الحماية يُستبدل بمرسل وحد في المنطق (القسم 11.8)
الطباشير والملصقات والمخاريط (Crayons, Labels, Pyrometric Cones)	مواد تذوب أو تغير لونها أو تنحني عند حرارة معلومة	40 إلى 1300 °C (المخاريط حتى 2000 °C)	تحقق سريع من حرارة سطح أثناء اللحام والمعالجة الحرارية؛ المخاريط في أفران الخزف والحراريات	تعطي «تجاوز/لم يتجاوز» فقط، غير رجعية، لا تُوصل بنظام

الحساس	المبدأ	المدى النموذجي	أين يُستخدم	تنبيه
البصيلة المملوءة والزجاجي (Filled-Bulb, Glass-Stem)	تمدد سائل أو غاز أو ضغط بخار في بصيلة وشعري	−200 إلى +650 °C	المقاييس المحلية والمسجلات القديمة، مراجع المختبر (الزئبقي)	تعويض حرارة الشعري (الفئات IA/IB/IIA…)؛ الزئبق ممنوع في كثير من المنشآت
حساسات الدوائر المتكاملة (IC: LM35، AD590، الترانزستور والديود)	جهد وصلة PN (نحو −2 mV/°C) تُحوّله الدائرة إلى خرج خطي معاير (LM35 يعطي 10 mV/°C، و AD590 يعطي 1 µA/K)	−55 إلى +150 °C	تعويض الوصلة الباردة في بطاقات المزدوجات، الإلكترونيات، HVAC	مدى ضيق؛ ليست للعمليات
الثرمستور	مقاومة شبه موصل تتغير أسيًا (القسم 7.5)	−100 إلى +300 °C	الحساسية العالية في مدى ضيق، الطب، الكابلات	خطية ضعيفة؛ تشتت بين الوحدات
الألياف البصرية (Fiber-Optic, Fluoroptic, DTS)	فسفور على طرف الليف يتغير زمن وميضه مع الحرارة؛ أو تشتت رامان على طول الليف (قياس موزع DTS)	−200 إلى +450 °C (الفسفوري)؛ حتى 700 °C (DTS)	داخل ملفات المحولات ومحركات الجهد العالي (بلا تداخل كهرومغناطيسي)، وكشف التسرب على طول خطوط الأنابيب والكابلات بالقياس الموزع	التكلفة؛ هشاشة الليف؛ الموصلات البصرية

الحساس	المبدأ	المدى النموذجي	أين يُستخدم	تنبيه
الكوارتز (Quartz Crystal)	تردد رنين بلورة كوارتز مقطوعة خصيصًا يتغير خطيًا مع الحرارة	−80 إلى +250 °C	مراجع المعايرة عالية الدقة (0.001 °C)	مختبري أساسًا
بيرومتر الشفط (Suction Pyrometer)	مزدوج حراري داخل درع إشعاعي يُسحب عبره غاز المداخن بسرعة عالية	حتى 1600 °C	قياس حرارة الغاز الحقيقية في الأفران والمراجل حيث يخطئ المزدوج المكشوف بمئات الدرجات بسبب الإشعاع من الجدران واللهب	يحتاج مصدر شفط؛ جهاز اختبار لا قياس دائم
الإشعاعي وتحت الحمراء والكاميرات الحرارية	(القسم 7.6)	−50 إلى +3000 °C	الأسطح، الأفران، المتحرك، الفحص التنبؤي	الانبعاثية؛ الغبار والزجاج
الموجات فوق الصوتية (Ultrasonic)	تغير سرعة الصوت مع الحرارة في الغاز أو في قضيب	حتى 3000 °C	قياس حرارة اللهب والغازات شديدة الحرارة بلا تلامس، أبحاث الاحتراق	متخصص

اختيار الحساس بالمدى والحاجة: يجمع الشكل 7-10 المديات النموذجية لكل الحساسات في رسم واحد على غرار جداول التطبيق والاختيار في أدلة المصنّعين، ومعه قاعدة الاختيار نفسها (انظر القسم 7.1)، ويُضاف إليها: **ثنائي المعدن والمملوء** للبيان المحلي؛ وما عداها لحالات خاصة.

الشكل 7-10: *المديات النموذجية لحساسات الحرارة الصناعية والمخبرية؛ الأشرطة الداكنة هي المدى المعتاد في العمليات، والفاتحة الحد الأقصى الممكن.*

درس عملي يستحق التوقف: خطأ الإشعاع في قياس حرارة الغازات الساخنة. المزدوج المكشوف في غاز مداخن عند 900 °C يرى جدارًا عند 600 °C، فيشع إليه ويستقر عند حرارة أقل من حرارة الغاز بقدر يعتمد على سرعة الغاز وقطر الوصلة والانبعاثية، وقد يبلغ الخطأ 100 إلى 300 °C. والعلاج: درع إشعاعي حول الوصلة، أو زيادة سرعة الغاز على الوصلة (بيرومتر الشفط)، أو وصلة أدق، أو التصحيح الحسابي. وهذا ما يفسر اختلاف قراءة «حرارة غاز العادم» بين مزدوج مركّب في الجدار وآخر ممتد إلى منتصف المجرى في التوربينات الغازية (القسم 7.8).

7.10-أ الثرمومترات المحلية: ثنائية المعدن والزجاجية، وما يُطلب في الطلبية

الثرمومتر المحلي هو ما يلمسه المشغّل ويصدّقه، وهو أرخص جهاز في المصنع وأكثره عددًا: معظم الأوعية والمبادلات مزوّدة به. والقليل من التفصيل في طلبه يوفّر استبدالات كثيرة.

الثرمومتر ثنائي المعدن: شريطان بمعاملي تمدد مختلفين ملحومان معًا، وأشهر أزواجهما **الإنفار (Invar)** — سبيكة حديد ونيكل معاملُ تمددها شبه معدوم — مقابل **النحاس الأصفر (Brass)** سبيكة النحاس والزنك عالية التمدد. فينحني الزوج عند ارتفاع الحرارة نحو المعدن الأقلّ تمددًا، وتُحوَّل الحركة إلى دوران مؤشر.

الشكل	البنية	ما يميزه
حلزوني مسطّح (Spiral)	الشريط ملفوف حلزونًا مسطحًا في مستوى القرص	بسيط ورخيص؛ للثرموستاتات والمقاييس الصغيرة
لولبي (Helix)	الشريط ملفوف لولبًا حول محور طويل داخل الساق	يُدخل في غمد أو أنبوب، فيقيس داخل مجرى أو وعاء ويحرك المؤشر مباشرة؛ الشكل الصناعي الأشيع
لولبي متعدد (Multiple Helix)	عدة لوالب على المحور نفسه	حركة زاوية أكبر للتغير نفسه، فتدريج أوسع وميز أفضل في مدى ضيق

المدى النموذجي **75− إلى 540 °C+**، والدقة القياسية **1% من المدى**، وأقطار الأقراص من 25 mm (جيب) إلى 125 mm فأكبر، و125 mm هو المعتاد في المنشآت الصناعية لأنه يُقرأ من مسافة معقولة. ويُختار المدى بحيث تقع حرارة التشغيل المعتادة **قرب منتصفه** مع تغطية الطرفين المهمّين؛ وهذه الأجهزة لا تتضرر بسهولة من تجاوز المدى صعودًا أو هبوطًا.

ما يُذكر في الطلبية ويُنسى عادة:

1. **موضع الساق:** خلفية (الوجه عمودي على الساق، والعنصر يدير المؤشر مباشرة)، أو سفلية (المؤشر يُدار بتروس)، أو **«كل زاوية» (Every Angle)** بقرص يميل ويدور. والأخير هو المفضّل حيث لا يُعرف موضع القراءة مسبقًا أو يصعب الوصول، وهو الأغلى.
2. **نافذة القرص:** زجاج مقاوم للخدش سهل الكسر، أو بلاستيك شفاف عكسه.
3. **الإحكام:** محكم الغلق تمامًا (Hermetically Sealed) (يمنع التآكل الداخلي وتضبيب النافذة، لكنه يُستبدل كاملًا عند كسر النافذة)، أو بإطار قابل للفك (تُستبدل النافذة، لكن الإحكام ضعيف)، أو مملوء بالغليسرين أو السيليكون (مقاومة تآكل وتخميد اهتزاز، كما في مقاييس الضغط). والمحكم أو المملوء هو الصحيح في الأجواء الرطبة والمالحة والبحرية.
4. **سنّ التركيب:** 1/2 in NPT الأشيع، و1/4 in و3/4 in خياران.
5. **التدريج:** مئوي (سلسيوس) أو فهرنهايتي أو مزدوج.
6. **الضبط:** برغي ضبط خارجي يصحّح **نقطة واحدة** فقط؛ **ولا يوجد ضبط للاتساع (Span).** فإن كان الخطأ يتغير على طول المدى فالجهاز يُستبدل لا يُضبط — وهذه معلومة تُنهي جدالًا متكررًا في الورشة.

الثرمومتر الزجاجي (Liquid-in-Glass): أنبوب زجاجي ببصيلة سائل يتمدد في شعري مدرّج، ويُعرف بـ«ذي الظهر الأصفر» (Yellow Back) لأن التدريج يُظهَّر على خلفية صفراء لتسهيل القراءة. مداه العملي نحو **120− إلى 320+ °C**، والمراجع المختبرية منه تقرأ إلى **0.1 °C** على مديات تغطي 38− إلى 650+ °C.

- **السائل:** الزئبق للمدى العام، وهو يتجمد عند 38.8− °C؛ وللأدنى تُستعمل ملغمة زئبق-ثاليوم أو الكحول أو البنتان (حتى نحو 200− °C).
- **شحن النيتروجين:** لرفع الحد الأعلى يُشحن الفراغ فوق عمود الزئبق بالنيتروجين تحت ضغط 2 إلى 20 bar (نحو 30 إلى 300 psi). فالزئبق يغلي عند 357 °C تحت الضغط الجوي، والضغط الإضافي يرفع نقطة غليانه فيمتد

المدى إلى نحو 650 °C. ولهذا لا يجوز أبدًا تسخين ثرمومتر زجاجي فوق مداه المكتوب: العمود يغلي والأنبوب ينفجر.

- **المزايا:** كلفة منخفضة ودقة جيدة ولا حاجة إلى طاقة، ولذلك يبقى مرجعًا مخبريًا وفي بعض قياسات النقل التجاري.
- **العيوب:** صعوبة القراءة وزاوية النظر، والكسر السهل، واستحالة التسجيل أو التحكم أو النقل عن بُعد. ويضاف اليوم قيد حاسم: **الزئبق محظور أو مقيَّد التداول في كثير من المنشآت والمختبرات**، وحلّت محله المراجع الرقمية ذات المجس البلاتيني (القسم 14.9).

الثرمومتر الرقمي المحمول والميداني: بديل عملي للاثنين معًا. المحمول يعمل ببطارية بمجس RTD أو مزدوج يُدخل في غمد اختبار، وميزه ودقته بين 0.1 و1 درجة، ويعطي تقديرًا تقريبيًا بملامسة سطح الأنبوب. ومنه طرازات ميدانية محكمة ضد الطقس ومعتمدة للأمان الجوهري بشاشة بلورية سائلة، مدمجة المجس أو موصولة بحساس بعيد. وهي الخيار حين تُقرأ النقطة كثيرًا ويُطلب ميز أفضل من درجة، مقابل صيانة أعلى من المقياس القرصي (بطارية، شاشة، إحكام).

◆ ◆ ◆

7.11 حالة ميدانية: انتشار حرارة العادم الذي يتبع المطر

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

توربين غازي يعطي إنذار ارتفاع انتشار حرارة العادم (Exhaust Spread) بعد الأمطار وفي ساعات الرطوبة العالية، ثم يختفي الإنذار مع ارتفاع الحرارة نهارًا. اشتبه الفريق أولًا في مشكلة احتراق وطُلب فحص الشعلات. عند مراجعة الاتجاهات تبين أن مزدوجًا واحدًا فقط يقرأ أقل من جيرانه بعشرات الدرجات، وأن انخفاضه يتزامن مع الرطوبة. الفحص الميداني وجد صندوق توصيل ضعيف الإحكام تسرب إليه الماء، ومقاومة عزل بين

الموصلات والأرض دون 0.2 MΩ. كان التسرب يُنشئ مسارًا يشوه جهد المزدوج. بعد تجفيف الصندوق واستبدال غدة الكابل وإعادة فحص العزل عادت القراءة إلى المجموعة، واختفى الإنذار.

الدروس: قارن الحساس بجيرانه قبل الحكم على العملية؛ الانتشار مؤشر احتراق وصحة حساسات معًا؛ فحص العزل جزء من صيانة المزدوجات لا من التركيب فقط؛ ولا يُعطَّل منطق الانتشار لإسكات الإنذار.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
الاختيار	نوع الحساس وفئة السماحية، وتقليل أنواع المزدوجات في المنشأة، وعدد أسلاك RTD	يطابق النوع والطول والقطر مع ورقة البيانات وأبعاد الغمد
الغمد	الشكل والطول U والمادة، ويطلب حساب ASME PTC 19.3 TW	يتحقق من ملامسة الحساس قاع التجويف ومن الخلوص
الكابلات	نوع كابل التمديد أو التعويض ونظام الألوان في أساس التصميم	يتحقق من القطبية، ويمنع الوصلات النحاسية الوسيطة
المرسل	تهيئة نوع الحساس، واتجاه كشف القطع (Burnout) المتوافق مع منطق الحماية	يهيئ المرسل، ويحاكي الحساس، ويسجل القراءات كما وُجدت (As-Found) وكما تُركت (As-Left)
التشخيص	يحكم بين عطل الحساس ومشكلة العملية بمقارنة القراءات المتجاورة	يقيس المقاومة والجهد وعزل الغمد (50 إلى 100 V DC) قبل أي استبدال

7.12 الأخطاء الشائعة

- جمع حرارة الوصلة الباردة مع الحرارة المقاسة بدل جمع الجهود.

- كابل تعويض من نوع خاطئ أو بقطبية معكوسة، أو وصلات نحاسية وسيطة في مسار المزدوج.
- RTD بسلكين على مسافة طويلة، أو ثلاثة أسلاك بأطوال ومقاطع غير متساوية.
- غمد طويل رفيع بلا حساب اهتزاز، أو فراغ هوائي بين الحساس والغمد.
- مزدوج مؤرَّض مع تأريض في طرف آخر يسبب حلقة أرضية وتشويشًا.
- اتجاه كشف القطع لا يتفق مع منطق الحماية.
- الاعتماد على بيرومتر دون ضبط الانبعاثية.
- معالجة القياس البطيء بزيادة كسب المتحكم.
- تهيئة نوع مزدوج خاطئ في المرسل (K على J مثلًا)، فتأتي القراءة معقولة الشكل وخاطئة بأكثر من مئة درجة (القسم 7.2-أ).
- نقل جهاز نظام مملوء رأسيًا بعد معايرته، أو شراء الفئة IIA لخدمة تعبر حرارة المحيط (القسم 7.5-أ).

7.13 ملخص

ستة أنواع رئيسية من الحساسات، لكل منها مجاله. المزدوج يقيس فرقًا يحتاج تعويضًا بالجهد لا بالحرارة، والكابل جزء منه، وخطأ تهيئة نوعه لا يطلق إنذارًا. وRTD دقيق ومستقر، وأثر الأسلاك والتسخين الذاتي يُحسبان، وعدم تطابق الأسلاك عدو نظام الثلاثة أسلاك. والأنظمة المملوءة تعمل بلا كهرباء، لكنها تتأثر بفرق الارتفاع وبعبور حرارة المحيط. والبيرومتر محكوم بالانبعاثية ونسبة المسافة إلى البقعة. والغمد يحمي ويؤخر، ويُحسب ميكانيكيًا وفق ASME PTC 19.3 TW. وفي التوربينات تُقرأ حرارة العادم كمجموعة: المتوسط للتحكم، والانتشار للحماية والتشخيص. والمعايرة ثلاث مراحل: الحساس، ثم المرسل، ثم السلسلة كاملة.

وفي الفصل التالي: الفصل 8 «قياس التدفق»؛ فبعد الضغط والحرارة نصل إلى المتغير الذي يحتاجهما معًا، إذ لا يصح قياس تدفق غاز دون تعويض ضغطه وحرارته.

7.14 أسئلة التقييم الذاتي

1. مزدوج K يعطي 12.21 mV صافيًا، وحرارة الأطراف (E = 1.000 mV) 25 °C. ما الحرارة المقاسة؟ ولماذا لا تجمع 25 °C مباشرة؟ (استعن بجدول IEC 60584).
2. صندوق توصيل عند 60 °C عُكس فيه زوج تعويض، والأطراف في غرفة عند 24 °C . قدّر الخطأ واتجاهه.
3. احسب مقاومة Pt100 عند 200 °C بمعادلة كالندر–فان دوسن.
4. RTD بسلكين على بعد 60 m بكابل (18.4 Ω/km) 1.0 mm². ما خطأ القراءة تقريبًا؟
5. متى تختار مزدوج N بدل K؟
6. ما الفرق بين كابل التمديد وكابل التعويض؟ ومتى لا يصلح الثاني؟
7. لماذا يجب حساب الغمد في خط غاز عالي السرعة؟ وما الخطر إن أُهمل؟
8. اشرح لماذا تُستخدم RTD لحرارة هواء دخول الضاغط ومزدوجات لحرارة العادم.
9. مرسل حرارة يُضبط كشف القطع فيه إلى أعلى المدى، ويستخدم في منطق إيقاف على الحرارة العالية. ماذا يحدث عند انقطاع الحساس؟ وهل هذا مقبول؟
10. في الحالة 7.11، ما الفحصان اللذان كانا سيكشفان السبب قبل طلب فحص الشعلات؟

مراجع الفصل: المسودة v0.1 (الفصل 7)؛ مبادئ حساسات الحرارة المقاومية وNTC و PTC وثابت الزمن ومعامل TC100 (Bosch، Automotive Mechatronics)؛ أنواع الحساسات وأشكال طرف المزدوج وتركيبه (دورة Instrumentation and Process Control)؛ سماحيات كابلات التمديد والتعويض وأكواد ألوانها ومقاومة الموصلات (كتالوج كابلات الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم، BS 4937-30)؛ إجراءات

المعايرة الميدانية للمزدوجات الحرارية ومقاومات RTD والمقاييس ومعدات ورشة الحرارة (I&C Commissioning Instruction، MAPNA/Monenco؛ IEC 60584، IEC 60751؛ ASME PTC 19.3 TW؛ R60 (DOE Fundamentals Handbook، الوحدة 1: أعطال الكواشف وأثر البيئة)؛ وR63 (عرض قياس الحرارة: المزدوجات النبيلة، وأسلاك RTD، والأنظمة المملوءة، والبيرومترات، والثرمومترات المحلية)؛ وSAMA RC 6-10 (تصنيف أنظمة القياس الحراري المملوءة)؛ وASTM E230 (جداول المزدوجات الحرارية وسماحياتها).

الفصل 8: قياس التدفق

> **لمن هذا الفصل:** المهندس الجديد ومهندس الموقع ومهندس التصميم؛ التدفق هو المتغير الذي تُحسب به المبيعات والكفاءة وموازنات المصنع، وهو الأكثر تأثرًا بالتركيب وخواص الوسط.
>
> **الفكرة الأساسية:** معظم العدادات لا تقيس التدفق مباشرة، بل تقيس أثرًا له (فرق ضغط، سرعة، تردد، زمن عبور، التواء)، ثم تحوّله بفرضيات عن الوسط ومقطع السرعة. إذا تغيّرت الفرضيات تغيّر القياس والعداد سليم.

8.1 أساسيات التدفق

- التدفق الحجمي: $Q = v \cdot A$، والكتلي: $\dot{m} = \rho \cdot Q$.
- رقم رينولدز: $Re = \rho \cdot v \cdot D / \mu$. دون نحو 2000 يكون الجريان صفائحيًا (Laminar)، وفوق نحو 4000 مضطربًا (Turbulent)، وما بينهما انتقاليًا. معظم العدادات الصناعية تُعايَر للجريان المضطرب، ولبعضها حد أدنى لـ Re.
- مقطع السرعة (Velocity Profile) يتشوه بعد المنعطفات والصمامات ويدور حلزونيًا (Swirl)؛ وهذا سبب متطلبات الأطوال المستقيمة (8.18).
- في الغازات يجب التمييز بين الحجم الفعلي والحجم عند الظروف المرجعية (الفصل 4):

$$Q_{std} = Q_{act} \times (P / P_{std}) \times (T_{std} / T) \times (Z_{std} / Z)$$

مثال محلول: غاز عند 40 barg (41.01 bara) و40 °C و$Z = 0.92$، تدفقه الفعلي 1000 m^3/h. عند الظروف القياسية (1.01325 bara، 15 °C، $Z \approx 1$):

$$Q_{std} = 1000 \times (41.01/1.01325) \times (288.15/313.15) \times (1/0.92) \approx 40{,}500 \ \mathrm{Sm^3/h}$$

أي أن «1000» و«40,500» قد تصفان التدفق نفسه؛ وكتابة الوحدة دون تحديد المرجع خطأ تصميم.

8.2 عناصر الضغط التفاضلي

تُحدث تضييقًا في المسار فتزداد السرعة وينخفض الضغط (مبدأ برنولي)، ويُقاس الفرق بمرسل DP (الفصل 6). هي أقدم الطرق وأكثرها انتشارًا لأن العنصر بسيط وموثّق بمواصفات دولية تغني عن معايرة التدفق.

العنصر	الميزات	الحدود	الاستخدام
لوح الفتحة (Orifice Plate) المتحد المركز	رخيص، موثّق في ISO 5167-2، يُستبدل بسهولة	فقد ضغط دائم مرتفع، تآكل الحافة يغيّر المعامل، أطوال مستقيمة طويلة	الغازات والسوائل النظيفة، البخار
لوح لامركزي أو قطاعي (Eccentric / Segmental)	يمرر المواد الصلبة أو الغاز المحبوس	دقة أقل	سوائل بها شوائب
فنتوري (Venturi)	فقد ضغط دائم منخفض (نحو 10–15% من فرق الضغط)	مكلف وطويل	خطوط كبيرة، مياه تبريد، حيث تكلفة الضخ مهمة
الفوهة (Flow Nozzle)	تتحمل السرعات العالية والتآكل	أغلى من اللوح	بخار ومياه تغذية المراجل
أنبوب بيتو المتوسط (Averaging Pitot / Annubar)	فقد ضغط ضئيل، تركيب ساخن ممكن	دقة أقل، حساس لمقطع السرعة	خطوط ومجاري هواء كبيرة

العنصر	الميزات	الحدود	الاستخدام
المخروط (V-Cone)	يحتاج أطوالًا مستقيمة قصيرة، مدى أوسع	تصميم خاص من المصنّع، يحتاج معايرة	المساحات الضيقة والمنصات البحرية
الإسفين (Wedge)	يتحمل الوحل واللزوجة	مواد محددة	المصافي والمواد الثقيلة

كيف أختار؟ ابدأ بلوح الفتحة المتحد المركز ما دام الوسط نظيفًا والخط صغيرًا أو متوسطًا وتوجد أطوال مستقيمة؛ وانتقل إلى الفنتوري حين يكون الخط كبيرًا وفقد الضغط يكلّف طاقة ضخ، وإلى الفوهة للبخار عالي السرعة، وإلى الإسفين أو اللوح اللامركزي للأوساط التي تحمل موادّ صلبة، وإلى المخروط حين لا تتوفر الأطوال المستقيمة. ولا يُظهر الجدول أن هذه العناصر كلها تشترك في ضيق المدى (نحو 4:1 مع مرسل تقليدي) وفي حساسية القراءة لكثافة الوسط؛ فإن كان المطلوب مدى واسعًا أو تدفقًا كتليًا دقيقًا فالمقارنة الصحيحة مع تقنيات القسمين 8.4 و8.5 لا بين هذه العناصر. والخطأ الأكثر كلفة اختيار اللوح لأنه الأرخص ثم اكتشاف أن الأطوال المستقيمة غير متاحة أو أن الفقد الدائم يستهلك طاقة ضخ تفوق فرق الثمن في سنة واحدة.

مصطلحات لوح الفتحة: نسبة القطر β = d/D (تُختار عادة بين 0.3 و0.7)، ومواضع الأخذ (Flange Taps، Corner Taps، D–D/2)، ومعامل التصريف C، ومعامل التمدد ε للغازات. تُحسب الأبعاد وفق ISO 5167 ببرنامج موثوق، ويُختم اللوح برقم الوسم والقطر الداخلي واتجاه التدفق على الذراع (Tab).

الشكل 8-1: *توزيع الضغط على طول الأنبوب عبر لوح الفتحة: أدنى ضغط عند الانقباض الأعظمي، ثم يستعيد الخط جزءًا كبيرًا منه ويبقى فقد دائم.*

الشكل 8-2: *منظر ثلاثي الأبعاد للوح فتحة بين شفتين مع مأخذي الشفة والمانيفولد ومرسل الضغط التفاضلي فوق خط غاز. يضيق التيار بعد اللوح إلى أصغر مقطع ثم يعود ليملأ الأنبوب.*

جدول مقارنة: عناصر الضغط التفاضلي الأولية (أيها يناسب الخدمة؟)

العنصر	الفقد الدائم من ΔP	الدقة النموذجية	الطول المستقيم أعلى المجرى	المواد الصلبة/الا قذرة	الكلفة	ملاحظة عملية
لوح الفتحة (Orifice)	50 – 80%	±0.5 – 1%	10 – 40 D	يتآكل حده فيخطئ	الأدنى	الأكثر شيوعًا؛ الحد الحاد والتركيز أهم من أي شيء
الفوهة (Flow Nozzle)	30 – 60%	±1%	10 – 30 D	أفضل من الفتحة	متوسط	البخار عالي السرعة؛ تحمّل التآكل

العنصر	الفقد الدائم من ΔP	الدقة النموذجية	الطول المستقيم أعلى المجرى	المواد الصلبة/الا قذرة	الكلفة	ملاحظة عملية
فنتوري (Venturi)	10 – 20%	±0.5 – 1%	5 – 20 D	جيد (مقطع أملس)	عالٍ (طول وتكلفة)	حيث الفقد الدائم يكلّف طاقة: أنابيب المياه الكبيرة
أنبوب دال (Dall)	5 – 10%	±1%	نحو 10 D	متوسط	عالٍ	فنتوري قصير بفقد أقل؛ يوجد في المحطات القديمة ومصانع الورق
بيتو المتوسط (Averaging Pitot)	< 5%	±1 – 2%	20 – 30 D	يُسد بالغبار والشمع	منخفض	التركيب الساخن (Hot Tap) والمجاري الكبيرة؛ حساس لمقطع السرعة
الإسفين (Wedge)	متوسط	±0.5 – 1%	5 – 10 D	ممتاز (ملاط، لزج)	متوسط	بلا أجزاء متحركة ولا تجاويف تُسد
المخروط (V-Cone)	20 – 40%	±0.5%	0 – 3 D	جيد	متوسط	حيث لا يتوفر طول مستقيم

ما يُخطئ فيه الناس: الحكم على العناصر بالدقة وحدها؛ فالفقد الدائم في خط 24 بوصة يترجم إلى قدرة ضخ تُدفع كل ساعة، والفنتوري، وإن كان أغلى عند الشراء، قد يسترد فرق ثمنه في سنة واحدة. والعكس: لا يستحق الفنتوري ثمنه على خط 2 بوصة.

8.3 الجذر التربيعي وتعويض الكثافة

في مجال صلاحية العلاقة: $Q = K \cdot \sqrt{\Delta P}$، وللتدفق الكتلي: $\dot{m} = K \cdot \sqrt{(\Delta P \cdot \rho)}$.

ΔP كنسبة من المدى	التدفق الحقيقي	القراءة إذا طُبّق الجذر مرتين
100%	100%	100%
25%	50%	70.7%
4%	20%	44.7%
1%	10%	31.6%

الشكل 8-3: *علاقة الجذر التربيعي بين الضغط التفاضلي والتدفق، وأثر تطبيق الجذر مرتين، وضيق الإشارة عند التدفقات المنخفضة.*

ثلاث نتائج عملية:

- **نسبة المدى (Turndown):** مرسل DP تقليدي واحد يغطي بدقة مقبولة نحو 3:1 إلى 4:1 من التدفق، والمرسل الذكي الحديث أوسع من ذلك (القسم 8.14)؛

عند 10% تدفق يكون فرق الضغط نحو 1% من المدى وتضيع الإشارة في الضجيج. الحلول: مرسلان بمديين (Stacked)، أو تقنية أخرى.

- **قطع التدفق المنخفض (Low Flow Cut-off):** تُصفَّر القراءة تحت حد صغير لمنع تضخيم الضجيج بالجذر وتراكمه في العدادات التراكمية.
- **مكان استخراج الجذر:** إما في المرسل (Transfer Function = Square Root) وإما في كتلة النظام، وليس في الاثنين. يُكتب القرار في ورقة البيانات ومخطط الحلقة. الممارسة الشائعة اليوم: المرسل خطي والجذر في النظام، ليبقى فرق الضغط الخام متاحًا للتشخيص وللتعويض.

تعويض الضغط والحرارة في الغازات: تتناسب الكثافة مع P/(Z·T)، ويُحسب العنصر عند كثافة تصميمية.

مثال محلول: عنصر محسوب عند 40 bara و40 °C، ويعمل الآن عند 36 bara والحرارة نفسها (مع إهمال تغير Z).

- نسبة الكثافة = ضغط التشغيل ÷ ضغط التصميم = 0.9 = 36/40.
- المعادلة: التدفق الكتلي الحقيقي = المبيّن × √(نسبة الكثافة).
- التعويض والنتيجة: التدفق الكتلي الحقيقي = المبيّن × √0.9 = 0.949 × المبيّن.
- التفسير: القراءة غير المعوضة أعلى بنحو 5.4%.

في القياس التجاري (القسم 8.15) يُحسب التعويض كاملًا بحاسب تدفق وفق AGA/ISO، بما فيه Z من تركيب الغاز.

8.4 العدادات الكهرومغناطيسية والتوربينية والدوامية

يعرض هذا القسم والقسمان التاليان كل تقنية عرضًا موجزًا يكفي للاختيار الأولي، ثم تعود الأقسام 8.11 إلى 8.13 إلى كوريوليس وفوق الصوتي والتوربيني والدوامي بالتفصيل.

الكهرومغناطيسي (Magnetic Flowmeter): وفق قانون فاراداي، يولّد سائل موصل يتحرك في مجال مغناطيسي جهدًا يتناسب مع متوسط السرعة. لا فقد ضغط، ولا أجزاء متحركة، ودقة نحو 0.2±–0.5% من القراءة. شروطه: موصلية دنيا (عادة بضعة µS/cm)، وأنبوب ممتلئ، وتأريض صحيح بحلقات تأريض في الأنابيب المبطنة بعازل، ومادة بطانة وأقطاب مناسبة. لا يصلح للهيدروكربونات والغازات والماء مزيل المعادن عالي النقاء. ممتاز لمياه التبريد والوحل ومياه الصرف والماء المصاحب.

الشكل 8-4: *مقطع ثلاثي الأبعاد في عداد تدفق كهرومغناطيسي: ملفان مغناطيسيان فوق الأنبوب وتحته يولدان المجال B، وقطبان قياس في الجدار المبطن بمادة عازلة يلتقطان الجهد E = B·v·D الذي يتناسب مع سرعة السائل الموصل.*

التوربيني (Turbine Meter): دوّار تتناسب سرعته مع التدفق، ويُقرأ بمجس نبضي. المعامل K = عدد النبضات لكل وحدة حجم. دقيق جدًا في السوائل النظيفة منخفضة

اللزوجة وفي الغاز، ومستخدم في القياس التجاري مع مُثبِت (Prover). يتأثر بتآكل المحامل وباللزوجة وبالدوامات، ويحتاج مرشحًا ومعدّل انسياب.

الدوامي (Vortex): جسم مصدّ تنفصل خلفه دوامات متبادلة بتردد f = St·v/d، حيث رقم ستروهال St ثابت تقريبًا في مدى واسع من Re، ويلتقط التردد حساس كهرضغطي. جيد للبخار والغازات والسوائل النظيفة بلا أجزاء متحركة. حدوده: لا يقيس تحت سرعة دنيا (يسقط إلى الصفر)، وحساس لاهتزاز الأنبوب الذي قد يظهر كتدفق وهمي، ويحتاج أطوالًا مستقيمة.

8.5 العدادات فوق الصوتية وعدادات كوريوليس

فوق الصوتي (Ultrasonic):

- **زمن العبور (Transit-Time):** نبضة مع التيار وأخرى ضده، وفرق الزمن يعطي السرعة على المسار. العدادات متعددة المسارات (Multipath) تُستخدم في القياس التجاري للغاز وفق AGA 9 وتعطي تشخيصًا غنيًا: سرعة الصوت لكل مسار (تُقارن بالمحسوبة من تركيب الغاز)، ونسبة الإشارة إلى الضجيج، وشكل مقطع السرعة.
- **دوبلر (Doppler):** يحتاج جسيمات أو فقاعات عاكسة؛ دقة أقل.
- **المثبّت خارجيًا (Clamp-On):** يُثبّت خارج الأنبوب دون إيقاف، ممتاز للتحقق والتشخيص المؤقت، ودقته تعتمد على معرفة القطر والسماكة والبطانة.

كوريوليس (Coriolis Mass Flowmeter): أنبوب أو أنبوبان يهتزان بترددهما الطبيعي؛ مرور الكتلة يُحدث التواءً يتناسب مع التدفق الكتلي، وتردد الاهتزاز يعطي الكثافة. يقيس الكتلة مباشرة (نحو ±0.1% للسوائل) دون حاجة إلى تعويض ضغط وحرارة، ولا يحتاج غالبًا أطوالًا مستقيمة. حدوده: فقد ضغط ملحوظ، ومحدودية المقاسات المتاحة في الأقطار الكبيرة، وتأثر بالغاز المحبوس في السوائل، وبإجهادات التركيب، ويحتاج تحققًا

من الصفر بالأنبوب ممتلئًا والتدفق متوقفًا. شائع في غاز الوقود للتوربينات وحقن الكيماويات ومحطات التحميل.

8.6 العدادات الحرارية

يسخّن العداد عنصرًا ويقيس ما يحمله الغاز من حرارة، إما بفرق حرارة ثابت أو بقدرة ثابتة. النتيجة تدفق كتلي تقريبي دون تعويض ضغط وحرارة، بمدى واسع وفقد ضغط ضئيل. هذا هو مبدأ مقياس كتلة الهواء بالفيلم الساخن (Hot-Film Air-Mass Meter) في محركات السيارات. حدوده الجوهرية: تُعايَر لتركيب غاز محدد، فإذا تغيّر التركيب تغيّرت القراءة، وتتأثر بترسب الأوساخ والرطوبة على الحساس. تُستخدم للهواء المضغوط والغازات النظيفة. أما غاز الشعلة (Flare) المتغيّر التركيب فيفضَّل له غالبًا العداد فوق الصوتي.

8.7 الإزاحة الموجبة والعدادات متعددة الأطوار

- **الإزاحة الموجبة (Positive Displacement):** تحبس حجومًا ثابتة وتعدّها (تروس، مكابس، ريش، حلزونيات). الوحيدة التي تقيس الحجم مباشرة، وتتحسن دقتها مع اللزوجة. مناسبة لزيت الوقود والزيوت الثقيلة والتحميل. فيها أجزاء متحركة، وتحتاج مرشحًا، وقد تغلق الخط إذا انحشرت.
- **متعددة الأطوار (Multiphase Flow Meter – MPFM):** تقيس النفط والماء والغاز دون فصل، بدمج فنتوري مع مقياس كثافة إشعاعي أو قياسات كهربائية ونماذج حسابية. تُستخدم لاختبار الآبار وتخصيص الإنتاج، ودقتها تعتمد على معرفة خواص الأطوار وتحديثها، وتتراجع عند النسب العالية من الغاز أو الماء.

8.8 مقياس المساحة المتغيرة (Rotameter)

مقياس المساحة المتغيرة أنبوب مخروطي رأسي يتسع نحو الأعلى، بداخله عوامة. يدخل المائع من الأسفل فيرفع العوامة، وكلما ارتفعت اتسعت الحلقة بينها وبين جدار الأنبوب، حتى تتوازن قوة السحب مع وزن العوامة الظاهري. فيصبح ارتفاع العوامة مقياسًا للتدفق يُقرأ مباشرة على تدريج الأنبوب.

لماذا ما زال مستخدمًا؟ لأنه لا يحتاج تغذية كهربائية، ويُرى فيه التدفق بالعين، وفقد الضغط فيه صغير وثابت تقريبًا، ومداه نحو 10:1. لذلك نجده في خطوط التطهير بالنيتروجين، وهواء الأجهزة للمحللات، وماء تبريد الحشوات، وحقن الكيماويات، ولوحات أخذ العينات (الفصل 10). والطرازات المعدنية تُضاف إليها وصلة مغناطيسية تنقل موضع العوامة إلى مؤشر خارجي أو مرسل 4–20 mA.

حدوده: دقته النموذجية بين نحو 1% و2% من المدى الكامل لا من القراءة، فتضعف الدقة عند التدفقات المنخفضة. ويجب تركيبه رأسيًا والتدفق إلى الأعلى. ويتأثر بكثافة المائع ولزوجته، فالتدريج صحيح فقط للمائع وظروف المعايرة المكتوبة عليه. والأنبوب الزجاجي لا يصلح للضغوط العالية ولا للمواد الخطرة.

> **مثال محلول (تصحيح الغاز):** مقياس هواء مدرّج بوحدة m^3/h عند ظروف مرجعية مكتوبة عليه: هواء عند الضغط الجوي (1.013 bar مطلق) و20 °C. رُكّب على خط هواء ضغطه 3 barg (4.013 bar مطلق) عند الحرارة نفسها، والتدريج يقرأ 10 m^3/h (بالظروف المرجعية المكتوبة: 1.013 bar مطلق و20 °C).

تتناسب قوة السحب على العوامة مع كثافة الغاز ومربع سرعته. فإذا زادت الكثافة، يكفي حجم فعلي أقل لرفع العوامة إلى الموضع نفسه. وبعد التحويل إلى الظروف المرجعية نفسها يكون:

- المعادلة: التدفق الحقيقي = القراءة × √(ضغط التشغيل المطلق ÷ ضغط المعايرة المطلق).

- التعويض: التدفق الحقيقي = 1.99 × 10 = (4.013 ÷ 1.013)√ × 10.
- النتيجة: التدفق الحقيقي ≈ 19.9 m^3/h بالظروف المرجعية للتدريج.

أي أن التدفق الحقيقي ضعف القراءة تقريبًا. وهذا الخطأ شائع جدًا حين يُنقل مقياس من خدمة إلى أخرى دون مراجعة ظروف معايرته.

8.9 القياس في القنوات المفتوحة

في محطات معالجة المياه ومصارف مياه الأمطار ومخارج مياه التبريد، يجري الماء في قناة مفتوحة لا في أنبوب ممتلئ. هنا يُقاس التدفق بتحويل الارتفاع إلى تدفق: يُوضع في مجرى الماء عائق معروف الشكل، هدار (Weir) أو مجرى مضيَّق (Flume)، فيرتفع الماء أمامه ارتفاعًا يرتبط بالتدفق بمعادلة ثابتة. ويُقاس هذا الارتفاع بمرسل مستوى فوق صوتي أو راداري (الفصل 9).

الهدار: حاجز بفتحة ذات شكل هندسي محدد يفيض الماء فوقه. والشائع:

- **الهدار ذو الفتحة V:** ممتاز للتدفقات الصغيرة لأن عرض الفتحة يزيد مع الارتفاع، فتتحسن الدقة عند التدفق المنخفض. وللفتحة القائمة 90° تقريبًا: Q ≈ 1.38 × H^2.5، حيث Q بالمتر المكعب في الثانية وH بالمتر.
- **الهدار المستطيل:** للتدفقات الأكبر، وتدفقه يتناسب تقريبًا مع H^1.5 مضروبًا في عرض الفتحة.

وعيب الهدار أنه يرفع منسوب الماء خلفه ويحتاج فرق ارتفاع، وتتراكم الرواسب أمامه فتغير معادلته.

المجرى المضيَّق (Flume): مثل مجرى بارشال (Parshall Flume)، وهو تضييق في عرض القناة مع تغير في قاعها يسرّع الماء. فقد الارتفاع فيه أقل من الهدار، وينظف نفسه لأن الماء لا يتوقف أمامه، ولذلك يُفضل لمياه الصرف والماء المحمل بالمواد الصلبة.

الشكل 8-5: *مقياسان بسيطان لا يحتاجان إلى تغذية: مقياس المساحة المتغيرة، والهدار ذو الفتحة V الذي يتحول فيه ارتفاع الماء H إلى تدفق.*

مثال محلول (حساسية الهدار): هدار بفتحة V قائمة الزاوية، وارتفاع الماء فوق رأس الفتحة H = 0.25 m.

- $Q = 1.38 \times 0.25^{2.5} = 1.38 \times 0.03125 = 0.0431\ m^3/s$، أي نحو 155 m^3/h.
- إذا أخطأ مرسل المستوى 1 cm فقرأ 0.26 m، يصبح التدفق المحسوب $1.38 \times 0.26^{2.5} \approx 0.0476\ m^3/s$، بزيادة نحو 10%.

فالخطأ النسبي الصغير في الارتفاع يتضخم في التدفق نحو 2.5 مرة (بمقدار الأس). ولذلك يُعاير صفر مرسل المستوى على رأس الفتحة بدقة، ويُقاس الارتفاع أمام الهدار بمسافة لا تقل عن أربعة أمثال أقصى ارتفاع، حيث يكون سطح الماء هادئًا وغير منحنٍ نحو الفتحة. وتحدد المعايير مثل ISO 1438 للهدارات وISO 9826 لمجرى بارشال الأبعاد وشروط التركيب ومعاملات التدفق.

8.10 عدادات أخرى للخدمات الخاصة

عداد الهدف (Target Meter): قرص يُوضع في منتصف الأنبوب، يدفعه المائع بقوة تتناسب مع كثافته ومربع سرعته، ويقيسها حساس انفعال. يصلح للسوائل اللزجة أو المتسخة وللتدفقات ثنائية الاتجاه، ولا يحتاج خطوط نبض قد تنسد. لكن مداه ضيق كعناصر الضغط التفاضلي لأن القوة تتناسب مع مربع السرعة.

عنصر الإسفين (Wedge Element): عنصر ضغط تفاضلي فيه قيد على شكل إسفين في أعلى الأنبوب، ويترك أسفله مفتوحًا، فتمر المواد الصلبة والطين دون أن تتراكم أمامه كما في لوح الفتحة. ومعامل تدفقه ثابت حتى أعداد رينولدز المنخفضة، فيصلح للسوائل اللزجة. ويُستخدم عادة مع مرسل ضغط تفاضلي بحاجزين غشائيين.

مآخذ الكوع (Elbow Taps): تستفيد من القوة الطاردة في منعطف قائم: الضغط على الجانب الخارجي للكوع أعلى منه على الداخلي، والفرق يتناسب مع مربع السرعة. لا تضيف فقد ضغط ولا تحتاج تعديلًا في الأنابيب إلا ثقبين. دقتها المطلقة ضعيفة، نحو ±5% إلى ±10% دون معايرة، لكن تكرارها جيد. لذلك تصلح لمراقبة الاتجاه أو لحماية مضخة من التدفق المنخفض، لا للقياس التجاري.

تدفق المواد الصلبة: حين يكون المطلوب قياس الفحم أو الحبوب أو الإسمنت أو الكلس، تُستخدم طرق مختلفة تمامًا:

الطريقة	المبدأ	الدقة النموذجية	الاستخدام
ميزان السير (Belt Scale)	وزن جزء من السير × سرعته	من نحو 0.25% إلى 1%	نقل المواد السائبة على السيور

الطريقة	المبدأ	الدقة النموذجية	الاستخدام
مغذي فقد الوزن (Loss-in-Weight)	معدل نقص وزن القادوس مع الزمن	نحو 0.25% إلى 0.5%	جرعات دقيقة في الكيماويات والبلاستيك والأغذية
لوح الصدم (Impact Plate)	قوة سقوط المادة على لوح مائل	نحو 1% إلى 2%	المواد الحبيبية المتدفقة بالجاذبية
حساسات الموجات الدقيقة (Microwave) والحساسات الكهروستاتيكية	انعكاس الموجات أو الشحنة المتولدة في النقل الهوائي	مؤشرات نسبية غالبًا	كشف التدفق أو توقفه في خطوط النقل الهوائي

كيف أختار؟ إن كانت المادة تُنقل على سير فميزان السير هو الخيار الطبيعي للقياس التراكمي، وإن كانت تُجرَّع من قادوس بكميات صغيرة ودقة عالية فمغذي فقد الوزن، وإن كانت تسقط بالجاذبية فلوح الصدم؛ أما حساسات الموجات الدقيقة والكهروستاتيكية فمؤشرات على وجود التدفق أو توقفه لا عدادات. ولا يُظهر الجدول أن الدقة المكتوبة دقة الخلية في أحسن الظروف، بينما تحسمها في الميدان التركيب (شد السير واستقامة البكرات ونظافتها) والمعايرة الدورية بكمية موزونة. والخطأ الأكثر كلفة شراء ميزان سير بدقة 0.25% ثم تركيبه قرب نقطة تحميل أو على بكرات غير مستقيمة فتصير دقته الفعلية بضعة في المئة، وتُبنى عليه محاسبة أو خلطة.

ودقة ميزان السير تتوقف على التركيب أكثر من الخلية: شد السير، واستقامة البكرات حول منطقة الوزن، ونظافتها. ويُعاير بسلسلة معايرة أو أوزان ثابتة، ويُتحقق منه دوريًا بتمرير كمية موزونة بدقة.

عدادات الطاقة الحرارية (BTU Meters): تحسب القدرة الحرارية المنقولة في دوائر الماء المبرد أو الساخن من ثلاثة قياسات: تدفق الماء، وحرارة الذهاب، وحرارة العودة، ثم تكامل القدرة مع الزمن لتعطي الطاقة. والمعادلة:

$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T$ (القدرة الحرارية بالكيلوواط حين يكون التدفق الكتلي بوحدة kg/s والسعة الحرارية النوعية بوحدة kJ/(kg·°C))، والطاقة $E = \int \dot{Q}\, dt$، وعند ثبات القدرة $E = \dot{Q} \times t$؛ فالعداد يعرض القدرة اللحظية بوحدة kW ويراكم الطاقة بوحدة kWh (أو MJ)، والفاتورة على الطاقة المتراكمة.

> **مثال محلول (عداد طاقة لماء مبرد):** تدفق 50 m³/h، وحرارة الذهاب 7 °C والعودة 12 °C، والكثافة نحو 1000 kg/m³ والسعة الحرارية النوعية 4.19 kJ/kg·°C.
>
> - التدفق الكتلي = 50 × 1000 ÷ 3600 = 13.9 kg/s.
> - القدرة = 13.9 × 4.19 × 5 ≈ 291 kW، أي نحو 83 طن تبريد.
> - لو أخطأ أحد حساسي الحرارة 0.1 °C، فالخطأ في فرق الحرارة = 0.1 ÷ 5 = 2%، ويمر كله إلى الفاتورة.

ولهذا يُستخدم في عدادات الطاقة زوج حساسات RTD متطابق ومعاير معًا (Matched Pair)، ويُركبان بالطريقة نفسها وبعمق غمر متساوٍ. وتحدد المعايير مثل EN 1434 و OIML R75 متطلبات عدادات الطاقة الحرارية المستخدمة في الفوترة.

8.11 عداد كوريوليس بالتفصيل

المبدأ: أنبوب (أو أنبوبان متوازيان) مثبت من طرفيه يُهَزّ عند تردده الطبيعي بملف إثارة (Driver) في منتصفه، وعلى جانبي المنتصف ملفّا التقاط (Pickoffs). حين لا يوجد تدفق يهتز الطرفان بطور واحد. وحين يمر المائع تعمل قوة كوريوليس على الجزء الداخل بعكس اتجاهها على الجزء الخارج، فيلتوي الأنبوب قليلًا ويتأخر أحد ملفي الالتقاط عن الآخر بزمن Δt يتناسب طرديًا مع التدفق الكتلي، ولا يعتمد على الكثافة ولا اللزوجة ولا مقطع السرعة (الشكل 8-6). وفي الوقت نفسه يتغير تردد الاهتزاز الطبيعي مع كتلة الأنبوب المملوء، فيعطي العداد **الكثافة** مباشرة ($f^2 \propto 1 \div$ (كتلة الأنبوب + كتلة

المائع))، ومنها التدفق الحجمي والتركيز (نسبة مادة في محلول) ودرجة API للنفط. ويحمل العداد أيضًا حساس حرارة لتعويض تغير صلابة الأنبوب.

الأشكال: أنبوب مستقيم واحد (سهل التنظيف، فقد ضغط قليل، حساس للإجهادات الخارجية)، أو أنبوبان منحنيان (U أو Ω أو Δ) وهما الأكثر انتشارًا واستقرارًا لأن اهتزازهما المتعاكس يلغي أثر الاهتزازات الخارجية والتثبيت.

الدقة والمدى: نحو ±0.1% من القراءة للسوائل (وأفضل في العدادات التجارية) و±0.35 إلى 0.5% للغازات، ومدى واسع (20:1 وأكثر عند الدقة المعلنة، وأكثر بدقة أقل)، ولا يحتاج إلى أطوال مستقيمة. ويقيس السوائل والغازات والملاط والسوائل غير النيوتونية. وحدوده: القطر (عادة حتى 300–400 mm بتكلفة عالية جدًا)، وفقد الضغط في الأنابيب المنحنية، والحرارة القصوى، والحساسية لدخول الغاز في السائل.

الصفر (Zero) والكسب (Drive Gain): الصفر هو Δt المقروء بلا تدفق، ويُضبط في التركيب بإغلاق صمامي العزل والتأكد من امتلاء الأنبوب واستقرار الحرارة، ثم تنفيذ «معايرة الصفر (Zero Calibration)» من المرسل؛ فالضبط بتدفق صغير غير ملحوظ يعطي انحيازًا ثابتًا يظهر في التدفقات المنخفضة. أما **كسب الإثارة** فالطاقة اللازمة لإبقاء الأنبوب مهتزًا بالسعة المطلوبة؛ ارتفاعه المفاجئ أشهر علامة على دخول فقاعات غاز (طور ثانٍ) أو على ترسبات أو تجاوز حد الأنبوب، وهو المتغير التشخيصي الأول الذي يُراقب.

التركيب: الأنبوب ممتلئًا دائمًا (في السوائل يوجّه الغلاف إلى الأسفل حتى يبقى الأنبوب مملوءًا ويهرب الغاز، وفي الغازات إلى الأعلى حتى يهرب السائل)، والدعائم على الأنابيب لا على العداد، وبعيدًا عن المضخات الترددية والصمامات المسببة للتكهف، وبضغط خلفي كافٍ لمنع التبخر الوميضي في العداد (يوصى بأن يكون ضغط الخرج ≥ 2 × فقد الضغط + 1.25 × ضغط البخار تقريبًا). ولا يُركب عدادان متطابقان ملتصقين إلا بمسافة كافية أو بترددات مختلفة لتفادي التداخل (Cross-Talk).

التطبيقات: القياس التجاري للسوائل والغاز المسال والغاز الطبيعي بضغوط عالية، والدفعات في الأغذية والأدوية، وتعبئة الأسطوانات والشاحنات (تحميل بالوزن)، وحقن المواد الكيميائية، والتركيز (السكر، الأحماض)، وقياس الوقود للتوربينات والمراجل حيث يلزم التدفق الكتلي للاحتراق.

الشكل 8-6: *مبدأ عداد كوريوليس: أنبوبان يهتزان بلا تدفق بطور واحد، ومع التدفق تلوي قوة كوريوليس الأنبوب فيتأخر ملف التقاط الدخول عن ملف الخروج بزمن Δt يتناسب مع التدفق الكتلي، ويعطي تردد الاهتزاز الكثافة.*

الشكل 8-7: *نموذج ثلاثي الأبعاد لعداد كوريوليس ثنائي الأنبوب مقطوع: المقسم عند المدخل، والأنبوبان المنحنيان، وملف الإثارة في المنتصف، وملفا الالتقاط على الجانبين، وحساس الحرارة، والمرسل في الأعلى.*

مثال محلول (الكثافة والتركيز): عداد كوريوليس على خط محلول ملحي يقرأ 1120 kg/h وكثافة 1085 kg/m³ عند 25 °C.

- المعادلة: التدفق الحجمي = التدفق الكتلي ÷ الكثافة.
- التعويض والنتيجة: التدفق الحجمي = 1120 ÷ 1085 = 1.032 m³/h.
- التركيز: من جدول كثافة محلول كلوريد الصوديوم عند 25 °C تقابل 1085 kg/m³ تركيزًا نحو 12% وزنًا.
- المعادلة: تدفق الملح الصافي = التركيز × التدفق الكتلي.
- التعويض والنتيجة: تدفق الملح الصافي ≈ 1120 × 0.12 = 134 kg/h.

- التفسير: يعطي العداد تدفق الملح الصافي دون محلل.

تشخيص ملحق (مثال افتراضي):

- **الملاحظة:** ارتفع كسب الإثارة فجأة من 5% إلى 60%، وتذبذبت الكثافة بين 1020 و1085 kg/m^3 دون تغير في المدخلات.
- **الفرضية:** طور غازي في السائل؛ ففقاعات الهواء تمتص طاقة الاهتزاز وتخفض الكثافة الظاهرة. والتركيز مستبعد لأن تغيره بطيء ومستقر لا متذبذب.
- **الإثبات:** كان مستوى خزان التغذية 8% قرب فوهة سحب المضخة، فتكونت دوامة تسحب الهواء. وبرفع المستوى إلى 40% عاد الكسب إلى 6% خلال دقيقتين، واستقرت الكثافة عند 1085 kg/m^3. ولو كان السبب التركيز لاستقرت الكثافة عند قيمة جديدة ولما ارتفع الكسب.
- **القاعدة:** ارتفاع كسب الإثارة علامة على «طور ثانٍ» أو ترسبات؛ فابحث عن مصدر الغاز أو الترسب، ثم راقب عودة الكسب بعد المعالجة.

8.12 العدادات فوق الصوتية بالتفصيل

زمن العبور (Transit-Time): محولان (Transducers) على جدار الأنبوب يشكل خط الوصل بينهما زاوية θ مع محور الأنبوب، ويرسل كل منهما نبضة إلى الآخر. الزمن مع التيار t_d أقصر من الزمن ضده t_u، والسرعة المتوسطة على المسار:

$$v = (L \div (2 \cos \theta)) \times (t_u - t_d) \div (t_u \times t_d)$$

حيث L طول المسار. وميزة الصيغة أن سرعة الصوت في المائع c تختفي منها، فلا تحتاج إلى معرفة المائع، بل يعطي العداد c كناتج إضافي: t_c = L ÷ 2 × (1 ÷ t_u + 1 ÷ t_d). ولأن المسار الواحد يقيس متوسط السرعة على خط واحد لا على المقطع كله، تعتمد الدقة على مقطع السرعة؛ ولهذا تستخدم العدادات الدقيقة **مسارات متعددة** (4 إلى 8) موزعة على أوتار المقطع بأوزان تكامل (غاوس-جاكوبي أو غيرها) تجعل النتيجة شبه مستقلة

عن تشوه المقطع والدوامة، وتبلغ خطيّتها بعد المعايرة بالتدفق نحو 0.1± إلى 0.15% في القياس التجاري للغاز (AGA 9) والسوائل (API MPMS 5.8).

التشخيص الذاتي: لكل مسار سرعة صوت مقيسة، ويجب أن تتطابق المسارات فيما بينها (ضمن 0.2% تقريبًا) ومع سرعة الصوت المحسوبة من تركيب الغاز وضغطه وحرارته (بمعادلة AGA 10)؛ وأي انحراف يكشف محولًا متسخًا أو تغير الغاز أو خطأ في الحرارة. كما تُراقَب نسبة السرعات بين المسارات (Profile Factor) ونسبة الدوامة (Swirl) ونسبة النبضات المقبولة (Performance) وكسب الإشارة؛ وهذه المؤشرات تسمح بالتحقق دون إخراج العداد من الخدمة.

المثبّت خارجيًا (Clamp-On): محولان يُثبتان خارج الأنبوب بمادة اقتران وشريط، دون قطع الخط. المعرفة اللازمة: القطر الخارجي والسماكة ومادة الأنبوب والبطانة والمائع (لتقدير سرعة الصوت وزوايا الانكسار). دقته نحو 1± إلى 2% في الظروف الجيدة، وتسوء مع الصدأ الداخلي والبطانة والفقاعات والأنابيب ذات الطلاء السميك. ممتاز للتحقق المؤقت من عدادات أخرى، ولقياس مياه التبريد ومياه الإطفاء والتدفقات الكبيرة حيث القطع مكلف، وفي حلقات التحكم بالمبردات.

دوبلر: يرسل ترددًا مستمرًا ويقيس الإزاحة الترددية للصدى المرتد من جسيمات أو فقاعات تتحرك مع المائع؛ لا يعمل مع السوائل النظيفة، ودقته نحو 2± إلى 5%، ويصلح لمياه الصرف والملاط.

العدادات فوق الصوتية للغاز: تحتاج إلى محولات عالية القدرة لأن الغاز يمتص الصوت ولأن فرق الممانعة الصوتية كبير؛ وتعمل عادة بضغوط من بضعة بارات فأكثر (عدا عدادات غاز الشعلة المصممة للضغط القريب من الجوي)، وتتأثر بالضوضاء فوق الصوتية من صمامات التحكم القريبة (تُترك مسافة كافية أو تُستخدم مرشحات ضوضاء). وتُستخدم أيضًا لقياس غاز الشعلة (Flare Gas) بفضل مداها الواسع جدًا (أكثر من 1000:1) وقدرتها على تقدير الوزن الجزيئي من سرعة الصوت.

الشكل 8-8: *هندسة عداد زمن العبور: محولان بزاوية θ على مسار طوله L، والنبضة مع التيار أسرع من النبضة ضده، وترتيب المسارات المتعددة على أوتار المقطع في عداد القياس التجاري، والتثبيت الخارجي (Clamp-On) بطريقتي Z وV.*

مثال محلول (زمن العبور): أنبوب ماء بقطر داخلي 300 mm، المحولان على قطرين متقابلين بزاوية 45°، وسرعة الصوت في الماء 1480 m/s، وسرعة التدفق 2 m/s .

- طول المسار: $L = D \div \sin\theta = 300 \div \sin 45° = 424$ mm.
- زمن العبور الأساسي: $t \approx L \div c = 0.424 \div 1480 = 286.6$ µs.
- المعادلة: $(t_u - t_d) \approx 2 L v \cos\theta \div c^2$.
- التعويض والنتيجة: $(t_u - t_d) = 2 \times 0.424 \times 2 \times 0.707 \div 1480^2 =$ 0.548 µs.
- التفسير: يقيس العداد فرقًا قدره نصف ميكروثانية فوق زمن قدره 287 µs، ولهذا تحتاج الإلكترونيات إلى دقة زمنية دون النانوثانية، ويكون الصفر (Zero Offset) الناتج من فرق تأخير المحولين حرجًا ويُضبط في المصنع أو بغلق الصمامين.
- التدفق الحجمي: $Q = v \times \pi \times (D \div 2)^2 = 2 \times \pi \times 0.15^2 = 0.141$ m³/s = 509 m³/h (بعد تصحيح المقطع الذي تجريه المسارات المتعددة أو معامل المقطع في المسار الواحد).

8.13 العدادات التوربينية والدوامية بالتفصيل

التوربيني (Turbine Meter): دوّار بريش حلزونية معلق على محامل في مجرى الأنبوب، سرعته الزاوية تتناسب خطيًا مع سرعة المائع في مدى التصميم، ويلتقط مجس مغناطيسي أو حثي أو معدّل تردد راديوي (RF) مرور كل ريشة فيعطي نبضات ترددها f. **معامل K (K-Factor)** = عدد النبضات لكل وحدة حجم (نبضة/لتر أو نبضة/m³)، ويُحدد بالمعايرة، فالتدفق الحجمي $Q = f \div K$. وليس المعامل ثابتًا تمامًا: في التدفقات المنخفضة تهيمن قوى الاحتكاك في المحامل والسحب اللزج فينحرف (منحنى «الحدبة» عند

الدخول إلى المدى الخطي)، ثم يستقر ضمن 0.15± إلى 0.5% في المدى الخطي (عادة 10:1 للسوائل و20:1 وأكثر للغاز)، ويعتمد على اللزوجة (تُعطى منحنيات K مقابل f ÷ v أو تُستخدم معايرة باللزوجة الفعلية) وعلى الكثافة في الغاز. **معامل العداد (Meter Factor)** في القياس التجاري هو النسبة بين الحجم الحقيقي والحجم الذي يحسبه العداد، يُحدد بالإثبات ويُطبق في حاسب التدفق (AGA 7 للغاز، API MPMS 5.3 للسوائل).

ونقاط الضعف: المحامل (تلف بالجسيمات أو بالتشغيل جافًا)، والتسارع الزائد عند الدفعات الغازية في خطوط السوائل (يدمر الدوّار)، والدوامة والمقطع المشوه (تحتاج إلى 10D مع معدّل انسياب)، وعدم ملاءمة السوائل اللزجة جدًا أو المحملة بالمواد الصلبة. وتشمل الوقاية مصفاة قبل العداد، وصمام تنفيس هواء، وتبديل السرعة تدريجيًا. وتُستخدم في قياس زيت الوقود والمياه والمنتجات المكررة والغاز الطبيعي، وفي التحميل والقياس التجاري.

الدوامي (Vortex Shedding): جسم مصدّ (Bluff Body) عرضه d عبر الأنبوب، تنفصل خلفه دوامات بالتناوب من جانبيه (شارع فون كارمان) بتردد f = St × v ÷ d حيث St رقم ستروهال، ثابت تقريبًا (نحو 0.2 إلى 0.3 بحسب الشكل) في مدى واسع من أرقام رينولدز (فوق نحو 20000). يُلتقط التردد بحساس كهرضغطي أو سعوي أو حراري يحس بتقلب الضغط أو القوة على المصد، فيعطي معامل K ثابتًا مع كل المائعات تقريبًا: سوائل وغازات وبخار. ميزاته: لا أجزاء متحركة، ومعامل ثابت لا يحتاج إلى معايرة لكل مائع، ودقة نحو 0.75± إلى 1% من القراءة للسوائل و1±% للغاز والبخار، ومدى 20:1 للسوائل وأكثر للغاز. وحدوده: **الحد الأدنى للتدفق** حيث تصبح الدوامات ضعيفة أو غير منتظمة (تحت رقم رينولدز نحو 10000 إلى 20000، ويُضبط قطع التدفق المنخفض (Low-Flow Cutoff) فوقه)، والحساسية لاهتزاز الأنابيب عند ترددات قريبة من تردد الدوامات (تُعالج بمرشحات رقمية ومعرفة الاتجاه)، وفقد ضغط متوسط، والحاجة إلى 15 إلى 20D قبله. وهو العداد المفضل لبخار المرافق والمكثفات والغازات في الأنابيب

المتوسطة، ويتوافر بنسخ متعددة المتغيرات (Multivariable) تضم حساس حرارة وضغط وتحسب التدفق الكتلي للبخار المشبع والمحمّص.

مثال محلول (التوربيني): عداد توربيني لزيت الوقود بمعامل K = 8500 نبضة/m^3 يعطي 47.2 Hz.

- المعادلة: $Q = f \div K$.
- التعويض: $Q = 47.2 \div 8500 = 5.55 \times 10^{-3}$ m^3/s.
- النتيجة: $Q = 20.0$ m^3/h.
- الإثبات: مرت 10.000 m^3 في العداد المرجعي بينما عدّ العداد 84 830 نبضة أي 9.980 m^3.
- المعادلة: معامل العداد = الحجم المرجعي ÷ الحجم المعدود.
- التعويض والنتيجة: معامل العداد = 1.0020 = 9.980 ÷ 10.000.
- التفسير: يُدخل المعامل في حاسب التدفق فيصبح التدفق المصحح 20.04 m^3/h.

مثال محلول (الدوامي): عداد دوامي بقطر 100 mm على بخار مشبع عند 10 barg، عرض المصد d = 25 mm وSt = 0.26، وسرعة البخار 25 m/s.

- المعادلة: $f = St \times v \div d$.
- التعويض: $f = 0.26 \times 25 \div 0.025$.
- النتيجة: $f = 260$ Hz.
- التدفق الحجمي: $Q = v \times \pi \times (D \div 2)^2 = 25 \times \pi \times 0.05^2 = 0.196$ m^3/s = 707 m^3/h.
- التدفق الكتلي: بكثافة البخار المشبع عند 11 bara (5.64 kg/m^3) يكون التدفق الكتلي ≈ 3990 kg/h.

- التحقق عند أدنى تدفق: لو انخفض التدفق إلى 10% من الأعلى (2.5 m/s) فرقم رينولدز عند لزوجة البخار الحركية نحو 2.4×10^{-6} m²/s: $Re = v \times D \div \nu = 2.5 \times 0.1 \div 2.4 \times 10^{-6} \approx 1.0 \times 10^{5}$.
- التفسير: ما زال رقم رينولدز فوق الحد الأدنى للدوامات المنتظمة، فيقيس العداد.

الشكل 8-9: *العداد التوربيني ومنحنى معامل K مقابل التدفق مع المدى الخطي، والعداد الدوامي وشارع الدوامات خلف المصد وعلاقة التردد الخطية بالسرعة فوق الحد الأدنى لرقم رينولدز.*

8.14 مدى القياس والدقة وتأثيرات التركيب

% من القراءة و% من المدى: أخطر ما يُخلط في مواصفات العدادات. خطأ ±1% من القراءة (AR% أو Rate%) يعني ±1% عند أي تدفق؛ وخطأ ±1% من المدى الكامل

(FS%) يعني ±1% من التدفق الأقصى دائمًا، أي ±10% من القراءة عند 10% من المدى. وعدادات الإزاحة الموجبة والتوربينية والكوريوليس والكهرومغناطيسية والدوامية تُعلن بـ AR%، أما عناصر الضغط التفاضلي فخطأ المرسل فيها FS% من مدى الضغط التفاضلي. ولأن Q ∝ √ΔP فإن الخطأ النسبي في التدفق يساوي نصف الخطأ النسبي في ΔP، لكن عند انخفاض التدفق ينخفض ΔP تربيعيًا فيصبح خطأ المرسل الثابت (كنسبة من المدى) نسبةً كبيرة من ΔP المقاس، ولذلك تتدهور دقة التدفق عند أسفل المدى كما يبين الحساب التالي.

نسبة المدى (Turndown) في عناصر الضغط التفاضلي: يجمع الخطأ الكلي عنصرين: خطأ العنصر الأولي (معامل التصريف Cd، نحو ±1% من القراءة)، وخطأ مرسل الضغط التفاضلي بالنسبة إلى مداه. فمع مرسل قديم دقته ±0.25 إلى 0.5% من المدى كانت نسبة المدى العملية نحو 4:1 حتى يبقى الخطأ الكلي عند أدنى تدفق تحت 3% من القراءة. أما المرسلات الذكية الحديثة (دقة نحو ±0.065% من المدى ونسبة ضبط للمدى (Rangedown) تصل إلى 200:1) فتوسّع نسبة المدى كثيرًا. والحساب: بما أن خطأ التدفق النسبي نصف خطأ الضغط التفاضلي النسبي، فإذا أردنا خطأً كليًا لا يتجاوز 3% من القراءة مع 1% للعنصر، يبقى للمرسل نحو 2.8% في التدفق أي 5.7% في الضغط التفاضلي. وبمرسل قديم (0.35% من المدى) يتحقق ذلك عند ΔP = 6.2% من المدى أي تدفق 25% (نسبة مدى 4:1)، وبمرسل ذكي (0.065%) عند ΔP = 1.15% من المدى أي تدفق 10.7% (نسبة مدى نحو 9:1). ويذكر المرجع R19 أن نسبة المدى قد تصل إلى 14:1 بقبول خطأ أعلى عند أدنى تدفق (عند 196 ÷ 1 من مدى الضغط التفاضلي يبلغ خطأ المرسل 12.7% من ΔP أي نحو 6.4% في التدفق). ويشترط ذلك أن يبقى الجريان مضطربًا (Re > 8000 تقريبًا) عند أدنى تدفق، وأن يكون الضغط التفاضلي الأدنى أكبر بوضوح من ضوضاء الخط. وبديل ذلك مرسلان بمديين مختلفين (Stacked Transmitters) للمدى الواسع.

الفقد الدائم للضغط: لوح الفتحة يفقد نحو 60 إلى 70% من الضغط التفاضلي (حسب β)، والمخروط V نحو 40%، والفنتوري نحو 10 إلى 15% فقط؛ وفي التدفقات الكبيرة يُترجم هذا إلى طاقة ضخ أو ضغط سنوية كبيرة تبرر ثمن الفنتوري أو العداد بلا فقد (كهرومغناطيسي أو فوق صوتي).

مقطع السرعة والدوامة: كل العدادات التي تستنتج التدفق من سرعة جزء من المقطع (الضغط التفاضلي، الدوامي، التوربيني، فوق الصوتي أحادي المسار، أنابيب بيتو) تفترض مقطعًا مكتمل النمو ومتماثلًا بلا دوامة. المنعطفات المتتالية في مستويين تولد دوامة تدوم عشرات الأقطار؛ والصمامات نصف المفتوحة تشوه المقطع. ولهذا تُشترط الأطوال المستقيمة (القسم 8.18)، أو يُستخدم **معدّل انسياب (Flow Conditioner)** (لوح مثقب أو حزمة أنابيب أو معدّل زعانف) يقصّرها إلى نحو 5 إلى 10D مع فقد ضغط إضافي، أو **عناصر مهيِّئة ذاتيًا** (لوح فتحة مهيِّئ بأربع فتحات، أو مخروط V) تتحمل 2D بعد المصدر.

النبض والاهتزاز: المضخات والضواغط الترددية تولد تدفقًا نابضًا يعطي خطأ موجبًا في عناصر الضغط التفاضلي لأن متوسط الجذر لا يساوي جذر المتوسط)، ويربك العداد الدوامي والتوربيني؛ والعلاج مخمدات نبض قبل العداد، أو عداد كوريوليس أو إزاحة موجبة، مع تجنب التخميد الإلكتروني الذي يخفي المشكلة ولا يصححها.

الحرارة والضغط والتركيب: العدادات الحجمية تحتاج إلى تعويض الكثافة لتعطي كتلة (القسم 8.3)؛ والعدادات الكتلية (كوريوليس والحرارية) لا تحتاج، لكن الحرارية تحتاج إلى معرفة الغاز وتركيبه لأن معامل الانتقال الحراري يعتمد عليه.

الشكل 8-10: *أثر نوع الخطأ على الدقة عبر المدى: خطأ ثابت بالنسبة إلى المدى الكامل يتضخم عند التدفقات المنخفضة بينما يبقى خطأ النسبة من القراءة ثابتًا؛ ومدى قياس عنصر الضغط التفاضلي مع مرسل ذكي مقارنة بمرسل قديم، والفقد الدائم للضغط في العناصر الثلاثة.*

8.15 القياس التجاري والإثبات: نظرة من منظور العداد

حين يُباع المائع أو يُحاسب عليه بين طرفين (Custody Transfer) أو يُخصص الإنتاج بين شركاء (Allocation) تتغير المتطلبات: عدم يقين كلي محدد (نحو ±0.25% للسوائل و±0.5 إلى 1% للغاز وفق العقد والمعايير)، وقابلية تتبع إلى مراجع وطنية، وحاسب تدفق (Flow Computer) معتمد يحسب الكمية بالشروط المرجعية مع تعويض الضغط والحرارة والانضغاطية والكثافة، وسجلات مختومة، وشهود من الطرفين. والمعايير المرجعية: ISO 5167 وAGA 3 لعناصر الضغط التفاضلي، وAGA 9 للعدادات فوق الصوتية للغاز، وAGA 7 للتوربينية، وAGA 11 لكوريوليس الغاز، وAGA 8 لحساب الانضغاطية، وسلسلة API MPMS للسوائل، وOIML R117 وR137 في المترولوجيا القانونية. والتفاصيل التجارية والتشغيلية تُفصَّل في الفصل 68 من الجزء القادم، وخلاصتها أن الغاز يُباع بالطاقة لا بالحجم، فيضرب حاسب التدفق الحجم القياسي في القيمة الحرارية المقيسة؛ وهنا ما يخص العداد نفسه:

- **الإثبات (Proving):** التحقق الدوري من معامل العداد في الموقع بمرجع يمرر فيه الحجم نفسه: مُثبت أنبوبي بكرة (Pipe Prover) أو مُثبت مكبس صغير الحجم (Small Volume Prover) للسوائل، أو عداد مرجعي (Master Meter) معاير

في مختبر معتمد. ويُقبل الإثبات عادة إذا تكررت خمس تمريرات ضمن 0.05%، ويُحدَّث معامل العداد إن تغير عن السابق بأقل من حد مسموح (وإلا يُحقق في السبب).

- **الترتيب:** مصفاة ومزيل هواء، ثم أطوال مستقيمة أو معدّل انسياب، ثم العداد مع حساسات الضغط والحرارة قربه، ثم صمام تحكم بالضغط الخلفي، وصمامات عزل مزدوجة مع تنفيس بينهما (Double Block and Bleed) لعزل مسار الإثبات، ووصلات إثبات معتمدة.
- **العدادات المتعددة على التوازي (Meter Runs):** لتغطية المدى وللاحتياط، بتشغيل عدد المسارات المناسب للتدفق.

8.16 معايرة عدادات التدفق والتحقق منها: خطوات

المعايرة في المختبر (المرجع): بالطريقة الوزنية (Gravimetric: جمع المائع في خزان على ميزان مع تحويل الكتلة إلى حجم بالكثافة) وهي الأدق للسوائل، أو الحجمية (خزان مدرج معتمد)، أو بعداد مرجعي (Master Meter) على التوالي، أو بأنبوب مكبس معتمد؛ وللغاز بفوهات التدفق الحرج (Critical Flow Nozzles) أو بأجراس غازية أو عدادات مرجعية. تُجرى المعايرة عند 5 إلى 10 نقاط عبر المدى بثلاث تكرارات على الأقل، وتُصدر شهادة بمعامل K أو معامل العداد ومنحنى الخطأ وعدم اليقين.

التحقق الميداني لعداد كهرومغناطيسي: خطوات

1. تحقق من امتلاء الأنبوب والتأريض (حلقات التأريض أو قطب التأريض) وخلو الأقطاب من الترسبات إن أمكن الفحص.
2. سجّل الإعدادات: القطر، ومعامل المعايرة المطبوع على العداد، وقطع التدفق المنخفض، والتخميد، واتجاه التدفق.
3. شغّل أداة التحقق من المصنّع (Verification Tool) التي تقيس مقاومة الملفات ومحاثتها وعزلها، وممانعة الأقطاب، وتيار الملف وشكل موجته، وتقارنها ببصمة

العداد عند خروجه من المصنع؛ يُقبل ضمن التفاوت المسموح المعلن (عادة ±1%).

4. تحقق من الصفر: أغلق التدفق تمامًا والأنبوب ممتلئ فيجب أن تكون القراءة ضمن ±0.1% من المدى؛ لا تضبط الصفر وهناك أي تدفق.
5. اختبر الحلقة: محاكاة خرج التيار أو النبضات من المرسل إلى النظام ومقارنتها.
6. إن أمكن، مقارنة بعداد مثبّت خارجيًا (Clamp-On) أو بحساب من مضخة معروفة الأداء، ووثّق.

التحقق من عداد كوريوليس: خطوات

1. تحقق من امتلاء العداد وثبات الحرارة وغياب الغاز (كسب الإثارة منخفض ومستقر، والكثافة معقولة).
2. أغلق صمامي العزل وتأكد من انعدام التدفق (لا تسرب)، ثم اقرأ الصفر الحالي (Zero Offset) وقارنه بالقيمة الأصلية؛ إذا كان الفرق ضمن نافذة التحقق المعلنة فلا تعد ضبط الصفر (فالضبط المتكرر يضيف تشتتًا).
3. شغّل التحقق الذاتي للعداد (Meter Verification) الذي يقيس صلابة الأنبوب وتردده مقارنة ببصمة المصنع؛ فتغير الصلابة يكشف التآكل أو الترسب أو التلف.
4. تحقق من قراءة الكثافة بعينة مقيسة في المختبر أو بمائع معروف (ماء) ضمن التفاوت المسموح (نحو ±1 kg/m^3).
5. للقياس التجاري يُثبت العداد بمثبت أو عداد مرجعي وفق API MPMS 5.6.
6. وثّق الصفر والصلابة والكثافة كبصمة للتحقق القادم.

التحقق من عداد فوق صوتي متعدد المسارات: خطوات

1. اقرأ تقرير التشخيص: سرعة الصوت لكل مسار، ونسبة النبضات المقبولة، والكسب، ومعامل المقطع، ونسبة الدوامة، وقارنها بالبصمة الأصلية.
2. قارن سرعة الصوت المقيسة بالمحسوبة من تركيب الغاز (المحلل الكروماتوغرافي) وضغطه وحرارته؛ الفرق يجب ألا يتجاوز نحو 0.2 إلى 0.3%.

3. تحقق من صفر العداد عند انعدام التدفق (بغلق الصمامين) إن كان الترتيب يسمح.
4. تحقق من حساسات الضغط والحرارة الملحقة بمعايرة عادية (الفصل 14).
5. راجع أثر أي تغيير في المنبع (صمام تحكم جديد، أو معدّل انسياب) على مؤشر الدوامة والمقطع.
6. وثّق، واحتفظ بتقرير التشخيص الشهري كسجل اتجاه.

التحقق من عداد توربيني: خطوات

1. افحص الدوّار بصريًا إن أمكن سحبه: ريش سليمة، ودوران حر بلا احتكاك أو صوت، ومصفاة نظيفة.
2. قِس خرج المجس (سعة النبضات وشكلها) عند التدفق العادي، وتحقق من عدم فقد نبضات (تطابق العدّاد الميداني مع النظام).
3. أثبت العداد بمثبت أو عداد مرجعي عند تدفق التشغيل، واحسب معامل العداد وتكراريته.
4. قارن المعامل بالسابق؛ التغير المتدرج يدل على تآكل المحامل أو الريش.
5. وثّق منحنى المعامل مقابل التدفق واللزوجة إن تغير المائع.

ولعناصر الضغط التفاضلي يُتبع القسم 14.12 لمعايرة المرسل، مع فحص العنصر الأولي: حافة لوح الفتحة حادة (نصف قطر الحافة أقل من 0.0004 × قطر الفتحة d) وغير مشوهة، والسماكة والقطر مطابقان لشهادة التصنيع، واللوح مركّب بالاتجاه الصحيح (الحافة الحادة إلى المنبع)، ومآخذ الضغط نظيفة بلا نتوءات.

8.17 أمثلة محلولة إضافية

مثال 1 (اختيار β للوح فتحة): خط ماء بقطر داخلي 154 mm، التدفق الأقصى 120 m^3/h، والضغط التفاضلي المطلوب عند الأقصى 25 kPa. للماء ε = 1 وρ = 998 kg/m^3، ونفترض Cd = 0.61.

- المعادلة الأساسية: $Q = Cd \times \varepsilon \times (\pi\, d^2 \div 4) \times \sqrt{(2\,\Delta P \div \rho)} \div \sqrt{(1 - \beta^4)}$.
- التدفق بالوحدات الأساسية: $Q = 0.0333\ m^3/s$.
- حد السرعة: $\sqrt{(2 \times 25000 \div 998)} = 7.08\ m/s$.
- المطلوب: $d^2 \div \sqrt{(1 - \beta^4)} = 0.0333 \div (0.61 \times 0.7854 \times 7.08) = 0.00982\ m^2$.
- التجربة الأولى: $\beta = 0.6 \rightarrow d = 92.4\ mm$، $d^2 = 0.00854$، $\sqrt{(1 - \div} = 0.00915 \div 0.933 = 0.00854$ (أقل من المطلوب 0.1296 قليلًا).
- التجربة الثانية: $\beta = 0.62 \rightarrow d = 95.5\ mm$، $\sqrt{(1 -} \div 0.00912 = d^2$ $0.00912 \div 0.923 = 0.00988$ (مطابق تقريبًا 0.148).
- النتيجة: $\beta \approx 0.62$ و$d \approx 95.5\ mm$، ضمن المدى المفضل (0.3 إلى 0.7).
- التفسير: يُحسب Cd بعد ذلك بدقة من معادلة ريدر-هاريس/غالاغر (Reader-Harris/Gallagher) في ISO 5167 ويُكرر الحساب.
- الفقد الدائم للضغط: $\Delta P \approx 0.6 \times 25 = 15\ kPa \approx$ (1 − $\beta^{1.9}$) تقريبًا.

مثال 2 (تعويض الكثافة لعداد دوامي على غاز): عداد دوامي يقرأ 850 m^3/h غاز طبيعي عند 8.0 bara و35 °C، والمطلوب التدفق بالشروط القياسية (1.01325 bara و15 °C) للمحاسبة، بمعامل انضغاطية $Z \approx 0.985$ عند شروط التشغيل و1.0 عند القياسية.

- المعادلة: $Q_{std} = Q \times (P \div P_{std}) \times (T_{std} \div T) \times (Z_{std} \div Z)$.
- التعويض: $Q_{std} = 850 \times (8.0 \div 1.01325) \times (288.15 \div 308.15) \times (1 \div 0.985) = 850 \times 7.895 \times 0.935 \times 1.015$.
- النتيجة: $Q_{std} = 6371\ Sm^3/h$.
- التفسير: خطأ 1 °C في الحرارة يغير النتيجة نحو 0.3%، وخطأ 0.1 bar في الضغط نحو 1.25%؛ ولهذا يشترط القياس التجاري مرسلات ضغط وحرارة بدقة عالية قرب العداد.

مثال 3 (كوريوليس مقابل حجمي في وقود التوربين): توربين غازي على غاز وقود بضغط 25 barg يحتاج إلى التدفق الكتلي لحساب الطاقة والانبعاثات. لوح فتحة مع تعويض ضغط وحرارة يعطي عدم يقين نحو ±1.5% (عنصر 1% + مرسلات + تركيب + كثافة)، وعداد كوريوليس للغاز يعطي ±0.5% دون تعويض. عند 12 t/h من الغاز وسعر مرجعي يجعل 1% ≈ مبلغًا كبيرًا سنويًا، يُعوَّض فرق التكلفة في أشهر، بشرط توافر ضغط خلفي كافٍ وعدم وجود سوائل في الغاز. وهذا تحليل نموذجي يبرر اختيار العداد الأغلى بأثره الاقتصادي.

مثال 4 (Clamp-On للتحقق): عداد كهرومغناطيسي على خط مياه تبريد بقطر 400 mm يقرأ 1250 m^3/h، وشُك في قراءته بعد تغيير المضخة. عداد مثبّت خارجيًا (Clamp-On) بطريقة V على مسافة 10D بعد المنعطف أعطى 1235 m^3/h بعد إدخال القطر الخارجي 406 mm وسماكة 6.3 mm والمادة فولاذ كربوني. الفرق 1.2% ضمن عدم يقين العداد المثبّت خارجيًا (±2%)، فالعداد الكهرومغناطيسي سليم، ويُبحث عن سبب الشك في مكان آخر (منحنى المضخة الجديدة مثلًا).

8.18 الأطوال المستقيمة ومعدّلات الانسياب

تُقاس بمضاعفات قطر الأنبوب (D) قبل العداد (Upstream) وبعده (Downstream). القيم التالية إرشادية؛ والمرجع الملزم هو جداول ISO 5167 (التي تعتمد على β ونوع التجهيزة السابقة) أو تعليمات المصنع:

العداد	قبل	بعد
لوح الفتحة	من نحو 10D إلى أكثر من 40D حسب β والتجهيزة	نحو 4–8D
فنتوري	أقل من لوح الفتحة بوضوح	قصير
دوامي	نحو 15–20D	نحو 5D
فوق صوتي	نحو 10–20D (أقل مع معدّل انسياب ومسارات متعددة)	نحو 3–5D
كهرومغناطيسي	نحو 5D	نحو 2–3D
توربيني	نحو 10D مع معدّل انسياب	نحو 5D
كوريوليس	غير مطلوبة غالبًا	غير مطلوبة غالبًا

تُترجم هذه المتطلبات مبكرًا إلى متطلبات لتخصص الأنابيب في النموذج ثلاثي الأبعاد؛ اكتشافها بعد التركيب يعني إما إعادة بناء الخط وإما قبول عدم يقين أعلى. وتُوضع مواضع الضغط والحرارة التعويضية حسب المواصفة (الحرارة غالبًا بعد العنصر لتجنب تشويه الجريان).

التحقق الميداني من عداد التدفق: خطوات

هذه خطوات عامة تصلح لأي عداد، وتكمّل الخطوات الخاصة بكل نوع في القسم 8.16. ولا يمكن «معايرة» عداد التدفق في الموقع بالمعنى الكامل إلا بمرجع تدفق، لكن يمكن التحقق منه بدرجات متفاوتة من الثقة (الشكل 8-11):

1. **حدد نوع التحقق المطلوب:** تحقق إلكتروني (يفحص المرسل والملفات والإلكترونيات لا الجزء الملامس للمائع)، أو تحقق بالمقارنة (بعداد مرجعي أو خزان)، أو معايرة كاملة في مختبر معتمد. وحدد حدود القبول من ورقة البيانات أو من متطلبات القياس التجاري.
2. **راجع التركيب قبل أي قياس:** الأطوال المستقيمة، وامتلاء الأنبوب، والتأريض للعداد الكهرومغناطيسي، واتجاه السهم، وحالة البطانة أو لوح الفتحة. فكثير من الأخطاء تركيبية لا في العداد.
3. **سجّل الإعدادات كما وُجدت (As-Found):** المدى، والمعامل K أو معامل العداد، وقطع التدفق المنخفض (Low-Flow Cutoff)، والكثافة المرجعية، ومعاملات التعويض.
4. **للعدادات ذات المرسل المنفصل (DP):** عاير مرسل الضغط التفاضلي بالخطوات في القسم 14.12، وتحقق من الجذر التربيعي في النظام (مرة واحدة فقط)، وافحص لوح الفتحة إن أمكن سحبه: حافة حادة، وسمك مطابق، ولا تآكل.
5. **للعدادات الإلكترونية (كهرومغناطيسي، كوريوليس، فوق صوتي، دوامي):** شغّل أداة التحقق المدمجة أو الخارجية من المصنّع، وسجّل نتائجها (مقاومة

الملفات، وتردد الأنبوب، وقوة الإشارة، وسرعة الصوت) وقارنها بقيم البصمة الأصلية عند التشغيل الأول.

6. **التحقق بالمقارنة إن أمكن:** مرّر تدفقًا ثابتًا عبر العداد وعداد مرجعي معتمد على التوالي (Master Meter)، أو اجمع الكمية في خزان موزون أو مدرّج لزمن مقيس (الطريقة الوزنية أو الحجمية)، وقارن الكميتين عند نقطتين أو ثلاث من المدى.
7. **احسب الخطأ عند كل نقطة:** (قراءة العداد − المرجع) ÷ المرجع × 100%، وقارنه بحدود القبول؛ وللقياس التجاري يُحسب أيضًا عدم اليقين الكلي.
8. **إن لزم الضبط:** عدّل معامل العداد (Meter Factor) فقط بناءً على معايرة كاملة، لا على تحقق إلكتروني، وسجّل «كما تُرك» (As-Left).
9. **أعد الخدمة ووثّق:** الخطوات، والقيم، والأداة المستخدمة وشهادتها، وتاريخ التحقق التالي.

الشكل 8-11: *خمس طرق للتحقق من عداد التدفق في الموقع، مرتبة من الأدق إلى الأبسط: الطريقة الوزنية بخزان على ميزان، والمقارنة بعداد مرجعي، وعداد خارجي مؤقت، والتحقق الإلكتروني المدمج، وفحص عناصر الضغط التفاضلي ومعايرة مرسلها.*

جدول مقارنة: تقنيات عدادات التدفق الرئيسية (قيم نموذجية للمقارنة لا للتصميم)

التقنية	الدقة	المدى	فقد الضغط	أطوال مستقيمة (قبل/بعد)	أجزاء متحركة	ما يقيسه	الكلفة النسبية
لوح الفتحة + DP	±1 إلى 2% من المدى	4:1 (10:1 بعدة مرسلات)	مرتفع	10 إلى 40 / 5 D	لا	حجمي (كتلي بتعويض)	منخفضة للعنصر، متوسطة للحلقة

التقنية	الدقة	المدى	فقد الضغط	أطوال مستقيمة (قبل/بعد)	أجزاء متحركة	ما يقيسه	الكلفة النسبية
كهرومغناطيسي	±0.2 إلى 0.5% من القراءة	20:1 وأكثر	لا شيء	5 / 2 D	لا	حجمي، سوائل موصلة فقط	متوسطة
دوامي (Vortex)	±0.75 إلى 1%	15:1 إلى 20:1	متوسط	10 إلى 20 / 5 D	لا	حجمي (كتلي بمرسل متعدد)	متوسطة
توربيني	±0.25 إلى 0.5%	10:1	متوسط	10 / 5 D	نعم (محامل)	حجمي، سوائل نظيفة	متوسطة
كوريوليس	±0.1 إلى 0.2% كتلي	20:1 إلى 100:1	متوسط إلى مرتفع	لا يحتاج	لا (أنابيب مهتزة)	كتلي + كثافة + حرارة	مرتفعة
فوق صوتي (زمن العبور)	±0.5 إلى 1% (±0.15% للتجاري متعدد المسارات بعد المعايرة بالتدفق)	30:1 وأكثر	لا شيء	10 إلى 20 / 5 D	لا	حجمي، سوائل وغازات	متوسطة إلى مرتفعة

التقنية	الدقة	المدى	فقد الضغط	أطوال مستقيمة (قبل/بعد)	أجزاء متحركة	ما يقيسه	الكلفة النسبية
حراري كتلي	±1 إلى 2%	50:1 إلى 100:1	منخفض	10 إلى 20 / 5 D	لا	كتلي، غازات فقط	منخفضة إلى متوسطة
إزاحة موجبة	±0.1 إلى 0.5%	10:1 إلى 20:1	مرتفع	لا يحتاج	نعم	حجمي، سوائل لزجة	متوسطة إلى مرتفعة

كيف أختار؟ حدّد أولًا ما تحتاجه فعلًا: كتلة أم حجم، ودقة من القراءة أم من المدى، ونسبة المدى بين أدنى تدفق وأقصاه؛ ثم استبعد ما لا يصلح للوسط (الكهرومغناطيسي لغير الموصل، والحراري لغير الغاز، والتوربيني للوسط القذر أو اللزج)، ثم قارن ما بقي بفقد الضغط والأطوال المستقيمة المتاحة والكلفة. ولا يُظهر الجدول كلفة الحلقة كاملة: عنصر DP رخيص لكنه يحتاج مرسلًا وخطوط نبض وتعويضًا وأطوالًا مستقيمة، وكوريوليس غالٍ لكنه يغني عن التعويض والأطوال والمعايرة الدورية بمرجع تدفق. والخطأ الأكثر كلفة اختيار التقنية بالدقة المعلنة وحدها، ثم اكتشاف أن التدفق الحقيقي يعمل عند 10% من المدى حيث لا يقيس عنصر DP شيئًا، أو أن الغاز المحبوس يفسد كوريوليس، أو أن الأطوال المستقيمة لا تتحقق في الموقع.

8.19 جدول اختيار عداد التدفق حسب الخدمة

الخدمة	الخيار المفضل	بديل	تجنّب
غاز نظيف في العمليات	لوح فتحة + DP	دوامي، فوق صوتي	كهرومغناطيسي

الخدمة	الخيار المفضل	بديل	تجنّب
غاز قياس تجاري	فوق صوتي متعدد المسارات	لوح فتحة (AGA 3)، توربيني (AGA 7)	تقنيات غير معتمدة تعاقديًا
غاز الوقود للتوربين (استهلاك وكفاءة)	كوريوليس	لوح فتحة، فوق صوتي	حراري
بخار	فوهة أو لوح فتحة + DP	دوامي	كهرومغناطيسي، كوريوليس في الأقطار الكبيرة
ماء تبريد وماء مصاحب	كهرومغناطيسي	فوق صوتي، فنتوري	توربيني
ماء مزيل المعادن وتغذية المراجل	فوهة أو لوح فتحة + DP	دوامي، فوق صوتي	كهرومغناطيسي (موصلية منخفضة)
نفط خام ومكثفات للبيع	توربيني أو إزاحة موجبة مع مُثبِت	كوريوليس، فوق صوتي	كهرومغناطيسي
حقن كيماويات (تدفق صغير)	كوريوليس صغير	إزاحة موجبة، مقياس حراري للسوائل	عناصر DP
غاز الشعلة (Flare)	فوق صوتي	متوسط بيتو، حراري للتركيب الثابت	لوح فتحة (فقد ضغط ومدى ضيق)
وحل ومواد بها شوائب	كهرومغناطيسي (إن كانت موصلة)	الإسفين، دوبلر	توربيني، لوح متحد المركز
هواء مضغوط	حراري أو دوامي	لوح فتحة	—

كيف أختار؟ اقرأ الجدول من عمود «الخدمة» لا من عمود التقنية: الخيار المفضل هو ما يعمل بأقل عناية في أغلب المواقع، والبديل ما يصلح حين يمنع قيدٌ ما الخيار الأول (مساحة، كلفة، اعتماد تعاقدي)، وعمود «تجنّب» هو ما فشل مرارًا في هذه الخدمة. ولا يُظهر الجدول ظروف الموقع التي تقلب القرار: نسبة المدى المطلوبة، وتوافر الأطوال

المستقيمة، وتغير التركيب في الغاز، ووجود طور ثانٍ. والخطأ الأكثر كلفة اعتماد الجدول بديلًا عن ورقة البيانات: فالخدمة نفسها (ماء تبريد مثلًا) قد تكون بمياه بحر موصلة أو بماء مزيل المعادن غير موصل، والعداد الذي يناسب الأولى لا يعمل مع الثانية.

ملاحظة على التوربينات الغازية: في كثير من التصاميم لا يدخل عداد تدفق الوقود في حلقة التحكم السريعة؛ بل يُحكم الوقود بضبط الضغط قبل صمام التحكم وموضع الصمام (الفصل 34)، ويُستخدم العداد لحساب الاستهلاك ومعدل الحرارة (Heat Rate) والتحقق.

8.20 عدادات وملحقات لم تُذكر بعد

غطّى هذا الفصل تقنيات قياس التدفق الرئيسية كلها، ويبقى ما يلي مما يستحق أن يُضاف حتى لا يفاجأ المهندس به في مواصفة أو ورقة بيانات:

عداد التدفق الحراري الكتلي بالتفصيل (Thermal Mass Flowmeter): ذُكر مبدؤه في 8.6؛ وله نمطان يبين الشكل 8-12 الفرق بينهما: **القدرة الثابتة** يُسخَّن العنصر بقدرة ثابتة ويُقاس فرق الحرارة بين حساس مسخّن وآخر مرجعي، فكلما زاد التدفق الكتلي انخفض الفرق (استجابة بطيئة نسبيًا لكنها بسيطة)؛ و**فرق الحرارة الثابت** تُضبط قدرة التسخين لإبقاء الفرق ثابتًا، والقدرة اللازمة هي مقياس التدفق (استجابة أسرع ومدى أوسع، وهو السائد اليوم). العلاقة بين القدرة والتدفق الكتلي تمر عبر السعة الحرارية والموصلية الحرارية للغاز، لذلك **المعايرة خاصة بتركيب الغاز**؛ وأي تغيّر في التركيب (غاز وقود متغير المصدر) يعني خطأ منهجيًا. أفضل استخداماته: هواء الاحتراق والغازات النقية والتدفقات الصغيرة ومراقبة التسرب والغازات عند الضغط المنخفض حيث تعجز الطرق التفاضلية. مداه يصل إلى 100:1، وفقد ضغطه ضئيل، ويتأثر بالرطوبة والقطرات (تبريد كاذب يُقرأ تدفقًا أعلى) وبترسبات العنصر. ويوجد منه نمط الإدخال (Insertion) للمجاري الكبيرة ونمط الشعري الجانبي (Capillary/Bypass) لمتحكمات التدفق الكتلي الصغيرة (MFC) في المختبرات وشبه الموصلات.

الشكل 8-12: *عداد التدفق الحراري الكتلي: نمط القدرة الثابتة (يُقاس فرق الحرارة الذي ينخفض مع التدفق) ونمط فرق الحرارة الثابت (تُقاس القدرة اللازمة التي تزيد مع التدفق)، والمنحنى غير خطي ويُخطَّط بالمعايرة لغاز محدد.*

عداد الارتباط المتقاطع (Cross-Correlation Flowmeter): حساسان متطابقان على مسافة معلومة L على الأنبوب يلتقطان «بصمة» عشوائية في المائع (اضطراب، فقاعات، جسيمات، تغيّر توصيلية أو سعة)، ويحسب المعالج الزمن τ الذي تتأخر به إشارة الحساس الثاني عن الأول بدالة الارتباط المتقاطع، فالسرعة = L/τ. لا يحتاج إلى معايرة تدفق ولا يعتمد على خواص المائع، ويصلح للملاط والمعلقات والتدفق ثنائي الطور والمواد الصلبة

في النقل الهوائي حيث تفشل أغلب العدادات؛ وعيبه أنه يحتاج إلى «بصمة» كافية (لا يعمل مع سائل نظيف متجانس) ودقته نحو 1 إلى 2% من القراءة.

العداد الصفائحي (Laminar Flowmeter): عنصر يجبر الغاز على المرور في قنوات دقيقة كثيرة يبقى فيها الجريان صفائحيًا (رينولدز أقل من نحو 1000)، فيصبح فقد الضغط **خطيًا** مع التدفق الحجمي (معادلة بوازوي) لا تربيعيًا كما في لوح الفتحة؛ ولذلك مداه واسع (100:1) وهو المرجع في معايرة تدفق الغازات الصغيرة ومختبرات المحركات، لكنه حساس للزوجة (تصحيح حراري) وللانسداد.

مآخذ الكوع والإسفين والمخروط: ذُكرت الأولى والثانية في 8.10، والمخروط موجزًا في جدولي القسم 8.2؛ وهذا تفصيل عداد **المخروط (V-Cone)**: مخروط معلق في محور الأنبوب يضغط المائع نحو الجدار، والضغط التفاضلي يُقاس بين ما قبل المخروط وذيله. ميزته أن المخروط نفسه يُهيّئ انسياب التدفق فلا يحتاج إلا إلى 0 إلى 3 أقطار أطوال مستقيمة (مقابل 10 إلى 40 للوح الفتحة)، وحافته لا تتآكل كحافة اللوح، ومداه نحو 10:1 مع نسبة β تُختار من 0.45 إلى 0.85. مناسب للغاز الرطب والمساحات الضيقة والتعديلات (Revamps) التي لا تسمح بأطوال مستقيمة.

مفاتيح التدفق (Flow Switches): حين لا يُطلب إلا «هل يوجد تدفق؟» (حماية مضخة من الجفاف، تأكيد تدفق ماء التبريد للمحمل، تدفق هواء التطهير): مجداف (Paddle) يُدفع بالمائع، أو حراري (يقارن حرارة عنصر مسخّن بمرجع فينخفض الفرق مع التدفق: بلا أجزاء متحركة، وهو الأشيع اليوم)، أو ضغط تفاضلي عبر قيد، أو مكبس في فتحة. القاعدة التي كررناها في الفصل 11: في وظائف الحماية يفضَّل مرسل تدفق مستمر مع حد في المنطق على مفتاح لا يمكن اختباره دون قطع التدفق.

مضخات القياس (Metering Pumps) كعدادات: مضخة الإزاحة الموجبة ذات الغشاء أو المكبس (Diaphragm/Plunger) تُحقن بها الكيماويات (مانع التآكل، الميثانول، مضاد الرغوة) بمعدل يُضبط بطول الشوط أو بسرعة المحرك أو بتردد النبض، وتُعدّ بذاتها عداد تدفق تقريبيًا (حجم الشوط × عدد الأشواط) بدقة نحو 1% عند ضغط تصريف مستقر.

ويُحقَّق منها بأسطوانة معايرة (Calibration Cylinder/Pot) في خط الشفط: يُعزل الخزان ويُقاس زمن نزول السائل فيها. ومن الأخطاء الشائعة تركيب مضخة القياس دون صمام ضغط خلفي (Back-Pressure Valve) على التصريف فتسحب السائل بالسيفون وتزيد الجرعة على المطلوب.

مؤشرات التدفق المرئية (Sight Flow Indicators): زجاجة على الخط بريشة دوارة أو كرة أو قلاب ترى بها العين أن السائل يجري؛ رخيصة وتُركب عادة على خطوط ماء تبريد السدادات والتزييت وتصريف المكثفات، بحدود ضغط وحرارة الزجاج (تُختار مع وقاء) ولا تُستخدم في المناطق التي يهدد فيها انكسار الزجاج السلامة.

عدادات الغاز الحجمية (Diaphragm/Rotary/Turbine Gas Meters): عدادات الغشاء التي تُرى في محطات الغاز الصغيرة، والعدادات الدوارة (Roots) للأحمال المتوسطة، والتوربينية للأحمال الكبيرة؛ وتصنيفها في القياس التجاري وفق فئات الدقة (مثل OIML R137) مع تصحيح الحجم إلى الشروط القياسية بمصحح حجم (Volume Corrector/Flow Computer) يقرأ الضغط والحرارة والانضغاطية (AGA 8).

أنواع أقل شيوعًا تظهر في المواصفات وأوراق البيانات (الشكل 8-13):

العداد	المبدأ	نقاط القوة	الحدود	أين يظهر
الدوّامي اللولبي (Swirl Meter)	ريش عند المدخل تجعل التيار يدور لولبيًا فيتذبذب محور الدوامة بتردد يتناسب مع التدفق، يلتقطه حساس كهرضغطي	يحتاج 3 أقطار مستقيمة فقط، مدى نحو 30:1، بلا أجزاء متحركة	سعره أعلى من الدوامي العادي، حساس للفقاعات	الغازات والبخار والسوائل في المساحات الضيقة

العداد	المبدأ	نقاط القوة	الحدود	أين يظهر
الموائعي (Fluidic / Coanda)	تيار نفّاث يلتصق بأحد الجدارين بتأثير كواندا ويُدفع إلى الآخر بقناة تغذية راجعة، فيتذبذب بتردد يتناسب مع التدفق	بلا أجزاء متحركة، خطي، رخيص، يعمل مع رينولدز منخفض نسبيًا	مقاسات صغيرة فقط، فقد ضغط ملحوظ	عدادات المياه والغاز المنزلية والصناعية الصغيرة
الترس البيضاوي (Oval Gear)	ترسان بيضاويان يحبسان حجمًا ثابتًا في كل دورة (إزاحة موجبة)	دقة ±0.2 إلى 0.5%، تتحسن مع اللزوجة، لا يحتاج أطوالًا مستقيمة	يحتاج مرشحًا، قد يعلق بالمواد الصلبة، فقد ضغط	زيت الوقود، الزيوت الهيدروليكية، الكيماويات اللزجة، التحميل
القرص المتأرجح (Nutating Disc)	قرص يتأرجح داخل حجرة كروية دون أن يدور، وكل دورة تأرجح تمرر حجمًا معلومًا	بسيط ورخيص ومتين	دقة نحو ±1 إلى 2%، للمياه والسوائل النظيفة	عدادات المياه المنزلية، ماء التغذية الصغير
الحلزوني (Helical Rotor)	دوّاران حلزونيان متعاشقان (إزاحة موجبة)	نبض تدفق منخفض، سوائل لزجة جدًا وحاملة لبعض المواد الصلبة	مقاسات وسعر أكبر	النفط الخام والزيوت الثقيلة في التحميل
لوح الفتحة المهيِّئ (Conditioning Orifice)	لوح بأربعة ثقوب متناظرة بدل ثقب مركزي، يعمل معدِّل انسياب وعنصرًا في آن	أطوال مستقيمة نحو قطرين فقط، ويُركب بمرسل مدمج (Compact) بلا خطوط نبض	معامل تصريف خاص بالمصنّع، دقة تقارب اللوح العادي	تعديل مواقع ضيقة، المنصات، الاستبدال في خطوط قائمة

العداد	المبدأ	نقاط القوة	الحدود	أين يظهر
التوربيني مزدوج الدوّار (Dual-Rotor Turbine)	دوّار ثانٍ بطيء بعد الرئيسي يقيس الدوامة المتبقية، والفرق بين الترددين يصحح أثر الاحتكاك واللزوجة	دقة ±0.15% ومدى أوسع، تشخيص ذاتي لتلف المحامل	سعر أعلى، سوائل نظيفة فقط	القياس التجاري للهيدروكربونات ووقود الطائرات
فتحة التقييد (Restriction Orifice – RO)	ليست عدادًا: لوح لخفض الضغط أو تحديد التدفق الأقصى (سميك، أحيانًا متعدد المراحل)	يحد التدفق عند فشل صمام مفتوحًا، يخفض الضغط بلا أجزاء متحركة	تآكل وضوضاء عند الفروق الكبيرة	خطوط التطهير والحقن وتغذية الآلات، حماية من التدفق الزائد

وتضاف صفة **ثنائي الاتجاه (Bidirectional)** لعدادات تُطلب في خطوط الشحن والتخزين حين يجري المائع في الاتجاهين: يصلح لها فوق الصوتي وكوريوليس والكهرومغناطيسي والتوربيني المصمم لذلك، ولا يصلح لوح الفتحة العادي لأن حافته الحادة في جهة واحدة (يوجد لوح بحافتين مربعتين مع فقد دقة).

الشكل 8-13: *عدادات أقل شيوعًا: الدوّامي اللولبي، والموائعي، والترس البيضاوي، والقرص المتأرجح، ولوح الفتحة المهيَّئ، والتوربيني مزدوج الدوّار؛ رسوم تخطيطية للمبدأ.*

ما لم نضفه عمدًا: عدادات الانحراف النفاث (Jet Deflection) والمقاييس المخبرية القديمة التي لم تعد تُستخدم صناعيًا، فقيمتها اليوم تاريخية فحسب.

8.21 حالة ميدانية: جذر مرتين بعد تحديث النظام

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

بعد مشروع تحديث نظام تحكم، بدأت قراءة تدفق مياه تغذية مولد البخار تظهر مرتفعة عند الأحمال المنخفضة، ومقبولة تقريبًا عند الحمل الكامل، ولم تعد موازنة الماء والبخار تغلق. وكانت حلقة المستوى ثلاثية العناصر تتصرف بغرابة عند البدء. المرسل مُعايَر، والعنصر سليم. بمقارنة إعدادات المرسل عبر HART بكتلة الإدخال في النظام الجديد تبيّن أن المرسل مضبوط على دالة الجذر التربيعي (Square Root) منذ النظام القديم، وأن المبرمج فعّل استخراج الجذر في الكتلة أيضًا حسب القالب القياسي. عند 25% من فرق الضغط كان النظام يعرض 70.7% بدل 50%. أُلغي الجذر في المرسل ووُحِّدت الوثيقة، وأُعيد ضبط حلقة المستوى.

الدروس: في مشاريع التحديث تُراجَع دالة التحويل والمدى ووحدات كل حلقة تدفق مقابل المرسل نفسه لا مقابل الوثائق القديمة وحدها؛ وفحص الحلقة عند 100% وحدها لا يكشف الخطأ، بل تكشفه النقاط الوسطى (25 و50 و75%).

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
الاختيار	التقنية بحسب الخدمة والدقة ونسبة المدى، والظروف المرجعية لوحدة الغاز	يطابق اتجاه السهم والقطر ومادة البطانة مع ورقة البيانات
التصميم	الأطوال المستقيمة مبكرًا، ومكان استخراج الجذر (مرة واحدة)، وتعويض الضغط والحرارة	يتحقق في الموقع من الأطوال والتأريض وامتلاء الأنبوب

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
التشغيل التجريبي	حدود القبول وبصمة التحقق الأولى	يفحص الحلقة عند 0 و25 و50 و75 و 100%، ويسجل الإعدادات كما وُجدت (As-Found)
التحقق الدوري	طريقته (إلكتروني أو بالمقارنة أو معايرة كاملة)، ومتى يُعدَّل معامل العداد	يشغّل أداة التحقق، ويقرأ كسب الإثارة وسرعة الصوت، ويضبط الصفر والتدفق متوقف تمامًا
القياس التجاري	الامتثال لمعايير AGA وAPI MPMS و OIML وللعقد	ينفذ الإثبات (Proving) بحضور الطرفين ويوثقه

8.22 الأخطاء الشائعة

- وحدة غاز بلا ظروف مرجعية، أو خلط Nm^3 بـ Sm^3.
- استخراج الجذر مرتين، أو عدم استخراجه أبدًا.
- مدى DP واسع جدًا فيُفقد القياس عند التدفقات المنخفضة.
- إهمال تعويض الضغط والحرارة في غاز تتغير ظروفه.
- تركيب لوح الفتحة معكوسًا (الحافة الحادة إلى المصب)، أو حافة متآكلة، أو حشوة بارزة داخل المسار.
- كهرومغناطيسي في أنبوب غير ممتلئ أو بلا تأريض صحيح.
- دوامي على خط مهتز يعطي تدفقًا والخط متوقف.
- كوريوليس بلا تحقق من الصفر بعد التركيب، أو مركب تحت إجهاد أنابيب.
- اكتشاف نقص الأطوال المستقيمة بعد تنفيذ الأنابيب.
- ضبط صفر عداد كوريوليس أو فوق صوتي والتدفق لم يتوقف تمامًا (القسم 8.11).

- نقل مقياس مساحة متغيرة إلى خدمة أخرى دون تصحيح ظروف معايرته (القسم 8.8).

8.23 ملخص

التدفق حجمي أو كتلي، وفي الغازات لا معنى للحجم دون مرجع. عناصر DP بسيطة وموثّقة لكن مداها ضيق بسبب الجذر، ويجب حسم مكان استخراجه. الكهرومغناطيسي للسوائل الموصلة، والتوربيني والإزاحة الموجبة للقياس التجاري للسوائل، والدوامي للبخار، وفوق الصوتي للغاز التجاري والشعلة، وكوريوليس حيث تلزم الكتلة مباشرة. والأطوال المستقيمة قرار تصميم لا تفصيل تركيب.

وفي الفصل التالي: الفصل 9 «قياس المستوى والسطح الفاصل»؛ فالضغط التفاضلي الذي حوّلناه هنا إلى تدفق هو نفسه أشيع طرق قياس المستوى، والمستوى يحكم مخزون الأوعية التي يدخلها التدفق ويخرج منها.

8.24 أسئلة التقييم الذاتي

1. مرسل DP للتدفق مداه 0–250 mbar يقابل 0–100 t/h. كم التدفق عند 90 mbar؟
2. بفرض السؤال السابق، ما القراءة إذا طُبّق الجذر في المرسل والنظام معًا؟
3. حوّل 1500 m^3/h فعلية من غاز عند 20 bara و50 °C و$Z = 0.96$ إلى Sm^3/h (15 °C، 1.01325 bara).
4. عنصر DP محسوب لغاز عند 60 °C يعمل عند 20 °C بالضغط نفسه. هل تكون القراءة غير المعوضة أعلى أم أدنى؟ وبكم؟
5. لماذا لا يصلح العداد الكهرومغناطيسي لماء تغذية المراجل عالي النقاء؟
6. عداد دوامي يقرأ 5% والخط مغلق. ما السبب المحتمل؟ وكيف تتحقق؟

7. قارن بين كوريوليس ولوح الفتحة لقياس غاز وقود توربين من حيث الدقة والمدى والتركيب.
8. ما التشخيصات التي يوفرها عداد فوق صوتي متعدد المسارات، وكيف تستخدم سرعة الصوت للتحقق؟
9. لماذا تُحدد الأطوال المستقيمة مبكرًا في التصميم؟ وما الخيارات إن اكتُشف نقصها بعد التركيب؟
10. في الحالة 8.21، لماذا لم يكشف فحص الحلقة عند 100% الخطأ؟

مراجع الفصل: المسودة v0.1 (الفصل 8)؛ أنواع عناصر الضغط التفاضلي وألواح الفتحة والعدادات الكهرومغناطيسية والدوامية والتوربينية وكوريوليس والإزاحة الموجبة (دورة Instrumentation and Process Control)؛ مبادئ مقاييس التدفق ومقياس كتلة الهواء بالفيلم الساخن (Bosch، Automotive Mechatronics)؛ حساسات التدفق (Shardt، Automation Engineering)؛ متطلبات الشفاه ووصلات العملية لألواح الفتحة (I&C Design Basis)؛ ISO 5167؛ AGA 3 و7 و8 و9؛ R60 (DOE Fundamentals Handbook، الوحدة 4: عناصر الضغط التفاضلي وأنبوب Dall).

الفصل 9: قياس المستوى والسطح الفاصل

لمن هذا الفصل: المهندس الجديد ومهندس الموقع. فالمستوى يحرس الفواصل والخزانات ودروم المراجل، وخطؤه يعني فيضانًا أو جفافًا، وعاقبة ذلك تلف مضخة، أو عبور سائل إلى ضاغط، أو انفجار أنابيب في مرجل.

الفكرة الأساسية: نقيس المستوى إما مباشرةً بتحديد موضع السطح، وإما استنتاجًا من كمية أخرى كالضغط أو الوزن أو الطفو. وكل طريقة استنتاجية تفترض كثافةً معينة؛ فإذا تغيرت الكثافة تغيّر المستوى المقروء وإن لم يتغير المستوى الحقيقي.

9.1 المبادئ والاختيار

الشكل 9-1: *وعاء واحد وست تقنيات لقياس المستوى: مرسل ضغط تفاضلي بساق مرجعية رطبة، ورادار غير تلامسي على فوهة علوية، ورادار موجّه بقضيب يمتد إلى القاع، ومُزاح في غرفة خارجية، ومقياس مغناطيسي جانبي مؤشرًا محليًا، ومفتاح شوكة اهتزازية للمستوى العالي. ولكل منها خدمة تناسبه، كما يشرح هذا الفصل.*

تُقسَم طرق قياس المستوى إلى فئتين:

- **الطرق المباشرة (Direct Methods):** تتحسس السطح نفسه ولا تتأثر بالكثافة، مثل المقياس الزجاجي والعوامة والرادار.
- **الطرق الاستنتاجية (Inferential Methods):** تستنتج المستوى من الضغط الهيدروستاتيكي أو الوزن أو قوة الطفو، وتحتاج تصحيحًا أو إعادة معايرة إذا تغيّر الوسط.

التقنية	تتأثر بالكثافة؟	نقاط القوة	نقاط الضعف
المقياس الزجاجي والمغناطيسي (Gauge Glass / Magnetic Gauge)	لا (ما عدا فرق الحرارة)	بسيط، مرجع مرئي مباشر	التلوّث والكسر، قراءة محلية فقط
الضغط التفاضلي (DP / Hydrostatic)	نعم	شائع، موثوق، يصلح للضغوط العالية	خطوط النبض، تغيّر الكثافة
المُزاح (Displacer)	نعم	يقيس السطح الفاصل جيدًا	مدى محدود، أجزاء متحركة
الرادار غير الملامس (Non-Contact Radar)	لا	بلا تلامس، دقيق، للخزانات الكبيرة	الرغوة، المواد منخفضة ثابت العزل
الرادار الموجّه (Guided Wave Radar – GWR)	لا	السطح الفاصل، المساحات الضيقة	الترسبات على المجس، المناطق الميتة
فوق الصوتي (Ultrasonic)	لا	رخيص للمياه والآبار المفتوحة	يتأثر بالحرارة والأبخرة والرغوة
السعوي (Capacitance / RF Admittance)	يتأثر بثابت العزل	بسيط، يصلح للمفاتيح والسطوح الفاصلة	تغيّر خواص الوسط، الترسبات
الإشعاعي (Nuclear / Gamma)	نعم (ضمنيًا)	من خارج الوعاء مهما كانت الظروف	التراخيص والسلامة الإشعاعية

التقنية	تتأثر بالكثافة؟	نقاط القوة	نقاط الضعف
المغناطيسي التضييقي (Magnetostrictive)	لا	دقة عالية، مستويان معًا	عوامة متحركة قد تعلق
الوزن (Load Cells)	لا (يقيس الكتلة)	الصوامع والمفاعلات الدفعية	تأثير الأنابيب المتصلة والرياح

كيف أختار؟ اسأل أولًا: هل تتغير كثافة الوسط أثناء التشغيل؟ فإن كانت تتغير فابدأ بالطرق المباشرة (الرادار بنوعيه أو المغناطيسي التضييقي)، وإن كانت ثابتة معلومة فالضغط التفاضلي أرخص وأكثر تحمّلًا للضغط والحرارة؛ ثم اسأل عن ثابت العزل والرغوة والسطح الفاصل ليتحدد نوع الرادار أو الحاجة إلى المُزاح. ولا يُظهر الجدول طريقة التركيب (داخلي أو غرفة أو جسر) ولا المناطق الميتة ولا الحاجة إلى مرجع مرئي محلي، وهذه تحسم نصف القرار (القسم 9.9.1). والخطأ الأكثر كلفة اختيار طريقة استنتاجية لوعاء يتغير فيه الوسط أو حرارته ثم «معايرة» المرسل مرارًا لمطابقة الزجاج، فيُحمَّل الجهاز خطأ الفيزياء لا خطأه هو.

9.2 المقاييس الزجاجية والمغناطيسية

المقياس الزجاجي (Gauge Glass): أبسط وسيلة وأكثرها انتشارًا في المصانع. النوع العاكس (Reflex) يُظهر السائل داكنًا والبخار فاتحًا، والنوع الشفاف (Transparent) يُستخدم مع السوائل الملوّنة والسطوح الفاصلة. أما دروم المراجل فتستخدم مقاييس ثنائية اللون (Bi-Color) يظهر فيها الماء أخضر والبخار أحمر، مع زجاج محمي بطبقة ميكا ضد تآكل البخار. ويُزوَّد كل مقياس بصمامات عزل وتصريف، وغالبًا بكرات إغلاق آلية تمنع التسرب إذا انكسر الزجاج.

المقياس المغناطيسي (Magnetic Level Gauge): عوامة تحمل مغناطيسًا داخل غرفة جانبية، تقلب رقائق ملوّنة من الخارج. يحل محل الزجاج في السوائل الخطرة والضغوط العالية، ويمكن أن تُركّب على غرفته مفاتيح مغناطيسية أو مرسل مغناطيسي تضييقي أو

مرسل رادار موجّه. وبضبط وزن العوامة على كثافة بين سائلين يصبح مؤشرًا للسطح الفاصل.

تبقى هذه المقاييس المرجعَ الميداني الذي تُقارَن به المرسلات، ولذلك تُنظَّف وتُصرَّف ضمن الصيانة الدورية.

9.3 القياس بالضغط التفاضلي

المبدأ: ضغط عمود السائل يتناسب مع ارتفاعه وكثافته: $\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$، ومنه $h = \Delta P / (\rho \cdot g)$.

الخزان المفتوح: يُكتفى بمرسل ضغط مقيس عند القاع، أو بمقياس فقاعي (Bubbler) يضخ غازًا خاملًا بتدفق صغير عبر أنبوب غائص ويقيس الضغط اللازم لخروجه. وهذا مناسب للآبار والسوائل الأكالة، لأن المرسل يبقى بعيدًا عن الوسط.

الوعاء المغلق: يجب طرح ضغط الفراغ العلوي، فيُوصَل الجانب المنخفض بأعلى الوعاء بإحدى طريقتين:

- **الساق الجافة (Dry Leg):** خط يبقى ممتلئًا بالغاز، ويصلح حين لا يتكثف البخار فيه.
- **الساق الرطبة (Wet Leg):** خط مملوء عمدًا بسائل معروف الكثافة (ماء أو جلايكول) أو بالمتكثف عبر وعاء تكثيف (Condensate Pot)، ويُستخدم حين يتكثف البخار حتمًا، كما في دروم المراجل. والبديل الحديث هو الحواجز الغشائية بأنبوبين شعريين (الفصل 6).

حين تضيف الساق الرطبة عمودًا ثابتًا على الجانب المنخفض تصبح بداية المدى (LRV) سالبة؛ ويُسمّى هذا رفع الصفر (Zero Elevation). وحين يُركَّب المرسل أسفل نقطة الأخذ السفلية يضيف العمود الإضافي ضغطًا موجبًا عند المستوى صفر، ويُسمّى هذا كبت الصفر

(Zero Suppression). وقد تختلط التسميتان في بعض الوثائق، فالعبرة بإشارة LRV: سالبة في الرفع وموجبة في الكبت.

مثال محلول — مدى مرسل بساق رطبة: وعاء مغلق، المسافة بين نقطتي الأخذ H = 3 m، وكثافة السائل $850\ kg/m^3$، والساق الرطبة مملوءة بماء كثافته $1000\ kg/m^3$، والمرسل مركّب عند مستوى النقطة السفلى. يُوصَل الجانب العالي بالنقطة السفلى والمنخفض بالساق الرطبة.

- عند 0%: $\Delta P = -(1000 \times 9.81 \times 3) = -29.43\ kPa = -294.3\ mbar$.
- عند 100%: $\Delta P = (850 - 1000) \times 9.81 \times 3 = -4.41\ kPa = -44.1\ mbar$.
- مدى المرسل: LRV = −294.3 mbar، وURV = −44.1 mbar، والاتساع (Span) = 250.2 mbar.

الشكل 9-2: *ترتيب المثال المحلول: وعاء مغلق بساق رطبة مملوءة بالماء، ومرسل بمدى سالب من −294.3 إلى −44.1 mbar.*

أثر تغيّر الكثافة: إذا انخفضت كثافة السائل إلى 800 kg/m³ والمستوى الحقيقي 1.5 m (50%):

- فرق الضغط الفعلي: ΔP = ρ × g × h — عمود الساق الرطبة = 800 × 9.81 × 1.5 = 29.43 − 17.66 kPa−.
- ما يقرؤه المرسل المعايَر على 850 kg/m³: h = (ΔP + 29.43) × 1000 / (850 × 9.81) = (−17.66 + 29.43) × 1000 / (850 × 9.81) = 1.41 m.
- النتيجة: 47.1% بدل 50%.
- التفسير: فرق كثافة قدره 6% أنتج خطأً قدره 2.9% من المدى، ويزداد الخطأ طرديًا مع ارتفاع المستوى حتى يبلغ نحو 5.9% من المدى عند 100%.

أخطاء نظام القياس التفاضلي في الميدان (R51): لأن المستوى هنا مستنتج من ضغط لا مقيس مباشرة، فمعظم الأخطاء تركيبية وإجرائية لا إلكترونية:

- **عكس وصلتي المرسل:** أكثر الأخطاء شيوعًا وأسهلها وقوعًا في الأوعية المغلقة ذات الضغط التشغيلي العالي والعمود الهيدروستاتيكي الصغير؛ ونتيجته أن القراءة تنخفض كلما ارتفع المستوى الحقيقي. اختبره دائمًا عند التشغيل الأول بملء الوعاء ومراقبة اتجاه القراءة.
- **الإفراط في الضغط عبر المانيفولد:** فتح صمام العزل على جانب وإغلاقه على الآخر قبل فتح صمام الموازنة يعرّض الغشاء لكامل الضغط الساكن على جانب واحد؛ وإذا لم يتلف فورًا فقد يتشوه ويقرأ عاليًا أو منخفضًا بعد ذلك. والتسلسل الصحيح في القسم 6.5. وفتح صمام الموازنة سهوًا أثناء التشغيل يُصفّر فرق الضغط فورًا فتقفز القراءة إلى أدنى المدى (ساق جافة) أو إلى أعلاه (ساق رطبة بمدى مرفوع الصفر).
- **انسداد خطوط النبض:** الجسيمات تسد الخطوط الدقيقة فتبطئ الاستجابة أولًا («المستوى كسول») ثم تجمدها؛ والعلاج تصريف وغسل دوريان، مع إغلاق العزل وفتح الموازنة قبل التصريف حتى لا يُفرَط في ضغط الخلية.

- **تراكم المتكثف في الساق الجافة:** يضيف عمودًا على الجانب المنخفض فتقرأ القراءة أقل من الحقيقة؛ وتُصرَّف الساق الجافة دوريًا أو تُحوَّل إلى ساق رطبة مقصودة.
- **تسرب الساق الرطبة أو تفريغها:** يعطي قراءة مستوى **عالية كاذبة** (الحالة الميدانية في 9.12)؛ وتسرب الخط المتغير (جانب العملية) يعطي قراءة **منخفضة كاذبة**. القاعدة: الساق الرطبة يجب أن تبقى ممتلئة، وكل صيانة عليها تنتهي بإعادة الملء والتحقق.

9.4 المُزاح والعوامة

المُزاح (Displacer): أسطوانة أثقل من السائل معلّقة في الوعاء أو في غرفة جانبية. كلما ارتفع السائل زادت قوة الطفو وفق مبدأ أرخميدس ($F = \rho \cdot g \cdot V$ المغمور)، فينقص الوزن الظاهر ويُقاس بأنبوب الليّ (Torque Tube) أو بنابض. مداه هو طول المُزاح (عادة بين 0.3 و2.5 m)، وهو حساس للكثافة مثل طريقة الضغط التفاضلي. ومن مزاياه أنه يقيس السطح الفاصل جيدًا حين يكون مغمورًا بالكامل ويكون فرق الكثافة بين السائلين كافيًا. تُعايَر المُزاحات بالماء مع تصحيح الكثافة، أو بأوزان معايرة تحاكي قوة الطفو.

العوامة (Float): تطفو على السطح نفسه فلا تتأثر بالكثافة تقريبًا. وتشمل هذه الفئة مقاييس الخزانات المؤازرة (Servo Tank Gauges)، التي تتبع السطح بمُزاح صغير معلّق بسلك وتُستخدم في القياس التجاري للخزانات، وكذلك المرسلات المغناطيسية التضييقية (Magnetostrictive) التي تحدد موضع عوامة مغناطيسية على سلك توجيه بدقة عالية، ويمكنها قياس المستوى والسطح الفاصل معًا بعوامتين.

9.5 الرادار والقياس فوق الصوتي

تقيس هذه التقنيات زمن ذهاب الموجة وعودتها من السطح، ثم تحسب المسافة وتطرحها من ارتفاع الوعاء المرجعي.

الرادار غير الملامس (Non-Contact Radar): يبثّ موجات كهرومغناطيسية إما نبضات وإما موجة مستمرة معدّلة التردد (FMCW). ولا تتأثر سرعتها عمليًا بالحرارة والضغط وتركيب الغاز في معظم التطبيقات (عدا البخار عالي الضغط)، وهذا سبب تفوّقها على الموجات فوق الصوتية. وتتوقف قوة الانعكاس على ثابت العزل – Dielectric Constant) (εr للوسط: الماء (εr ≈ 80) يعكس بقوة، والهيدروكربونات الخفيفة (εr ≈ 1.8–2.2) تعكس بضعف. والأجهزة ذات الترددات العالية (نحو 80 GHz) تعطي حزمة ضيقة تتجنب العوائق الداخلية وتصلح للفتحات الصغيرة. أما الرغوة الكثيفة والسطح المضطرب فيُضعفان الإشارة، ويُستخدم عندئذ أنبوب تهدئة (Stilling Well).

الرادار الموجّه (Guided Wave Radar – GWR): تنتقل النبضة على مجس (قضيب أو كابل أو محوري) بمبدأ انعكاس المجال الزمني – Time Domain Reflectometry) (TDR، فتبقى الطاقة مركّزة وتُقاس مواد ثابت عزلها منخفض جدًا (حتى نحو 1.2 في بعض الأجهزة). وتبلغ دقته نحو ±3 mm، ولا يحتاج إلى تعويض عن تغيّر الكثافة أو اللزوجة.

اعتبارات تركيب الرادار الموجّه:

- المجس المحوري (Coaxial) للسوائل النظيفة والغرف الجانبية (Bypass Chambers)، والقضيب المفرد (Single Rod) للمواد المعرّضة للترسب، والكابل المرن (Flexible Cable) للخزانات العالية.
- يجب ألا يلامس المجس أجسامًا معدنية داخل الوعاء، وألا يُستخدم قرب الخلاطات.
- توجد منطقة ميتة أو انتقالية عند أعلى المجس وأسفله (Dead / Transition Zones)، تُؤخذ في الحسبان عند تحديد طول الغرفة ونقاط الإنذار.
- الترسبات والطبقات اللزجة على المجس قد تُحدث انعكاسات كاذبة.

فوق الصوتي (Ultrasonic): أرخص ثمنًا، لكن سرعة الصوت في الغاز تتغيّر بنحو 0.17% لكل درجة مئوية في الهواء، ومع تركيب الغاز والأبخرة. ولا يعمل في الفراغ،

وتضعف دقته مع الرغوة والأبخرة الكثيفة. مكانه الطبيعي خزانات المياه المفتوحة والآبار والقنوات.

الشكل 9-3: *مبدأ الرادار غير التلامسي: يقيس المسافة من الهوائي إلى السطح فيُحسب المستوى بطرحها من الارتفاع المرجعي، ومبدأ الرادار الموجّه: النبضة تسير على قضيب أو كابل وتنعكس عند السطح، فهي قليلة التأثر بالرغوة والاضطراب وشكل الوعاء.*

> **مثال محلول (إعداد الرادار):** خزان ارتفاعه من القاع إلى شفة الفوهة 8.0 m، ويقرأ الرادار مسافة 5.2 m إلى السطح. المستوى = 8.0 − 5.2 = 2.8 m. وإذا أُدخل الارتفاع المرجعي خطأً 7.5 m لقرأ النظام 2.3 m، أي خطأ نصف متر ثابت في كل القراءات. ولهذا يُتحقق من الارتفاع المرجعي بالقياس الفعلي عند التركيب، لا من الرسومات وحدها.

9.6 القياس السعوي والإشعاعي

السعوي (Capacitance / RF Admittance): يشكّل المجس وجدار الوعاء مكثفًا تتغيّر سعته بتغيّر المادة بينهما. ويصلح للمفاتيح وللسطح الفاصل بين الزيت والماء بسبب الفرق الكبير في ثابت العزل. أما تقنية القبولية الراديوية (RF Admittance) فتُضيف دائرة

تحجب أثر الترسبات على المجس. ومشكلته أن تغيّر تركيب الوسط أو حرارته يغيّر المعايرة.

الإشعاعي (Nuclear / Gamma): مصدر أشعة غاما في جهة من الوعاء وكاشف في الجهة الأخرى؛ يمتص السائل جزءًا من الإشعاع بقدر ارتفاعه وكثافته. يقيس من خارج الجدار دون أي تلامس، فهو حل للظروف القاسية مثل المواد شديدة التآكل ودرجات الحرارة والضغوط العالية والمواد اللزجة. والتفصيل في القسم 9.6.1: الكواشف، والمصادر وتعويض اضمحلالها، والترخيص والسلامة الإشعاعية، والمعايرة الموضعية (In-situ).

9.6.1 كواشف الإشعاع في القياس الصناعي: كيف تعمل، وكيف يُعوَّض المصدر، وكيف تُدار السلامة

الفكرة في القياس الإشعاعي (النيوكليوني) واحدة سواء قسنا مستوى أو كثافة (القسم 12.1) أو سمكًا أو وزنًا على حزام: **مصدر غاما محكم في غلاف رصاصي بمصراع (Shutter)، ومادة تُوهِّن الإشعاع بقدر كثافتها وسمكها، وكاشف يعد ما وصل.** ما يختلف هو الكاشف والهندسة والمعايرة.

الكواشف (الشكل 9-4 أ، د): الكاشف الغازي أنبوب فيه غاز وقطبان بجهد؛ الإشعاع يؤين الغاز فتتجمع الأيونات تيارًا أو نبضة. ومع رفع الجهد يمر الكاشف بمناطق: إعادة الاتحاد (تُفقد الأيونات)، ثم **غرفة التأين** (كل الأيونات الأولية تُجمع: تيار صغير مستقر يتناسب مع الشدة)، ثم **التناسبي** (تضخيم غازي يحفظ نسبة الطاقة)، ثم **غايغر–مولر** (تفريغ كامل لكل حدث: نبضة كبيرة سهلة العد لكنها لا تميز الطاقة، وزمنها الميت طويل فتُشبع عند الشدات العالية)، ثم التفريغ المستمر (يتلف). الصناعة الحديثة تفضّل **الكاشف الوميضي** (بلورة NaI(Tl) أو بلاستيك PVT مع مضاعف ضوئي) لحساسيته العالية التي تسمح بمصدر أصغر، وتبقى غرف التأين وأنابيب غايغر في الأجهزة القديمة والمفاتيح.

الهندسة (الشكل 9-4 ب): للمفتاح: مصدر نقطي وكاشف نقطي على ارتفاع واحد. للقياس المستمر: مصدر قضيبي (أو عدة مصادر نقطية) مقابل كاشف قضيبي؛ ما يمر فوق

السطح لا يُوهَّن وما يمر تحته يُمتص، فيتناسب العدّ الكلي مع الجزء الفارغ. المعايرة موضعية: نقطتان (فارغ وممتلئ) أو أكثر، ولا يمكن نقل الجهاز إلى الورشة.

تعويض الاضمحلال (الشكل 9-4 ج): نشاط المصدر يهبط أسّيًا: $A(t) = A_0 \times 0.5^{(t/T½)}$، بعمر نصف 30.17 سنة للسيزيوم 137 و5.27 سنة للكوبالت 60. بلا تعويض يقرأ الجهاز عدًّا أقل مع السنوات فيظن أن المستوى «ارتفع» أو الكثافة «زادت». المرسلات الحديثة تعوّض بالمعادلة من تاريخ المعايرة؛ والقديمة تحتاج إلى إعادة معايرة دورية.

مثال محلول (أثر الاضمحلال):

- **المعطيات:** مقياس كثافة بمصدر Co-60 عُوير قبل 3 سنوات؛ التعويض معطل.
- **الافتراضات:** الهندسة والأنبوب لم يتغيرا؛ العلاقة خطية تقريبًا حول نقطة العمل.
- **الحل بالوحدات:** نسبة النشاط المتبقي $= 0.5^{0.5} = 0.5^{(3/5.27)}$ ≈ 0.674، أي هبط العدّ نحو 33% لسبب لا علاقة له بالمائع.
- **معنى النتيجة:** هبوط بهذا الحجم يُقرأ كثافة أعلى بكثير، وقد يوقف العملية زورًا؛ لهذا لا يُختار Co-60 إلا حيث تلزم طاقته الأعلى (جدران سميكة)، ويُفضَّل Cs-137 حيث أمكن لأن اضمحلاله السنوي نحو 2.3% فقط.

السلامة والإدارة بخطوات مرقّمة:

1. الترخيص من الجهة الناظمة للإشعاع قبل الشراء، وتسجيل كل مصدر (النظير، النشاط، الرقم التسلسلي، الموقع) في سجل المنشأة.
2. تعيين **مسؤول سلامة إشعاعية** وتدريب من يعملون بقرب المصدر، ووضع لافتات التحذير الإشعاعي ثلاثية الشفرات على الغلاف وحول المنطقة.

3. **إغلاق المصراع وقفله ووسمه** قبل أي عمل داخل الوعاء أو على الأنبوب في مسار الحزمة، والتحقق بمقياس جرعة محمول أن الحزمة أُغلقت فعلًا (المصراع قد يعلق).
4. مسح التسرب (Leak Test) دوريًا (عادة كل 6 إلى 12 شهرًا) بمسحة على سطح الغلاف وتحليلها.
5. لا تُحرك المصدر ولا تُفكك غلافه إلا بواسطة جهة مرخصة؛ والتخلص من المصدر المنتهي وفق الجهة الناظمة لا مع الخردة.
6. عند فقد قراءة الكاشف تحقق أولًا من المصراع (مغلق؟) والجهد العالي للكاشف والحرارة المحيطة (المضاعف الضوئي حساس)، ثم من هندسة التركيب (هل أُضيف عازل أو تبطين جديد في المسار؟).

للعاملين في المحطات النووية: قياس القدرة النووية يعتمد على كواشف النيوترونات (غرف الانشطار، وغرف التأين المعوّضة بالبورون، وكواشف BF_3) في ثلاثة مديات متداخلة: مدى المصدر (عد النبضات عند القدرة المنخفضة وبدء التشغيل)، والمدى المتوسط (تيار الغرفة المعوّضة على مقياس لوغاريتمي)، ومدى القدرة (غرف غير معوّضة على مقياس خطي)؛ وهي خارج نطاق هذا الكتاب، ويغطيها دليل وزارة الطاقة الأمريكية (R60) بتفصيل مناسب لمن ينتقل إلى ذلك القطاع.

الشكل 9-4: *كواشف الإشعاع في القياس الصناعي: (أ) مناطق عمل الكاشف الغازي مع الجهد (مقتبس من R60)؛ (ب) مقياس مستوى بمصدر وكاشف قضيبيين؛ (ج) اضمحلال Cs-137 وCo-60 وأثره على القراءة؛ (د) مقارنة الكواشف.*

9.7 قياس السطح الفاصل بين الزيت والماء

في الفاصل ثلاثي الأطوار (Three-Phase Separator) نحتاج إلى مستوى السائل الكلي ومستوى السطح الفاصل بين الزيت والماء (Interface Level)؛ فالأول يتحكم في صمام الزيت، والثاني في صمام الماء (القسم 5.8). الخيارات:

التقنية	شرط النجاح	الملاحظات
المُزاح	فرق كثافة كافٍ ومُزاح مغمور بالكامل	تقليدي وموثوق، مداه محدود
الرادار الموجّه	ثابت عزل السائل العلوي منخفض والسفلي مرتفع، وسماكة دنيا للطبقة العلوية	يعطي المستويين معًا؛ تتراجع دقته مع طبقات المستحلب (Emulsion)

التقنية	شرط النجاح	الملاحظات
مرسلان للضغط التفاضلي	كثافات معروفة وثابتة	يُحسب السطح الفاصل من المعادلات، ويتأثر بتغيّر الكثافة
السعوي أو القبولية الراديوية	ماء موصل وزيت عازل	جيد مع الترسبات إذا كان من نوع القبولية الراديوية
مقياس المقطع المتعدد النقاط (Profiler)	إشعاعي أو سعوي بعدة نقاط	يُظهر سُمك طبقة المستحلب؛ للفواصل الحرجة والمكلفة

كيف أختار؟ إن كان فرق الكثافة بين السائلين واضحًا والطبقة العلوية أسمك من الحد الأدنى للجهاز فالرادار الموجّه يعطي المستويين معًا ويغني عن جهازين؛ وإن كان الوسط يلوّث المجس أو الفرق في ثابت العزل ضعيفًا فالمُزاح المغمور في غرفة خارجية هو الخيار المجرَّب؛ ولا يُلجأ إلى مقياس المقطع إلا في الفواصل التي تكلّف أخطاؤها أكثر من ثمنه. ولا يُظهر الجدول أن الغرفة الخارجية للسطح الفاصل تحتاج وصلتها العليا في الطور السائل العلوي، وإلا لم يقرأ أي جهاز فيها قراءة صحيحة (القسم 9.9.1). والخطأ الأكثر كلفة شراء جهاز دقيق قبل الاتفاق مع مهندس العمليات على تعريف «السطح الفاصل» في وجود المستحلب، فيتنازع الجهاز والعينة اليدوية سنوات.

والمشكلة الحقيقية في الميدان هي أن «السطح الفاصل» ليس خطًا حادًا دائمًا، بل كثيرًا ما يكون طبقة مستحلب متغيّرة السماكة؛ فتُعطي كل تقنية قراءة مختلفة لأن كلًّا منها تعرّف الحد بطريقتها. ولذلك يُتفق مع مهندس العمليات على المعنى المطلوب قبل اختيار الجهاز.

9.8 مستوى درم المرجل: الانتفاخ والانكماش

درم المرجل أو مولّد البخار باستعادة الحرارة (HRSG) يحوي ماءً في حالة غليان تختلط به فقاعات البخار، وهذا ما يجعل قياس مستواه والتحكم فيه من أصعب الحالات في الصناعة.

الانتفاخ والانكماش (Swell & Shrink): عند زيادة الطلب على البخار فجأةً ينخفض ضغط الدرم، فتتمدد الفقاعات ويتبخر جزء إضافي من الماء، فيرتفع المستوى مؤقتًا مع أن كتلة الماء تتناقص. والمتحكم البسيط الذي يعتمد على المستوى وحده يقلّل ماء التغذية في اللحظة التي يحتاج فيها الدرم إلى زيادته. وعند انخفاض الطلب يحدث العكس. ومن هنا جاء التحكم ثلاثي العناصر (Three-Element Control) الذي يستخدم المستوى وتدفق البخار وتدفق ماء التغذية معًا (القسم 36.7).

الشكل 9-5: *توضيح نوعي للانتفاخ: بعد زيادة مفاجئة في الطلب ينخفض ضغط الدرم ويرتفع المستوى المقاس مؤقتًا، بينما تتناقص كتلة الماء الفعلية.*

تصحيح الكثافة: يقيس مرسل الضغط التفاضلي الفرقَ بين الساق المرجعية المملوءة بالمتكثف وعمودِ الماء والبخار داخل الدرم. وكثافة الماء المشبع والبخار تتغيّران كثيرًا مع

ضغط الدرم، لذلك يُحسب المستوى في نظام التحكم من فرق الضغط وضغط الدرم بجداول البخار. ومرسل معايَر على الظروف الباردة يعطي خطأً كبيرًا عند ضغط التشغيل.

المقياس الزجاجي لا يطابق الدرم تمامًا: الماء في المقياس أبرد من الماء في الدرم، فهو أكثف ويظهر مستواه أدنى من الحقيقة، ويزداد الفرق مع الضغط. لذلك لا تُضبط المرسلات لتطابق الزجاج حرفيًا دون فهم هذا الفرق.

الحماية: تشترط أكواد المراجل (مثل ASME Section I) ومواصفات المصنّعين وجود وسائل مستقلة لبيان المستوى. وفي التطبيق المعتاد تُستخدم ثلاثة مرسلات بتصويت اثنين من ثلاثة (2oo3) لفصل المرجل عند المستوى المنخفض جدًا (Low-Low Level Trip)، مع إنذار انحراف (Deviation Alarm) بين القراءات.

9.9 مفاتيح المستوى وتطبيقاتها في الحماية

النوع	المبدأ	الاستخدام
الشوكة الهزازة (Vibrating Fork)	يتغيّر تردد الاهتزاز عند الغمر	الحماية من الفيضان ومن تشغيل المضخة جافةً (Dry Run)، أغلب السوائل
العوامة (Float Switch)	حركة ميكانيكية أو مغناطيسية	المضخات والحزم البسيطة
الموصلية (Conductive)	اكتمال دائرة عبر سائل موصل	المياه والمحاليل الموصلة
البصري (Optical)	تغيّر انكسار الضوء عند الغمر	خزانات صغيرة وسوائل نظيفة
المُزاح أو العوامة الجانبية (External Cage)	طفو داخل غرفة خارجية	الفواصل ومستويات الإيقاف في التصاميم القديمة

تتجه التصاميم الحديثة في وظائف السلامة إلى استبدال المفاتيح بمرسلات مستمرة؛ لأن المرسل يُظهر قيمته طوال الوقت ويُقارَن بغيره ويُشخَّص، بينما يبقى المفتاح ساكنًا

سنوات وقد يكون عالقًا دون أن يعلم أحد (عطل خطر غير مكتشف، القسم 29.4). وتتطلب حماية الخزانات من الفيضان قياسًا مستقلًا عن مقياس التشغيل وفق API 2350 (القسم 31.11).

9.9.1 تركيب أجهزة المستوى: داخل الوعاء، أو في غرفة خارجية، أو على جسر

اختيار التقنية نصف القرار، والنصف الآخر مكان تركيب الجهاز، وأمامنا ثلاثة خيارات:

جدول مقارنة: طرق تركيب أجهزة المستوى

المعيار	داخلي (Internal)	غرفة خارجية (External Cage)	جسر / (Bridle Standpipe)
الكلفة	الأدنى	أعلى (غرفة + صمامات + فتحة إضافية)	متوسطة إذا تعددت الأجهزة
الصيانة بلا إيقاف	لا	نعم بالعزل	نعم بالعزل
عدد الفتحات في الوعاء	فتحة لكل جهاز	فتحتان لكل غرفة	فتحتان للجسر كله
نقل جهاز أو إضافته لاحقًا	يتطلب عملًا على وعاء مقنَّن	يتطلب فتحة جديدة	بتعديل العمود الأنبوبي فقط
الاضطراب والتيارات داخل الوعاء	يؤثر: تأرجح وقوى واحتكاك	معزول عنه	معزول عنه
السوائل اللزجة	الأفضل (لا أنابيب صغيرة)	مشكلة	أسوأ (أبعد عن الوعاء)
التتبع الحراري في البرد	غير مطلوب غالبًا	مطلوب	مطلوب

كيف أختار؟ اختر التركيب الداخلي للسوائل اللزجة أو حين لا تُتوقع صيانة دون إيقاف، والغرفة الخارجية حين يجب اختبار المفاتيح أو صيانة الجهاز والوحدة تعمل، والجسر حين تتعدد الأجهزة على الوعاء نفسه أو يُتوقع نقلها وإضافتها لاحقًا. ولا يُظهر الجدول أن

الغرفة والجسر يقيسان سائلًا أبرد وأهدأ مما في الوعاء، فيختلف مستواهما عنه في الأوعية الساخنة أو المغلية، ويحتاجان إلى تصريف دوري كي لا تنسد وصلاتهما السفلية. والخطأ الأكثر كلفة اقتصاد فتحة على وعاء مقنَّن بتركيب داخلي لجهاز يحتاج إلى فحص دوري، فتصير كل صيانة إيقافًا للوحدة.

قواعد التركيب الداخلي: إن كان الوعاء ذا جريان كبير فالتيارات والاضطراب تُسبّب تأرجح العوامة أو المُزاح وقوى جانبية واحتكاكًا في الدليل؛ والعلاج **أنبوب تهدئة (Stilling Well)** مثبَّت في الوعاء يحيط بالحساس بخلوص كافٍ لحركته الحرة، وبه فتحات أو شقوق كثيرة تضمن تساوي المستوى داخله وخارجه. **ولا معنى لأنبوب تهدئة بلا فتحات كافية**، فهو حينئذٍ يقيس مستواه هو. ويجب أن تتسع فوهة الوعاء لإدخال الحساس، وأن تسمح داخليات الوعاء بذلك.

قواعد الغرفة الخارجية: الغرفة وعاء صغير يتصل بالوعاء الرئيسي بفوهتين عبر صمامَي عزل علوي وسفلي، فيتساوى المستوى فيهما. وميزتها الكبرى **اختبار مفاتيح المستوى من دون تغيير مستوى الوعاء**:

1. **مفتاح المستوى المنخفض (LSL):** اعزل الغرفة عن الوعاء بالصمامين، ثم افتح صمامي التنفيس والتصريف **بحذر** فينخفض المستوى في الغرفة وحدها حتى يعمل المفتاح.
2. **مفتاح المستوى المرتفع (LSH):** أغلق الوصلة العلوية إلى الوعاء وافتح التنفيس؛ فإن كان ضغط الوعاء كافيًا دفع السائلَ صعودًا في الغرفة حتى يبلغ المفتاح فيعمل.
3. في الحالتين: أعد الصمامات إلى وضعها، وتحقق من تساوي المستوى مرة أخرى قبل الخروج، ووثّق الحالة كما وُجدت وكما تُركت.

الجسر (Bridle): عمود أنبوبي رأسي قطره 51 إلى 102 mm (2 إلى 4 بوصات) يُثبَّت على جانب الوعاء بوصلتين قرب الأعلى والأسفل عبر صمامي عزل، وتُركَّب عليه عدة

أجهزة مستوى عند مناسيبها. وهو صورة من التركيب الخارجي بمزاياه وعيوبه، وتُضاف إليه ميزتان:

- **يقلّل عدد الاختراقات في الوعاء** إلى فتحتين مهما تعدّدت الأجهزة.
- **يُنقل جهاز أو يُضاف بتعديل العمود الأنبوبي وحده**، من دون قطع أو لحام على وعاء مقنَّن — وهذه وحدها قد تبرّر الجسر في وحدة يُتوقع تعديلها.

وقواعده: **الوصلة السفلية بالوعاء تُركَّب أفقية** لتقليل الانسداد؛ ويُزوَّد الجسر بصمامي تنفيس وتصريف ليمكن تغيير مستواه مستقلًا عن الوعاء للاختبار والخدمة؛ ويُفضَّل لكل جهاز عليه صمام عزل وتصريف خاص به.

السطح الفاصل — قاعدة لا يجوز إغفالها: جهاز يقيس السطح الفاصل بين سائلين ويُركَّب خارجيًا **يجب أن تكون وصلته العليا في الطور السائل العلوي**. فجهاز وصلته العليا في طور الغاز والسفلى في الطور السائل السفلي **لن يعطي مستوى صحيحًا أبدًا**، لأن أعمدة السوائل في الغرفة لا تطابق ما في الوعاء. ولذلك يحتاج الجسر المستعمل لقياس السطح الفاصل في وعاء ثلاثي الأطوار إلى **ثلاث وصلات** حتى يجد كل طور مسارًا إلى العمود وتتعادل المناسيب مع ما في الوعاء (القسم 9.7).

زجاجات المستوى وصمامات محابسها: تُركَّب المقاييس الزجاجية بصمامات زاوية تسمّى **محابس المقياس (Gauge Cocks)**، من الفولاذ الكربوني المطروق للخدمة الهيدروكربونية العادية والمقاوم للصدأ للخدمات الأكالة. وهي نمطان: مستقيم ومنحرف (Offset)، **ويُحدَّد المنحرف عادة لأنه يسمح بتنظيف المقياس من دون فكّه**. وتُزوَّد هذه المحابس بـ**كرة الإغلاق الآلي (Ball Velocity Check)**: كرة تنجرف مع الجريان المفاجئ فتغلق المنفذ إن انكسر الزجاج، فتقلّل التسرّب إلى الجو. **وغياب كرات الإغلاق الآلي في مقياس على خدمة هيدروكربونية أو بخارية عالية الضغط ملاحظةُ مراجعة لا تفصيلًا.**

وفي السوائل اللزجة بطيئة الجريان وفي السوائل المغلية المضطربة تقلّ دقة المقياس كثيرًا؛ والحل في الحالتين واحد: **مقياس بغرفة سائل أكبر من المعتاد**، وهي متاحة في الأنماط الأنبوبية والشفافة والعاكسة.

◆ ◆ ◆

9.10 تقنيات المستوى الأخرى ودليل الاختيار الكامل

غطّينا تقنيات المستوى الرئيسية في 9.2 إلى 9.9، وتبقى تقنيات تُصادَف في الوحدات القديمة والمناجم ومصانع المواد الصلبة والمختبرات، ثم دليل الاختيار الجامع في الشكل 9-6:

التقنية	المبدأ	أين تصلح	حدودها
الفقاعي (Bubbler)	أنبوب غاطس يُنفخ فيه هواء أو نيتروجين بتدفق ثابت صغير (منظم تدفق تطهير) ويُقاس الضغط اللازم = ρgh	خزانات مفتوحة، آبار، سوائل أكالة أو لزجة أو قذرة (لا يلامس المرسل السائل)	يحتاج غاز تطهير دائم؛ يخطئ مع تغير الكثافة؛ لا يصلح للأوعية المغلقة إلا بفرع ثانٍ للفراغ
الموصلي (Conductivity Probes)	قطب أو أكثر بأطوال مختلفة تُغلق دائرة تيار متردد صغير عبر السائل الموصل	مفاتيح نقاط متعددة في مياه، مراجل صغيرة، أحواض	يحتاج توصيلية لا تقل عادةً عن بضع µS/cm بحسب الجهاز؛ الترسبات تعزل القطب أو تجسّر بينه وبين الجدار
الغشائي (Diaphragm Detector)	غشاء مرن على الجدار يدفعه ضغط المادة الصلبة أو السائل فيُغلق مفتاحًا	مفاتيح مستوى المواد الصلبة الخفيفة (حبوب، مساحيق) في القواديس	ميكانيكي؛ لا يعمل مع المواد اللزجة أو المتراصة
المجداف الدوار (Rotating Paddle)	محرك صغير يدير مجدافًا؛ عند غمره بالمادة يتوقف ويُفصل مفتاح عزم	مفاتيح عالٍ/منخفض في صوامع المواد الصلبة (إسمنت، حبوب، فحم)	يتآكل مع المواد الكاشطة؛ قد يعلق بالكتل؛ يحتاج فتحة ورأسًا واقيًا

التقنية	المبدأ	أين تصلح	حدودها
الشوكة المهتزة والقضيب المهتز	تردد الاهتزاز يتغير عند الغمر (سوائل) أو يُخمَد (مواد صلبة)	مفاتيح الحماية من الفيضان والجفاف؛ المساحيق الناعمة	الالتصاق الشديد يعطل الشوكة؛ لا تصلح مقياسًا مستمرًا
الميكروويف والبصري كمفاتيح	شعاع ميكروويف بين مرسل ومستقبل يُحجب بالمادة؛ أو منشور بصري يفقد الانعكاس الداخلي عند الغمر	مفاتيح بلا تلامس عبر جدران غير معدنية؛ سوائل نظيفة في خزانات صغيرة	الغبار والرطوبة على النوافذ؛ اللزوجة تعمي المنشور
الحراري (Thermal Dispersion)	عنصر مسخّن يبرد أسرع في السائل منه في الغاز (كما في مفتاح التدفق الحراري)	مفاتيح مستوى وسطح فاصل (فرق تبريد بين الزيت والماء) وكشف تدفق	بطيء نسبيًا؛ يتأثر بتغير حرارة العملية
الشريط المقاوم (Resistance Tape)	شريط مغلف يضغطه رأس السائل فيتلامس موصلاه، والمقاومة تتناسب مع الطول غير المغمور	خزانات مياه وزيوت خفيفة بسيطة	حساس للثقوب والرطوبة؛ نادر اليوم
عصا القياس وأنبوب الانزلاق (Dipstick / Slip Tube)	قياس يدوي بشريط أو عصا معايرة، أو أنبوب ينزلق حتى يخرج منه السائل	تحقق دوري ومعايرة القياس الآلي؛ خزانات الديزل والزيوت	السلامة (فتح فتحة على خزان مضغوط أو سام)، وأنبوب الانزلاق ممنوع في خزانات LPG في كثير من اللوائح

التقنية	المبدأ	أين تصلح	حدودها
الشريط المؤازر (Servo Tape Gauge)	مُزاح صغير معلق بشريط مقاس يتبعه محرك خادم ليبقى على السطح، ويحسب المستوى من طول الشريط	قياس الخزانات التجاري (ATG) بدقة ±1 mm مع الرادار عالي الدقة؛ يقيس أيضًا السطح الفاصل والكثافة بالغمر التدريجي	أجزاء متحركة؛ يحتاج بئرًا واقيًا وتحققًا دوريًا
الليزر	زمن الرحلة أو التثليث بشعاع ليزر	مواد صلبة ذات زوايا ميل، خزانات طويلة ضيقة، سوائل غير عاكسة للرادار	الغبار والبخار والرغوة تشتت الشعاع؛ الأسطح اللامعة
الإشعاعي (Nuclear)	مصدر جاما وكاشف على الجدار الخارجي؛ يزداد التوهين أسّيًا مع سمك المادة وكثافتها	الأوعية التي لا يمكن اختراقها (مفاعلات، أفران، ملاط، ضغط وحرارة قصوى)	ترخيص وحماية إشعاعية؛ التكلفة؛ يتأثر بتغير الكثافة والبنية الداخلية

دليل الاختيار الجامع: يبين الشكل 9-6 مصفوفة مبسطة للتطبيق والاختيار: صفوف التقنيات مقابل أعمدة الخدمة (سائل نظيف، سائل لزج أو قذر، سطح فاصل، رغوة، بخار متكثف، مواد صلبة حبيبية، مواد صلبة مسحوقة، ضغط وحرارة قصوى، محاسبة تجارية، وظيفة حماية) بثلاث درجات: مناسب، ممكن بشروط، غير مناسب.

الشكل 9-6: *مصفوفة اختيار تقنية المستوى بحسب الخدمة: أخضر مناسب، أصفر ممكن بشروط، أحمر غير مناسب؛ تُستكمل بالقسم 27.3 وبالخبرة الميدانية للمصنع.*

جدول مقارنة: الطرق الأربع الأكثر تنافسًا في قياس المستوى المستمر

المعيار	الضغط التفاضلي (DP)	الرادار الموجّه (GWR)	الرادار غير التلامسي	فوق الصوتي
تأثير الكثافة	يؤثر مباشرة (يقيس ضغطًا)	لا	لا	لا

المعيار	الضغط التفاضلي (DP)	الرادار الموجّه (GWR)	الرادار غير التلامسي	فوق الصوتي
البخار والضغط والحرارة العالية	يعمل مع الحواجز والملء	جيد؛ بخار الماء العالي يحتاج تعويض ثابت العزل	جيد؛ فوهة مناسبة	لا يصلح (سرعة الصوت تتغير، الفراغ)
الرغوة والاضطراب	لا يتأثر	يتأثر قليلًا	يتأثر (فقد الإشارة)	يتأثر بشدة
السطح الفاصل	نعم بمرسلين أو بكثافتين	نعم إن اختلف ثابت العزل	لا	لا
الأجزاء داخل الوعاء	لا (مأخذان)	مجس على كامل المدى	لا (هوائي في الفوهة)	لا
الدقة النموذجية	±0.5 إلى 1% من المدى	±3 mm	±2 mm	±5 mm
نقطة الضعف الميدانية	خطوط نبض، تغير الكثافة	التصاق المادة على المجس، الترسبات	الفوهات الطويلة، العوائق الداخلية	الغبار، التكثف على الحساس
أفضل استخدام	الأوعية المضغوطة والمراجل (الدرم)	السوائل والسطوح الفاصلة والصوامع الصغيرة	الخزانات والصهاريج والمواد الصلبة	الخزانات الجوية والقنوات المفتوحة

كيف أختار؟ الضغط التفاضلي حين يكون الوعاء مضغوطًا أو ساخنًا والكثافة معلومة أو معوَّضة؛ والرادار الموجّه حين تلزم دقة ملّيمترية أو سطح فاصل أو فتحة ضيقة والوسط لا يلتصق بالمجس؛ والرادار غير التلامسي للخزانات الكبيرة والأوساط الأكالة أو اللزجة حيث لا يُراد شيء داخل الوعاء؛ وفوق الصوتي حيث الوعاء جوي والوسط ماء والميزانية محدودة. ولا يُظهر الجدول أن الدقة المكتوبة دقة الجهاز لا دقة النظام: فالضغط التفاضلي يخسرها مع تغير الكثافة، والرادار مع الرغوة أو الفوهة الطويلة، وفوق الصوتي مع تغير حرارة الغاز. والخطأ الأكثر كلفة اختيار الرادار غير التلامسي لأنه «الأحدث» على

فوهة طويلة ضيقة أو فوق سائل منخفض ثابت العزل مع رغوة، فيفقد الإشارة في اللحظة التي تهم.

9.11 من المستوى إلى الحجم والكتلة: جداول المعايرة وحجوم الأوعية

قراءة المستوى ليست غاية؛ المطلوب في المحاسبة والجرد والتحكم بالمخزون هو **الحجم** ثم **الكتلة**. وتُستخدم لذلك:

- **جداول معايرة الخزان (Strapping/Calibration Tables):** لكل خزان أسطواني رأسي جدول (الحجم لكل مليمتر) يُعدّ بقياس محيط الخزان عند عدة ارتفاعات (API MPMS الفصل 2) أو بالمسح الليزري، ويراعي انتفاخ الجدار بالضغط الهيدروستاتيكي وتمدده بالحرارة وحجم التجهيزات الداخلية (السلالم، اللفائف) والسقف العائم. ويُدخل الجدول في نظام قياس الخزانات (Tank Gauging System) الذي يجمع المستوى والحرارة (متوسط حرارة متعددة النقاط) والكثافة أو الضغط الهيدروستاتيكي فيحسب الحجم الإجمالي القياسي (GSV) والكتلة (API MPMS 3 و7 و12).
- **الأوعية الأفقية والكروية:** العلاقة بين المستوى والحجم غير خطية بشدة، والشكل 9-7 يبين منحنى الحجم لوعاء أفقي: عند منتصف الوعاء يعطي كل سنتيمتر من المستوى أكبر حجم، وعند القاع والقمة أقل. حجم الجزء الأسطواني عند مستوى h في وعاء قطره D وطوله L:

$$V = L \times \left[(D^2/4) \times \arccos(1 - 2h/D) - (D/2 - h) \times \sqrt{(h(D - h))} \right]$$

وتُضاف رؤوس الوعاء (Heads) بمعادلاتها الخاصة: البيضوية 2:1، ونصف الكروية، والكروية الحلقية (Torispherical)؛ وهي في مراجع تصميم الأوعية وبرامجها. ويُدخل المنحنى في نظام التحكم كجدول خطي متعدد الشرائح (Characterizer) حين تكون الحاجة إلى الحجم لا المستوى (مثلًا لحساب زمن البقاء في الفواصل أو لإنذارات الجرد).

مثال محلول: وعاء أفقي $D = 2\ m$ و$L = 6\ m$ (بلا رؤوس)، والمطلوب الحجم عند $h = 0.5\ m$.

- الحد الأول: $(D^2/4) \times \arccos(1 - 2h/D) = (4/4) \times \arccos(1 - 0.5) = (4/4) \times \arccos(0.5) = (4/4) \times 1.047 = 1.047$.
- الحد الثاني: $(D/2 - h) \times \sqrt{(h(D - h))} = (1 - 0.5) \times \sqrt{(0.5 \times 1.5)} = 0.5 \times 0.866 = 0.433$.
- مساحة المقطع المبتل: $1.047 - 0.433 = 0.614\ m^2$.
- الحجم: $V = L \times$ المساحة $= 6 \times 0.614 = 3.68\ m^3$.
- النتيجة: $3.68\ m^3$ من أصل $18.85\ m^3$ (19.6%) مع أن المستوى 25% من القطر؛ وعند $h = 1.0\ m$ الحجم نصف السعة تمامًا $9.42\ m^3$.
- التفسير: قراءة «25%» على مرسل المستوى تعني نحو 19.6% من الحجم؛ ومن يضبط إنذار المخزون على النسبة المئوية للمستوى يخطئ في الحجم بهذا القدر.

الشكل 9-7: *منحنى الحجم مقابل المستوى لوعاء أفقي أسطواني: العلاقة غير خطية، وميلها (الحجم لكل سنتيمتر) أكبر ما يكون عند المنتصف؛ ويُدخل المنحنى في نظام التحكم كجدول تخطيط.*

9.12 حالة ميدانية: ساق مرجعية فارغة ومستوى «مطمئِن»

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

بعد أعمال صيانة على مولّد بخار باستعادة الحرارة، صُرّفت الساق المرجعية لأحد المرسلات ولم تُملأ قبل التشغيل. ومع البدء أظهر ذلك المرسل مستوًى أعلى من المرسلين الآخرين بكثير. السبب أن الجانب المنخفض فقد عمود الماء المرجعي، فزاد فرق الضغط، وفرق الضغط الأكبر يعني في مدى مرفوع الصفر مستوًى أعلى. وهذا أخطر أنواع الأعطال؛ لأن المرسل يطمئن المشغل بأن الماء وفير بينما قد يكون الدرم يقترب من الجفاف. أنقذ الموقفَ تصويتُ اثنين من ثلاثة وإنذارُ الانحراف الذي نبّه المشغل، فعُزل المرسل ومُلئت ساقه وتُرك حتى يستقر، ثم عاد إلى الخدمة.

الدروس: تعبئة السيقان المرجعية خطوة مكتوبة إلزامية في إجراء إعادة التشغيل؛ وإنذار الانحراف بين المرسلات المتكررة ليس ترفًا؛ ويجب أن يعرف كل مهندس اتجاه الخطأ الذي يسببه كل عطل في التركيب الذي يعمل عليه.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
الاختيار	الطريقة المباشرة أو الاستنتاجية بحسب تغير الكثافة وثابت العزل والرغوة، ومعنى السطح الفاصل بالاتفاق مع مهندس العمليات	يطابق طول المجس أو المُزاح والوصلات مع مخطط المستوى (القسم 27.8)
التصميم	مدى المرسل وإشارة LRV، وطريقة التركيب (داخلي أو غرفة أو جسر)، ونقاط الإنذار خارج المناطق الميتة	يتحقق من الارتفاع المرجعي بالقياس الفعلي لا من الرسومات
الساق الرطبة	يكتب تعبئتها خطوة إلزامية في إجراء إعادة التشغيل	يملأ الساق ويتحقق منها بعد كل صيانة، ويختبر اتجاه القراءة عند التشغيل الأول
الحماية	التصويت (2oo3) وإنذار الانحراف وفترة اختبار المفاتيح	يختبر المفاتيح في الغرفة الخارجية دون تغيير مستوى الوعاء
المصادر المشعة	الترخيص وتعيين مسؤول السلامة الإشعاعية	يغلق المصراع ويقفله، ويتحقق بمقياس الجرعة قبل العمل

9.13 الأخطاء الشائعة

- اختيار طريقة استنتاجية لسائل تتغيّر كثافته دون تعويض.
- حساب مدى مرسل الساق الرطبة دون مراعاة كثافة سائل الساق أو موقع المرسل.

- تشغيل المرسل والساق المرجعية غير مملوءة.
- مطابقة مرسل الدرم مع المقياس الزجاجي حرفيًا.
- رادار غير ملامس على سائل منخفض ثابت العزل أو فوق رغوة كثيفة دون أنبوب تهدئة.
- رادار موجّه تقع نقاط إنذاره داخل المنطقة الميتة.
- فوق صوتي في وعاء مضغوط أو ممتلئ بالأبخرة.
- مفتاح مستوى للحماية لا يُختبر دوريًا.
- الاعتماد على مستوى السطح الفاصل دون الاتفاق على معناه في وجود المستحلب.
- عكس وصلتي مرسل DP في وعاء مغلق، فتنخفض القراءة كلما ارتفع المستوى (القسم 9.3).
- جهاز سطح فاصل خارجي وصلته العليا في طور الغاز لا في الطور السائل العلوي (القسم 9.9.1).
- ضبط إنذارات المخزون في وعاء أفقي على نسبة المستوى بدل الحجم (القسم 9.11).

9.14 ملخص

المستوى يُقاس مباشرةً أو استنتاجًا. والضغط التفاضلي هو الأكثر شيوعًا، لكنه يحتاج إلى فهم الساق الجافة والرطبة ورفع الصفر وكبته وأثر الكثافة. والرادار بنوعيه لا يتأثر بالكثافة ويتأثر بثابت العزل، والرادار الموجّه خيار قوي للسطح الفاصل. أما درم المرجل فله قواعده الخاصة: الانتفاخ والانكماش، وتصحيح الكثافة بالضغط، والتحكم ثلاثي العناصر، والتصويت بين المرسلات.

وفي الفصل التالي: الفصل 10 «المحللات الصناعية وأنظمة أخذ العينات»؛ فبعد المتغيرات الفيزيائية الأربعة ننتقل إلى قياس تركيب المادة نفسها، وهو ما يحتاجه تعويض الكثافة والقياس التجاري وضبط جودة المنتج.

9.15 أسئلة التقييم الذاتي

1. خزان مفتوح به سائل كثافته $1050\ kg/m^3$، ومرسل الضغط مركّب أسفل القاع بـ 0.4 m. احسب مدى المرسل لمستوى من 0 إلى 5 m.
2. في المثال المحلول في 9.3، ما المدى إذا مُلئت الساق الرطبة بجلايكول كثافته $1110\ kg/m^3$؟
3. اشرح الفرق بين رفع الصفر (Zero Elevation) وكبت الصفر (Zero Suppression) بمثال لكل منهما.
4. لماذا يرتفع مستوى الدرم مؤقتًا عند زيادة الحمل فجأة؟ وكيف يعالج التحكم ثلاثي العناصر هذه الظاهرة؟
5. متى تختار الرادار الموجّه بدل الرادار غير الملامس؟
6. ما شرطا نجاح قياس السطح الفاصل بالرادار الموجّه؟
7. لماذا يُظهر المقياس الزجاجي للدرم مستوًى أدنى من المستوى الحقيقي؟
8. ما متطلبات استخدام مقياس مستوى إشعاعي من حيث التراخيص والسلامة والمعايرة؟
9. قارن بين مفتاح المستوى والمرسل المستمر في وظيفة إيقاف من حيث اكتشاف الأعطال.
10. في الحالة 9.12، لو كان التصويت واحدًا من اثنين (1oo2) على المستوى المنخفض، هل كانت الحماية ستعمل؟ ولماذا؟

مراجع الفصل: المسودة v0.1 (الفصل 9)؛ تصنيف الطرق المباشرة والاستنتاجية والمقاييس الزجاجية والمغناطيسية والعوامات ومقاييس الخزانات (دورة

Instrumentation and Process Control)؛ حساسات مستوى السوائل وأثر تغيّر الكثافة والرغوة (Shardt، Automation Engineering)؛ مبدأ الرادار الموجّه وأنواع المجسات وحدوده (Emerson، Guided Wave Radar – مرجع إلكتروني)؛ المعايرة الموضعية لمقاييس المستوى الإشعاعية وأنظمة قياس الخزانات (I&C Commissioning Instruction، MAPNA/Monenco)؛ ASME Section I؛ API 2350؛ R51 (Field Instrumentation، قسم أخطاء نظام قياس المستوى)؛ R54 (مخطط المستوى، القسم 27.8)؛ R60 (DOE Fundamentals Handbook، الوحدتان 3 و6: تعويض الكثافة وكواشف الإشعاع، 9.6.1)؛ وR64 (مبادئ الأجهزة: تركيب أجهزة المستوى على جسر، 9.9.1).

الفصل 10: المحللات الصناعية وأنظمة أخذ العينات

> **لمن هذا الفصل:** مهندس الموقع والصيانة، ومهندس التصميم الذي يحدد متطلبات المحللات. فالمحلل (Analyzer) هو الجهاز الذي يقيس «ما هي المادة» لا «كم منها»، وهو في الغالب الأغلى ثمنًا والأكثر حاجةً إلى الرعاية بين أجهزة القياس.
>
> **الفكرة الأساسية:** معظم أعطال المحللات ليست في المحلل نفسه، بل في العينة التي تصل إليه. فإذا تأخرت العينة أو تغيّر تركيبها في الطريق، حلّل الجهاز بدقة عالية مادةً لا تمثل العملية.

10.1 مكونات نظام التحليل

يتكون نظام التحليل الاستخلاصي (Extractive Analyzer System) من سلسلة متصلة، وكل حلقة فيها قد تُفسد النتيجة:

الشكل 10-1: *مكونات نظام التحليل الاستخلاصي من نقطة الأخذ إلى المحلل ثم إلى التصريف، مع الحلقة السريعة.*

وفيما يلي وظيفة كل حلقة في هذه السلسلة:

- **مجس أخذ العينة (Sample Probe):** يدخل إلى منتصف الأنبوب تقريبًا لتجنب السوائل والشوائب المتجمعة على الجدار، ويُركَّب من أعلى الأنبوب في خطوط الغاز. وقد يكون قابلًا للسحب (Retractable) دون إيقاف، ويُتحقق حسابيًا من مقاومته الميكانيكية للاهتزاز كما في الغمد الحراري.
- **خط النقل (Transport Line):** أنبوب دقيق من الفولاذ المقاوم للصدأ، قصير قدر الإمكان، ومسخَّن بالتتبع (Heat Tracing) حين يُخشى التكثف.
- **الحلقة السريعة (Fast Loop):** تدفق كبير يُدار من العملية وإليها، لتبقى العينة قرب المحلل حديثة، بينما يسحب المحلل جزءًا صغيرًا منها.
- **تهيئة العينة (Sample Conditioning):** مرشحات، وفاصلات للسوائل (Coalescers)، ومنظمات ضغط، ومبردات، ومقاييس تدفق (Rotameters)، لتصل العينة بالضغط والحرارة والتدفق التي يتطلبها المحلل.

- **تبديل التيارات (Stream Switching):** حين يخدم محلل واحد عدة تيارات، تُستخدم صمامات بترتيب العزل المزدوج مع التنفيس (Double Block & Bleed) حتى لا يتسرب تيار إلى آخر.
- **التصريف:** إلى العملية أو إلى الشعلة أو إلى الجو بأمان. والضغط الخلفي في خط التصريف يغيّر ضغط خلية القياس والنتيجة، لذلك كثيرًا ما تُصرَّف محللات الغاز إلى الجو عبر منفذ محمي، أو يُعوَّض تغيّر الضغط الجوي.

10.2 زمن تأخر العينة

زمن النقل تقريبًا: t = V / Q، حيث V حجم الخط والمكونات، وQ التدفق **عند ضغط الخط نفسه**. وهذا الشرط الأخير هو موضع الخطأ الشائع في الغازات.

مثال محلول: خط نقل طوله 30 m من أنبوب ¼" بسماكة 0.035" (القطر الداخلي نحو 4.57 mm، والمساحة نحو 16.4 mm²). حجم الخط

$$= 30 \times 16.4 \times 10^{-6}\ \text{m}^3 \approx 0.49\ \text{L}.$$

- عند ضغط خط 10 barg (11 bara) ومقياس تدفق في التصريف يُظهر 1 L/min عند الضغط الجوي:
  - التدفق الفعلي داخل الخط = التدفق المقيس ÷ نسبة الضغط المطلق = 0.091 L/min = 1/11.
  - زمن التأخر = V / Q ≈ 0.49 / 0.091 ≈ 5.4 دقيقة.
- إذا خُفض الضغط إلى 1 barg عند نقطة الأخذ (منظم عند المجس)، يصبح التدفق الفعلي 0.5 L/min، وزمن التأخر نحو دقيقة واحدة.

يُضاف إلى زمن النقل حجمُ المرشحات والأوعية، وزمنُ دورة المحلل نفسه (قد يبلغ عدة دقائق في الكروماتوغراف). والمحلل الذي يدخل في حلقة تحكم يحتاج زمن استجابة كليًا قصيرًا مقارنةً بديناميكا العملية، وإلا صار زمنًا ميتًا يُفسد الحلقة. وزيادة سرعة تحديث الشاشة لا تُنقص زمن التأخر ثانية واحدة.

الشكل 10-2: *زمن النقل في خط المثال بدلالة ضغطه؛ خفض الضغط عند المجس من 10 إلى 1 barg يقصّر التأخر من نحو 5.4 إلى نحو دقيقة واحدة.*

10.3 المحافظة على تمثيل العينة

العينة التمثيلية (Representative Sample) هي التي تصل إلى المحلل بتركيبها الأصلي. وأكثر ما يهدّدها:

الظاهرة	الأثر	الوقاية
التكثف (Condensation)	تسقط المكونات الثقيلة أو الماء فتنخفض قراءتها	تسخين الخطوط فوق نقطة الندى بهامش كافٍ
التبريد عند خفض الضغط (تأثير جول–تومسون، Joule–Thomson)	تكثف أو تجمد في المنظم	منظمات مسخَّنة، وخفض الضغط على مراحل
الامتصاص والامتزاز (Adsorption)	تلتصق H_2S والرطوبة بالجدران فتتأخر الاستجابة وتنخفض القراءة	أنابيب مطلية معالَجة ومواد مناسبة

الظاهرة	الأثر	الوقاية
التسرب من الجو	دخول أكسجين أو رطوبة إلى عينة منخفضة الضغط	اختبار تسرب دوري
التفاعل الكيميائي	تغيّر التركيب قبل التحليل	تقصير الزمن، واختيار المواد
المسارات الميتة (Dead Legs)	عينة قديمة تختلط بالجديدة	تصميم بلا جيوب، وتنظيف بالتدفق

ويجمع الشكل 10-3 هذه المتطلبات في نظام أخذ عينات كامل: مجس يمتد إلى وسط الجريان بعيدًا عن الجدار، وصمام عزل أول عند المجس، وخط عينة مسخّن ومعزول، وفي غرفة المحلل منظم ضغط ومرشح تجميعي وفاصل سوائل ومقياس تدفق، وحلقة سريعة تعيد فائض العينة إلى العملية، ومدخل لغاز المعايرة عند أقرب نقطة إلى المجس حتى تشمل المعايرةُ أكبر جزء من النظام.

الشكل 10-3: *مخطط لنظام أخذ عينات كامل: المجس وصمام العزل الأول على الأنبوب، وخط العينة المسخّن، ثم في غرفة المحلل منظم الضغط والمرشح وفاصل السوائل ومقياس التدفق والمحلل، مع الحلقة السريعة ومدخل غاز المعايرة.*

10.4 محللات الغاز

الكروماتوغراف الغازي (Gas Chromatograph – GC): يحمل غازٌ حامل (Carrier Gas) كالهيليوم أو النيتروجين حجمًا صغيرًا من العينة عبر أعمدة فصل (Columns)؛ فتخرج المكونات بأزمنة مختلفة ويكشفها كاشف التوصيل الحراري (TCD) أو كاشف التأين باللهب (FID). النتيجة تركيب كامل للغاز، تُحسب منه القيمة الحرارية والكثافة النسبية ومؤشر ووب (Wobbe Index) وفق ISO 6976، ويُغذَّى به حساب معامل الانضغاطية في القياس التجاري. زمن دورته دقائق، ويُعايَر بغاز معايرة معتمد الشهادة.

الشكل 10-4: *مبدأ الكروماتوغراف الغازي: صمام حقن يُدخل حجمًا ثابتًا من العينة في تيار الغاز الحامل، وعمود الفصل في فرن بحرارة ثابتة يؤخر كل مكوّن بقدر مختلف، والكاشف يعطي قممًا تدل أزمنة احتباسها على هوية المكوّن ومساحاتها على تركيزه.*

الأكسجين (Oxygen):

- **الزركونيا (Zirconia):** خلية سيراميكية ساخنة تولّد جهدًا تبعًا لنسبة الأكسجين بين الغاز والهواء المرجعي. تُركَّب موضعيًا (In-situ) في مداخن الأفران والمراجل لضبط نسبة الهواء إلى الوقود. وهو المبدأ نفسه في حساس لامدا (Lambda Sensor) بالسيارات، الذي قد يتلف بالتسمم (Poisoning) من المواد الغريبة في العادم.

- **البارامغناطيسي (Paramagnetic):** يستغل انجذاب الأكسجين المغناطيسي؛ دقيق ومنتقٍ للعينات النظيفة المستخلَصة.
- **الكهروكيميائي (Electrochemical):** للتراكيز الضئيلة (ppm) في الغازات الخاملة، وللنسب المئوية في أجهزة السلامة والمحمولة، وله عمر محدود.

الأشعة تحت الحمراء غير المشتتة (NDIR): كل غاز يمتص أطوالًا موجية مميزة، فيُستخدم لـ CO وCO_2 وCH_4. وتستخدم محللات الانبعاثات كذلك اللمعان الكيميائي (Chemiluminescence) لأكاسيد النيتروجين والأشعة فوق البنفسجية (UV) لثاني أكسيد الكبريت.

كبريتيد الهيدروجين (H_2S): شريط أسيتات الرصاص (Lead Acetate Tape) الذي يسودّ بقدر التركيز، أو محللات UV والليزر. ويجب التمييز بين **محلل العملية** الذي يقيس H_2S داخل الغاز بوحدة ppm، و**كاشف الغاز** الذي يحمي الأشخاص في الهواء المحيط (القسم 30.5).

الشكل 10-5: *أربعة مبادئ شائعة في محللات الغاز: الامتصاص في الأشعة تحت الحمراء لغازات مثل CO و CO_2 و CH_4، والخلية البارامغناطيسية للأكسجين، وخلية الزركونيا الساخنة للأكسجين في المداخن بجهد نرنست، والليزر النافذ TDLAS لقياس مكون واحد بلا تداخل وعبر الأنبوب مباشرة.*

10.5 الرطوبة ونقطة الندى

تُعرَف نقطة الندى (Dew Point) بأنها الحرارة التي يبدأ عندها تكثف بخار الماء إذا بُرّد الغاز عند ضغط ثابت. وهي تتغيّر مع الضغط؛ لذلك تُذكر دائمًا مع ضغطها، كما في متطلبات هواء الأجهزة (القسم 25.8.2). ومن المصطلحات المرتبطة: الرطوبة النسبية (Relative Humidity) وهي نسبة الضغط الجزئي لبخار الماء إلى ضغط التشبع، والرطوبة المطلقة (Absolute Humidity) وهي كتلة بخار الماء في وحدة حجم من الغاز (g/m^3)، ونسبة الخلط (Mixing Ratio) وهي كتلة الماء لكل كتلة من الغاز الجاف.

التقنية	المبدأ	الاستخدام
المرآة المبردة (Chilled Mirror)	تبريد مرآة حتى ظهور الندى	مرجع للمعايرة والمختبرات
أكسيد الألومنيوم والبوليمر (Capacitive)	تغيّر سعة طبقة ماصّة للماء	هواء الأجهزة، المجففات، الغازات النظيفة
بلورة الكوارتز (Quartz Crystal)	تغيّر تردد بلورة مغطاة بمادة ماصّة	التراكيز الضئيلة
الليزر الماسح للامتصاص (TDLAS)	امتصاص ضوئي انتقائي للماء	محتوى الماء في الغاز الطبيعي (mg/Sm^3)، سريع وقليل الانجراف

كيف أختار؟ لهواء الأجهزة والمجففات والغازات النظيفة يكفي الحساس السعوي لرخصه، بشرط معايرة سنوية؛ وللغاز الطبيعي المحاسبي أو الحامض حيث يلزم قياس سريع مستقر فالليزر؛ وللتراكيز الضئيلة جدًا بلورة الكوارتز؛ والمرآة المبردة مرجع تحقق ومختبر لا جهاز عملية. ولا يُظهر الجدول التداخلات: الجلايكول والميثانول والأمينات تفسد السعوي، والقطرات والغبار تعمي البصري، ولذلك يُقرأ التركيب الكامل للغاز قبل اختيار المبدأ. والخطأ الأكثر كلفة تركيب حساس سعوي على غاز فيه جلايكول أو أمين من وحدة تجفيف، ثم الوثوق بقراءته التي تنجرف بصمت نحو «جاف» بينما الخط يحمل ماء.

وكل حساس تركيز له حساسية متقاطعة (Cross-Sensitivity) تجاه مواد أخرى؛ فالجلايكول والميثانول مثلًا قد يؤثران في بعض حساسات الرطوبة. ولذلك يُختار المبدأ بعد معرفة التركيب الكامل للوسط لا المكوّن المقيس وحده.

10.6 محللات السوائل ومحللات المياه والبخار

المحلل	المبدأ	أهم التطبيقات	نقاط الصيانة
الأس الهيدروجيني (pH)	قطب زجاجي مع قطب مرجعي	مياه التغذية، المعالجة، الصرف	معايرة بمحاليل منظّمة (Buffers) عند 4 و7 و10، وتعويض حراري، واستبدال القطب المتقادم
التوصيلية (Conductivity)	تلامسية بأقطاب، أو حثيّة حلقية (Toroidal) للمحاليل الموصلة جدًا	نقاء الماء والبخار، التركيز	ثابت الخلية، والتعويض إلى 25 °C
التوصيلية بعد التبادل الكاتيوني (Cation Conductivity)	العينة تمر براتنج يزيل أثر الأمونيا فتكشف الأملاح والأحماض	بخار التوربينات ومياه التغذية	استبدال الراتنج قبل استنفاده
الأكسجين المذاب (Dissolved Oxygen)	كهروكيميائي أو ضوئي (Optical)	نزع الهواء من مياه التغذية (ppb)	تسرب الهواء إلى خط العينة يفسد القراءة
السيليكا (Silica)	لوني (Colorimetric) بكواشف كيميائية	حماية شفرات التوربين البخاري من الترسبات	تجديد الكواشف، زمن دورة طويل
الصوديوم (Sodium)	قطب انتقائي للأيونات	كشف تسرب ماء التبريد في المكثفات	معايرة متكررة
العكارة (Turbidity)	تشتت الضوء	مياه الشرب والمعالجة	تنظيف النوافذ البصرية

المحلل	المبدأ	أهم التطبيقات	نقاط الصيانة
الزيت في الماء (Oil-in-Water)	فلورة بالأشعة فوق البنفسجية أو تشتت	تصريف الماء المصاحب في المنصات	المقارنة بالمختبر وتنظيف الخلية

قياس pH وORP بتفصيل أكبر (R51): الأس الهيدروجيني هو سالب لوغاريتم نشاط أيون الهيدروجين، ولا معنى لقراءته إلا في المحاليل المائية. ويتكوّن المجس من قطبين في غلاف واحد، ومعهما حساس حرارة:

- **قطب القياس الزجاجي:** بصيلة رقيقة الجدار مملوءة بمحلول منظّم معروف pH (عادة pH 7 مع KCl)، وفيها سلك فضة/كلوريد فضة. واختلاف نشاط H^+ بين داخل البصيلة وخارجها يولّد جهدًا مقداره **59.2 mV لكل وحدة pH عند 25 °C** (معادلة نرنست). ولأن الزجاج عازل، يجب أن يكون رقيقًا جدًا، ويُقرأ الجهد بمضخم ذي ممانعة دخول عالية جدًا.
- **القطب المرجعي** (مشترك بين pH وORP): يعطي جهدًا ثابتًا لا يتأثر بـ pH. وهو سلك فضة في عجينة كلوريد فضة يلامس محلول KCl مشبعًا، ويتصل بالعملية عبر **وصلة سائلة** (Liquid Junction) من خزف مسامي تسرّب KCl ببطء إلى العملية. لذلك يحتاج النوع القابل لإعادة التعبئة إلى تعويض دوري من فوهة مخصصة، وتبقيه بلورات KCl الصلبة في القاع مشبعًا.
- **التعويض الحراري:** ميل نرنست يتغير مع الحرارة، فيحوي المجس مقاومة حرارية (Pt100 أو Pt1000) تصحح ميل القطب عند حرارة العينة الفعلية.

أما **ORP** (جهد الأكسدة والاختزال) فقطب قياسه سلك بلاتين مكشوف، وتُقرأ نتيجته بالملي فولت: موجبة للمحاليل المؤكسدة وسالبة للمختزلة. ويُستخدم في معالجة المياه (الكلورة، وإزالة الكروم والسيانيد)، وفي متابعة التفاعلات الحيوية في معالجة مياه الصرف (النترجة ونزعها). **الأسلاك:** مع مضخم أولي داخل المجس يمكن إبعاد المحلل

حتى نحو 150 m، ومن دونه لا تتجاوز المسافة نحو 15 m، ويُستخدم كابل المصنّع المحجوب تحديدًا.

الشكل 10-6: *مجس pH المركّب ومعادلة نرنست: قطب زجاجي بمحلول منظّم داخلي 7 pH، وقطب مرجعي Ag/AgCl في KCl مشبع بوصلة سائلة، ومقاومة حرارية للتعويض؛ والجهد يتغير نحو 59.2 mV لكل وحدة pH عند 25 °C، ويزداد الميل مع الحرارة.*

خطوات معايرة محلل pH ميدانيًا:

1. أخرج المجس من العملية (أو اعزل خط العينة) واشطفه بماء منزوع الأيونات وجففه بالتربيت لا بالمسح.
2. تحقق من مستوى إلكتروليت المرجع ونظافة الوصلة السائلة، وأزل أي ترسبات بفرشاة ناعمة أو محلول مخفف يوصي به المصنّع.
3. اغمر المجس في محلول منظّم 7 pH (أقرب إلى نقطة الصفر) وانتظر الاستقرار (عادة 1 إلى 2 دقيقة)، واضبط الانحياز (Offset/Zero) في المحلل.

4. اشطف ثم اغمر في محلول منظّم ثانٍ قريب من مدى العملية (4 pH للأحماض أو 10 pH للقواعد) واضبط الميل (Slope).
5. اقرأ الميل الذي يحسبه المحلل بالنسبة من 59.2 mV/pH: **95 إلى 102% مقبول؛ و90 إلى 95% مقبول مع تقصير فترة المعايرة ومتابعة الاتجاه؛ وأقل من 90% يعني قطبًا متقادمًا يُستبدل**؛ وسجل الانحياز (يجب أن يبقى ضمن ±30 mV).
6. تحقق من حساس الحرارة بمقارنة قراءته بميزان حرارة مرجعي في المحلول نفسه.
7. أعد المجس إلى العملية وقارن قراءته بعينة مختبرية معاصرة؛ وسجل النتائج والتاريخ والميل في بطاقة المجس لمتابعة اتجاه التقادم.
8. اضبط فترة المعايرة على أساس الاتجاه (أسبوعيًا في المياه القذرة أو الساخنة، وشهريًا في المياه النقية)، ولا تعاير بمحاليل منظّمة منتهية الصلاحية أو مفتوحة منذ زمن لأن CO_2 الجوي يغيّر 10 pH خاصة.

لوح تحليل البخار والماء (Steam and Water Analysis System – SWAS): في محطات الدورة المركبة تُجمع عينات البخار ومياه التغذية وماء الدرم (Drum) والمتكثف في لوح واحد. تمر كل عينة بمبرد يخفض حرارتها إلى نحو 25 °C، ثم بمخفض ضغط، ثم بصمام حماية يغلق إذا ارتفعت الحرارة بسبب انقطاع ماء التبريد، لأن العينة الساخنة تتلف الأقطاب وتشكل خطرًا على الفنيين.

ونعود هنا إلى محللات الغاز بجدولين يلخصان ما عُرض في القسم 10.4 ويعينان على الاختيار.

جدول مقارنة: محللات الأكسجين في غازات الاحتراق والعمليات

المعيار	زركونيا (ZrO_2)	بارامغناطيسي (Paramagnetic)	كهروكيميائي	ليزر TDL
المبدأ	خلية أكسجينية ساخنة (نرنست)	قابلية O_2 المغناطيسية	تفاعل في خلية كيميائية	امتصاص طول موجي محدد
التركيب	في الموضع (In-situ) في المدخنة	استخلاصي بعد تكييف العينة	استخلاصي أو محمول	في الموضع عبر المدخنة
المدى	0.1 إلى 25%	0 إلى 100%	0 إلى 25%	ppm إلى %
الاستجابة	ثوانٍ	10 إلى 30 s + زمن النقل	20 إلى 60 s	ثوانٍ
ما يفسده	الغازات القابلة للاحتراق تُستهلك على الخلية (قراءة منخفضة)، السيليكون	الاهتزاز، غازات ذات قابلية مغناطيسية (NO)	عمر الخلية 1 إلى 3 سنوات، الجفاف	الغبار الكثيف، الاهتزاز على المحاذاة
الصيانة	مرشح المدخنة، معايرة بغازين	نظام العينة (الأثقل)	تبديل الخلية	المحاذاة والنوافذ
الاستخدام المعتاد	O_2 العادم للاحتراق (المراجل، الأفران)	الأكسجين النقي ومخاليط العمليات	الأمان والمحمول	المداخن الكبيرة، الحرارات القصوى

كيف أختار؟ للتحكم في احتراق مرجل أو فرن، الزركونيا في الموضع هي الاختيار الافتراضي لسرعتها وبساطتها؛ والبارامغناطيسي حين تلزم دقة مرجعية في عينة مكيفة أو في مخاليط ليست عادمًا؛ والكهروكيميائي للسلامة والأجهزة المحمولة لا للتحكم؛ والليزر للمداخن الكبيرة أو الساخنة جدًا حيث لا يعيش مجس داخلها. ولا يُظهر الجدول أن الزركونيا تقيس الأكسجين المتبقي بعد أن تحرق على خليتها الساخنة ما يصلها من غازات قابلة للاحتراق، فقراءتها المنخفضة عند احتراق ناقص ليست دليلًا على نقص الهواء بل قد تكون عكسه. والخطأ الأكثر كلفة استبدال زركونيا بمحلل استخلاصي لحلقة

تحكم في الاحتراق، فيدخل زمن النقل زمنًا ميتًا يجعل الحلقة تتأرجح أو تُترك على اليدوي.

جدول مقارنة: المحلل الاستخلاصي مقابل المحلل في الموضع

المعيار	استخلاصي (Extractive)	في الموضع (In-situ)
العينة	تُسحب وتُكيَّف (تبريد، ترشيح، خفض ضغط)	تُقاس حيث هي
زمن التأخير	نقل + تكييف: عشرات الثواني إلى دقائق	ثوانٍ
المعايرة	سهلة: غاز معايرة يدخل نظام العينة	تحتاج ترتيبًا خاصًا (مسار مرجعي أو خلية)
الأعطال الشائعة	انسداد، تكثف، تسرب هواء يخفف العينة	تلوث النافذة/المجس، حرارة، اهتزاز
الكلفة والصيانة	محلل أرخص + نظام عينة مكلف الصيانة	محلل أغلى، صيانة أقل
متى يُفضَّل	تحليل متعدد المكونات، غازات قذرة تحتاج تكييفًا	حلقات تحكم سريعة (O_2 الاحتراق، الرطوبة)

كيف أختار؟ إن كان القياس يغذي حلقة تحكم سريعة أو حماية فالموضع أولًا، وإن كان المطلوب تركيبًا متعدد المكونات أو الغاز قذرًا رطبًا فالاستخلاصي مع نظام عينة مصمم بعناية. ولا يُظهر الجدول أن الاستخلاصي ينقل معظم الكلفة من الشراء إلى الصيانة: مرشحات ومنظمات وتسخين وحلقة سريعة وزمن تأخر يُحسب عند ضغط الخط (القسم 10.2)، وأن الموضعي ينقلها إلى المعايرة وتنظيف النوافذ. والخطأ الأكثر كلفة اختيار الاستخلاصي لرخص المحلل ثم بناء نظام عينة بخطوط طويلة غير مسخنة، فيصير المحلل دقيقًا في غاز لا يمثل العملية، وتُعاد الأعطال إلى «المحلل» وهي في العينة.

10.7 غرف المحللات

تُجمع المحللات غالبًا في غرفة محللات (Analyzer House / Shelter) قريبة من نقاط الأخذ. ولأن الغرفة تستقبل خطوطًا تحمل غازات قابلة للاشتعال أو سامة إلى مكان مغلق، تُصمَّم وفق IEC 61285 وتتضمن:

- تهوية ميكانيكية بعدد تغييرات هواء محدد، مع ضغط موجب ومراقبة تدفق التهوية.
- كاشفات غاز قابل للاشتعال وغازات سامة (مثل H_2S) داخل الغرفة، مع إنذار ضوئي وصوتي عند المدخل.
- فصل التغذية الكهربائية غير المؤمَّنة عند فقدان التهوية أو كشف الغاز، والتزام تصنيف المنطقة الخطرة (الفصل 26).
- تخزين أسطوانات غاز المعايرة والغاز الحامل خارج الغرفة في رف مظلل ومثبت.
- تكييفًا يحفظ حرارة ثابتة تقريبًا؛ فدقة الكروماتوغراف تتأثر بالتغيّرات الحرارية الكبيرة.

الشكل 10-7: *مسقط تخطيطي لغرفة محللات وفق IEC 61285، تهوية ميكانيكية بضغط موجب ومراقبة تدفقها، وكاشفات غاز قابل للاشتعال وسام داخل الغرفة مع إنذار عند المدخل، وفصل التغذية غير المؤمَّنة عند فقد التهوية أو كشف الغاز، وأسطوانات المعايرة والغاز الحامل خارج الغرفة.*

10.8 المعايرة والتحقق والصيانة

تختلف المحللات عن المرسلات في أن «الحساس» فيها تفاعل كيميائي أو فيزيائي ينجرف مع الزمن، فالمعايرة والتحقق فيها نشاط دوري لا حدث نادر. والفرق بين التحقق والمعايرة أساسي: **التحقق (Validation)** تمرير مرجع معروف دون ضبط وتسجيل النتيجة، و**المعايرة (Calibration)** ضبط المحلل على المرجع. ولا يُضبط المحلل إلا حين يخرج التحقق عن حدود القبول؛ فالضبط المتكرر دون حاجة يُدخل تشويشًا بدل أن يزيله.

إجراء التحقق والمعايرة الدوري لمحلل غاز

1. راجع سجل المحلل: تاريخ آخر معايرة، والانجراف السابق، وصلاحية أسطوانات غاز الصفر وغاز المدى (Zero/Span Gas) وشهاداتها.
2. ضع المحلل في وضع الصيانة (Maintenance) في النظام حتى لا تُطلق قراءات المعايرة إنذارات أو تدخل في حلقات التحكم.
3. تحقق من أن تدفقات الحلقة السريعة وخط العينة ضمن قيمها، وأن حرارة الخطوط المسخنة صحيحة، وأن المرشحات غير مسدودة.
4. مرّر غاز الصفر بمعدل التدفق والضغط اللذين يعمل بهما المحلل عادة، وانتظر الاستقرار (حتى تثبت القراءة وفق توصية المصنّع، ولا يقل الانتظار عادة عن زمن نقل العينة مضافًا إليه T90)، وسجّل القراءة قبل الضبط (As-Found).
5. مرّر غاز المدى بالطريقة نفسها وسجّل القراءة «كما وُجد».
6. قارن الانحراف بحدود القبول على مخطط الضبط الإحصائي (Control Chart). إذا كان ضمن الحدود فوثّق التحقق وانتقل إلى الخطوة 9.
7. إذا خرج عن الحدود فاضبط الصفر ثم المدى، ثم أعد النقطتين وسجّل القراءة بعد الضبط (As-Left)، وتأكد من أن الخطية مقبولة بنقطة وسطية إن توافر غاز لها.
8. إذا احتاج المحلل إلى ضبط كبير أو متكرر فابحث عن السبب (تسرب في نظام العينات، أو تلوث الخلية، أو مصدر ضوء يضعف) قبل تكرار الضبط.
9. أعد المحلل إلى العينة الحية، وانتظر حتى تعود القراءة إلى قيمة العملية المتوقعة، ثم أخرجه من وضع الصيانة.
10. سجّل النتائج وزمن التوقف وأي قطع بُدّلت، وحدّث مؤشر توافر المحلل (Analyzer Availability).

الشكل 10-8: *مخطط قرار التحقق والمعايرة الدورية لمحلل غاز: لا يُضبط المحلل إلا إذا خرج التحقق بغازي الصفر والمدى عن حدود مخطط الضبط الإحصائي، ويُبحث عن السبب إذا كان الضبط كبيرًا أو متكررًا قبل إعادته.*

المقارنة بالمختبر

1. خذ عينة يدوية من نقطة الأخذ نفسها في زمن معلوم، مع مراعاة زمن تأخر العينة المحسوب في القسم 10.2.

2. سجّل قراءة المحلل في اللحظة المكافئة، وقارن النتيجتين ضمن عدم يقين الطريقتين.
3. لا تضبط المحلل على نتيجة مختبر واحدة؛ فالضبط يحتاج إلى مرجع معتمد أو اتجاه ثابت في عدة مقارنات.

الصيانة الوقائية

- تغيير المرشحات والفواصل وفق فترات محددة، وتنظيف خلايا القياس.
- متابعة ضغط أسطوانات الغاز الحامل وغاز المعايرة وتاريخ صلاحيتها، وطلب البدائل قبل انتهائها.
- تُعايَر محللات العملية ومحللات المختبر في مواقعها وفق توصيات المصنّع ضمن إجراءات التشغيل التجريبي، وتُدرج المحاليل المنظّمة (Buffers) لمحللات pH ضمن تجهيزات ورشة الأجهزة.
- مؤشر الأداء الأهم توافر المحلل؛ فالمحلل الموجود الذي لا يثق به المشغلون تكلفة بلا فائدة.

10.9 دليل مرجعي للمحللات الأخرى

ما غطيناه في 10.4 إلى 10.6 هو ما تصادفه في محطات الطاقة ومعالجة الغاز والمصافي يوميًا؛ وما يلي دليل مختصر لما تبقى، مرتبًا بحسب ما يُقاس، مع المبدأ الشائع وأهم ما يجب أن يعرفه مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس عند تحديده أو صيانته:

(أ) الرطوبة والماء في الغازات والسوائل والمواد الصلبة: يكمل هذا الجدول القسم 10.5 بالماء في السوائل والمواد الصلبة، وأرقام أداء حساسات الرطوبة في القسم 12.3.

القياس	الطرق الشائعة	ملاحظات ميدانية
نقطة ندى الماء في الغاز الطبيعي وهواء الأجهزة	**أكسيد الألومنيوم السعوي (Al_2O_3)**: طبقة مسامية تمتص الماء فتتغير سعتها؛ **المرآة المبردة (Chilled Mirror)**: مرجع دقيق يقيس حرارة التكثف مباشرة؛ **الكوارتز المهتز**: تغير تردد بلورة مغلفة بمادة ماصة؛ **TDLAS**: امتصاص ليزر عند طول موجة الماء (بلا تلامس، سريع)	Al_2O_3 رخيص لكنه ينجرف ويحتاج معايرة سنوية ويتأثر بالجلايكول والأمينات؛ المرآة المبردة مرجع مختبري وأداة تحقق؛ TDLAS الأفضل في الغازات الحامضية. يُحوَّل بين ppmv ونقطة الندى بضغط الخط (الشكل 10-9)
الماء في الهيدروكربونات السائلة	**كارل فيشر** (معايرة كيميائية، المرجع المخبري)؛ السعوي؛ الأشعة تحت الحمراء؛ الميكروويف	«الماء الحر» غير «الماء المذاب»؛ العينة تُحفظ في ضغط الخط حتى لا يتبخر
رطوبة المواد الصلبة (فحم، حبوب، أسمدة)	الميكروويف، الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR)، السعوي، التجفيف بالوزن (المرجع)	تتأثر بالكثافة الظاهرية وحجم الحبيبات؛ تُعاير مقابل تجفيف مختبري

الشكل 10-9: *العلاقة بين نقطة ندى الماء ومحتوى الماء (ppmv) في الغاز عند ضغوط مختلفة (بتقريب الغاز المثالي): القيمة نفسها من ppmv تعني نقطة ندى أعلى بكثير عند ضغط الخط منها عند الضغط الجوي؛ ولذلك تُحدد مواصفة الغاز الجاف (مثل 7 lb/MMscf أو نقطة ندى عند ضغط التسليم) بوضوح.*

(ب) الأكسجين والغازات الأخرى: يجمع الجدول في موضع واحد مبادئ القسم 10.4، ويضيف إليها غازات الانبعاثات والغازات القابلة للاشتعال، ليكون مرجعًا سريعًا عند الاختيار:

الغاز أو القياس	التقنية	متى تُختار وما حدودها
الأكسجين	**الزركونيا** (خلية كهروكيميائية ساخنة يتبع جهدها نسبة الضغطين الجزئيين للأكسجين)	الأنسب لغاز المداخن الرطب الساخن في الموقع؛ تخطئ في وجود الغازات القابلة للاحتراق لأنها تحرقها
الأكسجين	**البارامغناطيسي**	للعينة المكيفة الجافة؛ مرجع الدقة

الغاز أو القياس	التقنية	متى تُختار وما حدودها
الأكسجين	**الخلية الكهروكيميائية**	رخيصة، للسلامة والأجهزة المحمولة؛ عمر محدود
الأكسجين	**الليزر TDLAS**	بلا تلامس عبر المجرى، للأفران والمداخن الكبيرة
CO وCH_4 وCO_2	**NDIR** (امتصاص تحت الحمراء عند طول موجة الغاز)	انتقائي ومستقر؛ يحتاج تكييف عينة إن كان الغاز رطبًا أو مغبرًا
أكاسيد النيتروجين NOx	**اللمعان الكيميائي (Chemiluminescence)** أو UV	مرجع القياس البيئي؛ يحتاج محوّل NO_2 إلى NO
أكاسيد الكبريت SO_2	**الفلورة فوق البنفسجية**	القياس البيئي للانبعاثات
الغازات القابلة للاحتراق (LEL)	**الحبيبة الحفازة (Catalytic Bead)** أو تحت الحمراء (القسم 30.5)	الحبيبة تتسمم بالسيليكون والكبريت وتحتاج أكسجينًا؛ تحت الحمراء لا تحتاج أكسجينًا ولا تكشف الهيدروجين
كبريتيد الهيدروجين H_2S	**شريط أسيتات الرصاص (Lead Acetate Tape)** في الغاز الطبيعي للمحاسبة، والكهروكيميائي للسلامة	الشريط للتراكيز المنخفضة بدقة عالية؛ الكهروكيميائي للإنذار

كيف أختار؟ ابدأ من الغرض لا من الغاز: التحكم في الاحتراق يريد أكسجين الموضع، والامتثال البيئي يريد الطرق المرجعية للانبعاثات (اللمعان الكيميائي والفلورة فوق البنفسجية وNDIR) مع نظام عينة معتمد، والسلامة تريد الكاشف الكهروكيميائي أو الحبيبة الحفازة أو تحت الحمراء بحسب الغاز، والمحاسبة تريد الشريط أو الكروماتوغراف. ولا يُظهر الجدول التداخلات بين الغازات ولا حاجة كل تقنية إلى تكييف العينة، وهما ما يحدد كلفة التشغيل الحقيقية. والخطأ الأكثر كلفة الخلط بين محلل العملية وكاشف الغاز: تركيب كاشف سلامة كهروكيميائي لقياس H_2S داخل خط غاز محاسبي، أو الاعتماد على محلل عملية لحماية الأشخاص.

(ج) التركيب والخواص الفيزيائية للهيدروكربونات:

القياس	الطريقة	التطبيق
تركيب الغاز والقيمة الحرارية ومؤشر ووب (Wobbe)	**الكروماتوغراف الغازي (GC)** بكاشف TCD أو FID: عمود فصل + كاشف، دورة 3 إلى 10 دقائق؛ أو **الكالوريمتر** (احتراق مباشر أو استنتاج من الكثافة والامتصاص)	محاسبة الغاز (AGA 8 يحتاج التركيب)، تحكم في وقود التوربين (الحالة الميدانية في القسم 10.10)
الكروماتوغراف السائل (HPLC)	فصل في طور سائل تحت ضغط عالٍ	البتروكيماويات والأدوية؛ نادر في المصافي
مطياف الكتلة (Mass Spectrometer)	تأيين العينة وفصل الأيونات بالكتلة/الشحنة؛ يقيس عشرات المكونات في ثوانٍ	مراقبة الأفران والمفاعلات ومنافذ متعددة (Multistream) في البتروكيماويات
الخواص الفيزيائية وفق ASTM	محللات عملياتية تكرر الاختبار المخبري آليًا: **نقطة الوميض** (ASTM D93)، **التقطير** (D86: نقاط الغليان الأولية والنهائية)، **ضغط بخار ريد** (D323) **RVP**، **نقطة التغيّم (Cloud Point)** ونقطة **الانسكاب (Pour Point)** (D2500/D97)، **الأوكتان/السيتان** (بمحرك أو بالاستدلال NIR)، **اللون**، **اللزوجة** (القسم 12.2)	التحكم في أبراج التقطير وخلط المنتجات (Blending) بدل انتظار المختبر ساعات؛ يُتحقق منها دوريًا مقابل المختبر بإجراءات ASTM D3764
الكثافة والوزن الجزيئي	كوريوليس والمهتز (القسم 12.1)؛ الوزن الجزيئي للغاز من الكثافة عند ضغط وحرارة معلومين	خلط الغاز، التحكم في الأفران
الكبريت في الزيت	فلورة الأشعة السينية (XRF)	مواصفات الوقود منخفض الكبريت

القياس	الطريقة	التطبيق
ضغط البخار التفاضلي	مرسل ضغط تفاضلي بين الخط وبصيلة مرجعية مملوءة بالمنتج نفسه عند حرارته، فيعطي هامش الضغط فوق ضغط البخار	حماية مضخات LPG من التكهف

(د) المياه والمياه العادمة: مع ما في 10.6 (pH، ORP، التوصيلية، الأكسجين المذاب، السيليكا، الصوديوم، العكارة): **الطلب الكيميائي والبيولوجي للأكسجين (COD/BOD)** ومحللات **الكربون العضوي الكلي (TOC)** (أكسدة ثم قياس CO_2 بـ NDIR) لمراقبة الصرف؛ **الكلور الحر والكلي** (أمبيرومتري أو DPD لوني)؛ **الأمونيا والنترات والفوسفات** (أقطاب انتقائية للأيونات ISE أو طرق لونية)؛ **الفلوريد**؛ **الزيت في الماء** (فلورة UV، للمنصات والسفن؛ وحدود الصرف نحو 15 ppm للسفن وفق MARPOL، ونحو 30 mg/L متوسطًا شهريًا للمنصات وفق OSPAR)؛ **المعايِرات الآلية (Autotitrators) والمحللات الكيميائية الرطبة** (تكرر معايرة المختبر بكواشف سائلة، أعلى صيانة، لكنها الطريقة الوحيدة لبعض الأيونات)؛ و**محطات مراقبة جودة المياه** المتكاملة التي تجمع عدة مجسات على لوح واحد مع تنظيف آلي.

(هـ) الانبعاثات والبيئة (CEMS): نظام مراقبة الانبعاثات المستمر على المدخنة يقيس O_2 وCO وNOx وSO_2 والجسيمات (**العتامة** بامتصاص الضوء عبر المدخنة، أو التشتت الخلفي، أو الاهتزاز الدقيق) وأحيانًا HCl والزئبق، بأخذ عينة مستخرجة مخففة أو ساخنة أو بقياس في الموضع عبر المدخنة (Cross-Stack). تتطلب اللوائح (مثل US EPA 40 CF R 60/75 وEN 14181) تحققًا دوريًا بغازات معايرة معتمدة واختبارًا للدقة النسبية تجريه جهة مستقلة (RATA)، وتوافرًا (Availability) مرتفعًا للبيانات يزيد غالبًا على 90 إلى 95% بحسب اللائحة. وأخذ العينات من الجسيمات (Isokinetic Sampling) يحتاج سرعة سحب مساوية لسرعة الغاز في المدخنة حتى لا تنحاز العينة إلى الجسيمات الخفيفة أو الثقيلة.

(و) قياسات متفرقة: **مراقبة التآكل** (قسائم وزن، مجسات المقاومة الكهربائية ER، الاستقطاب الخطي LPR، ومجسات السماكة فوق الصوتية الحديثة؛ تفصيلها في الأجزاء القادمة)؛ **الانكسار (Refractometer)** لتركيز المحاليل والسكر والجلايكول؛ **حجم الجسيمات وتوزيعها** (حيود الليزر) في البلمرة والأسمدة؛ **القوام (Consistency)** في لب الورق؛ **الرائحة والسمية** في الهواء المحيط؛ و**كاشفات التوصيل الحراري (TCD)** كوسيلة عامة لقياس غاز ثنائي (هيدروجين في نيتروجين، CO_2 في هواء) من فرق الموصلية الحرارية.

كيف تستخدم هذا الدليل: عند طلب محلل لمتغير غير مألوف، ابدأ بسؤالين: **ما الغرض** (مراقبة، تحكم، محاسبة، سلامة، امتثال بيئي) و**ما زمن الاستجابة المقبول**؛ ثم اطلب من موردَين محللين بمبدأين مختلفين إن أمكن، وقارن بطاقة كل منهما: المدى، الدقة، التداخلات (Interferences)، متطلبات تكييف العينة، الاستهلاكيات، وفترة المعايرة. ثم طبّق مصفوفة الاختيار المرجّحة (القسم 27.6).

10.10 حالة ميدانية: غاز وقود «يفقد» قيمته الحرارية ليلًا

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

كروماتوغراف يحلل غاز الوقود المغذّي لتوربينات غازية، وتُستخدم نتائجه في متابعة مؤشر ووب (Wobbe Index) وحساب الكفاءة. بدأت القيمة الحرارية المقيسة تنخفض كل ليلة من ليالي الشتاء ثم تعود ظهرًا، بينما لم يتغيّر مصدر الغاز. فسّر البعض ذلك بتغيّر حقيقي في الغاز، وطُرح موضوع إعادة ضبط الاحتراق. لكن التحقق بغاز المعايرة أعطى نتيجة سليمة في الليل والنهار، فانتقل الشك إلى العينة. تبيّن أن دائرة تسخين جزء من خط النقل متعطلة، وأن منظم الضغط عند المجس غير مسخَّن؛ فمع برودة الليل والتبريد الناتج عن خفض الضغط تكثفت الهيدروكربونات الثقيلة قبل وصولها إلى المحلل. بعد

إصلاح التسخين وتركيب منظم مسخَّن استقرت القراءة، وأُضيف إنذار لانخفاض حرارة الخط.

الدروس: حين يجتاز المحلل اختبار غاز المعايرة وتبقى النتيجة غريبة، فالمشكلة غالبًا في العينة؛ والنمط اليومي المرتبط بالحرارة مؤشر قوي على التكثف؛ وتسخين خط العينة جزء من القياس ويستحق مراقبة وإنذارًا.

دور المهندس ودور الفني:

المرحلة	دور المهندس	دور الفني
التصميم والاختيار	يحدد غرض المحلل وزمن الاستجابة المقبول، ويختار المبدأ بعد معرفة التركيب الكامل للوسط، ويصمم نظام العينة (المجس، والحلقة السريعة، والتسخين، والتصريف)، ويحسب زمن التأخر عند ضغط الخط	يراجع قابلية الصيانة: الوصول إلى المرشحات والمنظمات، ومكان أسطوانات المعايرة، ومسارات خطوط التصريف
التشغيل التجريبي	يعتمد حدود القبول ومخطط الضبط الإحصائي وفترات التحقق	يختبر التسرب، ويضبط التدفقات وحرارة الخطوط، ويجري أول تحقق بغازي الصفر والمدى
التشغيل اليومي	يتابع مؤشر التوافر، ويحلل الانجراف والضبط المتكرر، ويقرر متى يُبحث عن السبب في نظام العينة	يتحقق دوريًا دون ضبط غير لازم، ويسجل «كما وُجد» و«كما تُرك»، ويبدّل المرشحات والاستهلاكيات، ويقارن بالمختبر مع مراعاة زمن التأخر

10.11 الأخطاء الشائعة

- حساب زمن التأخر بالتدفق عند الضغط الجوي بدل ضغط الخط.
- خطوط عينات طويلة غير مسخَّنة، أو منظمات تبرّد الغاز حتى يتكثف.

- استخدام مواد تمتص المكوّن المقيس مثل H_2S أو الرطوبة.
- ضغط خلفي متغيّر في خط تصريف المحلل.
- ضبط المحلل في كل زيارة دون تحقق إحصائي.
- غاز معايرة منتهي الصلاحية أو بلا شهادة متتبعة.
- الخلط بين محلل العملية وكاشف الغاز في المتطلبات أو في وظائف السلامة.
- إهمال صمام حماية الحرارة في لوح تحليل البخار والماء.

10.12 ملخص

المحلل جزء من منظومة تبدأ بالمجس وتنتهي بالتصريف، ودقة المنظومة مرهونة بأضعف حلقاتها. يُحسب زمن التأخر عند ضغط الخط، وتُحمى العينة من التكثف والامتصاص والتسرب. ولكل مكوّن مبدأ مناسب: الكروماتوغراف للتركيب، والزركونيا والبارامغناطيسي للأكسجين، والليزر للرطوبة في الغاز، والتوصيلية والسيليكا والصوديوم لنقاء البخار. وتُدار جودة المحلل بالتحقق الإحصائي ومؤشر التوافر، لا بالضبط المتكرر.

وفي الفصل التالي: ننتقل في الفصل 11 «المفاتيح والحساسات المنفصلة والمشفّرات» من قياس تركيب المادة إلى أبسط الإشارات وأكثرها عددًا في المصنع: إشارات «نعم أو لا» التي تؤكد المواضع وتطلق الحمايات.

10.13 أسئلة التقييم الذاتي

1. خط عينة غاز حجمه 0.8 L عند 20 barg، والتدفق المقيس في التصريف 2 L/min عند الضغط الجوي. احسب زمن التأخر، واقترح حلين لتقليله.
2. ما وظيفة الحلقة السريعة؟ ولماذا لا يسحب المحلل كامل تدفقها؟
3. لماذا يُستخدم ترتيب العزل المزدوج مع التنفيس في تبديل تيارات الكروماتوغراف؟

4. ما الفرق بين محلل الأكسجين من نوع الزركونيا والبارامغناطيسي؟ ومتى تختار كلًّا منهما؟
5. لماذا تُذكر نقطة الندى دائمًا مع الضغط الذي قيست عنده؟
6. ما الغرض من قياس التوصيلية بعد التبادل الكاتيوني في محطات الطاقة؟
7. اذكر أربعة متطلبات سلامة في غرفة المحللات.
8. ما الفرق بين معايرة المحلل والتحقق منه؟ ولماذا يُفضَّل عدم الضبط إذا كانت النتيجة ضمن الحدود؟
9. محلل H_2S يستجيب ببطء شديد وقراءته أقل من المختبر. ما الأسباب المحتملة في نظام العينة؟
10. في الحالة الميدانية (القسم 10.10)، لماذا كان نجاح اختبار غاز المعايرة مفتاح التشخيص؟

مراجع الفصل: المسودة v0.1 (الفصل 10: سلسلة العينة وزمن التأخر)؛ حساسات الغاز والتركيز والحساسية المتقاطعة وتسمم الحساسات وتعاريف الرطوبة وحساس لامدا (Bosch، Automotive Mechatronics)؛ المعايرة الموضعية للمحللات ومحاليل ورشة الأجهزة (I&C Commissioning Instruction، MAPNA/Monenco)؛ IEC 61285؛ ISO 6976؛ R51 (Field Instrumentation، أقسام pH وORP والأقطاب المرجعية).

الفصل 11: المفاتيح والحساسات المنفصلة والمشفّرات

> **لمن هذا الفصل:** مهندس الموقع والصيانة، ومهندس التصميم الذي يعدّ قوائم الإشارات، ومبرمج PLC. فمعظم نقاط الإدخال في أي مصنع إشارات منفصلة: مفتاح حدّي يؤكد أن الصمام أُغلق، وحساس قرب يعدّ دورات عمود، ومفتاح ضغط يحمي مضخة. وكثير من أعطال بدء التشغيل يبدأ من إشارة منفصلة موصولة خطأً أو مضبوطة في غير موضعها.
>
> **الفكرة الأساسية:** الحساس المنفصل يجيب عن سؤال واحد بنعم أو لا: هل الجسم هنا؟ هل تجاوز الضغط الحد؟ وقيمة هذه الإجابة تتوقف على ثلاثة أشياء: أين تقع نقطة التبديل بالضبط، وما الفرق بين نقطتي التشغيل والإرجاع، وماذا ترى المنظومة حين ينقطع السلك. أما المشفّر ومحوّل الإزاحة الخطي فيحوّلان الحركة إلى نبضات أو جهد، فيقعان بين عالمي الإشارة المنفصلة والإشارة التناظرية.

11.1 المفاتيح الحدية (Limit Switches)

المفتاح الحدّي مفتاح كهروميكانيكي يُفعَّل بتلامس مادي: ذراع بعجلة (Roller Lever)، أو مكبس (Plunger)، أو قضيب مرن (Wobble Stick). وفي داخله غالبًا مفتاح دقيق (Microswitch) بتلامس تحويلي (SPDT) يمنح تلامسًا مفتوحًا عادةً (NO) وآخر مغلقًا عادةً (NC).

مصطلحات لا بد منها:

- **الشوط المسبق (Pre-travel):** الحركة من وضع الراحة حتى لحظة التبديل.

- **الشوط الزائد (Over-travel):** الحركة المسموحة بعد التبديل دون أن يتضرر المفتاح. ويجب أن يُركّب المفتاح بحيث يبقى جزء من هذا الشوط متاحًا، وإلا كسرت الكامة الذراع.
- **الفرق الحركي (Differential Travel):** المسافة بين نقطة الضبط ونقطة الإرجاع.
- **الفتح القسري (Positive Opening):** تلامس NC يُفصَل ميكانيكيًا بقوة الذراع نفسها، حتى لو التحمت نقاط التلامس. وهو شرط أساسي في دوائر السلامة وأبواب الحماية (IEC 60947-5-1، الملحق K)، ويُعرف برمز سهم داخل دائرة على جسم المفتاح.

مفاتيح حدود الصمامات: تُركّب على صمامات الإغلاق والفتح (On/Off Valves) علبةُ مفاتيح (Limit Switch Box) فيها كامتان تُضبطان على الفتح الكامل والإغلاق الكامل. وقد تكون المفاتيح ميكانيكية أو حساسات قرب أو مفاتيح مغناطيسية مختومة. ويُحدَّد في التصميم ما يلي:

1. عدد الإشارات: إشارة للإغلاق وأخرى للفتح (ZSC وZSO)، لا واحدة فقط. فغياب الإشارتين معًا يعني صمامًا في منتصف الشوط أو عطلًا، وحضورهما معًا يعني خطأً في الضبط أو التوصيل.
2. طريقة الحماية في المنطقة الخطرة: مفتاح ميكانيكي داخل علبة مقاومة للانفجار (Ex d)، أو حساس NAMUR بأمان ذاتي (Ex ia) مع حاجز أو مضخّم فاصل.
3. مهلة عدم التطابق (Discrepancy Time) في منطق التحكم: الزمن المسموح بين صدور الأمر ووصول تأكيد الموضع قبل إطلاق إنذار «فشل الصمام في الإغلاق». ويُضبط بناءً على زمن الشوط الفعلي المقيس في التشغيل التجريبي مع هامش معقول، لا على رقم عام.

> **ملاحظة تصميمية:** مفتاح «مغلق» مضبوط على 95% من الشوط ليس تأكيدًا حقيقيًا لإحكام الإغلاق (Tight Shut-Off). ففي الصمامات الحرجة كصمامات الإغلاق الطارئ (ESDV) يُضبط المفتاح قرب نهاية الشوط تمامًا، ويُتحقق منه باختبار الشوط الكامل.

11.2 حساسات القرب الحثية والسعوية ومعيار NAMUR

الحساس الحثّي *(Inductive Proximity Sensor)*

يولّد مذبذب (LC Oscillator) مجالًا مغناطيسيًا متناوبًا عالي التردد أمام وجه الحساس. فإذا اقترب جسم معدني تولّدت فيه تيارات دوّامية (Eddy Currents) تستهلك طاقة من المذبذب، فتنخفض سعة الذبذبة، ويكشف مقارِن (Trigger) هذا الانخفاض فيبدّل خرج الحساس. لذلك يكشف الحساس الحثي المعادن وحدها، ودون أي تلامس أو تآكل ميكانيكي.

مسافات الكشف:

- **المسافة الاسمية (Sn – Nominal Sensing Distance):** قيمة الكتالوج، مقيسة بهدف قياسي من الفولاذ الطري (St37، ويُسمى أيضًا Fe360) مربع طول ضلعه يساوي قطر الحساس (أو ثلاثة أضعاف Sn إن كان أكبر) وسُمكه 1 mm.
- **المسافة الحقيقية (Sr):** ضمن ±10% من Sn لعيّنة بعينها بسبب تفاوت التصنيع.
- **المسافة المضمونة (Sa – Assured Sensing Distance):** من صفر إلى 0.81 × Sn. وهي المسافة التي يُصمَّم عليها التركيب، لأنها تغطي تفاوت التصنيع وتغيّر الحرارة والجهد.

عوامل التصحيح حسب المادة (قيم نموذجية، والمرجع النهائي كتالوج الصانع):

المادة	عامل التصحيح التقريبي
الفولاذ الطري St37	1.0
الفولاذ المقاوم للصدأ	0.6 – 0.85
النحاس الأصفر (Brass)	0.35 – 0.5
الألمنيوم	0.3 – 0.45
النحاس الأحمر	0.25 – 0.4

وتوجد حساسات «بعامل واحد» (Factor 1) تكشف جميع المعادن على المسافة نفسها، وهي مفيدة حين تتنوع المواد.

مثال محلول: حساس حثّي M18 مسافته الاسمية Sn = 8 mm، والهدف كامة من الفولاذ المقاوم للصدأ بعامل 0.7. ما أقصى فجوة تركيب تضمن الكشف؟

- المسافة المضمونة للفولاذ الطري: Sa = 0.81 × Sn = 0.81 × 8 = 6.48 mm.
- بعد تصحيح المادة: المسافة المضمونة المصححة = 6.48 × 0.7 ≈ 4.5 mm.
- النتيجة: تُضبط الفجوة على نحو 3 – 4 mm، لا على 8 mm كما يوحي الكتالوج.
- التفسير: كثير من شكاوى «الحساس يعمل أحيانًا» سببها تركيب على المسافة الاسمية.

الشكل 11-1: *مسافات الكشف الاسمية والحقيقية والمضمونة لحساس حثّي M18، وأثر عامل تصحيح المادة على فجوة التركيب.*

المحجوب وغير المحجوب: الحساس المحجوب (Shielded / Flush) يمكن تركيبه مستويًا مع سطح معدني لأن مجاله محصور أمام الوجه، لكن مسافته أقصر. أما غير المحجوب (Non-Shielded / Non-Flush) فمسافته أطول، ويحتاج إلى منطقة خالية من المعدن حوله (عادةً ما يعادل ضعفَي أو ثلاثة أضعاف Sn حسب الصانع)، وإلا بدّل وحده بتأثير الحامل المعدني. ويجب أيضًا مراعاة المسافة بين حساسين متجاورين حتى لا يتداخل مذبذباهما.

التخلّف (Hysteresis): نقطة الإرجاع أبعد قليلًا من نقطة الضبط (عادةً 3 – 15% من Sr)، وهذا يمنع ارتجاف الخرج (Chattering) حين يهتز الهدف عند الحد.

الحساس السعوي *(Capacitive Proximity Sensor)*

يشكّل قطب الحساس مع الوسط المحيط مكثفًا؛ فإذا اقترب جسم ثابت عزله أكبر من الهواء زادت السعة وبدّل الخرج. لذلك يكشف المعادن واللدائن والخشب والحبوب والسوائل، بل يكشف السائل عبر جدار خزان بلاستيكي. ويُزوَّد عادةً بمقاومة متغيرة لضبط الحساسية. ومشكلته الحساسية للرطوبة والترسبات والرغوة، فيحتاج إلى ضبط دقيق، وقد يلزم إعادة ضبطه بعد التنظيف.

أنواع الخرج وطرق التوصيل

النوع	الوصف	ما يجب الانتباه إليه
سلكان تيار مستمر أو متناوب (2-Wire)	الحساس في سلسلة مع الحمل كالمفتاح	تيار تسرّب في حالة الإطفاء (نحو 0.5 – 1.5 mA) وهبوط جهد في حالة التشغيل (نحو 3 – 8 V)؛ وقد يجعل تيارُ التسرب مدخلَ PLC عالي الحساسية يرى «واحدًا» دائمًا
ثلاثة أسلاك PNP (Sourcing)	الخرج يصل الحمل بالطرف الموجب	الشائع في أوروبا ومعظم بطاقات الإدخال بمنطق موجب
ثلاثة أسلاك NPN (Sinking)	الخرج يصل الحمل بالطرف السالب	الشائع في آسيا؛ لا يعمل مع بطاقة تتوقع PNP دون تعديل
أربعة أسلاك (NO + NC)	خرجان متتامّان	يسمح بكشف بعض الأعطال بمقارنة الخرجين
NAMUR (IEC 60947-5-6)	سلكان، ويتغيّر التيار لا الجهد	يحتاج إلى مضخّم فاصل (Isolating Amplifier)، ويسمح بكشف قطع السلك والقِصَر
IO-Link (IEC 61131-9)	اتصال رقمي نقطة إلى نقطة على ثلاثة أسلاك	يعطي إعدادات وتشخيصات ومسافة فعلية، مع بقاء خرج منفصل

كيف أختار؟ في المناطق الخطرة ودوائر الحماية اختر NAMUR مع مضخّم فاصل معتمد، لأنه يجمع الأمان الذاتي إلى كشف قطع السلك والقِصَر؛ وفي الآلات والحزم العادية اختر ثلاثة أسلاك بالمنطق الذي تتوقعه بطاقة الإدخال (PNP في الغالب)، واطلب IO-Link حيث تريد إعدادات وتشخيصًا من الحساس نفسه؛ وتجنّب ثنائي الأسلاك مع مدخلات عالية الممانعة. ولا يُظهر الجدول أن نوع الخرج يجب أن يُكتب في قائمة الإشارات ومواصفة الحزمة، لا أن يُترك لمورّد الحزمة. والخطأ الأكثر كلفة وصول حزمة كاملة بحساسات NPN إلى نظام يتوقع PNP، فيعمل مصباح كل حساس ولا ترى البطاقة شيئًا، ويُصلح ذلك بمرحلات وسيطة ترفع عدد نقاط العطل.

الشكل 11-2: *توصيل حساس قرب ثلاثي الأسلاك: الخرج PNP يصل الحمل بالموجب، والخرج NPN يصله بالسالب.*

> **قاعدة الألوان الشائعة (IEC 60947-5-2):** البني للموجب، والأزرق للسالب، والأسود للخرج، والأبيض للخرج الثاني. ولا يُعتمد عليها دون الرجوع إلى ورقة البيانات.

معيار *NAMUR*: لماذا يُفضَّل في صناعة النفط والغاز؟

حساس NAMUR ليس فيه ترانزستور خرج؛ إنه مذبذب يغيّر مقاومته الداخلية. ويغذّيه المضخّم الفاصل بنحو 8.2 V عبر مقاومة داخلية نحو 1 kΩ، ثم يقرأ التيار:

الحالة	التيار التقريبي
الحساس «مُخمَّد» (Damped) أي الهدف أمامه في معظم الأنواع	1 mA أو أقل
الحساس «غير مُخمَّد» (Undamped)	3 mA أو أكثر
عتبة التبديل	بين 1.2 و2.1 mA

الحالة	التيار التقريبي
قطع السلك (Wire Break)	تيار يقارب الصفر، ويُكشف عادةً دون نحو 0.1 – 0.35 mA حسب المضخّم
قِصَر في الكابل (Short Circuit)	تيار كبير، ويُكشف عادةً فوق نحو 6 mA

الشكل 11-3: *مستويات التيار في دائرة NAMUR، وكيف يميّز المضخّم الفاصل بين حالتي الحساس وأعطال الخط.*

وهذا يحقق ثلاث فوائد: طاقة منخفضة تجعل الحساس مناسبًا للأمان الذاتي (Ex ia) مع مضخّم معتمد، وكشف أعطال الخط بحيث يدخل النظام حالة آمنة أو يطلق إنذارًا، ومضخّمات فاصلة معتمدة لمستويات سلامة (SIL) تصلح لدوائر الحماية. وتنبّه إلى أن اتجاه الخرج (هل الهدف يعني تيارًا منخفضًا أم مرتفعًا) يتوقف على الطراز، وأن كثيرًا من المضخّمات تسمح بعكس المنطق بمفتاح، فيجب توثيق ذلك في ورقة الحلقة.

مقاومات كشف الخط مع التلامسات الجافة: يمكن استخدام المضخّم نفسه مع مفتاح ميكانيكي (مفتاح ضغط مثلًا) بإضافة مقاومة على التوالي (نحو 400 Ω – 2 kΩ) وأخرى على التوازي (نحو 10 kΩ) عند المفتاح، فيرى

المضخّم تيارًا محددًا في الحالتين، ويميّز المفتاح المفتوح من السلك المقطوع. وهذا مطلوب في كثير من دوائر الحماية والحريق.

فحص حساس القرب في الموقع: خطوات

1. تحقق من التغذية على أطراف الحساس (عادة 10–30 V DC للثلاثي الأسلاك، أو 8.2 V عبر المضخم لحساس NAMUR).
2. قرّب هدفًا معياريًا (لوح فولاذ St37 (Fe360) مربع بضلع يساوي قطر الحساس وسمك 1 mm) ببطء نحو الوجه، وسجّل مسافة التبديل الفعلية؛ يجب أن تقع ضمن 81% إلى 121% من المسافة الاسمية Sn (المسافة المفيدة Su وفق IEC 60947-5-2)، وضمن 90% إلى 110% إذا أُجري الفحص عند شروط المرجع.
3. أبعد الهدف وسجّل مسافة الإرجاع؛ الفرق بينهما هو التخلف (Hysteresis) ويجب ألا يزيد على نحو 20% من المسافة الحقيقية Sr.
4. تحقق من مؤشر LED على الحساس ومن حالة الإدخال في النظام معًا؛ فاختلافهما يعني مشكلة في الأسلاك أو في التهيئة (PNP/NPN أو NO/NC).
5. لحساس NAMUR: قِس التيار في الحالتين؛ أقل من 1.2 mA مع الهدف قريبًا وأكثر من 2.1 mA بعيدًا، وتحقق من أن المضخم يعطي إنذار عطل عند فصل السلك (تيار قرب الصفر) وعند قصره (تيار كبير).
6. تحقق من فجوة التركيب النهائية بشريط قياس أو معيار سماكة: عادة بين 30% و70% من Sn المصححة بعامل المادة، وأن الهدف يعبر الوجه كاملًا في مساره.
7. للحساسات القابلة للغمر في التركيب (Embeddable): تأكد من الجلبة ومسافة المعدن المحيط وفق تعليمات المصنّع، ثم شدّ الصواميل ووثّق النتائج.

11.3 الحساسات الضوئية وفوق الصوتية

الحساسات الضوئية *(Photoelectric Sensors)*

تتكون من باعث (LED بضوء أحمر أو بالأشعة تحت الحمراء، أو ليزر) ومستقبِل، وتُقسَم حسب طريقة الترتيب:

النوع	المبدأ	المدى النموذجي	الاستخدام
الحزمة المتقابلة (Through-Beam)	باعث ومستقبل متقابلان، ويكشف الجسم حين يقطع الحزمة	حتى عشرات الأمتار	الأجسام المعتمة، والبيئات المتسخة
العاكس الارتدادي (Retro-Reflective)	الباعث والمستقبل في جسم واحد مقابل عاكس	حتى نحو 10 m	خطوط النقل؛ ويُستخدم النوع المُستقطِب (Polarized) مع الأجسام اللامعة
الانعكاس المنتشر (Diffuse)	الجسم نفسه يعكس الضوء	حتى نحو 1 – 2 m	أسهل تركيبًا، ويتأثر بلون الجسم ولمعانه
كبت الخلفية (Background Suppression)	يقيس زاوية الانعكاس بالتثليث فيتجاهل ما وراء مسافة محددة	حتى نحو 1 m	كشف جسم أمام خلفية لامعة أو ملوّنة
الألياف الضوئية (Fiber Optic)	الباعث والمستقبل في مضخّم، والطرف رأس ليفي صغير	مليمترات إلى سنتيمترات	الأماكن الضيقة والحرارة العالية

كيف أختار؟ الحزمة المتقابلة أولًا حيث البيئة متسخة أو المسافة طويلة أو الجسم معتم، لأن هامش كسبها الأعلى؛ والعاكس الارتدادي المُستقطِب حين يتعذر تمديد كابل إلى الجهة الأخرى؛ والانعكاس المنتشر مع كبت الخلفية للأجسام القريبة أمام خلفيات لامعة؛ والألياف للحرارة والضيق. ولا يُظهر الجدول هامش الكسب ولا لون الجسم ولمعانه، وهما

اللذان يحددان هل يعمل الحساس بعد شهر من الغبار. والخطأ الأكثر كلفة اعتماد حساس منتشر رخيص على خط نقل في بيئة مغبرة بكسب قريب من 1، فيتعطل الخط مرارًا بلا عطل ظاهر؛ والأخطر استعمال حساس ضوئي عادي حيث يلزم ستار ضوء آمن معتمد لحماية الأشخاص.

التشغيل بالضوء أو بالظلام (Light-On / Dark-On): يحدد هل يبدّل الخرج حين يستقبل الضوء أم حين ينقطع. وهو اختيار منطقي يجب أن يُطابق فلسفة الأمان: فيُفضَّل أن يقود انقطاعُ الإشارة أو تعطّلُ الباعث إلى الحالة الآمنة.

هامش الكسب (Excess Gain): نسبة الضوء المستقبَل إلى الحد الأدنى اللازم للتبديل. في البيئات النظيفة يكفي كسب 2 تقريبًا، أما مع الغبار والبخار والزيت فيُطلب 10 أو أكثر، وإلا تعطل الحساس مع أول طبقة غبار. وكثير من الحساسات الحديثة تعطي خرج «تحذير استقرار» (Stability Output) ينبّه قبل أن تضعف الإشارة إلى حد الفشل.

> **تنبيه أمان:** الحساس الضوئي العادي ليس جهاز حماية أشخاص. أما ستائر الضوء الآمنة (Safety Light Curtains) فأجهزة مصمَّمة ومعتمدة وفق IEC 61496 وتُدمج في دائرة سلامة بمستوى أداء محدد (ISO 13849).

الحساسات فوق الصوتية *(Ultrasonic Sensors)*

تقيس زمن رجوع نبضة صوتية ترددها عادةً بين 40 و400 kHz، فتكشف الأجسام الشفافة والسوائل والحبيبات بغض النظر عن اللون. لها منطقة عمياء (Blind Zone) قريبة من الوجه لا ترى فيها شيئًا، وتتأثر بالحرارة (فتعوّضها بحساس داخلي) وبالتيارات الهوائية والرغوة والأسطح المائلة التي تعكس الصوت بعيدًا. وكثير منها يعطي خرجًا منفصلًا ونافذة ضبط، وبعضها يعطي خرجًا تناظريًا للمسافة أيضًا.

11.4 مفاتيح العمليات: الضغط والحرارة والمستوى والتدفق

مفتاح العملية (Process Switch) يغيّر حالة تلامسه حين يعبر المتغيّر قيمةً مضبوطة. وعلى الرغم من انتشار المرسلات، ما زالت هذه المفاتيح شائعة في الحزم الميكانيكية (Packages) كالضواغط ومضخات التزييت والمراجل الصغيرة.

المفاهيم الأساسية

- **نقطة الضبط (Set Point):** القيمة التي يبدّل عندها المفتاح. ويجب أن يُحدَّد اتجاهها: عند الارتفاع (Rising) أم عند الانخفاض (Falling).
- **الفرق أو المنطقة الميتة (Deadband / Differential):** الفرق بين نقطة التبديل ونقطة الإرجاع. قد يكون ثابتًا أو قابلًا للضبط. والفرق الصغير جدًا يسبب ارتجاف التلامس مع تذبذب الضغط، والكبير جدًا يؤخر إعادة الضبط.
- **المدى القابل للضبط (Adjustable Range):** يُختار بحيث تقع نقطة الضبط في منتصفه تقريبًا (بين 25% و75%)، فهناك تكون الدقة والتكرارية أفضل.
- **ضغط الإثبات (Proof Pressure):** أقصى ضغط يتحمله العنصر دون تغيّر معايرته، ويجب أن يزيد على أقصى ضغط تشغيل.
- **وضع التلامس:** SPDT أو DPDT. ويُذكر في ورقة البيانات وضع التلامس في الحالة «الطبيعية» من دون ضغط، وهي غير حالة التشغيل المعتادة. وهنا يقع أكثر الالتباس.

مثال محلول: مفتاح ضغط زيت التزييت. ضغط زيت التزييت الطبيعي 2.5 bar، ويُطلب إنذار عند 1.5 bar وإيقاف عند 1.0 bar، والمفتاح المختار مداه 0.2 – 2 bar بفرق ثابت 0.2 bar (فتقع نقطتا الضبط عند نحو 44% و72% من المدى وفق قاعدة 25 إلى 75%).

- مفتاح الإيقاف يُضبط على 1.0 bar عند الانخفاض، فيعود عند 1.2 bar أثناء الارتفاع.
- مفتاح الإنذار يُضبط على 1.5 bar عند الانخفاض، فيعود عند 1.7 bar.
- الفرق بين الإنذار (1.5) والتشغيل الطبيعي (2.5) كافٍ لتفادي الإنذارات المزعجة، والفرق بين الإنذار والإيقاف (0.5 bar) يعطي المشغل وقتًا للتدخل.
- **منطق الأمان (Fail-Safe):** يُوصَل التلامس بحيث يكون مغلقًا والضغط طبيعي، وينفتح عند انخفاض الضغط. فإذا انقطع السلك رأى النظام «ضغطًا منخفضًا» وأوقف أو أنذر، ولم يغب العطل.
- **تجاوز البدء (Start-up Bypass):** عند بدء التشغيل يكون الضغط صفرًا، فيحتاج منطق التحكم إلى تجاوز مؤقت (Start-up Bypass) حتى تبني المضخة الضغط، مع إلغائه تلقائيًا بعد زمن محدد.

الشكل 11-4: *مفتاح ضغط زيت التزييت في المثال: يفتح التلامس عند 1.0 bar ولا يعود إلا بعد تجاوز 1.2 bar، فلا يرتجف مع تذبذب الضغط.*

اختبار مفتاح الضغط على المنضدة: خطوات

1. راجع ورقة البيانات: نقطة الضبط واتجاهها، والمنطقة الميتة، ووضع التلامس الطبيعي، وضغط الإثبات، وحدد حد القبول المسموح (عادة ±1% إلى ±2% من المدى القابل للضبط).
2. ركّب المفتاح على منضدة الاختبار بوصلة محكمة، وصل مضخة يدوية (أو مصدر ضغط منظم) ومرجع ضغط رقمي دقته أفضل من حد القبول بأربع مرات على الأقل، بحيث يرى المرجع الضغط نفسه الذي يراه المفتاح (الشكل 11-5).
3. صل التلامس بجهاز استمرارية أو مصباح 24 V عبر الطرفين اللذين ستستخدمهما الحلقة فعلًا (NO أو NC).
4. حرّك الضغط في اتجاه التبديل (رفعًا لمفتاح الضغط العالي، وخفضًا لمفتاح الضغط المنخفض) ببطء شديد قرب القيمة المتوقعة (أقل من 1% من المدى في

الثانية) حتى يبدّل التلامس، وسجّل قراءة المرجع: هذه نقطة الضبط كما وُجدت (As-Found).

5. اعكس اتجاه الضغط ببطء حتى يعود التلامس، وسجّل القراءة: هذه نقطة الإرجاع، والفرق بينهما المنطقة الميتة.
6. كرر الخطوتين 4 و5 ثلاث مرات؛ ويجب أن تكون التكرارية ضمن نصف حد القبول.
7. إذا خرجت نقطة الضبط عن حد القبول فاضبط برغي نقطة الضبط (وبرغي المنطقة الميتة إن وُجد)، ثم أعد الخطوات 4–6 وسجّل القيمة كما تُركت (As-Left).
8. ارفع الضغط إلى ضغط التشغيل الأقصى وتحقق من عدم وجود تسرب من الوصلة أو العنصر.
9. أعد التركيب في الموقع، وتحقق من الحلقة كاملة: فعّل المفتاح بالضغط الفعلي أو بمحاكاته عند المانيفولد، وراقب ظهور الإنذار أو الفصل في النظام مع تسجيل الزمن.
10. وثّق الاتجاه المختبَر؛ فمفتاح الضغط المنخفض يُختبر وهو يهبط، والمرتفع وهو يصعد، وقيمة الاتجاه الآخر لا تعني شيئًا للحماية.

الشكل 11-5: *ترتيب اختبار مفتاح ضغط على المنضدة: مضخة يدوية ومرجع ضغط رقمي على خط واحد مع المفتاح المختبر، وكاشف تلامس على الطرفين المستخدمين في الحلقة.*

مفاتيح الحرارة

تعمل ببصيلة ممتلئة بسائل أو غاز (Filled System) موصولة بأنبوب شعري إلى منفاخ، أو بقرص ثنائي المعدن (Bimetal) في المحركات والملفات، أو إلكترونيًا بحساس RTD. والأنبوب الشعري لا يُثنى ثنيًا حادًا ولا يُقطع، وطوله جزء من المعايرة. وتُركّب البصيلة داخل غمد حراري (Thermowell) مناسب، مع مراعاة أن الغمد يزيد زمن الاستجابة (الفصل 7).

مفاتيح المستوى والتدفق

عُرضت مفاتيح المستوى (العوامة، والشوكة الرنانة، والموصلية، والسعوية، والرادار) في القسم 9.9. أما مفاتيح التدفق فأشهرها:

- **مفتاح الريشة (Paddle / Vane):** ريشة تنحرف مع التدفق. بسيط، لكنه يتأثر بالترسبات والاهتزاز، ويحتاج إلى أطوال مستقيمة.
- **مفتاح التشتت الحراري (Thermal Dispersion):** مجسان حراريان أحدهما مُسخَّن؛ ويتناقص فرق الحرارة بينهما بزيادة التدفق. لا أجزاء متحركة فيه،

ويصلح للسوائل والغازات، ومنها حماية المضخات من التشغيل الجاف وتأكيد تدفق التبريد.

- **مفتاح الضغط التفاضلي عبر عنصر:** يستنتج التدفق من فرق الضغط على مصفاة أو لوح ثقب.

11.4.1 اختيار مفتاح الحرارة: ميكانيكي أم حالة صلبة

عرضنا مبدأ مفتاح الحرارة في فقرة «مفاتيح الحرارة» أعلاه؛ أما الاختيار بين أنواعه فتحسمه أربعة أسئلة:

1. ما مبدأ الاستشعار؟ المفاتيح الميكانيكية هي الأشيع في المنشآت لرخصها وكفايتها. وتعمل غالبًا بنظام **ضغط بخار** (سائل متطاير يولّد ضغطًا متغيرًا) أو بنظام **سائل مملوء**، وكلاهما يشغّل في النهاية مفتاح ضغط. أما **أنظمة الغاز فلا تولّد قوة كافية** لتشغيل آلية مفتاح، فلا تُستعمل هنا وإن صلحت للمقاييس. والقاعدة العملية: لا تختر المفتاح بمبدئه بل **بمدى نقطة الضبط ودقتها ومنطقتها الميتة المنشورة**؛ فكلا المبدأين يعطي نتائج مقبولة، والمصنّع يذكر المبدأ ولا يفضّله.

2. أين يُركّب؟ تركيب موضعي: البصيلة مثبّتة صلبًا في جسم المفتاح، والتجميعة تُلوَلب في الغمد وتُحمل عليه — أرخص شراءً وتركيبًا. **تركيب بعيد:** البصيلة موصولة بالآلية بأنبوب شعري طوله من 2 m إلى 8 m أو أكثر — يعطي وصولًا أسهل ويعزل الآلية عن اهتزاز العملية وحرارتها. وفي الحالتين **لا يمكن فصل المفتاح عن بصيلته في الموقع**؛ فأي عطل في البصيلة أو الشعري يعني استبدال التجميعة كاملة.

3. هل المنطقة الميتة مقبولة؟ أهم عيوب المفتاح الميكانيكي **منطقة ميتة معتبرة**: لا يعود التلامس عند نقطة الفصل نفسها. وهي مقبولة في معظم التطبيقات، لكنها تصير مشكلة حين تقع نقطة الضبط **قريبة من حرارة التشغيل المعتادة**، فلا يعود المفتاح أبدًا أو يرتجف تلامسه. والمنطقة الميتة منشورة في وثيقة المصنّع لكل طراز، فتُقرأ قبل

الشراء لا بعده. وعيبه الثاني أن كتلة البصيلة وسائل الملء تستقران ببطء، فالاستجابة أبطأ من الحالة الصلبة.

4. هل تلزم الحالة الصلبة؟ مفتاح **الحالة الصلبة (Solid State)** حساسه RTD أو مزدوج حراري أو ثرمستور، ودائرته الإلكترونية تشغّل مرحّلًا أو مخرجًا إلكترونيًا عند نقطة الضبط. وهو الخيار حين: تكون نقطة الضبط قريبة من التشغيل (منطقة ميتة تُضبط دون درجة واحدة أو أوسع كما يُراد)، أو يلزم مدى ضبط واسع، أو يلزم زمن استجابة قصير، أو تخرج نقطة الضبط عن قدرة الميكانيكي (الحالة الصلبة تغطي من 185− إلى 1370 °C بحساس مناسب، بينما يغطي الميكانيكي في مجمله من 85− إلى 540 °C لكن **كل طراز منه يغطي جزءًا صغيرًا فقط** من هذا المجمل بحسب سائل ملئه). وثمنه أعلى وتركيبه أعقد: إما غلاف مانع للانفجار في الموقع، أو تركيبه في منطقة غير خطرة وتمديد أسلاك الحساس إليه، أو تمديد أسلاك تغذية إضافية إلى الميدان.

التلامسات وترتيبها: الخرج مفتاح دقيق أو مرحّل، بترتيب SPDT أو DPDT، وDPDT هو المفضّل لمرونته. وهناك طرازات بآليتي SPDT مستقلتين يشغّلهما حساس واحد، لكلٍّ نقطة ضبط قابلة للضبط: وهي مناسبة لتشغيل مضختين عند حرارتين مختلفتين، و**غير مناسبة إطلاقًا** حين يُطلب عملان **متزامنان** كإطلاق إيقاف وإنذاره معًا — فلا يمكن ضبط الآليتين على نقطة واحدة بدقة. وللتزامن يُستعمل تلامس DPDT، أو زوج SPDT يشغّلهما **قرص قافز (Snap Disc، ويسمى نابض بلفيل)** واحد.

المواد والغلاف: لا أجزاء مبللة عادة لأن الغمد يفصل المفتاح عن المائع (القسمان 7.7 و 7.7-أ)، لكن المادة يجب أن تحتمل الجو المحيط: الفولاذ المقاوم للصدأ الأشيع، ثم النحاس والنحاس الأصفر. وكلمة «المواد» هنا تشمل **البصيلة والشعري والغلاف ودرع الشعري** لا جسم المفتاح وحده. ويُختار الغلاف للمنطقة: مانع للانفجار في المناطق الخطرة (الفصل 26)، ومقاوم للطقس في الخارج غير الخطر.

البديل الهوائي: حيث لا كهرباء، تتوفر **صمامات الحرارة (Temperature Valves)** — مفاتيح هوائية تعمل بمبدأ ثنائي المعدن بصمام ثنائي المنافذ (يفتح منفذ تنفيس عند

تجاوز نقطة الضبط) أو ثلاثي المنافذ (يوصل جهاز الاستقبال بمصدر الضغط أو ينفّسه). وتُستعمل في وحدات الآلات المتكاملة وأنظمة حماية المحركات الترددية في المواقع النائية.

◆ ◆ ◆

11.4.2 اختيار عنصر استشعار مفتاح الضغط ونمط ضبطه

(أ) عنصر الاستشعار. ليست مفاتيح الضغط نوعًا واحدًا، والاختيار بينها يحسم العمر والدقة ومقاومة الاهتزاز.

جدول مقارنة: عناصر استشعار مفاتيح الضغط الكهربائية (قيم نموذجية للمقارنة لا للتصميم)

المعيار	حالة صلبة	غشاء	أنبوب بوردون	مكبس	مكبس بفاصل غشائي
العمر النموذجي (دورات)	~10^7	~10^6	~10^6	~2.5×10^6	~10^6
مدى التشغيل	~0.1 إلى 690 bar	تفريغ إلى ~10 bar	~3.5 إلى 1240 bar	~1 إلى 1380 bar	تفريغ إلى ~70 bar
الدقة	±0.5% من المدى القابل للضبط	±0.5%	±0.5%	±2.0%	±2.0%
مقاومة الاهتزاز	ممتازة	جيدة	جيدة	جيدة	جيدة
مدى الفرق التبديلي	2 إلى 100% من المدى	2 إلى 7%	2 إلى 7%	2 إلى 7%	2 إلى 7%

المعيار	حالة صلبة	غشاء	أنبوب بوردون	مكبس	مكبس بفاصل غشائي
أين يُختار	تبديل متكرر، اهتزاز شديد، حاجة إلى فرق واسع قابل للضبط	ضغوط منخفضة ودقة	ضغوط عالية ودقة	ضغوط عالية وتبديل متكرر	ضغوط متوسطة مع مائع قذر أو أكّال

نقطتان في قراءة الجدول: **دقة المكبس أضعف بأربع مرات** من الغشاء والبوردون، فلا يُختار لحماية تحتاج نقطة ضبط دقيقة قرب حدّ تصميم؛ و**الحالة الصلبة وحدها تتيح ضبط الفرق التبديلي حتى 100% من المدى**، وهي الحل حين تكون المشكلة ارتجافًا لا يعالجه فرق 2 إلى 7%.

(ب) نمط الضبط. أربعة أنماط، واختيارها يمسّ إدارة التغيير لا الراحة فحسب:

النمط	الوصف	أين يُستعمل
مضبوط من المصنع (Factory-Set)	نقطة ضبط ثابتة لا تُعدَّل	أرخص؛ حيث لا تكون نقطة الضبط حرجة: واجهات كهربائية لحلقات هوائية، تأكيد ضغط في لوحة
ضبط داخلي (Internal Set)	برغي الضبط داخل الغلاف؛ يلزم فتحه	الأشيع للحمايات؛ فتح الغلاف بحد ذاته حاجز أمام العبث
ضبط خارجي (External Set)	يُضبط بلا فتح الغلاف، لكن بلا تدريج معاير	حيث يكثر التعديل ولا تكون القيمة حرجة
ضبط مزدوج (Dual Set)	ضبط خارجي **معاير**	حيث يلزم تعديل متكرر بقيمة معلومة

كيف أختار؟ للحمايات اختر الضبط الداخلي: فتح الغلاف عقبة مقصودة أمام العبث، وأي تغيير يمر بإدارة التغيير؛ واختر المضبوط من المصنع حيث القيمة غير حرجة ولن تتغير؛ ولا تختر الضبط الخارجي غير المعاير إلا حيث لا تهم القيمة الدقيقة، أو المزدوج المعاير حيث يتكرر التعديل بقيمة معلومة. ولا يُظهر الجدول أن نمط الضبط لا يعفي من اختبار

نقطة الضبط في الاتجاه الصحيح وعند المنطقة التي ستُستعمل فيها من المدى. والخطأ الأكثر كلفة مفتاح حماية بضبط خارجي غير معاير في ممر مزدحم، «يُعدَّل» بمفك في وردية ليلية لإسكات إنذار، فتنزاح نقطة الفصل بلا سجل.

وتنبيه على المديات المنشورة: مديات مفاتيح الضغط في الكتالوجات لا تتداخل إلا قليلًا أو لا تتداخل أصلًا، فقد تُضطر إلى شراء مفتاح تقع نقطة ضبطك قرب حدّ مداه المنشور. والمدى الفعلي يتجاوز المنشور قليلًا في العادة فلا تكون المشكلة حادة، لكن **تُوثَّق الحالة وتُختبر نقطة الضبط في المنطقة التي ستُستعمل فيها فعلًا**، ولا يُكتفى بالمعايرة في منتصف المدى.

(ج) فخّ اتساع الفرق التبديلي: تعارض إعادة الضبط بين مفتاحي حماية على الخط نفسه. إذا رُكّب مفتاح ضغط عالٍ ومفتاح ضغط منخفض على الخط نفسه، فيجب أن يعود مفتاح الضغط العالي **قبل** أن يبلغ الضغط الهابط نقطة فصل مفتاح الضغط المنخفض. فإن كان فرق المفتاح العالي واسعًا جدًا، بلغ الضغط بعد الفصل نقطة فصل المفتاح المنخفض **قبل** أن يعود المفتاح العالي؛ وقد تعجز المنظومة حينئذ عن إعادة الضبط دون تجاوز (Bypass) مؤقت، بحسب منطق الإمساك (Latch) في نظام الحماية. ويُفحص ذلك بالحساب قبل الشراء:

- نقطة فصل PSH − فرقها التبديلي = نقطة عودة PSH.
- يجب أن تبقى **نقطة عودة PSH أعلى من نقطة فصل PSL** بهامش واضح يحدده المصمم، ومن القواعد العملية ألا يقل عن ضعفي أكبر الفرقين التبديليين.

والفروق التبديلية تختلف كثيرًا بين الأنواع وبين المصنّعين، وتُقرأ من ورقة بيانات الطراز لا من قاعدة عامة.

◆ ◆ ◆

11.5 المؤقتات والعدادات وعدادات ساعات التشغيل

انتقلت معظم وظائف التوقيت والعدّ إلى برمجيات PLC ونظام التحكم الموزع (DCS)، لكن فهم أنواعها ضروري لقراءة الرسومات القديمة وتصميم الدوائر المستقلة.

النوع	السلوك	مثال تطبيقي
تأخير التشغيل – (On-Delay TON)	يبدّل الخرج بعد مرور الزمن من تفعيل المدخل	تأكيد بقاء الضغط منخفضًا 3 s قبل الإيقاف لتصفية النبضات
تأخير الإطفاء – (Off-Delay TOF)	يبقى الخرج مفعّلًا مدةً بعد زوال المدخل	إبقاء مروحة التبريد تعمل بعد إطفاء المحرك
النبضة (Pulse – TP)	يعطي نبضة بطول ثابت	أمر فتح أو إغلاق لمحرك صمام
النجمة والمثلث (Star-Delta)	زمن انتقال بين طريقتي التوصيل	بدء المحركات الكبيرة
العداد التصاعدي والتنازلي (CTU / CTD)	يعدّ النبضات حتى قيمة مضبوطة	عدّ عبوات أو دورات
عداد ساعات التشغيل (Hour Meter)	يجمع زمن التشغيل	جدولة الصيانة وتبديل المضخات الاحتياطية

عدّادات النبضات السريعة: مدخل PLC العادي يُمسح كل عدة ميلي ثوانٍ ويحتوي مرشحًا على المدخل، فقد يفقد نبضات ترددها بضع مئات من الهرتز. لذلك تُستخدم بطاقات العدّ السريع (High-Speed Counter) أو مدخلات التردد لحساسات السرعة والمشفّرات وعدادات التدفق النبضية.

> **مثال محلول:** حساس قرب يكشف 4 براغٍ على قرص عمود مضخة يدور بسرعة 2970 rpm.
>
> - المعادلة: التردد = (السرعة × عدد الأهداف) ÷ 60.
> - التعويض: التردد = (2970 × 4) ÷ 60.
> - النتيجة: 198 Hz، أي نبضة كل 5 ms تقريبًا، وعرض النبضة نحو 2.5 ms إذا كان البرغي والفراغ متساويين.
> - التفسير: مدخل عادي بمرشح 3 ms وزمن مسح 20 ms لن يعدّها بدقة، فيجب استخدام مدخل عدّ سريع أو خفض عدد الأهداف.

11.6 المشفّرات وحساسات هول (Hall) وحساسات السرعة

المشفّر التزايدي *(Incremental Encoder)*

قرص مقسّم بخطوط يمر عليها ضوء (النوع الضوئي) أو مجال مغناطيسي (النوع المغناطيسي)، فيعطي قناتين A وB بينهما إزاحة طورية 90° (Quadrature)، وقناة مرجعية Z تعطي نبضة واحدة في كل دورة.

- **دقة التمييز (PPR – Pulses Per Revolution):** عدد النبضات في الدورة على قناة واحدة؛ وهو مقياس لدقة التمييز (Resolution) لا للدقة (Accuracy).
- **فك التشفير الرباعي (4× Decoding):** عدّ حواف الصعود والهبوط على القناتين يعطي أربعة أضعاف دقة التمييز.
- **الاتجاه:** يُعرف من أيّ القناتين تسبق الأخرى.
- **أنواع الخرج:** TTL تفاضلي (RS-422) للمسافات الأطول والمناعة ضد الضوضاء، أو HTL (10 – 30 V) للبيئات الصناعية، أو المجمّع المفتوح (Open Collector) للمسافات القصيرة.

- **العيب الأساسي:** يفقد الموضع عند انقطاع التغذية، فيحتاج إلى حركة مرجعية (Homing) بعد كل تشغيل.

الشكل 11-6: *إشارات المشفّر التزايدي: القناتان A وB بإزاحة 90°، والنبضة المرجعية Z مرة في كل دورة.*

مثال محلول: مشفّر 1024 PPR على عمود بكرة قطرها 100 mm تحرّك سيرًا ناقلًا.

- العدّات في الدورة بفك رباعي: 1024 × 4 = 4096.
- محيط البكرة: π × 100 ≈ 314.16 mm.
- دقة التمييز الخطية: 314.16 ÷ 4096 ≈ 0.077 mm لكل عدّة.
- عند 1500 rpm يكون تردد القناة A = 1500 × 1024 ÷ 60 = 25,600 Hz، فيجب أن تقبل بطاقة العدّ 25.6 kHz على الأقل مع هامش مناسب.

المشفّر المطلق *(Absolute Encoder)*

يعطي كلمة رقمية فريدة لكل موضع، فيعرف الموضع فور التشغيل دون حركة مرجعية.

- **أحادي الدورة (Single-Turn):** يميّز المواضع داخل دورة واحدة (مثل 13 بت = 8192 موضعًا).
- **متعدد الدورات (Multi-Turn):** يعدّ الدورات أيضًا بمسننات داخلية أو بتقنية فيغاند (Wiegand) دون بطارية.
- **شيفرة غراي (Gray Code):** يتغيّر بت واحد فقط بين كل موضعين متجاورين، فتختفي القراءات الخاطئة لحظة الانتقال.
- **الواجهات:** SSI وBiSS وEnDat، أو شبكات صناعية مثل PROFINET و EtherNet/IP وCANopen.

المحلّل *(Resolver)*

محوّل دوّار بلا إلكترونيات: ملف تغذية وملفّان متعامدان يعطيان جهدين يتناسبان مع جيب الزاوية وجيب تمامها. يتحمل الحرارة والاهتزاز والإشعاع، لذلك يُستخدم في محركات السيرفو في الظروف الشاقة وتطبيقات الطيران.

حساسات هول

تعتمد على ظهور جهد عمودي على اتجاه التيار في شريحة شبه موصلة داخل مجال مغناطيسي (ظاهرة هول). ومنها مفاتيح هول الرقمية للموضع وكشف القطب، وحساسات هول الخطية للزاوية والتيار، وحساسات السرعة النشطة (Active Speed Sensors) التي تعمل حتى السرعة الصفرية تقريبًا، بخلاف الحساس المغناطيسي السلبي. وهي التقنية نفسها المستخدمة في حساسات سرعة العجلات والمحركات في السيارات، وانتقلت إلى الصناعة لموثوقيتها وصغر حجمها.

حساسات السرعة المغناطيسية في التوربينات *(Magnetic Pickups – MPU)*

ملف حول مغناطيس دائم يُركّب مقابل عجلة مسننة على العمود. مرور كل سن يغيّر الفيض فيتولد جهد متناوب تردده:

$$f = (N \times Z) \div 60$$

حيث N السرعة بالدورة في الدقيقة، وZ عدد الأسنان.

> **مثال:** عجلة من 60 سنًا على توربين غازي سرعته الاسمية 3000 rpm تعطي

$$f = 3000 \times 60 \div 60 = 3000 \text{ Hz}.$$

ولهذا يُختار في كثير من الآلات عدد 60 سنًا؛ فيصبح التردد بالهرتز مساويًا للسرعة بالدورة في الدقيقة، ويسهل الفحص بمولّد إشارة.

نقاط عملية:

- جهد الخرج يزيد مع السرعة ويقل مع اتساع الفجوة. والفجوة النموذجية بين نحو 0.25 و1 mm حسب الصانع، وتُضبط بمقياس الفجوات (Feeler Gauge) أثناء التركيب.
- الحساس السلبي لا يعطي إشارة كافية عند السرعات المنخفضة جدًا، لذلك تُستخدم حساسات نشطة (Hall أو تيارات دوّامية) لكشف السرعة الصفرية (Zero Speed) وتشغيل جهاز التدوير البطيء (Turning Gear).
- حماية تجاوز السرعة (Overspeed) تعتمد عادةً على ثلاثة حساسات بتصويت اثنين من ثلاثة (2oo3)، في نظام حماية مستقل عن نظام التحكم، مع اختبار دوري بالمحاكاة (الفصل 32).
- الكابل مجدول محجوب، والحجب موصول بالأرض من طرف واحد في الغالب، والمسار بعيد عن كابلات القدرة؛ لأن الإشارة جهد متناوب ضعيف عند السرعات الدنيا.

11.7 حساسات الموضع LVDT وRVDT

محوّل الإزاحة التفاضلي الخطي (LVDT – Linear Variable Differential Transformer): ملف ابتدائي تغذّيه موجة جيبية (نحو 3 – 7 Vrms بتردد بين 1 و10

kHz تقريبًا حسب الطراز)، وملفّان ثانويان على جانبيه موصولان على التعاكس، وقلب حديدي متحرك مربوط بساق الصمام. في موضع الوسط (Null) يتساوى الجهدان فيكون فرقهما صفرًا تقريبًا، ومع تحرك القلب يزداد جهد أحد الثانويين وينقص الآخر، فتعطي سعة الفرق مقدار الإزاحة، ويعطي طوره اتجاهها.

الشكل 11-7: *تركيب LVDT ومنحنى خرجه: سعة الجهد تعطي مقدار الإزاحة عن نقطة الوسط، والطور يعطي اتجاهها.*

مزاياه: لا تلامس بين القلب والملفات فلا تآكل، ودقة تمييز عالية جدًا، وتحمّل جيد للحرارة والاهتزاز. لذلك هو الخيار المعتاد لتغذية موضع صمامات الوقود وصمامات البخار ومشغّلات أدلة التوجيه الداخلة (Inlet Guide Vanes – IGV) في التوربينات الغازية، ولمشغّلات السيرفو الهيدروليكية عمومًا. وتفصيل بنيته وقراءته النسبية ومعايرته على المنضدة في القسم 12.5.

RVDT (Rotary Variable Differential Transformer): الصيغة الدوّارة، وتقيس زوايا محدودة (عادةً من ±30° إلى ±40°، وحتى ±60° بخطية أقل).

التكرار في التوربينات: يُركّب على الصمام الحرج عادةً اثنان من محولات LVDT، ويختار نظام التحكم قيمة واحدة منهما (العليا عند بعض الصانعين، أو المتوسط، أو الأقرب إلى

الأمر) ويطلق إنذار انحراف عند اختلافهما (حسب فلسفة الصانع). وتُعاير حلقة السيرفو في التشغيل التجريبي بإجراء «معايرة LVDT» الذي يسجّل جهد الإغلاق الكامل والفتح الكامل، ثم تُحسب منهما الإزاحة من 0 إلى 100%.

نقاط تركيب وتشخيص:

- **المحاذاة:** يجب أن يتحرك القلب محوريًا دون احتكاك بجدار الأنبوب؛ فالانحراف الجانبي يسبب تآكل القضيب أو قراءات متقطعة.
- **النطاق الخطي:** يجب ألا يخرج القلب من النطاق الخطي عند نهايتي الشوط، وألا يعبر نقطة الصفر (Null) ضمن شوط العمل إذا كانت الإلكترونيات لا تميّز الاتجاه، ويُتبع في ذلك تعليمات الصانع.
- **فحص الملفات:** تُقاس مقاومة الملف الابتدائي والملفين الثانويين وتُقارن بالقيم المرجعية، ويُقاس العزل مع الأرض.
- **الكابل:** أزواج مجدولة محجوبة ومسار بعيد عن كابلات القدرة ومصادر الحرارة العالية، مع مراعاة أن إشارة الإثارة عالية التردد تتأثر بطول الكابل وسعته.

11.8 المفتاح أم المرسل؟

تغيّرت الممارسة في العقدين الأخيرين: كثير من مواصفات شركات النفط والغاز تطلب مرسلات بدل المفاتيح في وظائف الإنذار والإيقاف، وتُشتق نقاط التبديل برمجيًا.

المعيار	مفتاح العملية	المرسل مع نقطة تبديل برمجية
كشف الأعطال	لا يُعرف عطله إلا بالاختبار، وقد يعلق دون أن يلاحظ أحد	القراءة الحية تكشف التجمد والانحراف، والتشخيص يكشف قطع الحلقة (NAMUR NE 43)
المقارنة بين الأجهزة المتكررة	غير ممكنة	ممكنة بإنذار الانحراف

المعيار	مفتاح العملية	المرسل مع نقطة تبديل برمجية
تغيير نقطة الضبط	عمل ميداني ومعايرة	تعديل برمجي موثّق بإدارة التغيير (MOC)
المعلومات للمشغل	حالة فقط	القيمة والاتجاه ومدى الاقتراب من الحد
الكلفة الأولية	منخفضة	أعلى، لكن الفرق تقلّص كثيرًا
الاختبار الدوري	يحتاج غالبًا إلى ضغط أو حرارة حقيقيين	يمكن بمحاكاة التيار مع فحص جزئي للحساس
الاعتماد في دوائر السلامة	يحتاج إلى بيانات موثوقية وتقييم	مرسلات بشهادات SIL متاحة على نطاق واسع

متى يبقى المفتاح خيارًا صحيحًا؟ في الحزم البسيطة ذات الكلفة المحدودة، وفي الدوائر المستقلة التي لا تمر بنظام تحكم (كحماية محلية لمضخة)، وحيث يفرضه الصانع شرطًا لضمان المعدة. ويبقى حساس القرب والمفتاح الحدّي الوسيلة الطبيعية لتأكيد موضع صمامات الإغلاق والفتح.

> **قاعدة تصميمية:** في كل وظيفة إيقاف اسأل: كيف سأعرف أن هذا الجهاز تعطّل قبل أن أحتاج إليه؟ فإن كان الجواب «في الاختبار الدوري فقط»، ففكّر في المرسل أو في تقصير فترة الاختبار (القسم 29.4).

11.9 حالة ميدانية: صمام وقود «يفتح» على الشاشة ولا يفتح في الحقيقة

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في أثناء إعادة تشغيل توربين غازي بعد استبدال مشغّل صمام التحكم في الغاز، نجح الإشعال لكن التوربين فُصل مرارًا في مرحلة التسارع، وأطلق نظام التحكم إنذار «فشل

التسارع». وكانت شاشة المشغل تُظهر أن الصمام يتبع الأمر تمامًا، وأن الخطأ بين الأمر والموضع أقل من 1%.

تبيّن بالفحص أن قضيب LVDT أُعيد تركيبه بعد تغيير المشغّل دون إعادة المعايرة، وأن وصلة القضيب رُكّبت بإزاحة بضعة مليمترات. فصار جهد «الإغلاق الكامل» المخزّن في النظام لا يقابل موضع الإغلاق الحقيقي، وصارت نسبة 100% على الشاشة تقابل نحو 85% من الشوط الحقيقي. كانت حلقة السيرفو تعمل بإتقان، لكنها تتبع قراءة خاطئة، فكانت كمية الوقود الفعلية أقل مما يفترضه منحنى التسارع.

أُعيدت المعايرة بالطريقة المعتمدة: تحريك الصمام إلى الإغلاق الميكانيكي الكامل ثم الفتح الكامل، وقياس الشوط بمسطرة على الساق، وتسجيل الجهدين في النظام، ثم التحقق عند 25% و50% و75%. وبعدها تسارع التوربين طبيعيًا.

الدروس:

- الإشارة التي «تتبع الأمر» على الشاشة تثبت أن الحلقة مغلقة، لا أن الحساس صحيح.
- كل فكّ لقضيب LVDT أو لعلبة مفاتيح حدية يستدعي إعادة معايرة وتوثيق، ويجب أن يُكتب ذلك في أمر العمل.
- التحقق الميكانيكي المستقل (مسطرة على الساق أو مؤشر الموضع على الصمام) مرجع لا غنى عنه.

حالة قصيرة ثانية: في حزمة ضاغط جديدة وردت حساسات قرب من نوع NPN، بينما كانت بطاقات الإدخال في نظام التحكم تتوقع إشارة PNP. أظهر مصباح الحساس أنه يعمل، ولم ترَ البطاقة شيئًا. كان الحل الأسلم استبدال الحساسات بنوع PNP بدل إضافة مرحلات وسيطة، وأُضيف بند نوع الخرج صراحةً إلى قائمة الإشارات ومواصفات الحزم اللاحقة.

دور المهندس ودور الفني:

المرحلة	دور المهندس	دور الفني
التصميم	يحدد نوع الحساس وطريقة حمايته في المنطقة الخطرة، ونوع الخرج (PNP أو NPN أو NAMUR) في قائمة الإشارات، ومنطق الأمان عند قطع السلك، ونقاط الضبط واتجاهها وفرقها، ومهلة عدم التطابق	يراجع إمكان التركيب: المسافة المضمونة، والمعدن المحيط، والوصول إلى براغي الضبط وكامات علب الحدود
التركيب والتشغيل التجريبي	يعتمد نتائج اختبار المفاتيح وزمن شوط الصمامات المقيس، ويقرر المفتاح أم المرسل في الوظائف الحرجة	يضبط الفجوات والكامات، ويختبر المفاتيح على المنضدة في الاتجاه الصحيح، ويقيس تيارات NAMUR، ويعاير LVDT بالشوط الميكانيكي الحقيقي
الصيانة	يشترط في أوامر العمل إعادة المعايرة بعد أي فكّ ميكانيكي، ويراجع الأعطال المتكررة	يعيد معايرة LVDT وعلب الحدود بعد كل فكّ، ويوثّق «كما وُجد» و«كما تُرك»

11.10 الأخطاء الشائعة

- تركيب حساس القرب على المسافة الاسمية بدل المسافة المضمونة، ونسيان عامل تصحيح المادة.
- تركيب حساس غير محجوب مستويًا مع سطح معدني.
- الخلط بين NPN وPNP، أو توصيل حساس ثنائي الأسلاك بمدخل حساس لتيار التسرب.
- عدم تحديد اتجاه نقطة ضبط المفتاح (عند الارتفاع أم الانخفاض) وقيمة الفرق.

- توصيل تلامس الإيقاف بحيث يكون مفتوحًا في التشغيل الطبيعي، فيضيع كشف قطع السلك.
- ضبط مفتاح «مغلق» في علبة الحدود قبل نهاية الشوط بكثير.
- مهلة عدم تطابق عامة لا تناسب زمن شوط الصمام الفعلي.
- تلامسات فضية لإشارات منخفضة الطاقة (24 V وبضعة ميلي أمبيرات) تتأكسد وتعطي اتصالًا متقطعًا؛ والصواب تلامسات مطلية بالذهب أو تيار ترطيب (Wetting Current) كافٍ.
- قراءة نبضات سريعة بمدخل منفصل عادي بدل بطاقة العدّ السريع.
- فكّ قضيب LVDT أو كامات علبة الحدود دون إعادة المعايرة.
- اعتبار الحساس الضوئي العادي جهاز حماية للأشخاص.

11.11 ملخص

الحساسات المنفصلة تبدو بسيطة، لكن نجاحها في التفاصيل: المسافة المضمونة وعامل المادة لحساس القرب، ونوع الخرج وطريقة التوصيل، ونقطة الضبط واتجاهها والفرق في مفتاح العملية، ومنطق الأمان الذي يجعل قطع السلك حالة مكشوفة. ومعيار NAMUR يجمع الأمان الجوهري إلى كشف أعطال الخط، ولذلك هو من أوسع الحلول انتشارًا في المناطق الخطرة. والمشفّر التزايدي يعطي حركة نسبية تحتاج إلى مرجع، أما المطلق فيعرف موضعه فور التشغيل. وLVDT عين نظام التحكم على صمامات الوقود وأدلة التوجيه، ومعايرته شرط بعد كل تدخل ميكانيكي. والاتجاه الحديث استبدال مفاتيح العمليات بمرسلات تُكشف أعطالها وتُقارن قراءاتها.

وفي الفصل التالي: يتناول الفصل 12 «القياسات المتخصصة: الكثافة واللزوجة والرطوبة والوزن والموضع والقوة»، فيكمل قياس الموضع بتفصيل LVDT وتقنيات الإزاحة، ويضيف قياسات أخرى خارج المتغيرات الأربعة الكبرى.

11.12 أسئلة التقييم الذاتي

1. حساس حثّي مسافته الاسمية 15 mm والهدف من الألمنيوم بعامل 0.4. ما المسافة المضمونة؟ وما الفجوة التي تقترحها؟
2. ما الفرق بين الحساس المحجوب وغير المحجوب؟ ومتى تختار كلًا منهما؟
3. اشرح كيف يكشف المضخّم الفاصل قطع السلك والقِصَر في دائرة NAMUR.
4. لماذا قد يرى مدخل PLC حساسًا ثنائي الأسلاك مفعّلًا دائمًا؟ وكيف يُعالَج ذلك؟
5. ما فائدة هامش الكسب في الحساسات الضوئية؟ ولماذا يُطلب كسب أعلى في البيئات المتسخة؟
6. مفتاح حرارة مضبوط على 90 °C عند الارتفاع بفرق 5 °C. متى يبدّل ومتى يعود؟ ولماذا لا يُختار فرق 0.5 °C؟
7. مشفّر 2500 PPR على محرك يدور بسرعة 3000 rpm. ما تردد القناة A؟ وما عدد العدّات في الدورة بفك رباعي؟
8. ما ميزة شيفرة غراي في المشفّرات المطلقة؟
9. عجلة مسننة من 72 سنًا على عمود ضاغط يدور بسرعة 9000 rpm. احسب تردد إشارة الحساس المغناطيسي، وبيّن لماذا لا يصلح هذا الحساس لكشف السرعة الصفرية.
10. في الحالة الميدانية (القسم 11.9)، اقترح ثلاثة إجراءات تمنع تكرار المشكلة في الصيانات القادمة.

مراجع الفصل: مفاتيح القرب الحثية والسعوية والضوئية والحدية والمؤقتات والعدادات والمشفّرات والمرحلات الريدية (Manesis & Nikolakopoulos، Introduction to Industrial Automation، الفصل 2)؛ حساسات Hall وحساسات السرعة والموضع (Bosch، Automotive Mechatronics)؛ أساسيات الحساسات والمشغّلات (الظفري، الشامل في هندسة الميكاترونكس)؛ أنواع الإشارات المنفصلة والتلامسات الجافة وحماية

الأجهزة في المناطق الخطرة (I&C Design Basis)؛ معايرة أجهزة الموضع واختبار الصمامات في التشغيل التجريبي (I&C Commissioning Instruction)، (MAPNA/Monenco)؛ IEC 60947-5-1؛ IEC 60947-5-2؛ IEC 60947-5-6؛ IEC 61131-9؛ IEC 61496؛ ISO 13849؛ NAMUR NE 43؛ خبرة المؤلف في تشغيل التوربينات الغازية؛ وR63 (اختيار مفتاح الحرارة)؛ وR64 (عنصر استشعار مفتاح الضغط).

الفصل 12: القياسات المتخصصة: الكثافة واللزوجة والرطوبة والوزن والموضع والقوة

لمن هذا الفصل: مهندس الموقع الذي يصادف في المصنع أجهزة خارج «المتغيرات الأربعة الكبرى» (الضغط والحرارة والتدفق والمستوى)، ومهندس التصميم الذي يختار خلايا الوزن وحساسات الموضع ويحدد أجهزة الحماية الميكانيكية، والفني الذي يستعمل أدوات القياس الدقيقة في العمرات. هذه القياسات أقل عددًا، لكن بعضها يحدد جودة المنتج أو قيمة الفاتورة، وبعضها يغذي حلقات التحكم والحماية في الآلات مباشرة.

الفكرة الأساسية: معظم هذه الأجهزة تقيس شيئًا غير ما تُظهره: الكثافة تُستنتج من تردد اهتزاز، والوزن من انفعال معدن، والموضع من جهد ملفين أو من زمن عودة موجة. ومن يعرف المبدأ يعرف متى يخطئ الجهاز: فخلية الوزن المشدودة بأنبوب صلب، وLVDT المركّب بإزاحة بعد الصيانة، والكثافة المذكورة بلا حرارة مرجعية، كلها تعطي رقمًا مطمئنًا وخاطئًا.

12.1 قياس الكثافة

تُقاس الكثافة (Density) لتحويل التدفق الحجمي إلى كتلي، ولمراقبة تركيز المحاليل (حمض الكبريتيك، السكر، اللب)، ولكشف السطح الفاصل بين منتجين في خط أنابيب متعدد المنتجات، وفي القياس التجاري للنفط لتصحيح الحجم إلى الظروف القياسية.

الطريقة	المبدأ	الدقة النموذجية	ملاحظات
الأنبوب المهتز وكوريوليس (Vibrating Tube / Coriolis)	تردد رنين الأنبوب ينخفض بزيادة كتلة السائل داخله	نحو ±0.5 kg/m³ أو أفضل	يعطي التدفق الكتلي والكثافة معًا (الفصل 8)؛ تتأثر دقته بالفقاعات
الشوكة الرنانة (Vibrating Fork)	تردد شوكة مغمورة يتغيّر مع كثافة الوسط	نحو ±1 kg/m³	تُركّب مباشرة في الخط أو الخزان، وبعضها يقيس اللزوجة أيضًا
الإشعاعي (Gamma Density)	امتصاص أشعة غاما عبر الأنبوب	نحو ±1 – 5 kg/m³ حسب القطر وزمن التكامل	من خارج الأنبوب دون تلامس؛ للطين والمواد المسببة للتآكل؛ يحتاج تراخيص (الفصل 9)
الضغط التفاضلي (Hydrostatic)	فرق الضغط بين نقطتين بينهما ارتفاع ثابت	تتوقف على المسافة بين المأخذين	بسيط ورخيص في الخزانات والأوعية

كيف أختار؟ إن كان في الخط عداد كوريوليس أصلًا فالكثافة تأتي منه بلا كلفة إضافية وبأفضل دقة؛ وللخط أو الخزان دون عداد كتلي تكفي الشوكة الرنانة؛ ولا يُلجأ إلى الإشعاعي إلا للطين والموائع الأكالة حيث يمتنع التلامس، ويبقى الضغط التفاضلي للخزانات حين تكفي دقته. والجدول يذكر الدقة النموذجية ولا يذكر ما يفسدها: الفقاعات في الأنبوب المهتز، وقصر المسافة بين المأخذين في الطريقة الهيدروستاتيكية، وغياب الحرارة المرجعية في أي طريقة. وأكثر الأخطاء كلفة تحديد كثافة تجارية أو تركيز محلول بطريقة تفاضلية على مسافة قصيرة، فيصير التغير المطلوب كشفه أصغر من دقة المرسل.

> **مثال محلول (الكثافة بالضغط التفاضلي):** مرسل ضغط تفاضلي بغشاءين عن بُعد موصولين بمأخذين على خزان، والمسافة الرأسية بينهما h = 1.5 m، والمستوى أعلى من المأخذ العلوي دائمًا. يقرأ المرسل بعد تصفير أثر سائل الشعيرات ΔP = 18.1 kPa.

$$\rho = \Delta P \div (g \times h) = 18{,}100 \div (9.81 \times 1.5) \approx 1230 \ \text{kg/m}^3.$$

وحساسية الطريقة: تغيّر 10 kg/m³ في الكثافة يغيّر ΔP بمقدار

$$9.81 \times 1.5 \times 10 \approx 147 \ \text{Pa}$$

فقط؛ لذلك يحتاج مرسلًا دقيقًا وتعويضًا حراريًا لسائل الشعيرات، ولا يصلح للفروق الصغيرة جدًا.

الشكل 12-1: *قياس الكثافة بمرسل ضغط تفاضلي موصول بمأخذين على الخزان بينهما مسافة رأسية ثابتة h.*

تستخدم الصناعات وحدات بديلة: الوزن النوعي (Specific Gravity) بالنسبة إلى الماء، ودرجات API في النفط (API = 141.5 ÷ SG − 131.5 عند 60 °F)، ودرجات بريكس (Brix) في الصناعات الغذائية. وكل قياس للكثافة يجب أن تُذكر معه حرارة القياس أو الحرارة المرجعية (15 °C أو 60 °F).

12.2 قياس اللزوجة

اللزوجة (Viscosity) مقاومة المائع للجريان. وهناك نوعان يجب التمييز بينهما:

- **اللزوجة الديناميكية (μ):** وحدتها Pa·s، والشائع السنتيبواز (cP = mPa·s). الماء عند 20 °C نحو 1 cP.
- **اللزوجة الكينماتيكية (ν):** وحدتها mm^2/s، وتُسمى سنتيستوكس (cSt)، والعلاقة بينهما $\nu = \mu \div \rho$. وهي المستخدمة في تصنيف زيوت التزييت (درجات ISO VG عند 40 °C) ووقود المراجل.

أين تُقاس في الخط؟ في محطات تسخين الوقود الثقيل (HFO) للمحركات والمراجل، حيث يُضبط السخان لتحقيق لزوجة مطلوبة عند الحارق (التحكم التعاقبي: لزوجة ← حرارة ← بخار)، وفي خلط المنتجات النفطية، وفي مصانع البوليمرات والدهانات والأغذية.

الأنواع الصناعية:

- **الاهتزازي (Vibrational):** عنصر مغمور يهتز، وتُستنتج اللزوجة من التخميد. مناسب للخطوط ولا أجزاء متحركة فيه، لكنه يقيس عند معدل قص واحد، وهذا مهم مع الموائع غير النيوتنية.
- **الدوّار (Rotational):** يقيس العزم اللازم لتدوير عنصر بسرعة ثابتة. شائع في المختبرات، ومنه نماذج ميدانية.
- **الضغط التفاضلي عبر أنبوب شعري (Capillary):** بمبدأ هاغن-بوازيل (Hagen–Poiseuille) لتدفق صفحي تدفعه مضخة ثابتة التدفق.

واللزوجة شديدة التأثر بالحرارة (قد تتغيّر بضعة بالمئة لكل درجة في الزيوت)، لذلك تُقاس الحرارة في الموضع نفسه وتُذكر اللزوجة دائمًا مع حرارتها.

12.3 قياس الرطوبة ونقطة الندى

عُرِّفت نقطة الندى ومبادئ قياسها في فصل المحللات (القسمان 10.5 و10.9)؛ ونجمع هنا المصطلحات وأرقام الأداء النموذجية التي يحتاجها من يحدد حساس رطوبة، ثم نطبقها على هواء الأجهزة.

المصطلحات:

- **الرطوبة النسبية (RH):** نسبة ضغط بخار الماء إلى ضغط التشبع عند الحرارة نفسها؛ تتغيّر مع الحرارة وإن لم تتغيّر كمية الماء.
- **نقطة الندى (Dew Point):** الحرارة التي يبدأ عندها التكثف، وتتوقف على الضغط؛ لذلك يُميَّز بين نقطة الندى عند الضغط الجوي ونقطة الندى عند ضغط الخط (Pressure Dew Point).
- **المحتوى المائي المطلق:** بـ ppmv أو mg/Sm^3، وهو المستخدم في مواصفات الغاز الطبيعي.

التقنية	المدى والدقة النموذجية	الاستخدام
البوليمر السعوي (Capacitive Polymer)	0 – 100% RH، نحو ±2 – 3% RH	التكييف، غرف التحكم، هواء دخول التوربينات
أكسيد الألمنيوم والسيراميك (Aluminium Oxide / Ceramic)	نقط ندى منخفضة حتى نحو −80 °C، نحو ±2 °C	هواء الأجهزة، الغازات الجافة، مجففات الامتزاز
المرآة المبرّدة (Chilled Mirror)	نحو ±0.1 – 0.2 °C	مرجع معايرة ومختبرات
مطيافية الليزر (TDLAS)	ppmv بدقة عالية واستجابة سريعة	رطوبة الغاز الطبيعي في القياس التجاري (الفصل 10)

كيف أختار؟ للرطوبة النسبية في الهواء المحيط وغرف التحكم يكفي البوليمر السعوي؛ ولنقاط الندى المنخفضة في هواء الأجهزة والغازات الجافة يُختار أكسيد الألمنيوم أو السيراميك؛ ولا تُشترى مطيافية الليزر إلا حيث يلزم محتوى مائي بالجزء في المليون في

غاز تجاري، وتبقى المرآة المبردة مرجعًا للمعايرة لا جهازًا ميدانيًا. والجدول لا يبين ضغط القياس: نقطة الندى عند ضغط الخط غير نقطة الندى الجوية، فحدد أيهما تريد قبل المدى والدقة. وأكثر الأخطاء كلفة مجس سعوي يُترك يتلوث وينجرف دون معايرة سنوية، فيُطمئن إلى هواء أجهزة رطب يصل ماؤه إلى الموضّعات والصمامات الملفية.

هواء الأجهزة: تشترط ANSI/ISA-7.0.01 أن تكون نقطة الندى عند ضغط الخط أدنى بـ 10 °C على الأقل من أدنى حرارة محيطة يتعرض لها أي جزء من شبكة الهواء. فإذا كانت أدنى حرارة شتوية في الموقع 5 °C−، فالمطلوب نقطة ندى لا تزيد على 15 °C− عند ضغط الشبكة. ويُركّب محلل نقطة الندى بعد المجفف، مع إنذار يكشف تشبّع مادة التجفيف قبل أن يصل الماء إلى الموضّعات والصمامات الملفية (القسم 25.8.2).

> **تنبيه عملي:** المجسات السعوية تنجرف بالتلوث والتكثف المباشر، وتُعاير عادةً سنويًا بمولّدات رطوبة أو بمحاليل ملحية مشبعة ذات رطوبة معروفة، أو تُستبدل رؤوسها المعايَرة.

12.4 الوزن وخلايا الحمل

المبدأ: خلية الحمل (Load Cell) جسم معدني مرن ملصوق عليه مقاييس انفعال (Strain Gauges) موصولة في قنطرة ويتستون (Wheatstone Bridge). تغذَّى القنطرة بجهد إثارة (عادةً 5 – 10 V)، ويعطي خرجها بضعة ميلي فولتات تتناسب مع الحمل. وتُوصَف حساسيتها بـ mV/V، والشائع 2 mV/V عند الحمل الاسمي.

الأشكال: عمود ضغط (Canister)، وكمرة قص (Shear Beam)، ونوع S للشد والتعليق، ووحدات تركيب جاهزة للخزانات تسمح بحركة التمدد وتمنع انقلاب الخزان. وفئات الدقة المترولوجية تحددها توصية OIML R60 (مثل الفئة C3 المناسبة لـ 3000 تقسيمة).

مثال محلول: خزان خلط على ثلاث خلايا حمل سعة كل منها 10 t وحساسيتها 2 mV/V، موصولة على التوازي في صندوق جمع (Summing Box) ومغذاة بـ 10 V. وزن الخزان فارغًا 4 t، وأقصى حمولة من المادة 12 t.

- السعة الكلية للنظام: 10 × 3 = 30 t، والخرج عندها = 10 V × 2 mV/V = 20 mV.
- الحمل الميت (الخزان فارغًا): 20 × 30 ÷ 4 ≈ 2.67 mV، ويُطرح بالتصفير (Tare).
- المدى الصافي للمادة: 20 × 30 ÷ 12 = 8 mV فقط.
- الحمل الأقصى: 16 t من أصل 30 t، أي نحو 53% من السعة، وهذا يترك هامشًا للصدمات وتوزيع الحمل غير المتساوي والرياح. والقاعدة العملية أن يقع الحمل الأقصى بين نحو 50% و80% من السعة الكلية، ويخفض بعض الصانعين الحد الأعلى إلى نحو 70% إلى 75% للخزانات المعرضة للرياح والاهتزاز.
- النتيجة: إشارة القياس الفعلية 8 mV، وهذا يوضح لماذا تحتاج خلايا الحمل إلى مؤشر وزن (Weighing Terminal) أو مرسل قريب، وكابلات محجوبة بستة أسلاك (إثارة، إشارة، وخطا استشعار (Sense) لتعويض هبوط الجهد في الكابل).

الشكل 12-2: *قنطرة ويتستون داخل خلية الحمل، ونظام وزن خزان بثلاث خلايا وصندوق جمع ومؤشر وزن.*

شروط التركيب التي تحدد الدقة أكثر من الخلية نفسها:

1. **الأنابيب المتصلة:** كل أنبوب صلب متصل بالخزان يحمل جزءًا من الوزن فيسرق القراءة. الحل وصلات مرنة ومسارات أفقية طويلة ودعامات بعيدة عن الخزان.
2. **التمدد الحراري والرياح والزلازل:** وحدات تركيب تسمح بالحركة الأفقية وتمنع الرفع (Lift-off Protection).
3. **المستوى:** الأسطح الحاملة مستوية ومتساوية الصلابة، وإلا توزّع الحمل بشكل غير متساو.
4. **اللحام الكهربائي:** لا يُمرَّر تيار اللحام عبر الخلية؛ تُستخدم أشرطة تأريض تتجاوزها، أو تُفك الخلايا وتُوضع مكانها دمى (Dummy Load Cells) أثناء الإنشاء.
5. **المعايرة:** بأوزان معيارية معروفة حيث يمكن، أو بطريقة التراكم (Build-up) بسائل موزون بميزان معتمد، أو بالمعايرة الإلكترونية من بيانات الخلايا كحل أقل دقة.

التحقق من نظام الوزن: خطوات

1. راجع البيانات: عدد الخلايا وسعتها وحساسيتها (mV/V)، وجهد الإثارة، والحمل الميت المتوقع، والتفاوت المسموح للقبول (Tolerance) (للتحكم في الدفعات عادة 0.1%–0.25% من المدى).
2. تحقق من الميكانيكا قبل الكهرباء: الوصلات المرنة للأنابيب، وحرية حركة وحدات التركيب، وعدم وجود أي دعامة أو سلم أو كابل مشدود يلامس الخزان.
3. قِس مقاومة كل خلية (الإدخال والإخراج) ومقاومة العزل إلى الأرض بعد فصلها من صندوق الجمع، وقارنها بشهادة الخلية؛ تغيّر أكثر من نحو 1% أو عزل أقل من 5 GΩ يشير إلى تلف أو رطوبة.
4. بالخزان فارغًا، اقرأ خرج كل خلية على حدة (mV) عند صندوق الجمع؛ الفروق الكبيرة بين الخلايا تعني توزيع حمل غير متساوٍ أو خلية معطوبة.
5. صفّر المؤشر (Zero/Tare) وسجّل القيمة الخام للحمل الميت للمقارنة مستقبلًا.
6. للمعايرة بالأوزان: ضع أوزانًا معيارية معتمدة تعادل 10% من المدى على الأقل (وكلما زادت كان أفضل) عند نقاط موزعة حول الخزان، وسجّل القراءة عند كل زيادة ثم عند كل إزالة.
7. للمعايرة بالتراكم (Build-up) حين تتعذر الأوزان: أضف مادة أو ماء بكميات مقيسة بعداد أو ميزان معتمد، وسجّل القراءة عند كل خطوة حتى المدى الكامل.
8. احسب الخطأ والخطية والتخلف عند كل نقطة، وقارنها بالتفاوت المسموح، واضبط الاتساع (Span) إن لزم وأعد نقطة أو نقطتين للتأكد.
9. اختبر الزوايا (Corner Test) إن كان النظام يسمح: وزن ثابت فوق كل خلية بالتناوب يجب أن يعطي القراءة نفسها ضمن التفاوت المسموح، وإلا فاضبط معاملات الزوايا في صندوق الجمع.
10. وثّق النتائج، وسجّل القيم الخام للخلايا عند الفراغ كبصمة مرجعية للفحص الدوري السريع دون أوزان.

ومن أنظمة الوزن الصناعية أيضًا: موازين السيور (Belt Scales) للفحم والإسمنت والمعادن، ومغذيات الوزن بالفقد (Loss-in-Weight Feeders) للجرعات الدقيقة، وموازين الشاحنات التي تخضع غالبًا لرقابة المترولوجيا القانونية.

12.5 قياس الموضع والإزاحة والمسافة

المفاهيم: الموضع (Position) هو مكان جسم بالنسبة إلى مرجع، والإزاحة (Displacement) تغيّر هذا المكان، والمسافة (Distance) بعد بين نقطتين. وتُقاس خطيًا (مليمترات إلى أمتار) أو زاويًا (درجات). ومواصفات الحساس الأساسية: **الشوط أو المدى** (Stroke / Range)، و**الخطية** (أقصى انحراف عن الخط المستقيم كنسبة من المدى الكامل)، و**التكرارية**، و**الميز** (Resolution؛ لا نهائي في الحساسات التناظرية ومحدود بعدد الخطوات في الرقمية)، و**الاستجابة الترددية**، والفرق بين الحساس **المطلق** (يعطي الموضع فور التشغيل) و**التزايدي** (يعدّ التغير من مرجع، كالمشفّر التزايدي في الفصل 11). والحساسات إما **تلامسية** (ماسح أو قلب مربوط بالجسم) أو **غير تلامسية** (مغناطيسية أو بصرية أو بالتيارات الدوامية).

محول الإزاحة الخطي التفاضلي *(LVDT)* بالتفصيل

البنية: أنبوب عازل عليه ثلاثة ملفات: ملف ابتدائي (Primary) في الوسط، وملفان ثانويان (Secondaries) متطابقان على جانبيه موصولان على التوالي **بتعاكس الطور**، وداخل الأنبوب قلب مغناطيسي (Core) من سبيكة نيكل وحديد يتحرك بحرية دون تلامس، مربوط بالجسم المقاس بذراع غير مغناطيسية، ويحيط بالمجموعة غلاف فولاذي مغناطيسي يحميها من الرطوبة والغبار والمجالات الخارجية (الشكل 12-3).

العمل: يُغذى الملف الابتدائي بجهد متردد (عادة 1 إلى 10 kHz بسعة 1 إلى 7 V rms). حين يكون القلب في الوسط (**الموضع الصفري، Null**) يتساوى الجهدان المستحثان في الثانويين ويلغي أحدهما الآخر فيكون الخرج صفرًا (عمليًا بضعة ميليفولتات، أقل من نحو 1% من خرج المدى الكامل، تسمى الجهد الصفري المتبقي). وحين يتحرك القلب نحو أحد

الثانويين يزداد اقترانه به وينقص عن الآخر، فيظهر جهد تفاضلي تتناسب **سعته** خطيًا مع مقدار الإزاحة، ويدل **طوره** (0° أو 180° نسبة إلى الإثارة) على اتجاهها. وتحوّل إلكترونيات التكييف (مزيل تضمين حساس للطور، Phase-Sensitive Demodulator) الإشارة إلى جهد مستمر موجب أو سالب، أو إلى 4–20 mA؛ وتُدمج هذه الإلكترونيات في النوع **DC-LVDT** الذي يُغذى بجهد مستمر ويعطي خرجًا مستمرًا مباشرة، بينما يحتاج **AC-LVDT** إلى مكيّف خارجي ويتحمل حرارة أعلى (حتى نحو 200 °C وأكثر في الأنواع الخاصة) لأنه بلا إلكترونيات.

الحساسية والمدى: تُعطى الحساسية بوحدة mV لكل V إثارة لكل mm (مثلًا 2.4 mV/V/mm)، والمدى الخطي من ±0.5 mm إلى ±500 mm بحسب الطول، والخطية نحو ±0.25% من المدى الكامل، والتمييز لا نهائي عمليًا (يحده ضجيج الإلكترونيات) والتكرارية ممتازة. وتُستخدم في الأنظمة الدقيقة **القراءة النسبية (Ratiometric)**: الموضع ∝ (V_A + V_B) ÷ (V_A − V_B) للجهدين الثانويين، فتلغي أثر تغير جهد الإثارة وترددها والحرارة إلى حد كبير؛ وهذه الطريقة هي المعتمدة في نظم تحكم التوربينات لقياس مواضع صمامات الوقود وأدلة التوجيه (القسم 34.8).

المزايا: لا تلامس ولا احتكاك فلا تآكل ولا تخلف ميكانيكي، ومتانة عالية وإحكام كامل (يُعبأ الملف بالراتنج ويُغلق الغلاف باللحام فيتحمل الاهتزاز والزيت والإشعاع والضغط)، وخرج تناظري مستمر، وعمر شبه لا محدود. **القيود:** يحتاج إلى إثارة مترددة وإلكترونيات، والحرارة تغير مقاومة الملفات (فتفضل القراءة النسبية)، والقلب له كتلة تحدّ من الاستجابة الديناميكية، والمجالات المغناطيسية القوية والأجسام الحديدية القريبة تشوّه القياس، والجهد الصفري المتبقي ينزاح مع الزمن وتغير الكابل.

الأشكال التجارية: قلب حر (Free Core) يُربط بالجسم بذراع، وقلب مقيد (Captive) موجه داخل الأنبوب بمحمل، ورأس قياس بنابض (Spring-Loaded Gauging Head) يلامس السطح بمسبار ويُستخدم في المقارِنات الكهربائية (Electrical Comparators) لقياسات الأبعاد الدقيقة بتكبير يصل إلى 10^4:1 (R45)، ونسخ ضغط عالٍ للأسطوانات

الهيدروليكية، ونسخ مزدوجة أو ثلاثية القلب في جسم واحد للتكرار في الصمامات الحرجة.

الشكل 12-3: *محول LVDT. الملف الابتدائي بين ملفين ثانويين موصولين بتعاكس الطور وقلب متحرك، وجهدا الثانويين مقابل الموضع، والخرج التفاضلي الذي تعطي سعته المقدار وطوره الاتجاه، ومزيل التضمين الحساس للطور الذي يحوّله إلى جهد مستمر ثنائي القطبية.*

الشكل 12-4: *نموذج ثلاثي الأبعاد لمحول LVDT مقطوع: الغلاف الفولاذي، والملفات الثلاثة على الأنبوب العازل، والقلب المغناطيسي على ذراعه غير المغناطيسية، وكابل التوصيل؛ وبجانبه محول RVDT بقلب دوّار لقياس الزاوية.*

مثال محلول (حساسية LVDT وقراءة نسبية): محول LVDT مداه ±25 mm وحساسيته 2.0 mV/V/mm، يُغذى بـ 5 V rms عند 3 kHz.

- **الحل:**
  - الخرج التفاضلي = الحساسية × جهد الإثارة × الإزاحة.
  - عند إزاحة 10 mm نحو الثانوي A: 2.0 × 5 × 10 = 100 mV rms بطور 0°؛ وعند 10 mm في الاتجاه المعاكس 100 mV بطور 180°؛ وعند أقصى المدى 250 mV.
  - لو انخفض جهد الإثارة إلى 4.5 V بسبب طول الكابل: 2.0 × 4.5 × 10 = 90 mV عند الإزاحة نفسها، أي خطأ 10% في نظام يعتمد على السعة وحدها.
  - بالقراءة النسبية (V_A − V_B) ÷ (V_A + V_B) يبقى الناتج ثابتًا، لأن البسط والمقام ينخفضان بالنسبة نفسها.

- **المعنى ميدانيًا:** هذا سبب اعتماد نظم التوربينات القراءة النسبية وإثارة كل LVDT من قناة مستقلة.

محول الإزاحة الزاوي التفاضلي (RVDT)

النسخة الدوّارة من LVDT: الملفات نفسها لكن القلب قطعة حديدية ذات شكل كامي (Cam) على عمود يدور، فيتغير الاقتران مع الزاوية. مداه الخطي عادة ±30° إلى ±40° (وحتى ±60° بخطية أقل) من الموضع الصفري، وحساسيته بوحدة mV/V/درجة، ولا حد لعدد دوراته ميكانيكيًا لكن القياس صحيح في المدى الخطي فقط. يُستخدم في قياس زاوية أدلة التوجيه IGV في التوربينات الغازية والضواغط، وفتحة صمامات الفراشة والكرة في المشغلات الدوّارة، وزاوية ذراع دفة أو مصراع (Damper) في أنظمة الهواء والغازات، وفي أجهزة الطيران لموضع أسطح التحكم. ويُعايَر بقرص مدرّج أو منقلة إلكترونية على المحور نفسه.

التقنيات الأخرى للموضع والإزاحة والمسافة

التقنية	المبدأ	المدى النموذجي
المقاومة المتغيرة (Potentiometer)	ماسح على مسار مقاوم (سلكي أو بلاستيك موصل)، الخرج نسبة الجهد	10 mm إلى 2 m خطي؛ حتى 350° زاوي
المغناطيسي التضييقي (Magnetostrictive)	نبضة تيار في موجه معدني تلتقي بمجال مغناطيس متحرك فتولد موجة التواء تعود بسرعة نحو 2800 m/s؛ المسافة = الزمن × السرعة	50 mm إلى 20 m
التيارات الدوامية (Eddy Current)	تغيّر ممانعة ملف باقتراب سطح موصل	0.5 إلى 25 mm
السعوي (Capacitive)	تغيّر السعة مع البعد بين لوحين	ميكرومترات إلى ملليمترات

التقنية	المبدأ	المدى النموذجي
تأثير هول والمغناطيسي المقاوم (Hall / Magnetoresistive)	جهد أو مقاومة تتغير مع مجال مغناطيس متحرك	ملليمترات إلى 100 mm
المشفّرات (Encoders)	أقراص أو مساطر بصرية أو مغناطيسية تعطي نبضات أو شفرة	زاوية أو خطي حتى أمتار
الليزر (Laser Distance)	زمن الطيران (ToF) أو إزاحة الطور للمسافات الطويلة، أو التثليث (Triangulation) للقصيرة الدقيقة	0.1 m إلى مئات الأمتار (ToF)؛ ملليمترات إلى متر (تثليث)
فوق الصوتي (Ultrasonic Distance)	زمن عودة نبضة صوتية	0.1 إلى 15 m
الرادار (Radar Distance)	زمن الطيران أو FMCW لموجة راديوية	أمتار إلى مئات الأمتار
السلك المسحوب (Draw-Wire)	سلك ملفوف على بكرة بنابض مع مشفّر أو مقاومة	0.1 إلى 50 m
مقياس الميل (Inclinometer)	مسرّع MEMS أو سائل يقيس اتجاه الجاذبية	±10° إلى ±90°

جدول: التقنيات الأخرى للموضع والإزاحة والمسافة (تابع): التمييز والخطية والاستخدام والقيود

التقنية	التمييز والخطية	الاستخدام المميز والقيود
المقاومة المتغيرة (Potentiometer)	ميز محدود بالمسار؛ خطية 0.1 إلى 1%	رخيص وبسيط ومطلق؛ يتآكل بالاهتزاز والغبار؛ مواضع المصاريع والصمامات القديمة
المغناطيسي التضييقي (Magnetostrictive)	ميز ميكرومترات؛ خطية 0.01 إلى 0.05%	داخل الأسطوانات الهيدروليكية والمكابس، ومستوى الخزانات بعوامة (الفصل 9)؛ مطلق ودون تلامس

التقنية	التمييز والخطية	الاستخدام المميز والقيود
التيارات الدوامية (Eddy Current)	ميكرومترات	الموضع المحوري واهتزاز العمود وفق API 670 (الفصل 32)؛ يحتاج إلى مادة هدف محددة
السعوي (Capacitive)	نانومترات	المختبرات والقياسات فائقة الدقة؛ حساس للرطوبة والغبار
تأثير هول والمغناطيسي المقاوم / (Hall Magnetoresistive)	متوسط	موضّعات الصمامات الحديثة (بلا تلامس)، ومواضع المكابس، والأذرع الصغيرة
المشفّرات (Encoders)	حتى ملايين النبضات في الدورة	المحركات والروبوتات والأذرع (الفصل 11)؛ تزايدي أو مطلق
الليزر (Laser Distance)	ملليمترات (ToF)؛ ميكرومترات (تثليث)	الرافعات والمستودعات الآلية ومواضع العربات ومستوى المواد الصلبة؛ يتأثر بالغبار والبخار وانعكاسية السطح
فوق الصوتي (Ultrasonic Distance)	ملليمترات	مسافات في الهواء، ومستوى الخزانات المفتوحة؛ يتأثر بالحرارة والرياح والرغوة
الرادار (Radar Distance)	ملليمترات	مواضع الرافعات والسفن عند الأرصفة، والمستوى (الفصل 9)
السلك المسحوب (Draw-Wire)	0.01 إلى 0.1%	بوابات السدود والرافعات والمنصات؛ بسيط لكنه تلامسي
مقياس الميل (Inclinometer)	0.01°	زوايا الرافعات والمنصات والألواح الشمسية والأبراج

الشكل 12-5: *مبادئ أربع تقنيات للإزاحة والمسافة: المقاومة المتغيرة، والمغناطيسي التضييقي بزمن عودة موجة الالتواء، والليزر بزمن الطيران والتثليث، والسلك المسحوب، مع مخطط اختيار حسب المدى والدقة.*

السنكرو والريزولفر ومقياس الجهد ومفاتيح ريد: مؤشرات موضع قديمة ما زالت في الخدمة

في المحطات القديمة والمعدات البحرية والعسكرية ووحدات التحكم الميكانيكية للتوربينات ما زالت أربع تقنيات للموضع تلتقي بمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس، ويستحسن أن يعرف كيف يفحصها (الشكل 12-6):

التقنية	كيف تعمل	المخرج
السنكرو (Synchro)	مرسل ومستقبل متماثلان: دوار كل منهما يُغذى من مصدر متردد واحد، وستاتور كل منهما ثلاثة ملفات بزاوية 120° موصولة سلكًا بسلك (S1 S2 S3)؛ يدور دوار المستقبل حتى تتساوى جهود الستاتور فيتبع زاوية المرسل	زاوية ميكانيكية عن بعد (مؤشر)
الريزولفر (Resolver)	ملف دوار مُثار وملفان في الستاتور بزاوية 90°؛ الخرجان يتناسبان مع sin وcos للزاوية	زاوية مطلقة إلكترونيًا: θ = atan2(sin, cos)
مقياس الجهد (Potentiometer)	ماسح على مسار مقاوم؛ الخرج نسبة من جهد التغذية	جهد يتناسب مع الموضع
مفتاح ريد (Reed Switch)	لسانان مغناطيسيان في أنبوب زجاجي محكم يغلقان باقتراب مغناطيس	تلامس جاف

جدول: مؤشرات الموضع القديمة (تابع): أين تجدها وكيف تُفحص

التقنية	أين تجدها	الفحص الميداني
السنكرو (Synchro)	مؤشرات موضع الصمامات والدفات وأدلة التوجيه في الوحدات القديمة	قس جهد الإثارة، وجهود S1–S2 وS2–S3 وS3–S1 عند زاوية معلومة وقارن بالجداول؛ عكس سلكين يعكس الاتجاه

التقنية	أين تجدها	الفحص الميداني
الريزولفر (Resolver)	المحركات المؤازرة، والمشغلات الكهربائية للصمامات، والبيئات الساخنة والمهتزة حيث تفشل المشفرات البصرية	افحص مقاومة الملفات الثلاثة وعزلها، ثم الخرجين عند 0° و90° بمصدر إثارة مرجعي
مقياس الجهد (Potentiometer)	أرخص حساسات الموضع؛ الشوط في المشغلات الهيدروليكية القديمة	قس المقاومة الكلية ومقاومة الماسح عبر الشوط بحثًا عن انقطاعات (قفزات)؛ حمّله بمعاوقة عالية فقط
مفتاح ريد (Reed Switch)	مفاتيح المستوى بالعوامة المغناطيسية، وحدود مواضع الأسطوانات، والمناطق الخطرة	اختبر بمغناطيس يدوي؛ التلامس يتلف بتيار كبير أو بشرارة حمل حثي، فركّب ديودًا أو RC

القاعدة العملية: عندما تُستبدل هذه الأجهزة بحساسات حديثة (RVDT، مشفر مغناطيسي، هول) يجب إعادة معايرة الحلقة كاملة، لأن **الإشارة القديمة كانت زاوية أو نسبة جهد لا 4–20 mA**، وربما كان المؤشر أو المتحكم يعوّض داخليًا عن لاخطية الجهاز القديم.

الشكل 12-6: *(أ) السنكرو: نقل زاوية عن بعد بثلاثة أسلاك ستاتور؛ (ب) خرجا الريزولفر sin وcos. (ج) مقياس الجهد كمقسم جهد؛ (د) مفتاح ريد ومغناطيسه (مقتبس من R60).*

الاختيار

- **الشوط أقل من 100 mm ودقة عالية وبيئة قاسية (حرارة، اهتزاز، زيت):** LVDT (وRVDT للزاوية).

- **داخل أسطوانة هيدروليكية أو شوط حتى أمتار بدقة عالية:** المغناطيسي التضييقي.
- **موضع صمام تحكم في موضّع ذكي:** هول أو مغناطيسي مقاوم (بلا تلامس)، أو مقاومة متغيرة في الموضّعات القديمة.
- **أمتار إلى عشرات الأمتار في الهواء:** ليزر ToF أو رادار، أو سلك مسحوب إذا كانت البيئة غبارية والتلامس مقبولًا.
- **زاوية دوران محرك أو ذراع بدقة رقمية:** مشفّر مطلق أو تزايدي.
- **ميكرومترات في الاهتزاز والموضع المحوري للأعمدة:** التيارات الدوامية.

التطبيقات في المحطات والمصانع

- **صمامات الوقود وأدلة التوجيه في التوربينات الغازية:** LVDT مزدوج على كل صمام (SRV وGCV والوقود السائل) وRVDT أو LVDT على حلقة IGV، بقراءة نسبية وتصويت بين القناتين، مع معايرة في التوقف (الخطوات في القسم 34.8).
- **التوربينات البخارية:** LVDT طويل الشوط لتمدد الغلاف وموضع صمامات البخار الرئيسية والتحكم، ومجسات قرب أو LVDT للتمدد التفاضلي (الفصل 32).
- **الضواغط والمضخات:** الموضع المحوري بمجسات القرب، وموضع صمام إعادة التدوير بمرسل موضع، وموضع IGV بـ RVDT.
- **المشغلات الهيدروليكية والمكابس:** المغناطيسي التضييقي داخل الأسطوانة (المكابس، وبوابات السدود، وأذرع الرافعات).
- **المصاريع (Dampers) وصمامات الهواء والغازات في المراجل:** RVDT أو مقاومة متغيرة على محور المصراع مع مؤكد موضع.
- **المطاحن والأفران:** ليزر أو سلك مسحوب لمواضع العربات والأغطية، ومقاييس ميل للهياكل.

- **صمامات التحكم:** الموضّع الذكي يقيس شوط الصمام بحساس هول أو مغناطيسي مقاوم ويعطي التشخيص (الفصل 15).

معايرة *LVDT* على المنضدة: خطوات

1. ثبّت المحول في حامل معايرة بميكرومتر (أو مسطرة ليزر) يحرك القلب بدقة 0.01 mm، وصله بمكيّفه أو بإثارة معروفة (الجهد والتردد المحددان في ورقة البيانات) وفولتميتر يقيس السعة والطور (أو خرج DC بعد المكيّف).
2. ابحث عن الموضع الصفري: حرّك القلب حتى يبلغ الخرج أدنى قيمة، وسجّل قراءة الميكرومتر والجهد الصفري المتبقي (يجب ألا يتجاوز نحو 0.5 إلى 1% من خرج المدى الكامل).
3. اضبط صفر المكيّف عند هذا الموضع.
4. حرّك القلب إلى أقصى المدى في اتجاه واحد بخطوات 10 أو 20% من المدى وسجّل الخرج عند كل خطوة، ثم عد إلى الصفر وأكمل في الاتجاه الآخر، ثم أعد المسار في الاتجاه المعاكس لكشف التخلف (يجب أن يكون شبه معدوم).
5. اضبط الاتساع (Span) أو الكسب في المكيّف بحيث يعطي أقصى المدى القيمة الاسمية (مثلًا ±10 V أو 4–20 mA).
6. احسب الخطية: أقصى انحراف عن الخط المستقيم الأنسب (أو الخط بين الطرفين) مقسومًا على المدى الكامل؛ يُقبل ضمن القيمة المعلنة (عادة 0.25%).
7. تحقق من الطور أو إشارة الخرج: حركة نحو الاتجاه المتفق عليه «الموجب» تعطي جهدًا موجبًا؛ وإلا فبدّل طرفي الخرج التفاضلي أو موضعي الثانويين على المكيّف (ولا تعكس طرفي ثانوي واحد وحده، فذلك يحوّل التوصيل من التعاكس إلى التجميع).
8. سجّل الحساسية (mV/V/mm) بقسمة الخرج على جهد الإثارة والإزاحة، وقارنها بالشهادة.

9. وثّق الجهد الصفري المتبقي والحساسية والخطية والرقم التسلسلي وطول الكابل، فتغيّر الكابل يغير المحصلة في الأنظمة غير النسبية.

التحقق من حساس مغناطيسي تضييقي أو مقاومة متغيرة في الموقع: خطوات

1. حرّك المشغل يدويًا أو بأمر من النظام إلى الحدين الميكانيكيين وسجّل القراءة عند كل حد؛ يجب أن تطابق الشوط الفعلي المقيس بمسطرة أو بشريط قياس ضمن التفاوت المسموح.
2. للمقاومة المتغيرة: قِس المقاومة الكلية ومقاومة الماسح إلى الطرفين عند نقاط عدة؛ فالقفزات أو الانقطاعات تعني تآكل المسار، والمقاومة الكلية خارج ±10% من الاسمية تعني تلفًا.
3. للمغناطيسي التضييقي: تحقق من ثبات المغناطيس الموضعي على الجزء المتحرك وبعده عن أجسام حديدية أو مغناطيسات أخرى، ومن تغذية الحساس وتشخيصاته (إشارة فقد المغناطيس).
4. حرّك إلى ثلاث نقاط وسطية وقارن القراءة بالقياس الميكانيكي، واحسب الخطية.
5. تحقق من أن النظام يقرأ القيم نفسها (تهيئة المدى والوحدات والاتجاه)، وسجّل النتائج.

مثال محلول (المغناطيسي التضييقي): حساس داخل أسطوانة هيدروليكية شوطها 1200 mm، وسرعة موجة الالتواء في موجهه 2830 m/s.

- **الحل:**
  - زمن عودة الموجة = المسافة ÷ السرعة؛ عند موضع المكبس 800 mm من طرف الحساس: 282.7 = 2830 ÷ 0.8 µs.
  - ميز الموضع = السرعة × ميز عدّاد الزمن؛ بميز 1 × 2830 ns: $2.8\ \mu m = 10^{-9}$.

- لو تغيرت الحرارة فتغيرت السرعة 0.1% دون تعويض لكان الخطأ عند 800 mm نحو 0.8 mm.

- **المعنى ميدانيًا:** لهذا تعوّض الحساسات الجيدة الحرارة بمغناطيس مرجعي ثابت عند نهاية الموجه.

مثال محلول (RVDT لأدلة التوجيه): RVDT على حلقة IGV حساسيته 3.5 mV/V/درجة، بإثارة 7 V، والمدى الخطي ±40°. زاوية IGV تتراوح بين 34° (مغلقة) و 84° (مفتوحة) (قيم نموذجية لتوربين من الفئة E وفق R42؛ تختلف بين الطرازات وتُؤخذ من مواصفة التحكم لكل وحدة).

- **الحل:**
  - يُثبت RVDT بحيث يقابل الصفر الكهربائي منتصف المدى: (34 + 84) ÷ 2 = 59°، فتكون الزوايا العملية بين −25° و+25° من الصفر، ضمن المدى الخطي.
  - الخرج = الحساسية × جهد الإثارة × الزاوية من الصفر.
  - عند 84°: 3.5 × 7 × 25 = 612 mV؛ وعند 34°: −612 mV.

- **المعنى ميدانيًا:** في المعايرة تُقاس الزاوية الفعلية بمنقلة رقمية على ريشة مرجعية عند الحدين ونقطة وسطية، ويُدخل الحدان في النظام.

12.6 قياس القوة والعزم

القوة: تُقاس بخلايا الحمل نفسها في الحالات السكونية والبطيئة (شد الكابلات، قوة المكابس، شد الشرائح في مصانع الورق والفولاذ)، وبالحساسات الكهرضغطية (Piezoelectric) في القوى الديناميكية السريعة مثل الصدمات والاحتراق، لأن شحنتها تتسرب مع الوقت فلا تصلح للقياس السكوني الطويل. ومن تطبيقاتها حساسات الطرق (Knock Sensors) في محركات الاحتراق ومحركات الغاز الترددية المولدة للكهرباء.

العزم (Torque):

- **مقاييس انفعال على العمود:** بزاوية 45° لقياس انفعال القص، مع نقل الإشارة بحلقات انزلاق أو لاسلكيًا (Telemetry).
- **المغناطيسي المرن (Magnetoelastic):** تتغيّر النفاذية المغناطيسية لمادة العمود بالإجهاد، فيُقاس العزم دون تلامس؛ وهو مستخدم في أنظمة التوجيه الكهربائي في السيارات.
- **فرق الطور بين مشفّرين:** على طرفي وصلة مرنة معروفة الصلابة، يتناسب الالتواء بينهما مع العزم.

القدرة الميكانيكية على العمود:

$$\mathrm{P\ (kW)} = \mathrm{T\ (N{\cdot}m)} \times \mathrm{N\ (rpm)} \div 9549.$$

فعزم 5000 N·m عند 1500 rpm يعني نحو 785 kW. ومن هنا تأتي فائدة قياس العزم في تقييم كفاءة الضواغط والمضخات ومراقبة الحمل على علب التروس.

كشف اللهب والغاز: تُشرح كاشفات اللهب وكاشفات الغاز النقطية والخطية واختبارها في الفصل 30 (القسمان 30.4 و30.5)، ومعها حالة ميدانية عنها (القسم 30.15)، حيث يجتمع اختيار الكشف وتغطيته ومعايرته في باب الحريق والغاز.

12.7 أجهزة الحماية الميكانيكية وحساسات متفرقة

تحت هذا العنوان تندرج أجهزة لا يصممها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس عادة لكنه يحددها في أوراق البيانات ويختبرها ويربطها بالمنطق. نضيف هنا ما لم يُذكر في الفصول السابقة:

(أ) صمامات الأمان (Relief Valves / PSV): آخر طبقة حماية ميكانيكية مستقلة عن الأجهزة. يحدد مهندس العمليات **السعة المطلوبة** من أسوأ حالة (حريق خارجي، انسداد المخرج، فشل صمام تحكم مفتوحًا، تمدد حراري، انفلات تفاعل) وفق API 521، ويُحسب

حجم الفوهة (Orifice D إلى T) وفق API 520 للغاز والسائل والبخار وثنائي الطور. أما مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس فيعنيه: ضغط الضبط (Set Pressure) وعلاقته بأقصى ضغط تشغيل مسموح (MAWP) وبحد الفصل على الضغط العالي جدًا (يجب أن يفصل SIS قبل أن ينفتح PSV بهامش، والشكل 12-7)، والضغط الخلفي المتراكم (Back Pressure) الذي يفرض صمامًا متوازنًا بمنفاخ (Balanced Bellows) أو مشغَّلًا بصمام قائد (Pilot-Operated) على مجمعات الشعلة، والفرق بين نوع الرفع الكامل (Full Lift) والمعدَّل، و**مراقبة فتح الصمام** (مفتاح نهاية شوط أو حساس صوتي على PSV) لتسجيل الحوادث والانبعاثات، والفحص الدوري على منضدة الاختبار (Pop Test) بفترات يحددها سجل الأداء (API 576). وتفصيل الصمام نفسه (الأسماء، والمصطلحات، وتوازن القوى، وأنواع التصميم، والضغط الخلفي، وقائمة تحقق مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس) في القسم 16.3، وصمامات تنظيم الضغط ذاتية التشغيل في القسم 16.2.

(ب) أقراص الانفجار (Rupture Discs): غشاء معدني أو غرافيتي مصمم لينفجر عند ضغط محدد بدقة ±5%؛ لا يتسرب ولا يعلق، لكنه لا يعود للإغلاق. يُستخدم وحده في التفاعلات السريعة والسوائل اللزجة أو الأكالة، أو **تحت صمام الأمان** لحمايته من التآكل والتسرب (ويُراقب الحيز بينهما بمفتاح ضغط أو مؤشر انفجار (Burst Indicator) يُوصل بنظام التحكم، لأن ثقب القرص بلا اكتشاف يجعل صمام الأمان معرضًا للعملية والحيز مضغوطًا). يتأثر ضغط انفجاره بالحرارة (يُحدد عند حرارة التشغيل) وبالضغط النابض (يُختار قرص عكسي الانبعاج (Reverse Buckling) للخدمة النابضة).

(ج) صمامات فحص التدفق الزائد (Excess Flow Check Valves): صمام في مخرج خزان أو أسطوانة يغلق تلقائيًا إذا تجاوز التدفق حدًا (تمزق أنبوب أو خرطوم)، ويعود عند تساوي الضغط. في أنظمة LPG والكلور والأمونيا وخطوط التحميل، وتنص عليه NFPA 58. وعلى مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس أن يعرف أنه **قد لا يغلق** إذا كان الخط في المصب طويلًا أو مقيدًا بحيث لا يصل التدفق إلى حد الإغلاق، فلا يُعتمد عليه بديلًا من صمام القطع الآلي (SDV).

(د) مانعات اللهب وفتحات التنفس (Flame Arresters, Conservation and Emergency Vents): مانع اللهب (شبكات أو رقائق مموجة تمتص حرارة اللهب فتطفئه) على فتحات الخزانات وخطوط أبخرة الشعلة ومداخل محركات الاحتراق في المناطق الخطرة؛ يُصنف بحسب مجموعة الغاز (IIA/IIB/IIC) واتجاه الانفجار (Deflagration/Detonation) وفق ISO 16852، ويُراقب بمقياس ضغط تفاضلي لكشف الانسداد، وتُقاس حرارته بمزدوج حراري في بعض التصاميم لكشف اللهب المستقر. وفتحات التنفس على خزانات التخزين الجوية (API 2000) تفتح عند ضغط أو فراغ صغير (مليبارات) لمنع انبعاج الخزان أو تمزقه أثناء الملء والتفريغ وتغير الحرارة، وتُزود بمانع لهب؛ ومراقبة ضغط الفراغ في الخزان (مرسل ضغط بمدى ±50 mbar) هي التي تكشف انسداد الفتحة أو تجمدها.

(هـ) كبح الانفجار وأنظمة الإغراق (Explosion Suppression, Deluge): كبح الانفجار في القواديس والمرشحات والمجففات التي تتعامل مع الغبار القابل للاشتعال: كاشف ضغط سريع (بضع مللي ثانية) يفجّر عبوة مادة مثبطة قبل أن يبلغ ضغط الانفجار ذروته، مع فتحات تنفيس الانفجار (Explosion Vents) وفق NFPA 68/69. وأنظمة الإغراق (Deluge) للحماية من الحريق تُفعَّل من نظام F&G عبر صمام إغراق يُفتح بصمام ملفي أو بإشارة هوائية، وتُختبر بتفعيل الصمام مع صمام اختبار جانبي؛ تفصيلها في الفصل 30 (القسم 30.6).

(و) الأنيمومتر (Anemometer) وقياس سرعة الهواء والغازات في المجاري: الفنجاني والمروحي (ميكانيكي، لمحطات الأرصاد والتهوية)، والسلك الساخن (Hot-Wire، حساس وسريع، للمختبرات وسرعات الهواء المنخفضة)، وفوق الصوتي (ثلاثي المحاور بلا أجزاء متحركة، محطات الأرصاد الحديثة والمنصات)، وأنابيب بيتو ومصفوفاتها للمجاري الكبيرة (الفصل 8). و**محطة الأرصاد** على المنشأة (سرعة الرياح واتجاهها، الحرارة، الرطوبة، الضغط الجوي، المطر، الإشعاع الشمسي) ليست ترفًا: اتجاه الرياح يغذي نماذج تشتت الغاز في غرفة التحكم ويوجّه إخلاء الطوارئ، والضغط الجوي

والرطوبة يدخلان في تصحيح أداء التوربين الغازي (الفصل 34)، ورصد الصواعق ينبّه إلى إيقاف أعمال الرفع والتحميل.

(ز) المنظار الصناعي (Borescope) وكاشف المعادن والحساسات المتفرقة: المنظار الصلب أو المرن أو الفيديو يفحص داخل التوربينات والمراجل والأنابيب دون فك (فحص الشفرات والمشاعل في التوربين الغازي مع تسجيل الصور ومقارنتها بين الفحوص). وكاشفات المعادن على السيور تحمي الكسارات والمطاحن في الإسمنت والتعدين وتوقف السير آليًا؛ وحساسات **الضوضاء** (مقياس مستوى الصوت dB(A) الثابت لمراقبة الامتثال البيئي وحماية السمع) و**السماكة** بفوق الصوتية (مراقبة التآكل في القسم 10.9) و**السرعة** (الفصل 32) و**الاهتزاز** (الفصلان 32 و33) و**الوزن** (12.4) عُولجت في مواضعها.

الشكل 12-7: *طبقات الحماية من الضغط الزائد على وعاء وترتيبها بالضغط: التحكم الأساسي، إنذار الضغط العالي، فصل SIS عند PSHH، ثم صمام الأمان عند ضغط الضبط (≥ MAWP)، ثم قرص انفجار احتياطي بضغط أعلى (لحالة الحريق مثلًا) في التصاميم التي تتطلبه، وليس هذا الترتيب قاعدة عامة؛ مع هوامش التراكم (Accumulation) والضغط الخلفي.*

12.8 أدوات القياس الميكانيكية الدقيقة: القدمة والميكرومتر والفيلر جيج وساعة القياس

مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم لا يعيش مع المرسلات وحدها؛ في العمرات وفحص الآلات الدوارة يحتاج إلى أدوات الورشة نفسها التي يستخدمها الميكانيكي: خلوص ريش التوربين، وانحراف عمود عند ضبط مجسات القرب (الفصل 32)، وقطر ساق صمام تحكم مهترئة (الفصل 15)، وسماكة قرص فتحة (الفصل 8)، وخلوص كامة مفتاح حدي (الفصل 11). وقراءة هذه الأدوات مهارة لا تُكتسب من الشاشة، والخطأ فيها يُنقل إلى كل ما يُبنى عليه. وتوضيح للتسمية أولًا: **الكليبر (Caliper) هو القدمة، والورنية (Vernier) نوع من تدريجات القراءة**، ولذلك توجد قدمة ورنية

وقدمة بساعة وقدمة رقمية؛ و«الفيلر جيج» (Feeler Gauge) هو **مقياس الخلوص بالشرائح**. ويبين الشكل 12-8 قراءة نموذجية لكل أداة.

(أ) القدمة ذات الورنية (Vernier Caliper): أداة متعددة الاستخدامات تقيس الأبعاد الخارجية (قطر عمود أو سماكة قطعة بالفكّين الكبيرين)، والأبعاد الداخلية (قطر فتحة بالفكّين الصغيرين)، والأعماق (بالقضيب الخارج من نهاية القدمة)، وارتفاع الدرجات (بسطحي قياس الدرجة خلف الفكّين). أنواعها: ورنية، وساعة، ورقمية. من قيم التدريج الشائعة للورنية 0.02 أو 0.05 mm، وللرقمية عرض بخطوة 0.01 mm؛ لكن أصغر رقم تعرضه الأداة لا يساوي بالضرورة دقتها الفعلية (تحددها المواصفة ISO 13385-1 وشهادة المعايرة). **الاستخدام:** نظّف سطحي القياس والقطعة، وأغلق الفكّين للتأكد من الصفر، ثم ضع القطعة بينهما وأغلق برفق مع إبقاء الأداة مستقيمة على البعد المطلوب؛ وعند قياس عمود تجنّب الميل عن المقطع العمودي على محوره. **خطوات قراءة الورنية:**

1. اقرأ آخر مليمتر كامل قبل صفر الورنية المتحركة على التدريج الرئيسي.
2. ابحث عن خط الورنية الذي يتطابق مع أي خط من التدريج الرئيسي.
3. عدّ ترتيب هذا الخط بعد الصفر واضربه في قيمة أصغر تدريج (المقصود ترتيب الخط لا الرقم المطبوع بجانبه بالضرورة).
4. اجمع القراءتين: القراءة = الرئيسي + ترتيب الخط المتطابق × قيمة التدريج.

القدمة الرقمية تُقرأ مباشرة بعد التأكد من الوحدة (mm أو inch) والصفر، وقدمة الساعة تجمع قراءة المسطرة وقراءة الساعة وفق قيمة تدريج طرازها.

(ب) الميكرومتر (Micrometer): يقيس الأقطار والسماكات بدقة أعلى عادةً من القدمة. أنواعه: خارجي للأعمدة والسماكات، وداخلي للثقوب، وميكرومتر عمق، وأنواع خاصة للسنون والأنابيب، بقراءة ميكانيكية أو رقمية. المديات الشائعة للخارجي 0–25 و25–50 و50–75 mm، فيُختار المدى المناسب للقطعة. **الاستخدام:** ضع القطعة بين السندان الثابت والعمود المتحرك، واقترب بالأسطوانة الدوارة، ثم استخدم **السقاطة (Ratchet)**

للحصول على قوة قياس متكررة وفق تعليمات الأداة؛ لا تشدّ الأسطوانة بقوة على القطعة.

خطوات قراءة الميكرومتر المتري بتدريج 0.01 mm:

1. اقرأ المليمترات الكاملة الظاهرة على التدريج الثابت (فوق خط المرجع).
2. أضف 0.5 mm إذا ظهر خط نصف المليمتر التالي (تحت خط المرجع).
3. أضف رقم تدريج الأسطوانة المحاذي لخط المرجع مضروبًا في 0.01 mm.

هذه الطريقة تخص هذا التدريج المتري؛ ميكرومتر البوصة أو ذو الورنية الإضافية (0.001 mm) له قراءة مختلفة. **أكثر خطأ شائع:** نسيان نصف المليمتر، فتكون النتيجة أقل من الصحيح بمقدار 0.50 mm.

(ج) الفيلر جيج (Feeler Gauge): مجموعة شرائح معدنية كل شريحة بسماكة معلومة مكتوبة عليها، تُستخدم لفحص الفجوة بين سطحين: خلوصات الصمامات والفواصل الميكانيكية، وخلوص الريش والأختام، والفجوة بين كامة ومفتاح. أنواعه: شرائح مستقيمة، ومنحنية، وطويلة، ومجموعات بالمليمتر أو بالبوصة. **خطوات الاستخدام:**

1. نظّف الفجوة والشرائح.
2. ابدأ بشريحة أرفع من الخلوص المتوقع.
3. جرّب سماكات أكبر تدريجيًا.
4. الشريحة المناسبة تمرّ بمقاومة خفيفة ومتجانسة دون دفع بالقوة أو انثناء؛ لا توجد عملية قراءة تدريج، فالسماكة مكتوبة على الشريحة.

يمكن جمع شرائح نظيفة ومستوية عند الحاجة (0.10 + 0.15 = 0.25 mm). **انتبه للوحدة:** الشريحة المكتوب عليها 0.010 inch سماكتها 0.254 mm لا 0.010 mm.

(د) ساعة القياس (Dial Indicator): تقيس الإزاحة أو الاختلاف عن مرجع، وتُستخدم لفحص الانحراف أثناء الدوران (Runout)، والحركة المحورية (End Float)، ومقارنة ارتفاعات الأسطح، ومحاذاة القارنات. أنواعها: ساعة بمكبس، ورقمية، وساعة اختبار بذراع (Dial Test Indicator) تختلف طريقة تركيبها وتتأثر بزاوية التلامس (خطأ جيب التمام).

الاستخدام: ثبّت الحامل جيدًا، وضع رأس القياس على السطح بضغط ابتدائي يسمح بالحركة في الاتجاهين، وصفّر الساعة عند المرجع، ثم حرّك القطعة أو أدر العمود يدويًا في وضع آمن. **القراءة:** عدد التدريجات × قيمة التدريج، مع احتساب اللفات الكاملة إن حدثت. ولا تعتبر رقم الانحراف الكلي تلقائيًا مقدار انحناء العمود وحده؛ النتيجة تتأثر بشكل السطح وطريقة التثبيت أيضًا.

(هـ) مقياس العمق (Depth Gauge): يقيس عمق الثقوب والمجاري والتجاويف، وله قاعدة ترتكز على السطح وقضيب يصل إلى القاع؛ أنواعه ورنية ورقمي وميكرومتر عمق. **الاستخدام:** نظّف سطح الارتكاز والقاع، وثبّت القاعدة كاملة على السطح، ثم أنزل القضيب حتى يلامس القاع دون إمالة القاعدة. الرقمي يُقرأ مباشرة، والورنية بالطريقة السابقة، وميكرومتر العمق وفق تدريجه وطول القضيب المركّب (وقد يختلف اتجاه ترقيمه عن الميكرومتر الخارجي). **خطأ شائع:** وصول القضيب إلى برادة أو أوساخ في القاع، فتظهر قراءة أصغر من العمق الحقيقي.

(و) مقياس الأقطار الداخلية (Bore Gauge): لقياس الثقوب والأسطوانات وفحص تغير القطر على امتداد الثقب أو بين اتجاهين (البيضوية والمخروطية). أنواعه: ذو ساعة للمقارنة، ورقمي، ومقاييس داخلية ثلاثية النقاط. **خطوات استخدام النوع ذي الساعة:**

1. اختر رأس القياس المناسب للمدى.
2. اضبطه على قطر مرجعي معلوم بحلقة ضبط أو ميكرومتر خارجي.
3. صفّر الساعة.
4. أدخله في الثقب وحرّكه تمايلًا صغيرًا عبر وضع المحاذاة الصحيح، وسجّل نقطة انقلاب حركة المؤشر.
5. كرّر القياس في اتجاهين وعلى أعماق مختلفة.

لا تفترض أن دوران العقرب يمينًا يعني زيادة القطر؛ تحقّق من اتجاه الاستجابة عند الضبط.

الشكل 12-8: *قراءات نموذجية لأدوات القياس الميكانيكية الدقيقة: (أ) قدمة بورنية 0.05 mm تقرأ 24.25 mm؛ (ب) ميكرومتر 0.01 mm يقرأ 12.84 mm مع خط النصف؛ (ج) شريحة الفيلر جيج التي تمر بمقاومة خفيفة؛ (د) ساعة قياس والانحراف الكلي TIR؛ (هـ) مقياس العمق؛ (و) مقياس الأقطار الداخلية المضبوط على مرجع. رسوم تعليمية لا صور فوتوغرافية.*

أدوات أخرى مفيدة في الورشة:

الأداة	تعريفها وأنواعها	الاستخدام والقراءة مع مثال
مقياس الارتفاع (Height Gauge)	قاعدة وعمود ورأس قياس؛ ورنية أو رقمي	على سطح مرجعي (Surface Plate): صفّر ثم المس أعلى القطعة؛ مثلًا 65.24 mm
مشط القلاوظ (Thread Pitch Gauge)	أوراق مسننة للقلاوظ المتري أو بالبوصة	طابق الورقة مع السن؛ 1.5 في المتري تعني خطوة 1.5 mm ولا تحدد وحدها قطر القلاوظ
مقياس نصف القطر (Radius Gauge)	قوالب مقعرة ومحدبة	طابق القالب مع التقوّس؛ R6 يعني نصف قطر 6 mm
مقاييس GO/NO-GO	سدادات للثقوب أو حلقات للأعمدة وأنواع للقلاوظ	للتحقق من القبول ضمن الحدود: GO يدخل وNO-GO لا يدخل؛ قبول أو رفض بلا قراءة رقمية
كتل القياس (Gauge Blocks)	كتل مرجعية معدنية أو خزفية بدرجات دقة	للتحقق والضبط؛ مجموعة أطوال + 5 + 20 1.5 = 26.5 mm تُلصق (Wringing)

أمثلة محلولة (قراءة الأدوات):

- **المعطيات:** (1) قدمة ورنية 0.02 mm: التدريج الرئيسي 24 mm والخط المتطابق هو الثالث عشر. (2) ميكرومتر 0.01 mm: الظاهر 12 mm وخط النصف ظاهر والأسطوانة عند 34. (3) فيلر جيج: شريحة 0.25 mm تمر بمقاومة خفيفة و0.30 mm لا تمر. (4) ساعة قياس 0.01 mm/تدريجة على عمود يدور: أدنى قراءة 0.02− mm وأعلى قراءة +0.04 (5) قدمة عمق بورنية 0.02 mm: الرئيسي 18 mm والخط المتطابق السادس. (6) مقياس أقطار داخلية مضبوط على 50.00 mm وأظهر انحرافًا 0.03 mm باتجاه زيادة القطر.

- **الافتراضات:** الأدوات مصفّرة ومعايرة، والقطعة والأداة بدرجة الحرارة نفسها، والقراءة بعين عمودية على التدريج.
- **الحل:**
  - (1) القدمة: القراءة = الرئيسي + ترتيب الخط × قيمة التدريج = 24 + 13 × 0.02 = 24.26 mm.
  - (2) الميكرومتر: القراءة = المليمترات الكاملة + النصف + الأسطوانة × 0.01 = 12.84 mm = 12 + 0.5 + 34 × 0.01.
  - (3) الفيلر جيج: الخلوص بين 0.25 و0.30 mm ويُقدَّر بنحو 0.25 mm ضمن حدود هذا الفحص.
  - (4) ساعة القياس: الانحراف الكلي TIR = الأعلى − الأدنى = 0.04 − (−0.02) = 0.06 mm.
  - (5) قدمة العمق: 18 + 6 × 0.02 = 18.12 mm.
  - (6) مقياس الأقطار: القطر = المرجع + الانحراف = 50.00 + 0.03 = 50.03 mm (ولو كان الانحراف باتجاه النقصان لصار 49.97 mm).
- **معنى النتيجة:** الرقم وحده لا يكفي: 12.84 mm بلا ذكر نصف المليمتر قد يُسجَّل 12.34 mm، و0.06 mm انحراف كلي يُقارن بحد القبول في دليل الآلة لا يُحكم عليه منفردًا، والخلوص 0.25 mm يعني «بين 0.25 و0.30» لا قيمة دقيقة.

قواعد تجعل القياس موثوقًا:

1. نظّف القطعة والأداة، وأزل البرادة والنتوءات (Burrs) المؤثرة.
2. تحقّق من الصفر قبل كل جلسة قياس؛ وضبط الصفر وحده لا يُغني عن المعايرة الدورية بكتل القياس أو حلقات الضبط (الفصل 14).
3. لا تقِس قطعة ساخنة ثم تقارنها مباشرة بقياس قطعة باردة (الفولاذ يتمدد نحو 12 µm لكل متر لكل درجة).

4. استخدم ضغطًا خفيفًا ومتكررًا (السقاطة في الميكرومتر)، واقرأ التدريج بعين عمودية عليه لتجنب خطأ الإزاحة البصرية (Parallax).
5. كرّر القياس في أكثر من موضع واتجاه عند فحص الأعمدة والثقوب، وسجّل المتوسط والمدى.
6. سجّل الوحدة دائمًا: 1 mm = 1000 µm، و0.01 mm = 10 µm، و0.001 inch = 25.4 µm.
7. قارن النتيجة بالتفاوت المسموح وبقدرة الأداة (قاعدة 4:1 أو 10:1 بين التفاوت المسموح وعدم يقين الأداة)؛ عدد الخانات على الشاشة وحده لا يكفي للحكم.

(مصادر عامة: أدلة Mitutoyo لدقة القدمة والميكرومتر ومعايرتهما، وكتالوج Starrett لمقاييس الخلوص؛ والمواصفات ISO 13385-1 للقدمات وISO 3611 للميكرومترات.)

حالة ميدانية (مثال تعليمي مركّب): **العَرَض:** بعد عمرة لوحدة خلط، صار الخزان المحمول على ثلاث خلايا حمل يقرأ أقل من الكمية المضافة إليه بنحو 4%، مع أن الخلايا اجتازت فحص المقاومة والعزل. **الفحص:** أعطى اختبار الزوايا قراءات متقاربة، لكن اختبار التراكم بماء مقيس بعداد معتمد أظهر خطأً يكبر مع الحمل. وبفحص محيط الخزان تبيّن أن الوصلة المرنة على خط التغذية استُبدلت في العمرة بقطعة أنبوب صلبة، وأن دعامة الأنبوب الجديدة ثُبّتت قريبًا من الخزان. **السبب:** صار الأنبوب الصلب يحمل جزءًا من وزن الخزان، ويزداد ما يحمله كلما هبط الخزان تحت الحمل. **الدرس:** دقة نظام الوزن ميكانيكية قبل أن تكون كهربائية؛ فتُدرج الوصلات المرنة ودعامات الأنابيب في قائمة فحص إعادة الخدمة بعد كل عمرة، ويُعاد اختبار التراكم أو الأوزان بعد أي تعديل في الأنابيب المتصلة.

دور المهندس ودور الفني:

المجال	دور المهندس	دور الفني
الكثافة واللزوجة	يختار الطريقة، ويحدد الحرارة المرجعية ومدى القياس ودقته	يتحقق من امتلاء الأنبوب وغياب الفقاعات، ويسجل الحرارة مع كل قراءة
الوزن	يحدد عدد الخلايا وسعتها بحيث يقع الحمل الأقصى بين نحو 50 و80% من السعة، ويشترط الوصلات المرنة ووحدات التركيب	يفحص الخلايا بالمقاومة والعزل، ويجري اختبار الزوايا والمعايرة بالأوزان أو بالتراكم
الموضع	يختار التقنية حسب الشوط والبيئة، ويشترط القراءة النسبية والتكرار في الصمامات الحرجة	يعاير LVDT وRVDT على المنضدة وفي الموقع بالشوط الميكانيكي الحقيقي، ويوثّق الجهد الصفري والحساسية
الحماية الميكانيكية	يربط ضغط ضبط PSV بحد فصل SIS وبـ MAWP، ويشترط مراقبة الحيز بين قرص الانفجار وصمام الأمان	يتابع مؤشرات الانفجار وفتح الصمامات ومقاييس انسداد مانعات اللهب، ويسجل ما يرصده
أدوات الورشة	يعتمد قاعدة 4:1 بين التفاوت المسموح وعدم يقين الأداة، وبرنامج معايرة الأدوات	يقرأ الأدوات قراءة صحيحة، ويسجل الوحدة، ويكرر القياس في أكثر من موضع

12.9 الأخطاء الشائعة

- ذكر قيمة كثافة أو لزوجة دون حرارتها المرجعية.
- قياس الكثافة بالضغط التفاضلي مع مسافة قصيرة بين المأخذين لفروق صغيرة.
- الخلط بين نقطة الندى عند الضغط الجوي وعند ضغط الخط في مواصفات هواء الأجهزة.
- أنابيب صلبة متصلة بخزان محمول على خلايا حمل، أو تمرير تيار اللحام عبر الخلايا.

- اختيار خلايا حمل بسعة كبيرة جدًا فتصغر الإشارة الصافية، أو صغيرة جدًا فتتضرر بالصدمات.
- فكّ قضيب LVDT أو تبديل مكيّفه دون إعادة المعايرة، أو الاعتماد على سعة الخرج وحدها حيث يتغيّر جهد الإثارة بطول الكابل.
- عكس طرفي ثانوي واحد في LVDT لتصحيح الاتجاه، فيتحول التوصيل من التعاكس إلى التجميع.
- ضبط صمام الأمان دون مراجعة حد فصل SIS، فينفتح PSV قبل أن يفصل النظام الآلي.
- قرص انفجار تحت صمام الأمان بلا مراقبة للحيز بينهما، فيبقى ثقب القرص مجهولًا.
- نسيان نصف المليمتر في قراءة الميكرومتر، أو الخلط بين شرائح الفيلر جيج بالبوصة وبالمليمتر.

12.10 ملخص

الكثافة تُقاس بالاهتزاز أو الإشعاع أو الضغط التفاضلي، واللزوجة شديدة التأثر بالحرارة، وكلتاهما بلا معنى دون حرارة مرجعية. ونقطة الندى عند ضغط الخط هي المواصفة الحاسمة لهواء الأجهزة. ودقة الوزن تصنعها التركيبة الميكانيكية والأنابيب المتصلة بقدر ما تصنعها خلية الحمل. وفي الموضع يبقى LVDT بقراءته النسبية الخيار الأمتن لصمامات التوربينات، ويُختار غيره حسب الشوط والبيئة. وأجهزة الحماية الميكانيكية (صمامات الأمان، وأقراص الانفجار، ومانعات اللهب) لا يصممها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس، لكنه يربط ضغوط ضبطها بحدود الفصل ويراقب حالتها. وأدوات الورشة الدقيقة تُقرأ بقواعد ثابتة، وأكثر أخطائها في الوحدة وفي نصف المليمتر.

وفي الفصل التالي: قبل أن ننتقل إلى معايرة هذه الأجهزة وصيانتها، يضع الفصل 13 «السلامة قبل العمل الميداني: العزل الكهربائي والميكانيكي والتحكم بمصادر الطاقة (LOTO)» القواعد التي تسبق أي فكّ أو معايرة في الموقع.

12.11 أسئلة التقييم الذاتي

1. مرسل ضغط تفاضلي بين مأخذين المسافة بينهما 2 m يقرأ 19.6 kPa. احسب كثافة السائل، ومقدار تغيّر القراءة إذا تغيّرت الكثافة بـ 5 kg/m^3.
2. ما الفرق بين اللزوجة الديناميكية والكينماتيكية؟ واحسب اللزوجة الكينماتيكية لزيت لزوجته 45 cP وكثافته 900 kg/m^3.
3. أدنى حرارة محيطة في موقع ما 2 °C. ما نقطة الندى القصوى المسموحة لهواء الأجهزة وفق ANSI/ISA-7.0.01؟
4. خزان على أربع خلايا حمل سعة كل منها 5 t وحساسيتها 2 mV/V والإثارة 10 V. وزنه فارغًا 3 t وممتلئًا 13 t. احسب الإشارة الصافية للمادة ونسبة الحمل الأقصى إلى السعة.
5. اذكر ثلاثة عوامل تركيب تفسد دقة نظام وزن خزان وكيف تعالج كلًا منها.
6. محول LVDT حساسيته 2.4 mV/V/mm ويُغذى بـ 5 V rms. ما خرجه عند إزاحة 8 mm؟ ولماذا لا يتأثر الموضع المحسوب بالقراءة النسبية إذا انخفض جهد الإثارة 10%؟
7. حساس مغناطيسي تضييقي سرعة موجة الالتواء في موجهه 2800 m/s. ما زمن عودة الموجة من مغناطيس على بعد 0.5 m؟ وما الخطأ عند هذا الموضع إذا تغيرت السرعة 0.05% دون تعويض؟
8. لماذا يجب أن يفصل نظام السلامة الآلي (SIS) قبل أن ينفتح صمام الأمان؟ وما وظيفة مراقبة الحيز بين قرص الانفجار وصمام الأمان فوقه؟

9. عمود ينقل عزمًا مقداره 3000 N·m عند 3000 rpm. احسب القدرة على العمود، واذكر طريقتين لقياس العزم.

10. قدمة بورنية 0.02 mm: التدريج الرئيسي 37 mm والخط المتطابق الثامن عشر؛ ما القراءة؟ وميكرومتر يظهر 7 mm وخط النصف والأسطوانة عند 21؛ ما القراءة؟ ولماذا لا يعني مرور شريحة 0.30 mm بالقوة أن الخلوص 0.30 mm؟ (القسم 12.8)

مراجع الفصل: قياس الكثافة واللزوجة والرطوبة والوزن في العمليات (دورة Instrumentation and Process Control)؛ حساسات القوة والعزم والموضع والمغناطيسي المرن وحساسات الطرق (Bosch، Automotive Mechatronics)؛ حساسات الوزن والإزاحة في الأتمتة الصناعية، (Manesis & Nikolakopoulos Introduction to Industrial Automation)؛ متطلبات هواء الأجهزة وكاشفات الغاز ثلاثية الأسلاك (I&C Design Basis)؛ اختبار كاشفات اللهب والغاز في التشغيل التجريبي (MAPNA/Monenco، I&C Commissioning Instruction؛ ANSI/ISA-7.0.01؛ OIML R60؛ API 670؛ NFPA 85؛ FM 3260؛ EN 54-10؛ ISA-TR84.00.07؛ IEC 60079-29-1؛ IEC 60079-29-2؛ IEC 60079-29-4؛ EN 45544؛ R60 DOE Fundamentals Handbook، الوحدة 5: السنكرو ومقياس الجهد ومفتاح ريد)؛ خبرة المؤلف في محطات التوليد.

الفصل 13: السلامة قبل العمل الميداني: العزل الكهربائي والميكانيكي والتحكم بمصادر الطاقة (LOTO)

> **لمن هذا الفصل:** كل من سيضع يده على جهاز في الموقع: فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس الذي يفك مرسلًا أو يعاير مفتاحًا، ومهندس الموقع الذي يوقّع على خطة العزل أو يشرف على فحص الحلقات (Loop Check)، ومهندس الصيانة الذي يخطط لإيقاف وحدة. ويُقرأ هذا الفصل قبل فصول المعايرة والصيانة والتشخيص والاختبار، لأن كل خطوة فيها تبدأ بعزل آمن وتنتهي بإعادة آمنة إلى الخدمة.
>
> **الفكرة الأساسية:** العمل على جهاز يبدأ بسؤال واحد: ما الطاقة التي يمكن أن تصل إلى يدي؟ ولا يُعد الجهاز آمنًا بإيقافه، بل بعزل كل مصدر طاقة عنه، وتأمين نقطة العزل بقفل وبطاقة، وتفريغ ما بقي مختزنًا فيه، ثم إثبات ذلك بالتحقق. زر الإيقاف أو أمر الإيقاف من نظام التحكم الموزع (DCS) إيقاف لا عزل، وإغلاق صمام واحد عزل لا يكفي وحده في كل خدمة، وقراءة صفر على مقياس ضغط ليست دليلًا.

13.1 لماذا يحتاج مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس إلى هذا الفصل؟

عمل الأجهزة يقع عند التقاء كل أنواع الطاقة في المنشأة: المرسل موصول بخط العملية تحت الضغط، ويتغذى من بطاقة في نظام التحكم، وصمام التحكم يحركه هواء مضغوط ونابض محمّل، والصمام الملفي تغذيه لوحة أخرى بجهد متناوب، وخطوط النبض قد تُسخَّن ببخار التتبع. لذلك قد يتعامل فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس في اليوم الواحد

مع مصادر طاقة أكثر تنوعًا مما يواجهه معظم التخصصات الأخرى، وكثير من أعماله «صغيرة» في ظاهرها: فك مرسل، أو تبديل موضّع، أو تنظيف خط أخذ. والأعمال الصغيرة هي التي يُختصر فيها العزل.

والأخطار ليست على العامل وحده. فتح حلقة مرسل في وظيفة حماية قد يوقف الوحدة كلها (القسم 39.2)، وإعادة الهواء إلى صمام قبل إخلاء المكان قد تحرك ساقه فجأة، وتسريب غاز من خط أخذ مفتوح قد يصل إلى مصدر اشتعال في منطقة خطرة (الفصل 26).

دور المهندس ودور الفني:

المرحلة	دور المهندس	دور الفني
التخطيط	يحدد نطاق العمل ومصادر الطاقة، ويعد خطة العزل أو يراجعها، ويحدد هل يلزم عزل إيجابي	يراجع الخطة في الموقع، وينبه إلى ما لا يظهر في الرسومات (تغذية إضافية، خط تجاوز، تتبع حراري)
التصريح	يطلب تصريح العمل ويوقّع عليه بصفته صاحب العمل أو المشرف بحسب نظام الموقع	يحضر اجتماع السلامة، ويوقّع أنه فهم الأخطار وحدود التصريح
التنفيذ	يتحقق من اكتمال العزل قبل بدء العمل، ويبقى مرجعًا لأي تغيير في النطاق	يركّب قفله الشخصي، وينفذ التفريغ والتحقق، ويوقف العمل إن تغيّر شيء
الإعادة	يتأكد من اكتمال العمل والاختبار، ويسلّم المعدة للتشغيل	يزيل قفله، ويعيد الجهاز بالترتيب الصحيح، ويسجل ما نُفذ

13.2 التحضير قبل العمل (Prior to Work)

قبل أن يُلمس أي شيء، تُحسم خمسة أمور:

1. **تحديد المعدة ورقمها:** الوسم (Tag) كما هو في الموقع وعلى الرسومات، مثل PDT-205 أو FV-310. وتتأكد من أن اللوحة المعدنية على الجهاز تطابق الوسم في التصريح؛ فالعمل على الجهاز المجاور، أو على المضخة الاحتياطية بدل العاملة، خطأ متكرر.
2. **نطاق العمل:** ما الذي سيُفك أو يُفتح أو يُبدَّل بالضبط؟ فتبديل بطاقة إلكترونية داخل مرسل لا يحتاج إلى العزل الذي يحتاجه فك المرسل عن خط العملية.
3. **تقييم المخاطر (Risk Assessment):** ما المواد في الخط؟ وما ضغطها وحرارتها؟ وهل فيها كبريتيد الهيدروجين (H_2S)؟ وهل المنطقة خطرة مصنفة؟ وهل الجهاز جزء من وظيفة حماية؟
4. **تصريح العمل (Permit to Work – PTW):** وثيقة تحدد العمل والمكان والمدة والأخطار والضوابط، ومعها شهادة العزل (Isolation Certificate) التي تسرد كل نقطة عزل. التصريح يغطي العمل الفعلي لا عنوانه فقط.
5. **اجتماع السلامة (Toolbox Talk):** اجتماع قصير في الموقع قبل البدء، يُشرح فيه العمل والأخطار ونقاط العزل وطرق الطوارئ، ويُسأل فيه كل فرد عما فهمه.

وقبل أي عمل على جهاز يدخل في نظام السلامة الآلي (SIS) أو في منظومة الحريق والغاز، يُراجَع أثر العمل على الحماية، ويُطلب التجاوز (Bypass) المفوَّض إن لزم، مع إجراءات تعويضية (الفصل 29)، كما في القسم 39.2 من فصل استكشاف الأعطال.

13.3 تحديد مصادر الطاقة

الخطوة التي يفشل فيها العزل عادة ليست تنفيذه، بل نسيان مصدر لم يُذكر. لذلك تُحصر المصادر كلها على الرسم قبل الذهاب إلى الموقع (الشكل 13-1).

الشكل 13-1: *مصادر الطاقة حول عمل أجهزة نموذجي على خط غاز فيه كبريتيد الهيدروجين: التغذية الكهربائية للحلقة من نظام التحكم وتغذية الصمام الملفي من لوحة أخرى، وضغط العملية، وهواء الأجهزة، والنابض المحمّل في المشغل، وبخار التتبع، والمادة السامة؛ ولكل مصدر نقطة عزل تُقفل وطريقة تفريغ.*

جدول: مصادر الطاقة في أعمال الآلات الدقيقة وأجهزة القياس

مصدر الطاقة	أين يظهر في عمل الأجهزة	طريقة العزل	الطاقة المختزنة وتفريغها
كهربائية	تغذية الحلقات 24 V DC، والملفات 110/230 V AC، والمحللات، والتتبع الحراري الكهربائي، ومشغلات المحركات	فصل القاطع أو الفيوز أو مفتاح العزل وقفله	مكثفات المحولات ومغيرات السرعة؛ الانتظار ثم إثبات انعدام الجهد
ضغط العملية	خطوط النبض، والمانيفولد، وأغماد الحرارة، وأجسام الصمامات	صماما الجذر، أو عزل مزدوج مع تنفيس، أو عزل إيجابي	الضغط المحبوس في خطوط النبض وبين الصمامات؛ التنفيس إلى مكان آمن
الهواء المضغوط	الموضّعات، والمشغلات، والصمامات الملفية، وخزانات الحجم	صمام عزل الهواء وقفله	هواء المشغل وخزان الحجم والمركم؛ التنفيس
الهيدروليك	مشغلات الصمامات الكبيرة، ولوحات رؤوس الآبار	عزل المضخة ومصدر الضغط	المركّمات (Accumulators) تبقى مضغوطة؛ التفريغ وفق المصنّع
الحرارة	خدمات البخار والزيت الساخن، وبخار التتبع، والأسطح الساخنة	عزل البخار أو الزيت	الحرارة المختزنة في المعدن والمائع؛ الانتظار حتى التبريد
الأجزاء الدوارة	المضخات والمراوح والضواغط التي عليها مجسات اهتزاز وسرعة	عزل المحرك أو المحرك الأولي، وأحيانًا قفل الدوار	الدوران بالقصور الذاتي، أو بالتدفق العكسي؛ الانتظار والتحقق

مصدر الطاقة	أين يظهر في عمل الأجهزة	طريقة العزل	الطاقة المختزنة وتفريغها
النوابض والأحمال المعلقة	نوابض المشغلات، والنوابض المحمّلة مسبقًا، والصمامات الثقيلة المرفوعة	لا تُعزل بصمام	يُفرغ هواء المشغل ليعود إلى وضع الفشل، ولا يُفك غطاء النابض إلا بالأداة المخصصة
كيميائية وسامة	H_2S والهيدروكربونات والمواد الأكالة في خطوط العملية والعينات	عزل الخط	البقايا في خطوط النبض وسوائل الملء؛ التصريف والتطهير وفحص الغاز
إشعاعية	أجهزة المستوى والكثافة بالإشعاع (القسم 9.6)	إغلاق حاجب المصدر وقفله	الإشعاع لا يُفرغ؛ القياس بجهاز مسح إشعاعي تحت إشراف المسؤول المرخص

> **ملاحظة عن الجهد الأجنبي.** في خزانات التجميع وفي دوائر المرحلات الوسيطة قد يصل جهد من لوحة أخرى، مثل تغذية ملف 110 V AC من لوحة مراكز المحركات، أو إشارة تعشيق من نظام آخر. فصل تغذية الخزانة الرئيسية لا يفصل هذه الدوائر. لذلك تُعلَّم أطراف الجهد الأجنبي في الخزانة بلون أو بطاقة مميزة، ويُثبت انعدام الجهد عند كل طرف سيُلمس، لا عند المدخل الرئيسي وحده.

13.4 العزل الكهربائي (Electrical Isolation)

العزل الكهربائي فصل مادي لكل مصدر تغذية عن الدائرة، في نقطة يمكن تأمينها بقفل. أما إيقاف الجهاز فلا يفصله: زر الإيقاف يفتح دائرة تحكم، وأمر الإيقاف من نظام التحكم الموزع يرسل إشارة، وكلاهما يمكن أن يُعكس بأمر آخر أو بعطل، والجهد يبقى على الأطراف.

جدول: الإيقاف مقابل العزل

الإجراء	ماذا يفعل	هل هو عزل؟
زر الإيقاف المحلي	يفتح دائرة التحكم فيسقط الملامس	لا؛ الجهد باقٍ على أطراف الملامس والمحرك
أمر الإيقاف من DCS أو PLC	يغير خرجًا منطقيًا	لا؛ قد يُعكس بأمر أو فرض (Force) أو عطل
فصل الفيوز أو القاطع دون قفل	يفصل التغذية	عزل غير مؤمَّن؛ قد يعيده شخص آخر
فصل القاطع وقفله ووضع البطاقة، ثم إثبات انعدام الجهد	فصل مادي مؤمَّن ومتحقق منه	نعم

والقواعد الخمس المعروفة في أعمال الكهرباء (EN 50110-1) تصلح إطارًا لكل عزل كهربائي:

1. افصل الدائرة فصلًا تامًا من كل مصادرها، بما فيها التغذية الاحتياطية (UPS) والمصدر المكرر والتغذية الراجعة.
2. أمّن نقطة الفصل من إعادة التوصيل: قفل وبطاقة.
3. أثبت انعدام الجهد عند موضع العمل بجهاز فحص معتمد، يُختبر على مصدر معلوم قبل القياس وبعده (اختبار، ثم قياس، ثم اختبار)، ويؤدي ذلك شخص مؤهل.
4. أرِّض الموصلات واربطها بدائرة قصر (Short-circuit) حيث يلزم ذلك، وهو إلزامي في الجهد العالي.
5. احمِ نفسك من الأجزاء الحية المجاورة بالحواجز أو الأغطية.

الدوائر ذات الأمان الجوهري. يسمح المعيار IEC 60079-17 بأعمال صيانة محددة على الدوائر ذات الأمان الجوهري (Ex i) وهي حية، مثل فصل جهاز ميداني أو تبديله، لأن طاقتها محدودة لا تكفي للإشعال (الفصل 26). لكن هذا استثناء من العزل الكهربائي لا من

التصريح: فالعمل نفسه يبقى تحت تصريح، وضغط العملية على الجهاز يُعزل كالمعتاد، ولا يُستعمل في هذه الدوائر إلا جهاز فحص معتمد لها.

مثال محلول (الطاقة المختزنة في محرك متغير السرعة):

- **المعطيات:** محرك متغير السرعة (VFD) جهد ناقل التيار المستمر فيه 650 V، وسعة مكثفاته 4700 µF، ومقاومة التفريغ الداخلية 10 kΩ. المطلوب تبديل بطاقة الإشارات فيه بعد فصل تغذيته.
- **الافتراضات:** التفريغ عبر المقاومة وحدها، والحد الذي يُعد عنده الجهد آمنًا للمس في هذا المثال 50 V.
- **الحل:**
  - الطاقة المختزنة: $E = \tfrac{1}{2} \times C \times V^2 = \tfrac{1}{2} \times 4700 \times 10^{-6} \times 650^2 \approx 993$ J.
  - الثابت الزمني: $\tau = R \times C = 10{,}000 \times 4700 \times 10^{-6} = 47$ s.
  - زمن الهبوط إلى 50 V: $t = \tau \times \ln(650 \div 50) = 47 \times 2.565 \approx 121$ s.
- **معنى النتيجة:** بعد فصل القاطع يبقى ناقل التيار المستمر خطرًا دقيقتين على الأقل، حتى لو كانت مقاومة التفريغ سليمة. فإن تلفت، بقي الجهد ساعات. لذلك يُنتظر الزمن الذي يحدده المصنّع، ثم يُثبت انعدام الجهد بالقياس على أطراف الناقل نفسها (الشكل 13-3، اللوحة أ).

13.5 العزل الميكانيكي وعزل العملية (Mechanical / Process Isolation)

العزل الميكانيكي يمنع وصول ضغط العملية أو المادة أو الحركة إلى موضع العمل. ويُنفَّذ وفق خطة عزل معتمدة تسرد كل صمام يُغلق وكل نقطة تنفيس أو تصريف تُفتح، بالترتيب، مع حالة كل منها.

ودرجات العزل الميكانيكي ثلاث، يختار بينها تقييم المخاطر بحسب المادة والضغط والحرارة ومدة العمل وموضعه، وفق الإرشاد في دليل العزل الآمن (HSG253) (الشكل 13-2):

الشكل 13-2: *هرمية طرق العزل الميكانيكي: العزل بصمام واحد للأعمال منخفضة الخطورة، ثم العزل المزدوج مع التنفيس الذي يثبت إحكام الصمام الأول ويصرف تسريبه، ثم العزل الإيجابي بفصل مادي للمسار بلوح عمى أو بإزالة قطعة أنبوب؛ وإغلاق الصمام وحده ليس عزلًا إيجابيًا.*

جدول: مقارنة طرق العزل الميكانيكي

الطريقة	الوصف	درجة الأمان	متى تُستعمل	التحقق
صمام واحد (Single Valve)	صمام مغلق واحد بين العملية وموضع العمل	الأدنى؛ أي تسريب يصل مباشرة	مواد غير خطرة وضغوط منخفضة وأعمال قصيرة، بعد تقييم المخاطر	تنفيس بعد الصمام ومراقبة عدم تجمع الضغط
عزل مزدوج مع تنفيس (Double Block and Bleed – DBB)	صمامان مغلقان بينهما تنفيس مفتوح إلى مكان آمن	أعلى؛ تسريب الأول يخرج من التنفيس	أغلب أعمال الآلات الدقيقة وأجهزة القياس على الهيدروكربونات والضغوط العالية	التنفيس المفتوح يبقى تحت المراقبة طوال العمل
عزل إيجابي (Positive Isolation)	فصل مادي: لوح عمى (Spade / Blind)، أو نظارة عمى مقلوبة، أو إزالة قطعة أنبوب وتركيب شفاه عمياء	الأعلى	دخول الأوعية، والأعمال الساخنة، والمواد شديدة السمية، والعزل الطويل	فحص تركيب اللوح وتصنيفه لضغط الخط، وفحص الغاز

كيف أختار؟ دع تقييم المخاطر لا العادة يحسم الدرجة: صمام واحد لماء أو هواء بضغط منخفض وعمل قصير لا يُفتح فيه الخط إلى الجو إلا لحظات؛ وعزل مزدوج مع تنفيس لكل عمل أجهزة على هيدروكربونات أو مواد سامة أو ضغوط عالية، وهو الحد الأدنى المعتاد في هذه الخدمات؛ وعزل إيجابي حين يدخل أحد وعاءً، أو يُجرى عمل ساخن، أو تكون المادة قاتلة بتركيز صغير، أو يطول العزل أيامًا. ولا يُظهر الجدول أن الدرجة الأعلى تُبنى على ما دونها: لا لوح عمى إلا بعد عزل بالصمامات وتفريغ وتحقق، ولا صمامين إلا مع تنفيس مفتوح يُراقَب فعلًا. والخطأ الأكثر كلفة عدّ الصمام «المحكم» عزلًا إيجابيًا لأن التنفيس لم يُظهر شيئًا في أول دقيقة، ثم فتح الخط والصمام يسرّب ببطء أو يُفتح من غرفة التحكم.

عزل الأجهزة نفسها. للمرسلات ومقاييس الضغط صمامات جذر عند خط العملية، ومانيفولد عند الجهاز (القسم 6.5). إغلاق صمام المانيفولد وحده يعزل الجهاز عن خطوط النبض، لكنه لا يعزل خطوط النبض عن العملية؛ فإن كان العمل على خط النبض نفسه، فالعزل عند صمامي الجذر. وحين يكون صماما الجذر والمانيفولد مغلقين معًا، ويُفتح التنفيس بينهما، يتحقق ترتيب قريب من العزل المزدوج مع التنفيس.

نقطة مهمة جدًا: تركيب لوح العمى يتطلب فتح الخط. لا يُركَّب العزل الإيجابي إلا بعد عزل أولي بالصمامات، وتفريغ الضغط والمحتويات، والتحقق من أمان الفتح. ثم تُفك الشفة بحذر: تُرخى الصواميل في الجهة البعيدة عن العامل أولًا، فإن كان في الخط ضغط أو سائل محبوس، اندفع بعيدًا عنه، ولا تُفك آخر الصواميل حتى تنفصل الشفتان دون اندفاع. ولوح العمى نفسه يُختار بتصنيف ضغط الخط وسماكته المحسوبة، ويوسم ويُسجل في سجل الألواح، حتى لا يُنسى في الخط بعد انتهاء العمل.

13.6 القفل والبطاقة (Lockout / Tagout – LOTO)

العزل الذي لا يُؤمَّن يمكن أن يعيده أي شخص لا يعرف أن أحدًا يعمل. لذلك تُؤمَّن كل نقطة عزل بقفل يمنع تشغيلها، وبطاقة تبين من عزلها ولماذا ومتى.

- **القفل (Lock):** يُركَّب على مقبض القاطع أو ذراع الصمام أو سلسلته، بحيث لا يمكن تغيير الوضع إلا بفتحه. ولكل عامل قفل شخصي بمفتاح واحد يبقى معه.
- **البطاقة (Tag):** تحذير مكتوب: «لا تشغل، شخص يعمل»، ومعها الاسم ورقم التصريح والتاريخ. البطاقة وحدها لا تمنع التشغيل، فلا تُستعمل بلا قفل إلا حيث يتعذر القفل تقنيًا، وبضوابط إضافية يقرها نظام الموقع.
- **صندوق الأقفال الجماعي (Group Lock Box):** حين تكون نقاط العزل كثيرة والعاملون كثيرين، تُقفل كل نقطة بقفل العزل، وتوضع مفاتيحها في صندوق، ويركّب كل عامل قفله الشخصي على الصندوق. ولا يُفتح الصندوق لإعادة العزل إلا بعد أن يزيل آخر عامل قفله.

- **سجل العزل:** تسجل فيه كل نقطة: رقمها، ووضعها (مغلق، مفتوح، ملوح عمى)، ورقم القفل، ومن ركّبه، ومن تحقق منه.
- **التسليم بين الورديات:** الأقفال لا تُزال عند تغير الوردية. وتسلّم الوردية الخارجة التصريح والسجل والعمل للوردية الداخلة، ويراجع المستلم نقاط العزل بنفسه قبل أن يركّب قفله، ثم يزيل الخارج قفله.
- **القفل المتروك:** إذا غادر عامل الموقع وقفله باقٍ، لا يُكسر القفل إلا بإجراء مكتوب يتضمن محاولة التواصل معه، والتحقق من أنه ليس في موضع العمل، وموافقة المسؤول المفوَّض.

13.7 تفريغ الطاقة المختزنة

بعد العزل تبقى طاقة بين نقطة العزل وموضع العمل: غاز محبوس، أو سائل، أو هواء في مشغل، أو نابض محمّل، أو مكثف مشحون، أو معدن ساخن. وتفريغها خطوة مستقلة لها أسماؤها:

- **تخفيض الضغط (Depressurize):** خفض الضغط بأمان إلى الضغط الجوي أو إلى ضغط العمل المسموح، عبر مسار مصمم لذلك.
- **التصريف (Drain):** إخراج السوائل إلى نظام تصريف مغلق أو وعاء مناسب، لا إلى الأرض.
- **التنفيس (Vent):** إخراج الغازات إلى نظام آمن مناسب: الشعلة (Flare)، أو التنفيس المغلق، أو مكان آمن في الهواء الطلق للمواد غير الخطرة.
- **التطهير (Purge):** إزاحة البقايا بالنيتروجين أو البخار أو الماء، حين تكون المادة سامة أو قابلة للاشتعال وسيُفتح الخط.

وقد تحتاج المعدة إلى التصريف والتنفيس معًا: يُفتح التنفيس في أعلى النقطة ليدخل الهواء أو يخرج الغاز، ويُفتح التصريف في أسفلها ليخرج السائل. وخطوط النبض في

خدمات السوائل تحبس سائلًا بين صمام الجذر والمانيفولد، وفي خدمات الغاز قد تحبس مكثفات. أما سوائل الملء في الأغشية البعيدة، فجزء من الجهاز لا يُصرَّف.

الشكل 13-3: *الطاقة المختزنة التي لا يطفئها زر الإيقاف: (أ) تفريغ مكثف ناقل التيار المستمر في محرك متغير السرعة من 650 V بثابت زمني 47 s، فلا يهبط إلى 50 V قبل نحو دقيقتين؛ (ب) غاز محبوس بضغط 60 barg في 3 m من أنبوب قطره الداخلي 52.5 mm بين صمامين مغلقين: حجمه نحو 6.5 L وطاقته عند التمدد نحو 160 kJ، والقوة التي يدفع بها شفة بقطر الأنبوب نحو 13 kN.*

مثال محلول (الغاز المحبوس بين صمامين):

- **المعطيات:** أنبوب قطره الاسمي 2 inch وقطره الداخلي 52.5 mm، طوله 3 m بين صمامين مغلقين، والغاز فيه بضغط 60 barg. المطلوب فك شفة على هذا المقطع.
- **الافتراضات:** غاز مثالي، وتمدد متساوي الحرارة إلى الضغط الجوي 1.013 bar(a)، والضغط المطلق 61.0 bar(a).
- **الحل:**
  - مساحة المقطع: $A = \pi \div 4 \times 0.0525^2 \approx 2.16 \times 10^{-3}\ m^2$.
  - الحجم: $V = A \times L = 2.16 \times 10^{-3} \times 3 \approx 6.5 \times 10^{-3}\ m^3$، أي نحو 6.5 L.
  - المعادلة: الطاقة المتحررة عند التمدد $W = P_1 \times V \times \ln(P_1 \div P_2)$.
  - التعويض: $W \approx 6.10 \times 10^{6} \times 6.5 \times 10^{-3} \times \ln(61.0 \div 1.013) \approx 4.10 \times 10^{-3} \times 6.5 \times 10^{6} \times 6.10$.
  - النتيجة: $W \approx 1.6 \times 10^{5}\ J$، أي نحو 160 kJ.
  - القوة على شفة بقطر الأنبوب الداخلي: $F = P \times A = 6.0 \times 10^{6} \times 2.16 \times 10^{-3} \approx 13\ kN$، أي نحو 1.3 طن ثقلي.
- **معنى النتيجة:** مقطع قصير «صغير» يحبس طاقة تكفي لقذف شفة أو أداة بعنف، وقوة على الصواميل الأخيرة تفوق ما تتحمله يد العامل كثيرًا. فلا تُرخى صامولة قبل أن يثبت التنفيس أن الضغط زال، ولا يُعتمد على مقياس ضغط وحده.

13.8 التحقق من العزل (Verify Isolation)

العزل الذي لم يُتحقق منه افتراض. ويتحقق منه شخص غير الذي نفذه حيث يسمح نظام الموقع، وبطريقة تثبت زوال الطاقة فعلًا، لا بالنظر إلى وضع الصمامات وحده.

جدول: طرق التحقق وحدودها

الطاقة	طريقة التحقق	لماذا لا يكفي غيرها
كهربائية	إثبات انعدام الجهد بجهاز فحص معتمد عند موضع العمل (انظر القاعدة 3 في القسم 13.4)	مصباح الإشارة المطفأ قد يكون تالفًا، والقاطع المفصول قد يكون لدائرة أخرى
كهربائية لمحرك	بعد العزل تُجرّب محاولة التشغيل المحلي، إن سمح الإجراء، ثم يعاد المفتاح إلى وضع الإيقاف	يثبت أن العزل على المحرك الصحيح
ضغط العملية	فتح نقطة التنفيس بين العزل وموضع العمل، ومراقبتها فترة كافية لكشف تجمع الضغط	المقياس قد يكون معزولًا بصمامه أو مسدودًا أو مداه كبيرًا فلا يظهر الضغط المنخفض
سوائل	التصريف حتى التوقف، ثم المراقبة، والتحقق من أن نقطة التصريف ليست مسدودة	السائل قد يُحبس في نقطة منخفضة بعيدة عن التصريف
مواد سامة أو قابلة للاشتعال	فحص الغاز عند موضع الفتح (LEL وH_2S والأكسجين) بجهاز معاير	الرائحة لا تدل؛ H_2S يعطل حاسة الشم عند التراكيز العالية
الهواء والمشغل	تنفيس المشغل، والتأكد من أن الصمام في وضع الفشل ولا يتحرك	الهواء المحبوس في خزان حجم أو صمام قفل يحرك الساق لاحقًا
الإشعاع	قياس معدل الجرعة بجهاز مسح إشعاعي معاير	حاجب «مغلق» قد يكون عالقًا أو ناقص الإغلاق

قراءة صفر على مقياس ضغط وحدها لا تكفي. المقياس قد يكون معزولًا بصمامه، أو مسدودًا بالرواسب أو الهيدرات، أو مداه 0–100 bar فلا تظهر عليه 0.5 bar. والضغط المحبوس بين صمامين لا يظهر على مقياس خارجهما. الدليل الوحيد المقبول نقطة تنفيس مفتوحة بين العزل وموضع العمل، لا يخرج منها شيء.

13.9 تنفيذ العمل مع بقاء العزل

- تبقى الأقفال والبطاقات ونقاط التنفيس المفتوحة كما هي طوال العمل، ولا يُغلق تنفيس «لأنه يزعج».
- إن تغير نطاق العمل، كأن يتبين أن الجهاز يحتاج إلى فك الخط لا المرسل وحده، يتوقف العمل ويُراجع التصريح وخطة العزل.
- إن احتاج العمل إلى طاقة مؤقتًا، كإعادة الهواء لاختبار شوط الصمام أو تغذية المرسل لمعايرته، يُنفَّذ ذلك بإجراء مكتوب لرفع العزل مؤقتًا: يخرج الجميع من منطقة الخطر، ثم تُرفع نقطة العزل المعنية وحدها، ثم تُعاد بعد الاختبار ويُتحقق منها من جديد.
- العمل الساخن قرب خط معزول يحتاج إلى تصريح خاص وفحص غاز مستمر، وغالبًا إلى عزل إيجابي.

13.10 إعادة الخدمة (Reinstatement)

إعادة الخدمة عزل بالعكس، وأخطاؤها لا تقل خطرًا عن أخطاء العزل:

1. **التأكد من اكتمال العمل:** كل الوصلات مشدودة بالعزم الصحيح، والحشوات جديدة، والأغطية مركبة، ولا جزء ناقص.
2. **إخلاء الأشخاص والأدوات:** لا أحد داخل المعدة أو قرب الأجزاء المتحركة، ولا أداة متروكة في الخط أو داخل الصمام.
3. **إعادة الحواجز:** الأغطية الواقية وحواجز الأجزاء الدوارة وأغطية الخزانات.

4. **إزالة الألواح العمياء:** بالترتيب المعاكس للتركيب، ومطابقة سجل الألواح حتى لا يبقى لوح في الخط.
5. **اختبار الإحكام (Leak Test):** بالنيتروجين أو بضغط مناسب قبل إدخال المادة الخطرة، خاصة بعد فك شفاه في خدمة هيدروكربونات.
6. **إعادة الأجهزة بالترتيب الصحيح:** المانيفولد يُفتح بتسلسل يحمي المرسل من الضغط الزائد على جانب واحد (القسم 6.5)، ويُعاد الهواء إلى المشغل بعد إبلاغ من حوله، ويُتحقق من القراءة ومن اتجاه عمل الصمام.
7. **إزالة الأقفال:** يزيل كل عامل قفله بنفسه، ثم تُزال أقفال العزل وفق السجل.
8. **إزالة التجاوزات والفروض:** كل تجاوز في نظام السلامة وكل فرض في نظام التحكم يُزال ويُسجَّل، ويُتحقق من ذلك على الشاشة.
9. **التسليم:** تُسلَّم المعدة للتشغيل بتوقيع، ويُغلق التصريح، ثم يُعاد التشغيل بتنسيق وتصريح معتمدين.

الشكل 13-4: *تسلسل العزل والقفل من التحضير إلى إعادة الخدمة في عشر خطوات، مع صندوق الأقفال الجماعي الذي تُحفظ فيه مفاتيح أقفال نقاط العزل ويقفله كل عامل بقفله الشخصي؛ وإن فشل التحقق، يعود العمل إلى خطوة العزل.*

13.11 مثال تطبيقي متكامل: تبديل مرسل ضغط تفاضلي على خط غاز حامض

العمل: تبديل المرسل PDT-205 على عنصر تدفق في خط غاز عملية بضغط 60 barg فيه H_2S، ومرسله يغذي حلقة تحكم في DCS، وليس في أي وظيفة حماية. خطوط النبض عليها تتبع بخاري، والمنطقة مصنفة Zone 1.

خطة العزل:

الخطوة	الإجراء	من ينفذ	التحقق
1	إبلاغ غرفة التحكم، وتحويل الحلقة إلى اليدوي بقيمة خرج آمنة يحددها التشغيل	المشغل	الحلقة يدوي على الشاشة
2	إغلاق صمامي الجذر وقفلهما	فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس	القفل والبطاقة في مكانهما
3	إغلاق صمام بخار التتبع وقفله، والانتظار حتى تبرد خطوط النبض	فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس	اللمس بقفاز أو مقياس حرارة سطحي
4	فتح صمام الموازنة في المانيفولد، ثم التنفيس ببطء إلى نظام الشعلة	فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس	لا يخرج شيء من التنفيس بعد مدة مراقبة كافية
5	فصل قاطع الحلقة في خزانة التجميع وقفله	فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس	إثبات انعدام الجهد عند أطراف المرسل
6	فحص الغاز عند المانيفولد (H_2S و LEL) قبل الفك، ومعدات التنفس جاهزة بحسب تقييم المخاطر	حامل جهاز الفحص	القراءة صفر

الخطوة	الإجراء	من ينفذ	التحقق
7	فك المرسل مع إرخاء الصواميل البعيدة أولًا، وإبقاء التنفيس مفتوحًا	فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس	لا اندفاع

وبعد التركيب تُطبق خطوات إعادة الخدمة: فحص التسرب عند المانيفولد، ثم فتح المانيفولد بالتسلسل الصحيح، ثم رفع أقفال الكهرباء، ثم مقارنة القراءة بالمرسل المكرر أو بحساب العملية قبل إعادة الحلقة إلى الآلي.

وتنبه هذه الخطة إلى أمرين. الأول: ضغط العملية وحده ليس الخطر، فالمادة السامة تفرض التنفيس إلى نظام مغلق وفحص الغاز. والثاني: المرسل ليس في وظيفة حماية، ولو كان لاحتاجت الخطوة 1 إلى تجاوز مفوَّض وإجراء تعويضي.

13.12 حالة ميدانية: الضغط الذي لم يظهر على المقياس

> **نوع الحالة: مثال تعليمي مركّب**

طُلب من فني تبديل مرسل ضغط على خط سائل هيدروكربوني. أغلق صمام الجذر، ونظر إلى مقياس الضغط المحلي على المانيفولد فوجده عند الصفر، فبدأ بفك الوصلة. فاندفع سائل ساخن من خط النبض ورشّ ذراعه.

ما الذي حدث: كان صمام المقياس نفسه مغلقًا منذ صيانة سابقة، فالمقياس لا يرى الخط أصلًا. وخط النبض الطويل بين صمام الجذر والمانيفولد كان مملوءًا بسائل محبوس تحت الضغط، ثم ارتفع ضغطه بالتمدد الحراري بعد إغلاق الصمام، لأن بخار التتبع بقي مفتوحًا.

الأسباب:

- الاعتماد على قراءة مقياس بدل نقطة تنفيس مفتوحة.
- عدم إدراج بخار التتبع في مصادر الطاقة.
- لا خطة عزل مكتوبة لعمل عُدّ «صغيرًا».

الإجراءات التصحيحية:

- صار في إجراء عزل الأجهزة بند إلزامي: «تنفيس عبر المانيفولد ومراقبة التنفيس قبل أي فك».
- أُضيف بخار التتبع وسوائل الملء إلى قائمة مصادر الطاقة في نموذج التصريح.
- يُلزم نموذج التصريح كاتبه بتحديد نقطة التحقق من العزل لا نقطة العزل وحدها.

الدرس: الصفر على المقياس معلومة عن المقياس، لا عن الخط.

13.13 الأخطاء الشائعة

- عدّ زر الإيقاف أو أمر DCS عزلًا.
- عزل التغذية الرئيسية لخزانة ونسيان الجهد الأجنبي فيها (ملف من لوحة أخرى، أو مصدر UPS).
- الاكتفاء بصمام واحد في خدمة خطرة، أو عدّ إغلاق الصمام عزلًا إيجابيًا.
- فك شفة لتركيب لوح عمى قبل تفريغ الضغط والتحقق منه.
- الاعتماد على مقياس ضغط يقرأ صفرًا بدل نقطة تنفيس مفتوحة.
- نسيان الطاقة المختزنة: مكثفات مغيرات السرعة، والنوابض المحمّلة، وخزانات الحجم، والمركّمات، والسائل المحبوس في خطوط النبض.
- استعمال بطاقة بلا قفل، أو قفل مشترك بمفتاح مع أكثر من شخص.
- إزالة قفل شخص آخر، أو ترك القفل عند مغادرة الموقع.
- رفع العزل «لدقيقة» لاختبار شيء دون إجراء مكتوب.
- نسيان لوح عمى في الخط، أو تجاوز في نظام السلامة، أو فرض في نظام التحكم بعد انتهاء العمل.
- فتح المانيفولد بترتيب خاطئ عند الإعادة فيتضرر المرسل بالضغط الزائد على جانب واحد.

13.14 ملخص

العمل الميداني الآمن يبدأ بتحضير يحدد المعدة ونطاق العمل وأخطاره، وتصريح عمل واجتماع سلامة. ثم تُحصر مصادر الطاقة كلها: كهربائية، وضغط العملية، وهواء، وهيدروليك، وحرارة، وحركة، ونوابض، ومواد سامة، وإشعاع. ويُعزل كل مصدر عزلًا ماديًا يؤمَّن بقفل وبطاقة؛ فالإيقاف ليس عزلًا. وتُختار درجة العزل الميكانيكي من صمام واحد إلى عزل مزدوج مع تنفيس إلى عزل إيجابي بحسب المخاطر، ولا يُركَّب لوح العمى إلا بعد عزل أولي وتفريغ وتحقق. ثم تُفرغ الطاقة المختزنة بتخفيض الضغط والتصريف والتنفيس والتطهير. ويُثبت العزل بالتحقق: انعدام الجهد بجهاز معتمد، ونقطة تنفيس لا يخرج منها شيء، وفحص الغاز. وتنتهي الدورة بإعادة خدمة منظمة تزيل العزل بالترتيب العكسي، وتزيل التجاوزات والفروض، وتسلّم المعدة بتوقيع.

وفي الفصل التالي: بعد أن عرفنا كيف نعزل الجهاز ونعيده إلى الخدمة بأمان، يتناول الفصل 14 «المعايرة والتحقق من أجهزة القياس» العمل الذي يجري بين العزل والإعادة: مقارنة الجهاز بمرجع متتبَّع وتوثيق النتيجة.

13.15 أسئلة التقييم الذاتي

1. لماذا لا يُعد أمر الإيقاف من DCS عزلًا كهربائيًا؟ اذكر ثلاثة أسباب.
2. عدّد سبعة مصادر للطاقة قد تحيط بصمام تحكم بمشغل غشائي وموضّع وصمام ملفي على خط بخار.
3. ما الفرق بين العزل المزدوج مع التنفيس والعزل الإيجابي؟ ومتى يلزم الثاني؟
4. لماذا لا تكفي قراءة صفر على مقياس ضغط دليلًا على زوال الضغط؟ اذكر ثلاث حالات يقرأ فيها المقياس صفرًا والخط مضغوط.
5. مكثف سعته 2200 µF مشحون إلى 540 V، ومقاومة تفريغه 22 kΩ. احسب الطاقة المختزنة، والزمن اللازم ليهبط الجهد إلى 50 V.

6. صف طريقة فك شفة لتركيب لوح عمى، مع ذكر ما يجب إنجازه قبل إرخاء أول صامولة.
7. ما وظيفة صندوق الأقفال الجماعي؟ ومتى يُفتح؟
8. في خزانة تجميع، فصلت تغذيتها الرئيسية وأقفلتها. ما الذي يلزم بعد ذلك قبل لمس أطراف صمام ملفي فيها؟
9. رتّب خطوات إعادة الخدمة بعد تبديل مرسل ضغط تفاضلي، من اكتمال العمل إلى إعادة الحلقة إلى الآلي.
10. في الحالة الميدانية (القسم 13.12)، ما الإجراءان اللذان كانا سيمنعان الحادث؟

مراجع الفصل: HSE HSG253 «The safe isolation of plant and equipment» (الطبعة الثانية، 2006) للعزل والتصريف والتنفيس ودرجات العزل الميكانيكي؛ OSHA Lockout/Tagout) – 29 CFR 1910.147 (The Control of Hazardous Energy؛ ANSI/ASSP Z244.1 للتحكم بالطاقة الخطرة؛ EN 50110-1 (القواعد الخمس للعمل الكهربائي الآمن) و HSE HSG85 (Electricity at work: Safe working practices)؛ IEC 60079-17 لصيانة المعدات في المناطق الخطرة؛ IEC 61511 لتجاوز وظائف السلامة؛ وخبرة المؤلف الميدانية (R18).

الفصل 14: المعايرة والتحقق من أجهزة القياس

لمن هذا الفصل: مهندس الموقع وفنيّو الأجهزة، وكل من يوقّع على شهادة معايرة. فالمعايرة هي الدليل الموثّق على أن الرقم المعروض على الشاشة يستحق الثقة.

الفكرة الأساسية: المعايرة مقارنةٌ موثّقة بمرجع معروف الدقة، وليست «ضبط الجهاز حتى يوافق المقياس المحلي». والمعايرة التي لا تُسجَّل فيها الحالة قبل الضبط، ولا يُعرَف فيها مرجع المقارنة، لا تثبت شيئًا.

14.1 المعايرة والضبط والتحقق

تختلط هذه المصطلحات في لغة الموقع، لكنها في علم القياس (Metrology) أعمال مختلفة:

المصطلح	المعنى	هل يغيّر الجهاز؟
المعايرة (Calibration)	تحديد العلاقة بين قراءة الجهاز وقيمة المرجع، وتوثيق الخطأ وعدم اليقين	لا
الضبط (Adjustment / Trim)	تغيير الجهاز لتقليل الخطأ المكتشَف	نعم
التحقق (Verification)	إثبات أن الجهاز يحقق متطلبات محددة (مثل حدود القبول)	لا
الاختبار الوظيفي (Functional Test)	إثبات أن الوظيفة تعمل (إنذار، إيقاف، حركة صمام)	لا

المصطلح	المعنى	هل يغيّر الجهاز؟
تغيير المدى (Re-ranging)	تغيير LRV وURV في المرسل الذكي	نعم، لكنه **ليس معايرة**

كيف أختار؟ إن كان السؤال «هل يقيس الجهاز صحيحًا؟» فالجواب معايرة بمرجع متتبَّع مع تسجيل «كما وُجد»؛ وإن كان «هل تؤدي الحلقة وظيفتها؟» فاختبار وظيفي؛ ولا يُلجأ إلى الضبط إلا بعد أن تُظهر المعايرة خطأً يتجاوز حد القبول. وحدّ هذا الجدول أنه لا يقول كم من الخطأ يُحتمل؛ فحد القبول يأتي من ورقة البيانات أو إجراء المعايرة لا من تعريف المصطلح. والخطأ الأكثر كلفة أن يُسمّى تغيير المدى أو مطابقة الصفر على مقياس محلي «معايرة» وتُوقَّع عليه شهادة، فتُبنى فترة المعايرة التالية وتقييم الأثر على رقم لا يثبت شيئًا.

ويُسجَّل في كل عملية حالتان:

- **الحالة كما وُجدت (As-Found):** القراءات قبل أي تدخل. وهي وحدها التي تخبرنا كيف كان الجهاز يقيس طوال الفترة الماضية.
- **الحالة كما تُركت (As-Left):** القراءات بعد الضبط، وهي بداية الفترة القادمة.

محو بيانات «كما وُجد» بعد نجاح الضبط خطأ مهني؛ لأنه يُخفي الانحراف الذي قد يكون أثّر في المنتج أو الفواتير أو السلامة.

جدول مقارنة: أين تُجرى المعايرة؟

المعيار	في الموقع (In-situ)	ورشة الأجهزة	مختبر معتمد (ISO/IEC 17025)
ما يُعاير	الحلقة كاملة كما تعمل (حساس + مرسل + بطاقة)	الجهاز وحده على المنضدة	المراجع (المعايرات) وأجهزة الاختبار
الدقة المتاحة	محدودة بأداة محمولة (نسبة 4:1 غالبًا)	أعلى (مراجع ثابتة، حرارة مضبوطة)	الأعلى (شهادة بعدم يقين موثق)

المعيار	في الموقع (In-situ)	ورشة الأجهزة	مختبر معتمد (ISO/IEC 17025)
ما يكشفه	أخطاء التركيب والأسلاك والمدى في النظام	انحراف الجهاز نفسه	انحراف المراجع
التكلفة والزمن	ساعات وتصريح عمل، لا فك	فك وتركيب وإعادة فحص الحلقة	إرسال وانتظار أسابيع
متى	دوريًا للحلقات الحرجة، وبعد كل تدخل	عند الانحراف أو الإصلاح أو الاستلام	سنويًا أو حسب برنامج الجودة للمراجع
القاعدة	لا تعتمد شهادة الورشة لحلقة لم تُختبر في موضعها	لا تُعاير أداة الاختبار بأداة من فئتها	التتبعية تبدأ من هنا

كيف أختار؟ الحلقة الحرجة تُعاير في موضعها دوريًا وبعد كل تدخل، والجهاز الذي انحرف أو أُصلح أو استُلم جديدًا يذهب إلى الورشة، ولا يذهب إلى المختبر المعتمد إلا المراجع وأدوات الاختبار. وحدّ هذه المقارنة أنها لا تُظهر ما يُفقد بالفك: تصريح العمل، وإعادة فحص الحلقة بعد التركيب، وزمن توقف القياس؛ ولا تُظهر أن دقة المعايرة في الموقع محدودة بالأداة المحمولة ونسبة 4:1 (القسم 14.3). والخطأ الأكثر كلفة هو تركيب مرسل يحمل شهادة ورشة سليمة دون اختبار الحلقة في موضعها، فتبقى أخطاء المدى والأسلاك والبطاقة مستورة بشهادة صحيحة عن جهاز آخر غير الحلقة التي يراها النظام.

14.2 التتبعية المترولوجية وسلسلة المعايير

التتبعية المترولوجية (Metrological Traceability) خاصيةٌ تجعل نتيجة القياس مرتبطةً بمرجع أعلى عبر سلسلة متصلة من المعايرات الموثّقة، لكل حلقة منها عدم يقين معروف:

الشكل 14-1: *سلسلة التتبعية المترولوجية من وحدات SI إلى جهاز المصنع؛ كل حلقة تحتاج شهادة سارية، وعدم اليقين يزداد نزولًا.*

يُقرأ المخطط من الأعلى إلى الأسفل؛ وكلما نزلنا درجة ازداد عدم اليقين.

لكي تكون معايرتك متتبعة يجب أن تحمل كلّ أداة مرجعية شهادة معايرة سارية من جهة مؤهلة (ويُفضَّل مختبر معتمد وفق ISO/IEC 17025، تذكر القيم وعدم اليقين لا كلمة «مطابق» فقط. وتشترط إجراءات التشغيل التجريبي النموذجية أن تُعايَر أدوات الاختبار بوحدات المشروع المعتمدة (عادة SI)، وأن تحمل كل أداة ملصقًا ثابتًا يبيّن: رقمها التسلسلي، واسم من عايرها، وتاريخ المعايرة، وتاريخ المعايرة التالية.

14.2-أ المقياس الحراري الذي تنتهي إليه السلسلة: ITS-90

سلسلة التتبعية في القسم 14.2 تنتهي في أعلاها إلى وحدات SI. وفي الحرارة تحديدًا لا تُحقَّق الوحدة (الكلفن) في المختبر مباشرة، بل عبر **مقياس عملي** متفق عليه يعيد إنتاج الكلفن الديناميكي الحراري بأقرب ما يمكن، ويحدد للمعايِرين نقاطًا ثابتة وأجهزةً وطرق

استكمال بينها. المقياس النافذ منذ عام 1990 هو **المقياس الحراري الدولي ITS-90** (International Temperature Scale of 1990)، وهو الذي حلّ محل **IPTS-68** الذي ما تزال وثائق تدريبية كثيرة وأوراق أجهزة قديمة تذكره.

لماذا يهم هذا مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس عمليًا؟ لثلاثة أسباب: أن شهادة المعايرة يجب أن تذكر المقياس المعتمد (ITS-90)؛ وأن جداول IEC 60584 وIEC 60751 المستخدمة في الفصل 7 مبنية على ITS-90 لا على سابقه، فخلط جدول قديم بجدول حديث يُدخل خطأً منهجيًا؛ وأن **خلايا النقاط الثابتة** هي أرخص وأدقّ مرجع متاح في الورشة لفحص المجسات المرجعية.

النقاط الثابتة المعرِّفة لـ ITS-90 (مختارة في المدى الصناعي):

النقطة الثابتة	النوع	القيمة بالكلفن	القيمة بالسيلزي
النقطة الثلاثية للأرغون	ثلاثية	83.8058	−189.3442
النقطة الثلاثية للزئبق	ثلاثية	234.3156	−38.8344
النقطة الثلاثية للماء	ثلاثية	273.16	0.01
نقطة انصهار الغاليوم	انصهار	302.9146	29.7646
نقطة تجمد الإنديوم	تجمد	429.7485	156.5985
نقطة تجمد القصدير	تجمد	505.078	231.928
نقطة تجمد الزنك	تجمد	692.677	419.527
نقطة تجمد الألومنيوم	تجمد	933.473	660.323
نقطة تجمد الفضة	تجمد	1234.93	961.78
نقطة تجمد الذهب	تجمد	1337.33	1064.18

و**النقطة الثلاثية (Triple Point)** هي الحرارة والضغط اللذان تتعايش عندهما الأطوار الثلاثة (صلب وسائل وغاز) في توازن؛ وللماء يقع ذلك عند 611.66 Pa (نحو 0.0887

psia) و0.01 °C. ولهذا تُعدّ النقاط الثلاثية أدقّ من نقاط الغليان: الغليان يعتمد على الضغط الجوي فيتغير مع الطقس والارتفاع، أما النقطة الثلاثية فتُعرِّف الضغط والحرارة معًا.

الأجهزة المعرِّفة لكل مدى في ITS-90:

المدى	الجهاز المعرِّف	ملاحظة
0.65 إلى 5.0 K	ضغط بخار الهيليوم (^{3}He و^{4}He)	مختبري بحت
3.0 إلى 24.5561 K	ميزان حرارة غازي ثابت الحجم	مختبري بحت
13.8033 K إلى 961.78 °C (نقطة تجمد الفضة)	**مقياس المقاومة البلاتيني المعياري (SPRT)** مع دوال استكمال محددة	هذا هو المدى الذي تقع فيه كل قياسات العمليات تقريبًا
فوق 961.78 °C	**قانون بلانك للإشعاع** (بيرومتر إشعاعي) منسوبًا إلى نقطة تجمد الفضة أو الذهب أو النحاس	لا حدّ أعلى معرَّفًا

تصحيح شائع يستحق الانتباه: في المقياس القديم IPTS-68 كان **المزدوج الحراري بلاتين/10% روديوم مقابل البلاتين النقي** جهازًا معرِّفًا بين 630.74 °C ونقطة الذهب 1064.43 °C، وكان البيرومتر البصري يُستعمل فوق ذلك. أما في ITS-90 فقد **أُسقط المزدوج الحراري من قائمة الأجهزة المعرِّفة تمامًا**: مُدّ مدى مقياس المقاومة البلاتيني حتى نقطة الفضة (961.78 °C)، وأخذ قانون بلانك ما فوقها. فمن يقرأ في وثيقة أن «المزدوج بلاتين/روديوم يعرّف المدى 630 إلى 1064 °C» فهو يقرأ مقياسًا مسحوبًا من التداول منذ 1990، وإن بقي المزدوج النبيل أداة قياس ممتازة في ذلك المدى.

وملاحظة أخرى: بعد إعادة تعريف وحدات SI في 2019 صار الكلفن معرَّفًا بثابت بولتزمان لا بالنقطة الثلاثية للماء، لكن ITS-90 بقي هو **التحقيق العملي** المعتمد الذي تُعاير عليه المختبرات، ولم تتغير جداول المزدوجات ومقاومات القياس بسبب ذلك.

ما ينفع في الورشة:

1. تحقق من أن شهادة المجس المرجعي تذكر «ITS-90»؛ وإن ذكرت IPTS-68 فالشهادة قديمة جدًا وتُستبدل.
2. حمّام الجليد المذاب (Ice Point) تحقيق عملي رخيص للصفر السيلزي بتكرارية نحو ±0.002 °C إلى ±0.01 °C إذا صُنع بعناية (ونحو ±0.05 °C في حمام عادي) (جليد مسحوق من ماء منزوع الأيونات، وماء بقدر يكفي لملء الفراغات فقط، وغمر المجس 150 mm على الأقل). انتبه إلى أن الصفر السيلزي ليس النقطة الثلاثية: بينهما 0.01 °C.
3. خلايا النقاط الثابتة المتاحة تجاريًا للورش منها الغاليوم (29.7646 °C) والقصدير (231.928 °C) والزنك (419.527 °C)، وتُستعمل لفحص انجراف المجس المرجعي بين معايرتيه السنويتين (القسم 14.8).
4. اكتب في الشهادة قيمة النقطة الثابتة بخاناتها الكاملة كما في الجدول أعلاه، فهي معرَّفة بالتعريف لا مقيسة.

◆ ◆ ◆

14.3 نسبة دقة أداة الاختبار إلى الجهاز

تشترط إجراءات كثيرة أن تكون دقة أداة الاختبار أفضل من دقة الجهاز المختبَر أو مساوية لها على الأقل. والممارسة الجيدة تطلب أكثر من ذلك: نسبة لا تقل عن **4:1** بين سماحية الجهاز وعدم يقين الأداة (Test Uncertainty Ratio – TUR)، حتى لا تُقبَل أجهزة خارج الحدود أو تُرفَض أجهزة سليمة بسبب عدم يقين الأداة نفسها.

مثال محلول — اختيار وحدة الضغط المرجعية: مرسل DP مداه 0–250 mbar وسماحيته في الموقع ±0.1% من المدى، أي ±0.25 mbar.

- وحدة ضغط مداها 0–2000 mbar ودقتها ±0.025% من كامل المدى: ±0.5 mbar. هذه أسوأ من المرسل نفسه، ولا تصلح رغم أن «0.025%» تبدو رقمًا ممتازًا.
- وحدة مداها 0–300 mbar بالدقة نفسها: ±0.075 mbar، والنسبة 0.25 ÷ 0.075 ≈ 3.3:1.
- وحدة مداها 0–300 mbar ودقتها ±0.02%: ±0.06 mbar، والنسبة ≈ 4.2:1، وهي المناسبة.

الدرس: دقة الأداة المكتوبة كنسبة من كامل المدى تتحول إلى خطأ كبير عند استخدام جزء صغير من مداها؛ فتُختار وحدة المدى المناسبة لكل جهاز.

14.4 إجراء المعايرة بخمس نقاط صعودًا ونزولًا

تُطبَّق قيم عند 0 و25 و50 و75 و100% من المدى صعودًا، ثم النقاط نفسها نزولًا. الصعود وحده يكشف خطأ الصفر والمدى والخطية، والنزول يكشف التخلف (Hysteresis). ويجب الاقتراب من كل نقطة من اتجاه واحد دون تجاوزها ثم العودة إليها، وإلا ضاع أثر التخلف.

خطوات العمل:

1. التأكد من تصريح العمل وإخطار غرفة التحكم، وتجاوز المنطق المرتبط بالجهاز بتصريح رسمي (الفصل 13 والقسم 39.2).
2. عزل الجهاز عن العملية بالتسلسل الصحيح، وتنفيسه.
3. توصيل المصدر والمرجع، وترك الجهاز يستقر حراريًا.
4. تسجيل قراءات «كما وُجد» صعودًا ونزولًا.

5. مقارنة الخطأ بحدود القبول، والضبط فقط إن لزم.
6. تسجيل قراءات «كما تُرك»، ثم إعادة الجهاز إلى الخدمة والتحقق من قراءته على النظام.

مثال محلول — مرسل ضغط 0–10 barg، وحد القبول ±0.25% من المدى (±0.04 m A). الخطأ % = (التيار المقيس − التيار المثالي) ÷ 100 × 16.

الضغط المطبَّق (barg)	التيار المثالي (mA)	صعودًا (mA)	الخطأ صعودًا	نزولًا (mA)	الخطأ نزولًا
0.0	4.000	4.020	+0.13%	4.036	+0.23%
2.5	8.000	8.028	+0.18%	8.052	+0.33%
5.0	12.000	12.035	+0.22%	12.058	+0.36%
7.5	16.000	16.040	+0.25%	16.060	+0.38%
10.0	20.000	20.044	+0.28%	20.044	+0.28%

القراءة: المرسل خارج حد القبول «كما وُجد» (أكبر خطأ +0.38%). والخطأ كله موجب ويزداد مع المدى، فهناك انزياح في الصفر والمدى معًا. والفرق بين الصعود والنزول (حتى 0.15% عند 25%) تخلف ملحوظ، قد يدل على إجهاد ميكانيكي في الغشاء أو على تسرب صغير في وصلات الاختبار. القرار: تحقق من إحكام التوصيلات أولًا، ثم اضبط الصفر والمدى، ثم أعد الدورة كاملة. فإن بقي التخلف فوق الحد فالجهاز يُستبدَل، وتُقيَّم آثار الانحراف في الفترة السابقة.

الشكل 14-2: *أخطاء «كما وُجد» في المثال صعودًا ونزولًا مقابل حد القبول؛ الخطأ موجب ويزداد مع المدى، والفجوة بين المنحنيين تخلف.*

14.5 معايرة المرسلات الذكية

المرسل الذكي (Smart Transmitter) فيه مرحلتان مستقلتان، ولكل منهما ضبط خاص:

الشكل 14-3: *مراحل المرسل الذكي والضبط الخاص بكل مرحلة: ضبط الحساس بضغط مرجعي، وتغيير المدى تهيئة فقط، وضبط الخرج بمقياس تيار دقيق.*

يمر الضغط بالحساس ثم بالمعالج ثم بمحول التيار، وكل سهم يحمل الضبط الذي يؤثر فيه.

- **ضبط الحساس (Sensor Trim):** يُجرى بتطبيق ضغط مرجعي حقيقي، ويصحح القيمة المقاسة الرقمية (PV). ومنه ضبط الصفر (Zero Trim) تحت الضغط الساكن لمرسلات DP (الفصل 6).
- **ضبط الخرج التناظري (Analog Output Trim):** يُجرى بمقياس تيار دقيق في الحلقة، ويصحح تحويل القيمة الرقمية إلى 4–20 mA.
- **تغيير المدى (Re-ranging):** يغيّر فقط القيم التي تقابل 4 و20 mA، ولا يصحح أي خطأ في الحساس.

والخطأ الشائع هو «معايرة» المرسل بجهاز الاتصال (HART Communicator) دون تطبيق ضغط، بكتابة LRV وURV المطلوبة أو بتعديل الصفر حتى يوافق مقياسًا محليًا غير معايَر. هذا تهيئة (Configuration) وليس معايرة. ومن المهم أيضًا مقارنة القيمة الرقمية من HART بقيمة التيار التي يراها النظام؛ فاختلافهما يكشف خطأ خرج المرسل أو بطاقة الإدخال أو مقاومة الحلقة.

وقبل إعادة المرسل إلى الخدمة تُراجَع الإعدادات مقابل ورقة البيانات: الوسم، والوحدات، والمدى، ودالة التحويل (خطية أم جذر)، والتخميد، واتجاه إشارة العطل، وقفل الكتابة (Write Protect) في أجهزة الحماية.

14.6 معايرة المفاتيح

للمفتاح نقطتان لا واحدة:

- **نقطة الضبط (Set Point):** القيمة التي يتغيّر عندها التلامس في اتجاه الخطر (ارتفاعًا أو انخفاضًا).
- **نقطة الإرجاع (Reset Point):** القيمة التي يعود عندها التلامس. والفرق بينهما هو الفرق التشغيلي أو المنطقة الميتة (Dead Band).

تُطبَّق القيمة ببطء في اتجاه التشغيل حتى يتغيّر التلامس وتُسجَّل، ثم في الاتجاه المعاكس حتى يعود وتُسجَّل. ثم يُكرَّر الاختبار للتحقق من التكرارية (Repeatability) حيث تُطلب. وبعد الضبط يُعلَّم برغي الضبط (بطلاء أو ختم) لكشف أي عبث لاحق. ومفتاح الإيقاف يُختبَر ضمن وظيفته كاملة، أي بالتحقق من وصول الإشارة إلى النظام لا بتغيّر التلامس فقط.

14.7 شهادات المعايرة والملصقات والسجلات

بعد المعايرة يُثبَّت على كل جهاز ملصق متين يحمل: رقم الوسم (Tag)، وتاريخ المعايرة، وتوقيع من نفّذها. أما السجل فيجب أن يكون متاحًا للتفتيش في أي وقت، ويتضمن في الحد الأدنى:

- وسم الجهاز ووصفه ونوعه والمصنّع والطراز والرقم التسلسلي.
- المدى المطلوب وحدود القبول ووثيقة مرجعها (ورقة البيانات، قائمة نقاط الضبط).
- أدوات الاختبار بأرقامها التسلسلية وتواريخ صلاحية شهاداتها.
- قراءات «كما وُجد» و«كما تُرك» والأخطاء المحسوبة.
- الحالة المادية للجهاز، والملاحظات، والإجراء المتخذ.
- التواقيع: المنفّذ، والمراجع، وممثل المالك أو الاستشاري في مرحلة التشغيل التجريبي.

توجد نماذج مستقلة للأجهزة الرقمية (المفاتيح: نقاط التشغيل والإرجاع والتخلف) وللأجهزة التناظرية (المرسلات، المؤشرات، المحولات).

14.8 فترات المعايرة وتحليل الانجراف

لا توجد فترة معايرة واحدة صحيحة لكل الأجهزة. تُحدد الفترة الأولى من توصية المصنّع وأهمية الخدمة، ثم تُعدَّل بالبيانات:

- إذا جاءت نتائج «كما وُجد» ضمن الحدود بهامش كبير لعدة دورات متتالية، يمكن تمديد الفترة.
- إذا وُجد الجهاز خارج الحدود، تُقصَّر الفترة وتُدرَس الأسباب: الاهتزاز، والحرارة، والنبضات، والاختيار الخاطئ.
- يُرسم الانجراف (Drift) عبر الزمن لكل وسم؛ فالانجراف التدريجي في اتجاه واحد يسمح بتوقّع تاريخ خروج الجهاز عن الحدود.

تقييم أثر الخروج عن الحدود (Out-of-Tolerance Impact Assessment): حين يُوجد جهاز مهم خارج الحدود، يُسأل: ماذا حدث منذ آخر معايرة سليمة؟ هل تأثرت كميات مبيعة، أو جودة منتج، أو نقطة إيقاف كانت ستتأخر؟ ويُوثَّق الجواب، وقد يقتضي إعادة حساب فواتير أو تقريرًا لإدارة السلامة. أما أجهزة وظائف السلامة الآلية فتخضع كذلك لاختبارات الإثبات بفترات تحددها حسابات SIL (القسم 29.4).

14.9 تجهيزات ورشة الأجهزة الميدانية

تحتاج ورشة الأجهزة في الموقع (Field Instrument Workshop) إلى تجهيزات تناسب نوع الأجهزة في المصنع. القائمة التالية نموذجية، وتُراجَع لكل مشروع، ويعتمدها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس المسؤول:

المجال	التجهيزات
الضغط	مضخة هيدروليكية يدوية، مضخة هوائية يدوية للضغوط المنخفضة، مضخة تفريغ، ميزان الأثقال الميتة (Deadweight Tester)، مضخة مقارنة المقاييس، منظمات ومرشحات هواء دقيقة، مانومترات للمديات الصغيرة، مقاييس اختبار بدقة 0.25% أو أفضل، معايرات ضغط رقمية، ضاغط هواء محمول

المجال	التجهيزات
الحرارة	حمامات حرارة مضبوطة، أفران جافة (Dry Block)، مرجع حرارة رقمي معايَر، مصدر mV ومقياس دقيق، صندوق مقاومات (Decade Box) بدقة 0.1%، قنطرة ويتستون دقيقة للمقاومات الحرارية
الكهرباء والإلكترونيات	أجهزة قياس متعددة دقيقة، معايرات حلقات mA، مولّد إشارات، راسم ذبذبات (Oscilloscope)، جهاز قياس العزل (Megger) بجهود منخفضة وعالية، جهاز توقيت للمرحلات، جهازا اتصال HART على الأقل، محاكيات إشارة، مقياس اهتزاز محمول
الصمامات والمحللات	منصة اختبار صمامات التحكم، معاير هوائي/إلكتروني محمول، محاليل منظّمة وغازات معايرة للمحللات

وموازين الحرارة الزئبقية والمانومترات الزئبقية التي تذكرها الوثائق الأقدم استُبدلت اليوم في معظم المواقع بمراجع رقمية، لأسباب بيئية وصحية ولقيود تداول الزئبق.

والقائمة التفصيلية لتجهيز ورشة ومختبر متكامل، من الآلات الدقيقة إلى أجهزة التحكم والإلكترونيات، في الملحق ج «تجهيزات الورشة وأدوات الاختبار».

14.10 المعايرة حسب المتغير: الحرارة والضغط والتدفق والمستوى

القاعدة واحدة في كل الأجهزة: نقارن قراءة الجهاز بمرجع معياري معتمد، ونوثّق الخطأ، ثم نضبط الجهاز عند الحاجة. لكن طريقة توليد القيمة المرجعية تختلف كثيرًا من متغير إلى آخر، ومعها تختلف مصادر الخطأ واحتياطات السلامة.

المتغير	المرجع المعتاد	طريقة الاختبار	نقاط الاختبار	أهم الاحتياطات
الحرارة	حمام حراري أو فرن جاف (Dry Block) مع مجس مرجعي معايَر	غمر الحساس مع المرجع وانتظار الاستقرار، أو محاكاة الإشارة (mV أو Ω) عند معايرة المرسل وحده	0 و25 و50 و75 و 100% من المدى	عمق الغمر الكافي، وزمن الاستقرار، والتفريق بين معايرة الحساس ومعايرة المرسل
الضغط	مضخة معايرة مع مرجع ضغط رقمي أو ميزان الأثقال الميتة (Deadweight Tester)	عزل الجهاز وتفريغ الضغط بأمان، ثم التطبيق صعودًا ونزولًا	0 و25 و50 و75 و 100% صعودًا ونزولًا	فرق الارتفاع بين المرجع والجهاز، وتجاوز المدى، ونظافة الوصلات في خدمة الأكسجين
التدفق	عداد مرجعي، أو قياس حجم أو وزن خلال زمن معلوم، أو مُثبِت (Prover)	تمرير تدفق ثابت عند عدة معدلات ومقارنة النتيجة	عادة ثلاثة معدلات أو أكثر على مدى التشغيل	امتلاء الأنبوب، والفقاعات، والتسريب، والأطوال المستقيمة، وثبات الحرارة
المستوى	عمود ماء، أو مرجع ضغط تفاضلي، أو قياس يدوي للمستوى الحقيقي	محاكاة المستويات بالضغط المكافئ أو بتغيير المستوى فعلًا	الصفر والمدى ونقطة أو نقطتان بينهما	كثافة السائل وسائل الساق الرطبة، ونوع الخزان، وحدود محاكاة الرادار

كيف أختار؟ يُختار المرجع بحسب ما يمكن توليده فعلًا عند الجهاز: حرارة حقيقية في فرن أو حمام للحساس، وضغط مرجعي مع تصحيح فرق الارتفاع للمرسل، وكمية مائع معلومة للعداد، وضغط مكافئ للمستوى مع الكثافة وسائل الساق. وحدّ الجدول أنه لا يبيّن عدم يقين كل طريقة ولا أثر التركيب، فمحاكاة الإشارة تفحص المرسل لا الحساس، والمقارنة في الموقع تقبل عدم يقين أكبر. والخطأ الأكثر كلفة هو توقيع شهادة «معايرة تدفق» على حقن mA أو محاكاة إشارة المرسل دون تمرير كمية حقيقية، وفي المستوى

معايرة مرسل الساق الرطبة من الصفر إلى المدى بدل المدى المرفوع أو المخفوض المحسوب.

وفي كل الحالات تُتبع الخطوات نفسها:

1. **«كما وُجد»:** تسجيل حالة الجهاز قبل أي ضبط.
2. **حساب الخطأ** ومقارنته بحد السماحية المكتوب في ورقة البيانات أو إجراء المعايرة.
3. **الضبط** إذا لزم فقط.
4. **«كما تُرك»:** إعادة الاختبار وتسجيل النتائج بعد الضبط.
5. **الشهادة:** تتضمن الرقم التسلسلي، والمدى، ونقاط الاختبار، والخطأ، وعدم اليقين، والمعايير المستخدمة مع ما يثبت تتبعيتها.

ويُنفَّذ كل ذلك وفق تعليمات الشركة المصنّعة وإجراءات السلامة، ولا سيما عند التعامل مع الضغط أو السوائل الخطرة.

> **تحذير:** لا تبدأ قبل عزل الجهاز عن العملية، وتطبيق القفل والبطاقة (LOTO)، وتفريغ الضغط، والتأكد من خلو الخط من المواد الساخنة أو السامة أو القابلة للاشتعال. ولا تضبط جهاز حماية أو إيقاف دون تصريح عمل معتمد.

الشكل 14-4: *التسلسل العام لأي معايرة، من مراجعة بيانات الجهاز إلى إعادته للخدمة وإصدار الشهادة.*

الخرج المثالي وحساب الخطأ: في جهاز خطي خرجه 4–20 mA يُحسب التيار المثالي بالعلاقة:

$$\text{mA} = 4 + 16 \times (\text{القيمة المطبّقة} - \text{LRV}) \div (\text{URV} - \text{LRV})$$

فلو أعطى مرسل ضغط مداه 0–10 bar تيارًا قدره 12.08 mA عند 5 bar، فإن تياره المثالي 12.00 mA، والخطأ +0.08 mA، أي $+0.08 \div 16 \times 100 = +0.5\%$ من المدى. والنقاط النزولية بعد الصعودية تكشف التخلف، وتكرار الدورة يكشف ضعف التكرارية.

الحرارة

معايرة الحلقة أم معايرة الأجزاء؟ يمكن معايرة الحساس والمرسل معًا في فرن جاف أو حمام حراري، فتظهر النتيجة الكلية التي يراها النظام. ويمكن أيضًا معايرة المرسل وحده بمحاكي mV للمزدوج الحراري أو صندوق مقاومات لحساس RTD، ثم فحص الحساس منفصلًا. الطريقة الأولى أصدق، والثانية أسرع وتصلح عندما يتعذر فك الحساس من الغمد.

- **عمق الغمر:** الحساس الذي لا يُغمر بما يكفي يقرأ أقل من الحقيقة عند الحرارة العالية لأن الحرارة تتسرب عبر غمده. والقاعدة الشائعة في الأفران الجافة غمرٌ لا

يقل عن 15 ضعف قطر الغمد، أي نحو 90 mm لحساس قطره 6 mm، وتُراجَع تعليمات الفرن.

- **الاستقرار:** تُسجَّل القراءة بعد أن يستقر المرجع والجهاز معًا، لا بعد أن يستقر عرض الفرن فقط.
- **النقطة المرجعية:** نقطة انصهار الجليد (0 °C) فحص سريع ورخيص لسلامة RTD والمزدوج الحراري.
- **في الموقع:** حين لا يمكن الفك يُقارن الحساس بحساس مرجعي مركّب في غمد اختبار مجاور، مع قبول عدم يقين أكبر.

خطوات معايرة حساس ومرسل حرارة معًا (مثال: Pt100 بمدى 0–200 °C):

1. سجّل نوع الحساس ومداه، وتحقق من إعدادات المرسل.
2. افصل الحساس عن العملية، وضعه في الفرن إلى جانب المجس المرجعي وبالعمق نفسه تقريبًا.
3. غذِّ المرسل بـ 24 V، وصِل خرجه بمعاير التيار.
4. اضبط الفرن على أول نقطة (0 °C)، إن كان الفرن الجاف مبرَّدًا بتقنية بلتييه (Peltier)، لأن كثيرًا من الأفران لا تنزل دون حرارة المحيط، وإلا فاستعمل حمام الجليد لهذه النقطة؛ وانتظر حتى تستقر قراءة المرجع والجهاز.
5. سجّل حرارة المرجع، وقراءة المرسل، والتيار.
6. كرّر عند 50 و100 و150 و200 °C، ثم عند النقاط نفسها أثناء التبريد.
7. احسب الخطأ وسجّل «كما وُجد». فإن تجاوز السماحية نفّذ ضبط المدخل (Sensor/Input Trim) عند الحاجة، ثم ضبط الخرج عند 4 و20 mA.
8. أعد الدورة وسجّل «كما تُرك».

وفي المزدوج الحراري يُستخدم كابل تمديد من النوع نفسه، ويُتحقق من تفعيل تعويض الوصلة الباردة في المرسل أو في محاكي mV.

الشكل 14-5: *معايرة حلقة الحرارة بطريقتين: المنظومة الكاملة في فرن جاف مع مجس مرجعي، أو محاكاة الحساس التي تفحص إلكترونيات المرسل وحدها.*

الضغط

- يُعزل الجهاز ويُفرَّغ ضغطه بأمان، مع الانتباه إلى الضغط المحبوس بين صمامات المانيفولد (الفصل 6).
- يُستخدم الماء أو الزيت للضغوط العالية، والهواء أو النيتروجين للضغوط المنخفضة.
- يُطبَّق الضغط صعودًا ثم نزولًا دون تجاوز النقطة المستهدفة ثم العودة إليها.
- **ميزان الأثقال الميتة** مرجع أولي دقيق، لكن نتيجته تتطلب تصحيحات للجاذبية المحلية والحرارة وأحيانًا لطفو الهواء، كما في شهادته.

> **مثال محلول: فرق الارتفاع يصنع خطأً.** مرجع ضغط رقمي موصول بمضخة هيدروليكية مملوءة بالماء، ومركّب أدنى من مرسل مداه 0–10 bar بمسافة 0.6 m.
>
> - **الحل:**
> - ضغط عمود السائل بين المرجع والمرسل: $\Delta P = \rho \times g \times h$
> - بالتعويض: $\Delta P = 1000 \times 9.81 \times 0.6 \approx 5.9\ \text{kPa} \approx 59\ \text{mbar}$

  - نسبة الخطأ الظاهري إلى المدى (10 bar = 10,000 mbar): 59 ÷ 10,000 × 100 ≈ 0.59% من المدى، وهو أكبر من حد قبول ±0.25%.
  - التفسير: المرجع يقرأ هذا العمود زيادةً على ما يصل إلى المرسل، فيبدو المرسل منحرفًا وهو سليم.
- **العلاج:** يوضع المرجع والجهاز على مستوى واحد، أو يُطرح أثر العمود حسابيًا، أو يُستخدم الغاز في الضغوط المنخفضة.

خطوات معايرة مرسل ضغط في الورشة (مثال: 0–10 bar):

1. تحقق من LRV وURV ووحدة القياس في الجهاز وورقة البيانات.
2. صِل المضخة والمرجع بالمرسل عبر وصلة ثلاثية، وافحص التسريب بضغط منخفض أولًا.
3. افتح التنفيس وصفّر المرجع، ثم أغلقه وارفع الضغط تدريجيًا.
4. طبّق 0 و2.5 و5 و7.5 و10 bar، وانتظر الاستقرار عند كل نقطة، وسجّل الضغط والتيار (المثالي: 4 و8 و12 و16 و20 mA).
5. اخفض الضغط بالنقاط نفسها لتحديد التخلف.
6. لا تضبط شيئًا قبل أن تكتمل قراءات «كما وُجد».
7. إذا فشل الجهاز فتأكد أولًا من غياب التسريب والانسداد، ثم اضبط الصفر عند الضغط الصفري الصحيح، ثم الحساس أو المدى وفق دليل الجهاز، ثم الخرج التناظري إذا كان التيار منحرفًا.
8. أعد الاختبار كاملًا وسجّل «كما تُرك»، ثم افتح التنفيس ببطء قبل فك الخرطوم.

ولا تُستخدم مضخة هوائية لضغوط مرتفعة تناسبها المضخات الهيدروليكية، ولا يُستخدم هواء ملوث بالزيت مع أجهزة خدمة الأكسجين.

التدفق

عداد التدفق نادرًا ما يُعاير في مكانه كما يُعاير مرسل الضغط، لذلك تُستخدم عدة طرق:

1. **المعايرة الرطبة في مختبر معتمد:** بالطريقة الوزنية (Gravimetric) أو الحجمية أو بعداد مرجعي، وتُعطي أدق النتائج.
2. **في الموقع:** بمُثبِت (Prover) أنبوبي أو مدمج في القياس التجاري للسوائل (القسم 8.15)، أو بعداد مرجعي على التوالي، أو بعداد فوق صوتي خارجي (Clamp-on) للتحقق التقريبي فقط.
3. **عناصر الضغط التفاضلي:** يُعاير مرسل DP كأي مرسل ضغط، ويُفحص العنصر الأولي نفسه: قطر لوح الفتحة واستواؤه وحدة حافته واتجاه تركيبه. وتُسمّى هذه الطريقة «المعايرة الجافة».
4. **العدادات الذكية (الكهرومغناطيسية وكوريوليس):** كثير منها يوفّر تحققًا إلكترونيًا مدمجًا يفحص الحساس والإلكترونيات دون فك. وضبط الصفر في عداد كوريوليس يُجرى والأنبوب ممتلئ والتدفق صفر فعلًا.

وفي الاختبار: يُتأكد من امتلاء الأنبوب، وغياب الفقاعات والتسريب، واستيفاء الأطوال المستقيمة، وثبات الحرارة والضغط أثناء كل نقطة.

> **مثال محلول: الطريقة الوزنية.** عداد ماء يقرأ 15.2 m^3/h. جُمع الماء الخارج منه في خزان على ميزان مدة 60.0 s فكانت كتلته 251.3 kg، والحرارة 20 °C (الكثافة 998.2 kg/m^3).
>
> - الحجم = 251.3 ÷ 998.2 ≈ 0.25175 m^3.
> - التدفق المرجعي = 0.25175 ÷ 60 × 3600 ≈ 15.105 m^3/h.
> - الخطأ = (15.2 − 15.105) ÷ 15.105 × 100 ≈ +0.63% من القراءة.

معامل التصحيح: معايرة خرج المرسل وحده ليست معايرة لعداد التدفق؛ فالمعايرة الحقيقية تمرّر كمية معلومة من المائع عبر الحساس. وحين تُقارن كمية مرجعية بما سجّله مجمّع العداد (Totalizer) يُحسب معامل التصحيح:

معامل التصحيح = المرجع ÷ قراءة العداد

فإذا جُمع 1000 kg وسجّل العداد 980 kg، كان المعامل 1.0204 ≈ 980 ÷ 1000، والخطأ

$$(980 - 1000) \div 1000 \times 100 = -2\%.$$

ويُختبر العداد عادةً عند 10 و25 و50 و75 و100% من مداه، وتُكرّر بعض النقاط نزولًا. ولا يُعدَّل معامل العداد (Meter Factor) إلا وفق تعليمات المصنّع، ثم يُعاد الاختبار وتُسجَّل نتائج «كما تُرك».

الشكل 14-6: *ثلاث طرق لمعايرة عداد التدفق بتمرير كمية حقيقية: الوزنية، والحجمية، والعداد المرجعي.*

المستوى

- **مرسلات الضغط التفاضلي:** تُعاير بمرجع ضغط يطبّق الضغط المكافئ لكل مستوى، مع حساب الكثافة وسائل الساق الرطبة. ففي مثال الفصل 9 (المدى من 294.3− إلى 44.1− mbar) يُطبَّق الضغط على **الجانب المنخفض** بقيمة 294.3 mbar ليقابل 0%، وبقيمة 44.1 mbar ليقابل 100%.
- **عمود الماء:** طريقة بسيطة لمحاكاة المستوى في الورشة، مع تصحيح الكثافة إذا كان سائل الخدمة غير الماء.
- **المُزاح (Displacer):** بأوزان معايرة تحاكي قوة الطفو، أو بملء غرفته بالماء مع تصحيح الكثافة.
- **الرادار والموجات فوق الصوتية:** لا تُحاكى بالضغط. يُتحقق منها بمقارنة القراءة بقياس يدوي أو بالمقياس الزجاجي عند مستويين مختلفين، أو باختبار على منضدة بهدف على مسافة معلومة.
- **مفاتيح المستوى:** يُفضَّل رفع المستوى الحقيقي أو ملء غرفة العوامة، لأن زر الاختبار يفحص الإلكترونيات وحدها ولا يفحص الحساس.

خطوات معايرة مرسل مستوى بالضغط التفاضلي لخزان مفتوح: الجانب العالي موصول بأسفل الخزان، والمنخفض مفتوح للجو.

1. سجّل ارتفاع القياس h وكثافة السائل أو وزنه النوعي.
2. احسب الضغط المقابل لـ 0% و100% من العلاقة $\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$. وكل متر من الماء يعطي نحو 9.807 kPa.
3. اعزل المرسل عن الخزان وساوِ الضغط بين الجانبين، ثم صفّر المرجع.
4. صِل المضخة بالجانب العالي، واترك المنخفض مفتوحًا للجو.
5. طبّق الضغوط المقابلة لـ 0 و25 و50 و75 و100%، وسجّل التيار صعودًا ونزولًا.
6. اضبط الصفر والمدى عند الحاجة، ثم أعد الاختبار ووثّق النتيجة.

أما في الوعاء المغلق بساق رطبة فيُعايَر المرسل على LRV وURV المحسوبتين، لا على صفر ضغط، لأن عمود الساق يجعل المدى سالبًا كما سبق.

مرسلات الرادار والموجات فوق الصوتية تُختبر بثلاث درجات من الشمول:

1. **اختبار الحلقة (Loop Test):** محاكاة خرج 4–20 mA فقط للتأكد من وصول الإشارة.
2. **التحقق بالمسافة:** وضع هدف عاكس على مسافات معلومة.
3. **المعايرة بالتعبئة (Wet Calibration):** ملء الخزان إلى مناسيب مرجعية فعلية، وهي الأشمل.

ويحسب الجهاز المستوى من العلاقة: المستوى = الارتفاع المرجعي − المسافة المقاسة. لذلك يُتحقق من الارتفاع المرجعي المدخَل، ومن المسافة المحجوبة قرب الهوائي (Blocking Distance)، ومن جدول تحويل المستوى إلى حجم إن كان الخزان غير منتظم الشكل.

الشكل 14-7: *معايرة مرسل مستوى بالضغط التفاضلي في خزان مفتوح، ومبدأ التحقق من مرسل الرادار بالمسافة والارتفاع المرجعي.*

14.11 معايرة مرسل ضغط تفاضلي بجهاز اتصال HART خطوة بخطوة

يجمع هذا القسم ما سبق في إجراء عملي لمرسل DP ذكي في الورشة أو على حامل الاختبار. وتختلف أسماء القوائم بين الأجهزة، لكن المنطق واحد.

قبل البدء:

1. تصريح العمل، وإخطار غرفة التحكم، ووضع الحلقة في وضع التجاوز (Bypass) إذا كانت تدخل في تحكم أو حماية.
2. **المانيفولد:** اعزل المرسل وساوِ ضغط جانبيه ثم نفّسهما بالتسلسل المفصل في القسم 14.12 (ثالثًا)؛ فإهمال الموازنة قد يعرّض الغشاء لفرق ضغط كامل ويشوّهه.

التوصيل:

1. مصدر 24 V للحلقة مع **مقاومة 250 Ω على التوالي**. فالاتصال الرقمي يحتاج مقاومة حلقة لا تقل عن 230 Ω تقريبًا، ومعظم بطاقات الإدخال فيها هذه المقاومة أصلًا.
2. يوصل جهاز HART على طرفي المقاومة أو على طرفي المرسل مع مراعاة القطبية، ويوصل مقياس تيار مرجعي في الحلقة.
3. توصل مضخة الاختبار والمرجع إلى **الجانب العالي**، ويُترك **الجانب المنخفض مفتوحًا للجو**.

التنفيذ:

1. **قراءة الإعدادات:** الوسم، والوحدات، وLRV وURV، ودالة التحويل (خطية أم جذر)، والتخميد. وتُقارن بورقة البيانات قبل أي خطوة.
2. **«كما وُجد»:** تطبيق النقاط الخمس صعودًا ونزولًا، وتسجيل الضغط المرجعي، والتيار المقيس، والقيمة الرقمية PV من جهاز HART.

3. **ضبط الصفر للحساس:** والجانبان مفتوحان للجو، يُختار ضبط الحساس السفلي (Lower Sensor Trim) أو ضبط الصفر حسب الجهاز.
4. **ضبط أعلى الحساس (Upper Sensor Trim):** يُرفع الضغط **ببطء** حتى القيمة العليا دون تجاوزها، ثم يُنتظر الاستقرار، ويُدخل في الجهاز الرقم الذي يقرؤه المرجع بالضبط لحظة الاستقرار.
5. **ضبط الخرج التناظري (D/A Trim):** يأمر جهاز HART المرسلَ بإخراج 4 mA ثم 20 mA، ويُدخل ما يقرؤه مقياس التيار المرجعي.
6. **«كما تُرك»:** تكرار النقاط الخمس وتسجيلها.
7. **الإنهاء:** فك التوصيلات، وإعادة المانيفولد إلى الخدمة بالتسلسل الصحيح (الفصل 6)، ورفع التجاوز، والتحقق من القراءة على الشاشة مع غرفة التحكم.

تنبيهات:

- تغيير LRV وURV من لوحة المفاتيح تهيئة وليس معايرة (انظر القسم 14.5).
- جهاز HART هو «السيد الثانوي» (Secondary Master) في الحلقة، ويمكن أن يعمل مع نظام التحكم (السيد الأساسي) دون قطع إشارة 4–20 mA. لكن أوامر إخراج تيار ثابت تغيّر ما يراه النظام، ولذلك يلزم التجاوز.
- في أجهزة الحماية يُفعَّل قفل الكتابة (Write Protect) بعد الانتهاء إن كان مطلوبًا.
- مبدأ الاتصال (إشارتا تردد 1200 Hz و2200 Hz فوق تيار الحلقة، ونمط السيد والتابع، ونمط الإرسال المتواصل Burst Mode) مشروح في القسمين 23.1 و23.7.

الشكل 14-8: *ترتيب معايرة مرسل الضغط التفاضلي بجهاز HART. مضخة ومرجع ضغط على الجانب العالي، والجانب المنخفض مفتوح للجو، ومقاومة 250 Ω ومقياس تيار مرجعي في الحلقة.*

نموذج سجل المعايرة:

النقطة	الاتجاه	القيمة المرجعية	الخرج المثالي
0%	صعود		4.000 mA
25%	صعود		8.000 mA
50%	صعود		12.000 mA
75%	صعود		16.000 mA
100%	صعود		20.000 mA
75%	نزول		16.000 mA
50%	نزول		12.000 mA

النقطة	الاتجاه	القيمة المرجعية	الخرج المثالي
25%	نزول		8.000 mA
0%	نزول		4.000 mA

جدول: نموذج سجل المعايرة (تابع)

النقطة	الاتجاه	«كما وُجد»	الخطأ % من المدى	«كما تُرك»
0%	صعود			
25%	صعود			
50%	صعود			
75%	صعود			
100%	صعود			
75%	نزول			
50%	نزول			
25%	نزول			
0%	نزول			

ويُضاف إلى السجل: رقم الوسم، والمصنّع والطراز، والرقم التسلسلي، والمدى، والسماحية، وأدوات المرجع وأرقام شهاداتها، والظروف المحيطة، وعدم اليقين، والتاريخ، واسم الفني وتوقيعه (انظر 14.7).

14.12 معايرة مرسلات الضغط والضغط التفاضلي في الموقع خطوة بخطوة

شرح القسمان السابقان المعايرة في الورشة وعلى حامل الاختبار. أما في الموقع فالمرسل يبقى مركبًا على خطه، وتضاف إلى المعايرة أعمال لا تقل أهمية عنها: تجاوز الحلقة بأمان، وعزل الجهاز عن العملية بتسلسل صحيح للصمامات، ثم إعادته إلى الخدمة دون صدمة ضغط، والتأكد من أن نظام التحكم يرى القيمة الصحيحة. وأغلب الأضرار التي تلحق بالمرسلات أثناء المعايرة تحدث في هذه الخطوات، لا في المعايرة نفسها.

أولًا: التحضير

1. **التصريح والتنسيق:** استخرج تصريح العمل، وأبلغ مشغل غرفة التحكم برقم الوسم. فإذا كان المرسل يدخل في حلقة تحكم فاطلب تحويلها إلى اليدوي، وإذا كان يدخل في إنذار أو إيقاف أو نظام SIS فطبّق التجاوز المعتمد وسجّله (الفصل 13 والقسم 39.2).
2. **مراجعة البيانات:** قارن الوسم، والمدى LRV وURV، والوحدات، ودالة التحويل (خطية أم جذر)، والتخميد، بما في ورقة البيانات وقائمة الحلقات، وسجّل الإعدادات الحالية قبل لمس أي شيء.
3. **الأدوات:**
   - معاير ضغط أو مضخة يدوية مع مرجع ضغط معتمد، دقته أفضل من دقة المرسل بأربعة أضعاف على الأقل (14.3)، وشهادته سارية.
   - معاير حلقة أو مقياس تيار دقيق، وجهاز اتصال HART.
   - وصلات وخراطيم تتحمل ضغط الاختبار، ومفاتيح مناسبة للمانيفولد.
   - أدوات مصرح بها للمنطقة الخطرة إن كان الموقع مصنفًا، مع تصريح العمل الساخن عند الحاجة (الفصل 26).

4. **حد القبول:** حدد السماحية من إجراء المعايرة، مثل ±0.25% من المدى، قبل البدء لا بعده.

ثانيًا: عزل مرسل الضغط

1. أغلق صمام العزل (Block Valve) بين الخط والمرسل.
2. افتح صمام التنفيس (Bleed) ببطء، وتأكد بقراءة المرسل أو المرجع أن الضغط انخفض إلى الصفر. وانتبه إلى أن السائل الساخن أو الغاز السام يخرج من التنفيس، فوجّهه إلى مكان آمن.
3. صِل المعاير بمنفذ الاختبار، واختبر الوصلة بضغط منخفض أولًا للتأكد من عدم التسريب.

ثالثًا: عزل مرسل الضغط التفاضلي بمانيفولد الصمامات الثلاثة

الغشاء في مرسل DP مصمم لفرق ضغط صغير، وقد يكون مداه بضع مئات من الملي بار، بينما يتحمل ضغطًا ساكنًا يصل إلى مئات البارات على الجانبين معًا. فإذا تعرض جانب واحد للضغط الساكن كاملًا والآخر للجو، ولو لحظة، فقد ينزاح الصفر أو يتلف الحساس. لذلك يُتبع تسلسل ثابت:

1. أغلق صمام عزل الجانب العالي HP.
2. افتح صمام الموازنة (Equalizing)، فيتساوى الضغط على الجانبين.
3. أغلق صمام عزل الجانب المنخفض LP.
4. افتح التنفيس على الجانبين ببطء، وتأكد أن الضغط صار صفرًا.
5. **للمعايرة:** أغلق صمام الموازنة، وصِل المعاير بمنفذ الجانب العالي، واترك الجانب المنخفض مفتوحًا للجو.

الشكل 14-9: *أوضاع صمامات مانيفولد الصمامات الثلاثة لمرسل الضغط التفاضلي: في الخدمة، ثم معزولًا ومتوازنًا، ثم أثناء المعايرة والمعاير على منفذ الجانب العالي والجانب المنخفض مفتوح للجو.*

مانيفولد الصمامات الخمسة: شائع في خدمة الغاز والقياس التجاري، وفيه صمامان للعزل، وصماما موازنة، وصمام تنفيس أو اختبار في الوسط. والمنطق نفسه: يُغلق عزل HP، ويُفتح صماما الموازنة، ويُغلق عزل LP، ثم يُفتح صمام التنفيس الأوسط. وتختلف طريقة توصيل المعاير حسب تصميم المانيفولد، فيُتبع دليل الصانع.

> **تنبيه للخطوط ذات السوائل العازلة والسيقان المملوءة:** في المرسلات التي تُملأ خطوط نبضها بسائل عازل أو بسائل مكثف، مثل خطوط البخار وقياس المستوى بالساق الرطبة، يؤدي فتح صمام الموازنة وصماما العزل مفتوحان إلى جريان يفرغ السائل من أحد الخطين، فتفسد القراءة بعد العودة. ولذلك يُغلق صمام العزل أولًا دائمًا، ويُعاد ملء الخطوط إن فُرّغت.

رابعًا: اختبار الحالة كما وُجدت *(As-Found)*

1. طبّق 0 و25 و50 و75 و100% من المدى صعودًا، ثم 75 و50 و25 و0% نزولًا، دون تجاوز النقطة ثم الرجوع إليها.

2. انتظر الاستقرار عند كل نقطة، وسجّل: الضغط المرجعي، والتيار المقاس، والقيمة الرقمية من HART، وإن أمكن القيمة الظاهرة على شاشة التشغيل.

3. احسب التيار المثالي والخطأ:

التيار المثالي

$$= 4 + 16 \times (\mathrm{P} - \mathrm{LRV}) \div (\mathrm{URV} - \mathrm{LRV})$$

الخطأ % من المدى = (التيار المقاس − التيار المثالي) ÷ 16 × 100

4. إذا كانت كل النقاط ضمن السماحية فلا تضبط شيئًا، واكتب في السجل أن الحالة كما وُجدت هي الحالة كما تُركت، وانتقل إلى الإعادة للخدمة. فالضبط غير الضروري قد يضيف خطأً ولا يزيله، ويخفي الانجراف الذي نحتاج إلى تتبعه (14.8).

> **مثال محلول (قرار القبول):** مرسل ضغط مداه 0–10 bar، وسماحيته ±0.25% من المدى، أي ±0.04 mA.

الضغط bar	التيار المثالي mA	المقاس صعودًا	الخطأ %	المقاس نزولًا	الخطأ %
0	4.000	4.020	+0.13	4.028	+0.18
2.5	8.000	8.032	+0.20	8.040	+0.25
5	12.000	12.048	+0.30	12.056	+0.35
7.5	16.000	16.056	+0.35	16.064	+0.40
10	20.000	20.072	+0.45	20.072	+0.45

- الخطأ يزداد مع الضغط، وهذه علامة خطأ في الاتساع (Span) أكثر منه خطأ صفر.
- الفرق بين الصعود والنزول صغير (0.05% تقريبًا)، فالتخلف مقبول.

- خمس نقاط قياس (5 و7.5 bar صعودًا ونزولًا، و10 bar) تتجاوز ±0.25%، وقراءة 8.040 mA على الحد تمامًا، فالمرسل **فشل** في «كما وُجد»، ويُضبط، ويُسجل الفشل لأنه قد يؤثر في قراءات سابقة وفي تحليل فترة المعايرة.

خامسًا: الضبط بترتيب صحيح

في المرسل الذكي (HART):

1. **ضبط الحساس (Sensor Trim):** يصحح الضغط الذي يقيسه المرسل.
   - مع تطبيق الضغط الأدنى، وهو غالبًا الصفر، يُنفذ ضبط الحساس السفلي (Lower Sensor Trim).
   - مع تطبيق ضغط عند الحد الأعلى أو قريب منه، يُنفذ ضبط الحساس العلوي (Upper Sensor Trim)، ويُدخل الرقم الذي يقرؤه المرجع بالضبط.
   - إذا كان الخطأ إزاحة صفر صغيرة فقط، يكفي ضبط الصفر (Zero Trim).
2. **ضبط الخرج (Output أو D/A Trim):** يصحح التيار الذي يولده المرسل. يُؤمر المرسل بإخراج 4 mA ويُدخل ما يقرؤه مقياس التيار الدقيق، ثم 20 mA.
3. **إعادة تحديد المدى (Rerange):** تغيير LRV وURV يُستخدم فقط إذا كان المدى نفسه خاطئًا أو تغير التصميم، وهو تهيئة لا معايرة (انظر القسم 14.5).

والترتيب مهم: فضبط الخرج لا يصحح خطأ الحساس؛ ولو عُوّض انحراف الحساس بتعديل الخرج لصار التيار صحيحًا عند نقطتين وخاطئًا بينهما، ولبقيت القيمة الرقمية PV خاطئة.

في المرسل التناظري التقليدي: يُضبط الصفر (Zero) عند 0%، ثم الاتساع (Span) عند 100%. ولأن الضبطين يتداخلان في أغلب هذه الأجهزة، يُكرر الصفر ثم الاتساع حتى تستقر النقطتان معًا.

سادسًا: اختبار الحالة كما تُركت *(As-Left)*

كرر النقاط التسع صعودًا ونزولًا، وتأكد أن كل النقاط ضمن السماحية، ويُفضل أن تكون ضمن نصفها إذا كانت المعايرة لجهاز حماية أو قياس تجاري.

اختبار التسريب: قبل فك المعاير، ثبّت الضغط عند 100% دقيقة واحدة على الأقل مع إغلاق المضخة. فإن انخفض الضغط فهناك تسريب في الوصلات أو في صمامات المانيفولد، ويُصلح قبل الإعادة للخدمة، لأن التسريب في خط النبض يسبب قراءة خاطئة مستمرة.

سابعًا: الإعادة إلى الخدمة

مرسل الضغط:

1. افصل المعاير وأغلق منفذ الاختبار بسدادته.
2. أغلق التنفيس.
3. افتح صمام العزل ببطء، وراقب القراءة وهي ترتفع إلى قيمة العملية.

مرسل الضغط التفاضلي (مانيفولد الصمامات الثلاثة):

1. افصل المعاير، وأغلق صمامات التنفيس وسدادات المنافذ.
2. تأكد أن صمام الموازنة **مفتوح**.
3. افتح صمام عزل الجانب العالي HP ببطء، فيصل ضغط العملية إلى الجانبين معًا عبر الموازنة، ولا يرى الغشاء فرقًا.
4. أغلق صمام الموازنة.
5. افتح صمام عزل الجانب المنخفض LP ببطء.

بعد الإعادة:

- **ضبط الصفر عند الضغط الساكن:** في المرسلات ذات المدى الصغير والضغط الساكن العالي، قد ينزاح الصفر قليلًا بين الضغط الجوي وضغط الخط. فإذا نص

الإجراء على ذلك، يُفتح صمام الموازنة بعد عزل LP، ويُجرى ضبط صفر والجانبان تحت ضغط الخط، ثم تُعاد الصمامات إلى الخدمة بالتسلسل نفسه.

- **مطابقة القراءات:** قارن القراءة على شاشة التشغيل بقراءة HART وبالمؤشر المحلي أو مقياس ميكانيكي قريب إن وجد، وتأكد أن القيمة منطقية مع حالة العملية.
- **رفع التجاوز:** بالتنسيق مع المشغل، وبعد التأكد من أن القيمة لا تسبب إنذارًا أو إيقافًا.
- **التوثيق:** أكمل سجل المعايرة كما في النموذج في القسم 14.11، مع رقم المعاير وتاريخ شهادته، وحالة «كما وُجد» و«كما تُرك»، والتوقيع، وألصق ملصق المعايرة (14.7).

ثامنًا: ملاحظات خاصة بمرسل الضغط التفاضلي

- **مرسلات التدفق بدالة الجذر:** إذا كان الجذر يُحسب في نظام التحكم، يُعاير المرسل خطيًا. أما إذا كان الجذر مفعلًا في المرسل نفسه، فالتيار المثالي:

التيار = 4 + 16 × √(ΔP ÷ مدى ΔP)

فمرسل مداه 0–250 mbar، عند 62.5 mbar أي 25% من الضغط التفاضلي، يعطي 8 mA إذا كان خطيًا، و4 + 16 × √0.25 = 12 mA إذا كان بالجذر. ولا يُحسب الجذر في المكانين معًا، وهو خطأ شائع يجعل القراءة مرتفعة عن الحقيقة عند التدفقات الصغيرة (فتدفق 25% يظهر على الشاشة 50%). وفي مرسلات الجذر يُحدد عادةً قطع للتدفق المنخفض (Low Flow Cutoff) قرب الصفر، فلا تُقبل نقطة 0% وحدها دليلًا على الدقة.

- **مرسلات المستوى بساق رطبة أو جافة:** المدى المحسوب يتضمن الرفع أو الخفض، مثل 294.3− إلى 44.1− mbar، فيُعاير المرسل على هذا المدى، لا من الصفر إلى المدى، وقد يُطبق الضغط على الجانب المنخفض (القسم 14.10 والفصل 9).

- **المرسلات ذات الأغشية البعيدة والأنابيب الشعرية:** سائل الملء في الأنابيب الشعرية وارتفاع الأغشية يؤثران في الصفر. ويُفضل معايرتها وهي مركبة، أو تصحيح الصفر في الموقع بعد التركيب، لأن معايرتها على المنضدة لا تمثل وضعها الحقيقي.
- **فتح الجانبين معًا للجو:** قبل ضبط الصفر في الموقع تأكد أن الجانبين عند ضغط واحد فعلًا، وأن الريح لا تؤثر في منفذ مكشوف في مرسلات المدى الصغير جدًا، مثل مرسلات ضغط السحب في الأفران.

تاسعًا: ملاحظات خاصة بمرسل الضغط

- **الضغط المقيس والمطلق:** مرسل الضغط المطلق يقرأ نحو 1.013 bar عند الضغط الجوي عند سطح البحر، لا صفرًا. ولمعايرة نقطته الدنيا يلزم مضخة تفريغ أو مرجع ضغط مطلق.
- **فرق الارتفاع:** إذا كان الاختبار بسائل وكان المعاير أدنى أو أعلى من المرسل، يُصحح أثر العمود: نحو 0.098 bar لكل متر من الماء (المثال المحلول في القسم 14.10).
- **المديات الصغيرة:** تُستخدم مضخة هوائية للمديات بالملي بار، ويكون التسريب والحرارة مصدرين كبيرين للخطأ، فيُنتظر الاستقرار أطول.

14.13 معاير العمليات (Process Calibrator): توليد الإشارات ومحاكاتها واختبار الحلقات

جهاز القياس المتعدد (القسم 43.2) **يقرأ** الإشارة؛ أما معاير العمليات (يُسمى في الميدان «الكالبريتر») فيستطيع **توليدها أو محاكاتها أو قياسها** بحسب الطراز، ولذلك هو أداة اختبار الحلقات (Loop Test) ومحاكاة أجهزة الحقل. وليس كل معاير يدعم جميع الإشارات، فاقرأ لوحته قبل أن تعتمد عليه.

أنواع المعايرات:

النوع	وظيفته
معاير الحلقة (Loop mA Calibrator)	توليد وقياس ومحاكاة إشارات 4–20 mA؛ وبعضها يوفر تغذية الحلقة 24 V DC
معاير التردد (Frequency Calibrator)	توليد وقياس التردد والنبضات لمحاكاة إشارات السرعة والتدفق
المعاير متعدد الوظائف (Multifunction)	يجمع mA وV وHz والمقاومة وRTD والمزدوجات الحرارية بحسب الطراز (مع تعويض الوصلة الباردة)
معاير الضغط (Pressure Calibrator)	مرجع ضغط دقيق، ومع مضخة يدوية أو مصدر ضغط يختبر مرسل الضغط (القسم 14.12)
معاير الحرارة (Temperature Calibrator)	يحاكي حساسات الحرارة كهربائيًا، أو يولد حرارة فعلية إن كان حمّامًا أو كتلة جافة (Dry Block) (القسم 14.10)

كيف أختار؟ ابدأ من إشارات المصنع لا من كتالوج المعاير: المعاير متعدد الوظائف يغطي أغلب حلقات الحرارة والتيار والجهد، ومعاير الحلقة يكفي حيث الإشارة 4–20 mA و HART فقط، ومعاير الضغط مع مضخته لمرسلات الضغط والمستوى، والكتلة الجافة حين يلزم فحص الحساس بحرارة حقيقية. وحدّ هذا الجدول أنه لا يُظهر الدقة ونسبة 4:1 المطلوبة لأدق أجهزة المصنع، ولا اعتماد المنطقة الخطرة، ولا هل يوفر المعاير تغذية الحلقة ومقاومة HART. والخطأ الأكثر كلفة هو شراء معاير بمدى واسع ودقة تبدو ممتازة كنسبة من كامل المدى، فيعجز عن نسبة 4:1 عند المرسلات ذات المدى الصغير التي هي أهم ما في المصنع (القسم 14.3).

الفرق بين SOURCE وSIMULATE وMEASURE: هذا أهم ما يُخطئ فيه المبتدئ، والشكل 14-10 (أ) يوضحه:

الوضع	ماذا يفعل؟	متى يُستخدم؟
SOURCE mA	يولد تيارًا محددًا من مصدره الداخلي ضمن قدرته على تشغيل الحمل (عادة حتى نحو 1000 Ω)	لاختبار مدخل يستقبل التيار ولا يغذي الحلقة (بطاقة سلبية أو مؤشر)
SIMULATE mA	يتصرف كمرسل ثنائي الأسلاك ويتحكم في التيار، لكنه يحتاج إلى تغذية خارجية للحلقة	حين تكون تغذية الحلقة من النظام (بطاقة نشطة) أو من مصدر خارجي
MEASURE mA	يقيس التيار الموجود بالتوالي	للتحقق من خرج مرسل أو تيار الحلقة
LOOP POWER + MEASURE	يغذي المرسل بـ 24 V ويقيس تياره، إن كانت الوظيفة متاحة	لاختبار مرسل منفصل عن تغذية النظام (على الطاولة أو قبل التوصيل)

لا تختَر SOURCE أو SIMULATE بالاسم وحده؛ افحص مخطط الحلقة ودليل المعاير لمعرفة مصدر التغذية والأطراف الصحيحة. توصيل SOURCE إلى بطاقة نشطة يجمع مصدرين في حلقة واحدة (القسم 3.3.1)، واختيار SIMULATE بلا تغذية خارجية يعطي «لا شيء» ويحيّر الفني.

خطوات حقن 4–20 mA لاختبار مدخل PLC أو DCS (مثال: مدخل ضغط مضبوط على 0–10 bar):

1. حدد رقم الحلقة ومدخل AI والمدى الهندسي من مخطط الحلقة وقاعدة بيانات النظام.
2. نسّق الاختبار مع التشغيل؛ الإشارة المحقونة قد تشغّل إنذارًا أو فصلًا أو تحرك معدة، فيُوثَّق التجاوز المؤقت (Bypass) ومن وافق عليه.
3. افصل إشارة المرسل عند نقطة الاختبار المعتمدة (طرفية القياس أو صندوق التوصيل).

4. تحقق هل الحلقة مغذاة من النظام أم تحتاج إلى مصدر.
5. اختر SOURCE أو SIMULATE وفق تصميم الحلقة.
6. وصّل المعاير بالقطبية الصحيحة بحسب مخطط الجهاز.
7. طبّق نقاط الاختبار وسجّل القراءة على النظام في نموذج الاختبار:

خرج المعاير	النسبة من المدى	القراءة المتوقعة
4 mA	0%	0 bar
8 mA	25%	2.5 bar
12 mA	50%	5 bar
16 mA	75%	7.5 bar
20 mA	100%	10 bar

8. أعد التوصيلات إلى حالتها، وأزل التجاوزات، وتحقق من عودة الحلقة إلى العمل بقراءة حقيقية، ووقّع النموذج.

هذه العلاقة تخص التحويل الخطي؛ إذا كانت هناك دالة مثل استخراج الجذر التربيعي للتدفق تختلف القيم المتوقعة بحسب موضع تطبيقها (في المرسل أم في النظام)، فتُحسب مسبقًا (القسم 8.3).

ماذا يثبت هذا الاختبار؟ يعتمد على مكان الحقن (الشكل 14-10 (ب)): **عند مدخل البطاقة** تفحص المدخل والتحويل الهندسي والعرض والمنطق المرتبط به؛ **من جهة الحقل عبر الكابل** تضيف فحص مسار الكابل والحاجز والطرفيات بين نقطة الحقن والنظام؛ و**بتطبيق ضغط حقيقي على المرسل** تشمل استجابة المرسل أيضًا. **حقن mA بدل المرسل لا يثبت دقة حساس الضغط نفسه**، ولا ينوب عن المعايرة بمرجع (القسم 14.4).

محاكاة مرسل ثنائي الأسلاك: استخدم SIMULATE (Transmitter Simulation) حين توجد تغذية خارجية للحلقة؛ يحل المعاير محل المرسل ويتحكم في تيار الحلقة (4 ← 8 ← 12 ← 16 ← 20 mA). إن لم توجد تغذية خارجية فلن تعمل المحاكاة بمجرد اختيار

الوضع، ويجب أن يتوفر على طرفي المعاير جهد كافٍ لتشغيله مع بقية حمل الحلقة (ميزانية الجهد في القسم 3.3.1).

حقن التردد لاختبار السرعة أو التدفق: اختر Frequency SOURCE أو خرج النبضات (Pulse Output) ثم اضبط التردد Hz، وسعة الجهد ومستوييه، وشكل الإشارة (مربعة أو جيبية بحسب المتاح والمطلوب)، ونسبة التشغيل (Duty Cycle) عند الحاجة، ونوع الخرج والتوصيل المناسبين للمدخل. **تطابق التردد وحده لا يكفي:** مدخل حساس مغناطيسي (ميلي فولتات جيبية تعتمد على السرعة)، ومدخل نبضات 24 V، ومدخل المجمّع المفتوح (Open Collector) قد يحتاج كل منها إلى إشارة مختلفة (الفصلان 32 و11).

أمثلة محلولة (حقن التردد):

- **المعطيات:** (1) حساس سرعة على عجلة بـ 60 سنًا (60 نبضة لكل دورة)، والمطلوب محاكاة 500 و1500 و3000 rpm. (2) عداد تدفق بنبضات معامله 100 نبضة لكل لتر، ويُحقن 250 Hz، ثم 1000 نبضة معدودة لاختبار المجمّع (Totalizer).
- **الافتراضات:** المدخل يقبل شكل الإشارة وسعتها، والنظام مهيأ بعدد النبضات لكل دورة ومعامل العداد نفسيهما.
- **الحل:**
  - (1) السرعة بالدورة في الدقيقة = PPR ÷ f × 60
  - بعدد نبضات 60 لكل دورة: السرعة = f = 60 ÷ f × 60، أي أن السرعة بالدورة في الدقيقة تساوي التردد بالهرتز: 500 rpm ← 500 Hz، و 1500 rpm ← 1500 Hz، و3000 rpm ← 3000 Hz.
  - ولو كان الحساس يعطي نبضة واحدة لكل دورة (PPR = 1) لعادلت 50 Hz سرعة 3000 rpm = 1 ÷ 50 × 60.
  - (2) التدفق = f ÷ K = 250 ÷ 100 = 2.5 L/s = 150 L/min

- وحجم 1000 نبضة = 10 L ÷ 100 = 1000 يُفترض أن تُضاف إلى المجمّع.

- **معنى النتيجة:** الأرقام تتبع معامل الحساس المهيأ في النظام؛ فإن ظهرت السرعة على الشاشة ضعف المتوقع فالخطأ في عدد الأسنان المهيأ لا في المعاير، وإن أضاف المجمّع 9.98 L فالفرق في تقريب معامل العداد أو في نبضات ضاعت عند بدء الحقن.

الفرق بين المحاكاة واختبار الحلقة والمعايرة والاختبار الوظيفي:

المصطلح	المقصود
المحاكاة (Simulation)	استبدال الإشارة الحقيقية بإشارة اصطناعية تمثل حالة تشغيل
اختبار الحلقة (Loop Test)	التحقق من انتقال الإشارة وعرضها واتجاهها ووظائفها عبر الأجزاء المشمولة بالاختبار
المعايرة (Calibration)	مقارنة الجهاز بمرجع معلوم وتوثيق الخطأ؛ والضبط إجراء منفصل قد يلزم بعد المقارنة (القسم 14.1)
الاختبار الوظيفي/اختبار الفصل (Functional / Trip Test)	التحقق من الإنذارات والتعشيقات والفصل والاستجابات وفق إجراء اختبار معتمد (القسم 29.5)

تحذير في حلقات السرعة والحماية: حقن التردد قد يُفسَّر توقفًا (سرعة صفر) أو تجاوز سرعة (Overspeed) فيُطلق فصلًا؛ تُحدد التجاوزات المؤقتة والاستجابات المتوقعة مع التشغيل قبل الحقن، ثم تُعاد التوصيلات وتُزال التجاوزات ويُتحقق من عودة الحلقة إلى العمل بعد الاختبار وتُسجَّل في سجل التجاوزات.

الشكل 14-10: *معايرة العمليات: (أ) أوضاع SOURCE وSIMULATE وMEASURE ومن يغذي الحلقة في كل منها؛ (ب) نقاط الحقن الثلاث على حلقة ضغط وما يثبته الاختبار عند كل نقطة؛ (ج) نقاط اختبار حلقة خطية 0–10 bar بحقن 4–20 mA؛ (د) حقن التردد لمحاكاة السرعة (RPM = 60 × f ÷ PPR) والتدفق (Q = f ÷ K).*

14.14 حالة ميدانية: مقياس اختبار واحد ومئات الشهادات

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

أُرسل معاير ضغط رقمي تستخدمه ورشة الموقع إلى مختبر معتمد في موعد معايرته السنوية، فجاءت شهادته «كما وُجد» خارج الحدود بنحو 0.3% من المدى في الوحدة المنخفضة. وكانت هذه الوحدة قد استُخدمت خلال الأشهر الماضية في معايرة مرسلات تدفق ومستوى. ولأن سجلات المعايرة تحتوي على الرقم التسلسلي لكل أداة، استخرج الفريق خلال ساعات قائمةً بالأجهزة التي عويرت بها، ورتّبها حسب الأهمية: أجهزة القياس التجاري ووظائف الإيقاف أولًا، ثم أجهزة التحكم، ثم المؤشرات. أُعيدت معايرة الفئة

الأولى بأداة بديلة سليمة، ووُثِّق الأثر، ولم يتجاوز أي جهاز حدوده. ولو لم تكن الأرقام التسلسلية مسجلة، لكان الخيار الوحيد الآمن إعادة معايرة كل ما عوير في تلك الفترة.

الدروس: التتبعية ليست ورقة تُعلَّق بل سلسلة تُستعمل عند الحاجة؛ وتسجيل أداة الاختبار في كل شهادة يوفّر أيامًا من العمل؛ وتُفحَص أدوات الورشة بين معايرتيها السنويتين بمقارنة دورية بمرجع ثانٍ.

دور المهندس ودور الفني:

المرحلة	دور المهندس	دور الفني
البرنامج	يحدد حدود القبول لكل وسم، ويختار أدوات الاختبار بنسبة لا تقل عن 4:1، ويضع فترات المعايرة الأولى ثم يعدّلها بتحليل الانجراف	ينبّه إلى الأجهزة التي يتكرر انحرافها، ويحافظ على صلاحية شهادات أدوات الورشة
التنفيذ	يعتمد الإجراء والتجاوزات اللازمة بالتنسيق مع التشغيل	يعزل الجهاز بالتسلسل الصحيح، ويسجل «كما وُجد» قبل أي ضبط، ويضبط الحساس ثم الخرج عند الحاجة، ويسجل «كما تُرك»
بعد المعايرة	يراجع الشهادات، ويقرر تقييم الأثر حين يوجد جهاز مهم خارج الحدود	يعيد الجهاز إلى الخدمة ويطابق قراءته على النظام، ويزيل التجاوزات، ويلصق ملصق المعايرة

14.15 الأخطاء الشائعة

- الضبط مباشرة دون تسجيل «كما وُجد».
- استخدام تغيير المدى بـ HART بدلًا من المعايرة.
- مطابقة المرسل مع مقياس محلي غير معايَر.
- أداة اختبار مداها كبير جدًا بالنسبة إلى الجهاز، أو شهادتها منتهية.

- المعايرة صعودًا فقط، أو تجاوز النقطة ثم العودة إليها.
- معايرة مرسل DP ذي مدى صغير وضغط ساكن عالٍ دون ضبط الصفر تحت الضغط الساكن حين يتطلبه الإجراء.
- إهمال تقييم الأثر حين يُوجد جهاز مهم خارج الحدود.
- إعادة الجهاز إلى الخدمة دون التحقق من قراءته على النظام وإزالة التجاوزات.

14.16 ملخص

المعايرة مقارنة موثّقة بمرجع متتبَّع، والضبط إجراء منفصل يأتي بعدها عند الحاجة. تُسجَّل الحالتان قبل الضبط وبعده عند خمس نقاط صعودًا ونزولًا، وتُختار أداة الاختبار بنسبة لا تقل عن 4:1. وفي المرسلات الذكية يُميَّز ضبط الحساس وضبط الخرج من تغيير المدى. وتُدار الفترات بتحليل الانجراف، ويُقيَّم أثر كل خروج عن الحدود.

وفي الفصل التالي: ينتقل الفصل 15 «صمامات التحكم والمشغلات والموضّعات» من القياس إلى العنصر النهائي في الحلقة، الذي يحوّل قرار المتحكم إلى تغيير فعلي في العملية؛ وهو أيضًا جهاز يُعاير ويُختبر بالمنطق نفسه.

14.17 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق بين المعايرة والضبط والتحقق؟ أعطِ مثالًا لكل منها.
2. مرسل حرارة مداه 0–200 °C وسماحيته ±0.5 °C. ما أسوأ عدم يقين مسموح لأداة الاختبار وفق نسبة 4:1؟
3. احسب الخطأ بالنسبة المئوية من المدى لمرسل يعطي 12.10 mA عند 50% من المدى.
4. لماذا تُجرى المعايرة صعودًا ثم نزولًا؟ ولماذا لا تُتجاوَز النقطة ثم يُعاد إليها؟
5. ما الفرق بين ضبط الحساس وضبط الخرج التناظري وإعادة تحديد المدى؟

6. مفتاح ضغط منخفض مضبوط على 2.0 barg انخفاضًا ويعود عند 2.4 barg. ما الفرق التشغيلي؟ وما أثره في التشغيل؟

7. اذكر ستة بنود يجب أن يتضمنها سجل المعايرة.

8. كيف تستخدم بيانات «كما وُجد» لتمديد فترة المعايرة أو تقصيرها؟

9. متى يلزم تقييم أثر الخروج عن الحدود؟ وما الأسئلة التي يجيب عنها؟

10. في الحالة الميدانية (القسم 14.14)، ما المعلومة في شهادات المعايرة التي اختصرت العمل من إعادة معايرة شاملة إلى قائمة محددة؟

11. مدخل ضغط مضبوط على 0–16 bar تريد اختباره بمعاير حلقة والبطاقة تغذي الحلقة بـ 24 V: أي وضع تختار (SOURCE أم SIMULATE) ولماذا؟ وما القراءة المتوقعة عند 14 mA؟ (القسم 14.13)

12. لماذا لا يكفي شراء جهاز اتصال HART وحده لتجهيز الورشة؟ اذكر خمسة بنود من حزمة HART الكاملة وثلاثة بنود من التكلفة غير المباشرة (الملحق ج «تجهيزات الورشة وأدوات الاختبار»).

مراجع الفصل: R1 (المسودة الموحدة، الفصل 14: المصطلحات، السجل، الخروج عن الحدود)؛ متطلبات أدوات الاختبار وملصقاتها وسجلات المعايرة وقائمة تجهيزات ورشة الأجهزة وإجراءات معايرة المفاتيح ونماذج المعايرة الرقمية والتناظرية (I&C Commissioning Instruction، MAPNA/Monenco)؛ مصطلحات المعايرة والتتبعية والتحقق (مجمع اللغة العربية بدمشق، معجم مصطلحات علم القياس، 2022)؛ وR63 (عرض قياس الحرارة: المقياس الحراري ITS-90، 14.2)؛ ISO/IEC 17025؛ وH. Preston-Thomas، The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)، Metrologia 27 (1990).

الباب الثالث: العناصر النهائية وأسس التحكم

القياس وحده لا يغيّر شيئًا في العملية. يتناول هذا الباب ما يغيّرها وما يقرر كيف تتغير: صمامات التحكم ومشغلاتها وموضّعاتها (الفصل 15)، وصمامات العزل والتنظيم الذاتي والأمان (الفصل 16)، ثم لغة القرار الثنائي في المنطق الرقمي (الفصل 17)، ولغة القرار المستمر في متحكمات PID وضبطها (الفصل 18). أما الاستراتيجيات التي تُبنى من عدة حلقات PID، كالتعاقبي والتغذية الأمامية والانتقاء، فتأتي في (الفصل 41) بعد أن يتعرف القارئ على المعدات التي تطبقها.

الفصل 15: صمامات التحكم والمشغلات والموضّعات

لمن هذا الفصل: مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم الذي يحدد صمام تحكم في ورقة بيانات، أو يراجع حساب الحجم من المورد، أو يعاير موضّعًا في الموقع، أو يقف أمام حلقة تتذبذب ولا يعرف أهي من المتحكم أم من الصمام. ويفيد مهندس العمليات الذي يقدّم بيانات الخدمة، ومهندس الأنابيب الذي يضع الصمام في الخط، وفني الصيانة الذي يفك الغلاف ويبدل الحشوة.

الفكرة الأساسية: صمام التحكم هو العضو الوحيد في حلقة التحكم الذي يلمس العملية بيده؛ كل ما قبله قياس وحساب، وهو وحده يغيّر التدفق. ولهذا فإن أكثر مشكلات الحلقات «الصعبة» ليست في المتحكم بل في الصمام: حجم أكبر من اللازم يجعله يعمل عند 15% من شوطه، أو احتكاك حشوة يُحدث تذبذبًا لا يزيله أي ضبط، أو مشغل ضعيف لا يغلق عند أقصى ضغط. والصمام الجيد ثلاثة أشياء معًا: جسم وقطع داخلية تناسب المائع والضغط، ومشغل يملك القوة والسرعة ووضع الفشل الصحيح، وموضّع يجعل الساق تذهب حيث يريد المتحكم بدقة.

15.1 أجزاء صمام التحكم ووظيفة كل جزء

يبين الشكل 15-2 مقطعًا ثلاثي الأبعاد لأكثر صمامات التحكم شيوعًا في وحدات النفط والغاز والطاقة: صمام كروي (Globe) بقفص مع مشغل غشائي نابضي. أجزاؤه من أسفل إلى أعلى:

الجزء	الوظيفة	ما يحدده مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس
الجسم (Body)	يحمل الضغط ويوصل بالأنابيب	المادة (WCB، LCC، CF8M)، والتصنيف (Class 150–2500)، ونوع التوصيل (شفاه RF/RTJ، لحام)، والمسافة بين الوجهين وفق ISA 75.08
القطع الداخلية (Trim)	الكباس والكرسي والقفص أو الموجّه: تصنع الخاصية وتتحمل التآكل والضوضاء	مادة الترم (316، 17-4PH، Stellite على الأسطح)، والخاصية، والتصميم (قفص، مراحل متعددة، ضد التكهف)، ونسبة الحجم المخفض (Reduced Trim)
الغطاء (Bonnet)	يغلق الجسم من الأعلى ويحمل الحشوة والمشغل	عادي، أو ممدد للحرارة العالية والخدمة المبردة (Extended)، أو بمنفاخ (Bellows Seal) للسوائل السامة
حشوة الغلاف (Packing)	تمنع تسرب المائع حول الساق بأقل احتكاك	PTFE (حتى ~230 °C)، غرافيت (حتى 600 °C)، تحميل حي بنوابض صحن (Live-Loaded)، وفئة الانبعاث ISO 15848
الساق (Stem)	تنقل حركة المشغل إلى الكباس	القطر (لا تنحني تحت قوى المائع)، والمادة، والوصلة بالكباس
المشغل (Actuator)	يحول إشارة الهواء أو الكهرباء إلى قوة وحركة	النوع، والحجم (مساحة الغشاء)، ومدى النابض، ووضع الفشل، والشوط
الموضّع (Positioner)	يجعل الموضع الفعلي يطابق المطلوب	هوائي أو كهروهوائي أو رقمي، وبروتوكول التشخيص، والخاصية المبرمجة
الملحقات	صمام ملفي، ومعزز، ومرشح ومنظم، ومفاتيح حدية، ومرسل موضع، وعجلة يدوية	ما تحتاجه الوظيفة فعلًا (15.10)

الشكل 15-1: *الأنواع الشائعة لصمامات التحكم بمقاطع تخطيطية: الكروي بقفص، والفراشة، والكرة القطاعية بفتحة V، والكباس اللامركزي الدوار، والزاوي بقفص متعدد المراحل، وثلاثي المسالك؛ وكل نوع يحمل مقايضة بين الدقة والفقد والتكلفة والقدرة على الخدمة القاسية.*

الشكل 15-2: *مقطع تخطيطي لصمام تحكم كروي بقفص، الجريان إلى الفتح، مع مشغل غشائي نابضي هواء للفتح: المائع يدخل تحت الكرسي، ويمر عبر نوافذ القفص التي يكشفها الكباس بقدر موضعه، والغشاء ينقل ضغط الهواء إلى الساق ضد النابض الذي يعيد الصمام إلى الإغلاق عند فقد الهواء.*

15.2 أنواع صمامات التحكم ومتى يُختار كل نوع

يقسم مهندسو الصمامات الأنواع إلى **خطية الحركة** (Sliding Stem: الكروي والزاوي وثلاثي المسالك والغشائي) و**دوارة** (Rotary: الفراشة والكرة والكباس اللامركزي). القاعدة العامة: الخطية أدق وأكثر قدرة على خدمات الضغط العالي والضوضاء والتكهف، والدوارة أرخص وأخف وأعلى سعة للقطر نفسه وأنسب للأقطار الكبيرة والمواد القذرة.

جدول: أنواع صمامات التحكم: نسبة المدى والإغلاق وفقد الضغط

النوع	نسبة المدى (Rangeability) النموذجية	الإغلاق	فقد الضغط عند الفتح الكامل
كروي بقفص (Globe, Cage-Guided)	30:1 إلى 50:1	حتى Class V، ومع كرسي لين Class VI	عالٍ (Cv/D^2 منخفض)
كروي بكباس موجَّه من الأعلى (Top-Guided)	30:1	Class IV–V	عالٍ
زاوي (Angle)	30:1	Class IV–V	عالٍ
ثلاثي المسالك (3-Way)	20:1	محدود	متوسط
فراشة عالية الأداء (HP Butterfly)	20:1 إلى 50:1 (بقرص لامركزي مزدوج أو ثلاثي)	Class VI مع كرسي لين، Class IV بمعدن	منخفض جدًا
فراشة تقليدية (Swing-Through)	10:1	لا يغلق بإحكام	منخفض جدًا
كرة قطاعية بفتحة V (Segmented Ball)	100:1 إلى 300:1	Class IV–VI	منخفض
كرة كاملة بمخفِّض ضوضاء (Full-Bore Ball with Attenuator)	50:1	Class VI	منخفض
كباس لامركزي دوار (Eccentric Plug)	100:1	Class IV	متوسط
غشائي (Diaphragm/Weir) وقرصي (Pinch)	10:1	Class VI	منخفض

جدول: أنواع صمامات التحكم (تابع): أين يُفضَّل وأين يُتجنَّب

النوع	يفضَّل في	يتجنَّب في
كروي بقفص (Globe, Cage-Guided)	معظم حلقات التحكم من 1 إلى 12 بوصة؛ الضغط التفاضلي العالي؛ ضد الضوضاء والتكهف بقفص خاص	الملاط والألياف (تسد نوافذ القفص)؛ الأقطار الكبيرة (التكلفة والوزن)
كروي بكباس موجَّه من الأعلى (Top-Guided)	السوائل التي تحمل جزيئات، الأحجام الصغيرة	الضغط التفاضلي العالي جدًا (قوى غير متوازنة)
زاوي (Angle)	الوميض (المخرج مباشر إلى الأسفل بلا ارتطام)، وتفريغ المواد الصلبة، وملاط الفحم (Coal Slurry) وخدمات تسييل الفحم	حين يفرض التخطيط دخولًا ومخرجًا على خط واحد
ثلاثي المسالك (3-Way)	خلط تيارين (تحكم بالحرارة) أو تحويل تيار (تجاوز مبادل)	الإغلاق المحكم لأي من المسلكين
فراشة عالية الأداء (HP Butterfly)	الأقطار الكبيرة (6 إلى 60 بوصة)، الغازات والمياه، ضغط تفاضلي منخفض، ميزانية محدودة	التحكم الدقيق عند الفتحات الصغيرة (أول 15° غير مستقرة)، الضغط التفاضلي العالي، التكهف
فراشة تقليدية (Swing-Through)	مجاري الهواء والغاز، التحكم بالسحب في الأفران	كل ما يحتاج إغلاقًا
كرة قطاعية بفتحة V (Segmented Ball)	اللب والورق، الملاط، الألياف، السوائل اللزجة، المدى الواسع	الضوضاء والتكهف الشديدان
كرة كاملة بمخفِّض ضوضاء (Full-Bore Ball with Attenuator)	خطوط الغاز الكبيرة، تخفيض الضغط، الشعلة	التحكم الدقيق عند التدفق الصغير

النوع	يفضَّل في	يتجنَّب في
كباس لامركزي دوار (Eccentric Plug)	السوائل القذرة والمتآكلة، البخار، الخدمة الكاشطة	الضغط التفاضلي العالي جدًا
غشائي (Diaphragm/Weir) وقرصي (Pinch)	الأحماض والملاط والمياه والأغذية والأدوية	الحرارة العالية والضغط العالي (حد الغشاء المطاطي)

كيف أختار؟ ابدأ من الكروي بقفص ما لم يمنعه شيء ثم انزل عنه لسبب مكتوب: قطر كبير أو ضغط تفاضلي منخفض أو ميزانية ضيقة يقودك إلى الفراشة عالية الأداء، والملاط والألياف والمدى الواسع إلى الكرة القطاعية، والوميض والمواد الصلبة إلى الزاوي، والغاز عالي الضغط بأقطار كبيرة إلى الكرة الكاملة بمخفّض ضوضاء. وحدّ هذا الجدول أن نسب المدى فيه متأصلة والمركبة أقل دائمًا (القسم 15.3)، وأنه لا يُظهر الضوضاء والتكهف عند الحالة الأشد ولا كلفة الصيانة والقطع الداخلية. والخطأ الأكثر كلفة هو اختيار الفراشة توفيرًا للمال في خدمة ضغط تفاضلي عالٍ أو تدفق صغير، فتعمل في أول 15° من فتحتها حيث لا استقرار، وتتكهف، ثم تُستبدل بكروي بعد أن دُفع ثمن الاثنين.

ملاحظتان ميدانيتان: الأولى أن نسبة المدى المذكورة هي المتأصلة (Inherent) في اختبار المصنّع؛ والمركبة في الخط أقل دائمًا لأن الضغط التفاضلي يتغير مع التدفق (15.3). والثانية أن «Class VI» إغلاق محكم بكرسي لين يفقد إحكامه مع الحرارة والزمن والجزيئات، ولا يُعتمد عليه بديلًا من صمام عزل (SDV) في وظائف السلامة (الفصلان 29 و31).

15.3 الخاصية المتأصلة والمركبة: أي منحنى يريد المتحكم؟

الخاصية المتأصلة (Inherent Characteristic) هي العلاقة بين شوط الصمام h والتدفق عند ضغط تفاضلي ثابت عبره، ويحددها شكل الكباس أو نوافذ القفص (الشكل 15-3، اليسار):

- **الخطية (Linear):** التدفق يتناسب مع الشوط؛ الكسب المتأصل ثابت.
- **النسبة المتساوية (Equal Percentage):** كل زيادة متساوية في الشوط تزيد التدفق بنسبة مئوية متساوية من قيمته الحالية، أي أن الكسب يزداد مع الفتح؛ بنسبة مدى R (عادة 30 إلى 50):

$$\mathrm{Cv/Cv_rated} = \mathrm{R\hat{}(h - 1)}$$

- **الفتح السريع (Quick Opening):** أكبر التدفق في أول الشوط؛ للمفاتيح وأنظمة التخفيف والتحكم بالفتح والإغلاق (On-Off) لا للتحكم المستمر.

الخاصية المركبة (Installed Characteristic) هي ما يراه المتحكم فعلًا: الصمام في خط له مقاومة (أنابيب، ومبادلات، وفتحات) ومصدر ضغط له منحنى (مضخة). فحين يفتح الصمام يزيد التدفق فيزداد فقد الخط وينخفض ضغط المضخة، فينخفض الضغط التفاضلي المتاح للصمام. النتيجة أن الخاصية المتأصلة «تنحني» نحو الأعلى (الشكل 15-3، اليمين). المتغير الذي يحكم الانحناء هو **نسبة هبوط الضغط (Pressure Drop Ratio)**:

ΔP_valve = ΔP_total (الصمام + الخط عند التدفق الأقصى) ÷ ΔP_valve (عند التدفق الأقصى)

- عند DPR = 1 (الصمام يأخذ كل الهبوط) تبقى الخاصية المركبة كالمتأصلة.
- عند DPR ≈ 0.2 إلى 0.3 (الأشيع في الخطوط الطويلة) تصبح النسبة المتساوية شبه خطية، وتصبح الخطية شبه فتح سريع.
- عند DPR < 0.1 يفقد الصمام سلطته (Valve Authority) ويصبح التحكم في مداه الأعلى ضعيفًا مهما كانت الخاصية.

> **القاعدة العملية للاختيار:** إذا كان الضغط التفاضلي عبر الصمام سيتغير كثيرًا مع التدفق (مضخة طاردة مركزية، خط طويل، مبادل) فاختر **النسبة المتساوية** لتعوّض الانحناء وتعطي خاصية مركبة قريبة من الخطية، وهذا هو الاختيار الافتراضي لأغلب حلقات التدفق والضغط والحرارة. وإذا كان الضغط التفاضلي شبه ثابت (تحكم بالمستوى من وعاء إلى وعاء، تخفيض ضغط من شبكة مستقرة، مضخة إزاحة موجبة بصمام تنفيس) فاختر **الخطية**. ولا تختر الفتح السريع للتحكم المستمر أبدًا.

الشكل 15-3: *الخصائص المتأصلة الثلاث عند ضغط تفاضلي ثابت (اليسار)، والخاصية المركبة لصمام نسبة متساوية عند نسب هبوط ضغط مختلفة مقارنة بصمام خطي عند نسبة 0.2 (اليمين): كلما أخذ الخط حصة أكبر من الهبوط انحنت الخاصية، والنسبة المتساوية تعوّض هذا الانحناء.*

لماذا يهم هذا المتحكم؟ كسب الحلقة الكلي هو حاصل ضرب كسب المتحكم والصمام والعملية والمرسل. فإذا كان كسب الصمام (ميل الخاصية المركبة) يتغير ثلاث مرات بين 20% و80% من الشوط، فإن حلقة ضُبطت جيدًا عند حمل واحد ستكون بطيئة عند حمل وتتذبذب عند آخر. ولهذا يفضَّل أن تكون الخاصية المركبة خطية قدر الإمكان (تغير الكسب أقل من 2:1 عبر مدى التشغيل)، ويستطيع الموضّع الرقمي أن يفرض خاصية

مبرمجة (Characterization) لتصحيح ما تبقى (15.9)، لكن التصحيح في الموضّع لا يعوّض صمامًا أكبر من اللازم.

15.4 حساب حجم الصمام: Cv وKv للسوائل والغازات والبخار

معامل التدفق: Cv هو عدد الغالونات الأمريكية في الدقيقة من الماء عند 60 °F التي تمر عبر الصمام بهبوط ضغط 1 psi؛ وKv هو عدد الأمتار المكعبة في الساعة من الماء التي تمر بهبوط 1 bar. والعلاقة:

$$\mathrm{Cv} = 1.156 \times \mathrm{Kv}$$

السوائل (IEC 60534-2-1 / ISA-75.01.01)، تدفق غير مختنق:

$$Q = \mathrm{Kv} \times \sqrt{(\Delta P \,/\, SG)}$$

حيث Q بالمتر المكعب في الساعة، وΔP بالبار، وSG الكثافة النوعية بالنسبة إلى الماء. ومعادلة الحجم هي عكسها: Kv = Q √(SG/ΔP). وتُضاف عوامل التصحيح حين تلزم: **Fp** لهندسة الأنابيب (مخفضات قبل الصمام وبعده حين يكون الصمام أصغر من الخط)، و**FR** لرقم رينولدز المنخفض في السوائل اللزجة جدًا.

التدفق المختنق (Choked Flow) في السوائل: كلما زاد ΔP يزيد التدفق حتى حدٍّ ينخفض عنده الضغط في الوريد المنقبض (Vena Contracta) إلى ضغط البخار فيتكوّن بخار ولا يزيد التدفق بعده مهما زاد ΔP (الشكل 15-4، اليسار). الحد:

$$\Delta P_{\text{choked}} = \mathrm{FL}^2 \times (\mathrm{P1} - \mathrm{FF} \times \mathrm{Pv})$$

حيث FL معامل استعادة الضغط للصمام (نحو 0.9 للكروي، و0.6 إلى 0.7 للفراشة والكرة التي تستعيد الضغط أكثر فتختنق أبكر)، و

$$\mathrm{FF} = 0.96 - 0.28 \sqrt{(\mathrm{Pv}/\mathrm{Pc})}$$

معامل نسبة الضغط الحرج للسائل، وPc الضغط الحرج للمائع. وفي الحساب يُستخدم الأصغر من ΔP الفعلي وΔP_choked.

الشكل 15-4: *التدفق مقابل جذر الضغط التفاضلي لصمام كروي على سائل: خط مستقيم حتى حد الاختناق ثم ثبات (اليسار)؛ ومسار الضغط عبر الصمام في ثلاث خدمات: عادية، وتكهف حين يهبط ضغط الوريد المنقبض دون ضغط البخار ثم يعود فوقه، ووميض حين يبقى ضغط المخرج دون ضغط البخار (اليمين).*

مثال محلول (حجم صمام لسائل):

- **المعطيات:** ماء معالج بكثافة (SG = 0.95) 950 kg/m³ عند ≈ (Pv 90 °C (0.7 bara، التدفق العادي 60 m³/h والأقصى 78 m³/h، P1 = (11.0 bara) 10 barg، P2 = 6 barg، صمام كروي FL = 0.9، Pc للماء 221 bar.
- **الافتراضات:** Fp = 1 للتبسيط (يُراجع إن اختير صمام أصغر من الخط)، سائل نيوتوني بلزوجة منخفضة (FR = 1)، والضغوط عند التدفق العادي.
- **الحل:**
  - فرق الضغط: $\Delta P = P1 - P2 = 10 - 6 = 4$ bar
  - معامل نسبة الضغط الحرج للسائل: $FF = 0.96 - 0.28\sqrt{(Pv/Pc)} = 0.96 - 0.28\sqrt{(0.7/221)} = 0.96 - 0.28 \times 0.0563 = 0.944$
  - حد الاختناق: $\Delta P_{choked} = FL^2 \times (P1 - FF \times Pv) = 0.81 \times (11.0 - 0.944 \times 0.7) = 0.81 \times 10.34 = 8.4$ bar

- 8.4 bar أكبر من 4 bar، فالتدفق غير مختنق ويُحسب بـ ΔP الفعلي.
- معامل التدفق عند الحالة العادية: Kv = Q × √(SG/ΔP) = 60 × √(0.95/4) = 60 × 0.487 = 29.2 m^3/h، أي Cv = 1.156 × 29.2 = 33.8
- عند الأقصى (بافتراض ΔP نفسه للتبسيط): Cv = 78/60 × 33.8 = 44

- **الاختيار:** صمام كروي 2 بوصة بمعامل مقنن Cv ≈ 55 (نسبة متساوية): يعمل عند نحو 34/55 = 62% من سعته في الحالة العادية و= 44/55 80% في القصوى، وهذا داخل النطاق المستحسن (الحالة العادية بين 50% و70% والقصوى دون 80% إلى 90% من Cv المقنن، القاعدة 2 أدناه). ولو اختير 3 بوصات (Cv ≈ 120) لعمل الصمام عند 28% و37% من سعته المقننة، فتصبح أي منطقة ميتة أو ميز ثابت في الموضّع حصة أكبر من التدفق، وتقترب الحالة الدنيا من الكرسي حيث يخشن التحكم، ولو اختير 1.5 بوصة (Cv ≈ 30) لما بلغ التدفق الأقصى.
- **معنى النتيجة:** الصمام الأصغر من الخط (2 بوصة في خط 3 بوصات) شائع وصحيح ما دام عامل Fp محسوبًا والمخفضات مركّبة؛ والصمام «بحجم الخط» لمجرد سهولة التركيب هو أكثر أسباب الصمامات الكبيرة في المصانع.

الشكل 15-5: *اختيار حجم الصمام في مثال السائل: المطلوب Cv 33.8 عاديًا و44 أقصى؛ الصمام 2 بوصة (Cv 55) يضعهما عند نحو 62% و80% ضمن النطاق المستحسن، و3 بوصات (Cv 120) عند 28% و37% فهو كبير، و1.5 بوصة (Cv 30) لا يبلغ حتى الحالة العادية.*

الغازات والبخار: يختلف الحساب بعامل التمدد Y الذي يقل مع نسبة هبوط الضغط x = ΔP/P1، ويختنق التدفق عند x = Fγ × xT حيث xT معامل نسبة هبوط الضغط الحرج للصمام (نحو 0.7 للكروي و0.3 إلى 0.4 للفراشة والكرة) وFγ = γ/1.4 معامل الحرارة النوعية:

$$Y = 1 - x \,/\, (3 \times F\gamma \times xT)$$

$$Q_std = N9 \times Fp \times Cv \times P1 \times Y \times \sqrt{(\, x \,/\, (M \times T1 \times Z)\,)}$$

حيث Q_std بالمتر المكعب القياسي في الساعة (عند 15 °C وضغط جوي)، وP1 بالكيلوباسكال المطلق، وT1 بالكلفن، وM الكتلة المولية، وZ معامل الانضغاطية، وN9 = 22.5 (لـ Cv) أو 26.0 (لـ Kv). وعند x ≥ Fγ·xT يثبت Y عند 0.667 وتُستخدم x = Fγ·xT (تدفق مختنق: سرعة الصوت في الفتحة). وللبخار والتدفق الكتلي تُستخدم الصيغة

الكتلية بالكثافة عند المدخل (N6 = 2.73) لـ Cv أو 3.16 لـ Kv مع W بالكيلوغرام في الساعة وρ1 بالكيلوغرام في المتر المكعب وP بالكيلوباسكال، وتصبح 27.3 و31.6 حين يكون P بالبار). وتفاصيل الثوابت في ISA-75.01.01 ولا يُنصح بالحساب اليدوي إلا للتحقق؛ فالأدوات الحاسوبية للمصنّعين تحسب ما هو أكثر (الضوضاء، السرعة عند المخرج، القوى).

مثال محلول (حجم صمام لغاز):

- **المعطيات:** غاز وقود طبيعي (M = 17، γ = 1.3، Z = 0.95) بتدفق 5000 S m³/h، عند P1 = 20 bara و40 °C (313 K)، إلى P2 = 15 bara. صمام كروي xT = 0.70.
- **الافتراضات:** Fp = 1، والتدفق عند الظروف القياسية 15 °C و1.013 bar.
- **الحل:**
  - نسبة هبوط الضغط: x = ΔP/P1 = 5/20 = 0.25
  - معامل الحرارة النوعية: Fγ = γ/1.4 = 1.3/1.4 = 0.929
  - حد الاختناق: Fγ × xT = 0.929 × 0.70 = 0.65، وهو أكبر من 0.25 فالتدفق غير مختنق.
  - عامل التمدد: Y = 1 − x/(3 × Fγ × xT) = 1 − 0.25/(3 × 0.65) = 1 − 0.128 = 0.872
  - الجذر = √(x/(M × T1 × Z)) = √(0.25/(17 × 313 × 0.95)) = √(0.25/5055) = √(4.95 × 10⁻⁵) = 0.00703
  - معامل التدفق: Q = Y_Cv × std/(N9 × Fp × P1 × الجذر) = 5000/(22.5 × 2000 × 0.872 × 0.00703) = 5000/276 = 18.1، أي Kv ≈ 15.7
- **التحقق بطريقة الكثافة:** كثافة الغاز عند المدخل ρ1 = PM/(ZRT) = (2 ×

$\rho = (0.95 \times 8.314 \times 313) = 13.8\ kg/m^3$، والتدفق الفعلي $= 0.017 \times 10^6 / 13.8 \approx 261\ m^3/h$، وبمعادلة السائل التقريبية $Kv = 261 \times 0.72 / \sqrt{(0.0138/5)} = 13.7$، وبقسمة على $5000 \approx Y$ 15.7 — متسق.

- **الاختيار:** صمام 1.5 بوصة بمعامل مقنن $Cv \approx 25$ إلى 30 يضع الحالة العادية عند 60% إلى 70%؛ ويُتحقق من سرعة المخرج (يُفضَّل أقل من 0.3 ماخ في الجسم لتفادي الضوضاء) ومن الضوضاء المحسوبة وفق IEC 60534-8-3.
- **معنى النتيجة:** تقريب Cv المحسوب (18.1) إلى 20 أو نحوه لا يغير الاختيار، لكن الخطأ الشائع هو إدخال التدفق الفعلي بدل القياسي أو العكس، وهو خطأ بعامل $P1/P \approx 20$ std يجعل الصمام إما ضخمًا أو عاجزًا. اكتب دائمًا أساس الحجم على ورقة البيانات (Sm^3/h عند 15 °C أم Nm^3/h عند 0 °C أم m^3/h فعلي).

قواعد الحجم التي لا تُهمل:

1. احسب عند ثلاث حالات على الأقل: الأدنى والعادي والأقصى، بضغوطها الحقيقية عند كل حالة (P1 يرتفع عند التدفق المنخفض لأن فقد الخط يقل).
2. اجعل الحالة العادية بين 50% و70% من Cv المقنن، والقصوى لا تتجاوز 80% إلى 90%، والدنيا فوق 10% (وفوق أول 15° في الدوارة).
3. تحقق من الاختناق والتكهف والوميض والضوضاء عند الحالة الأشد، وهي غالبًا حالة البدء أو التوقف لا التشغيل العادي.
4. تحقق من سرعة المخرج: للسوائل أقل من نحو 8 إلى 10 m/s في الجسم (وأقل مع الوميض)، وللغازات يُفضَّل أقل من نحو 0.3 ماخ للتحكم المستمر، ويُقبل حتى نحو 0.5 ماخ إذا سمحت حسابات الضوضاء (15.4.1).
5. راجع حساب المورد سطرًا سطرًا: أساس التدفق، والكثافة، وضغط البخار عند حرارة التشغيل، وFL وxT لنوع الترم المعروض لا للجسم عمومًا.

15.4.1 مكمّلات حساب الحجم: عامل هندسة الأنابيب، والبخار، وسرعة المخرج، والجريان ثنائي الطور

عامل هندسة الأنابيب Fp (Piping Geometry Factor): الصيغ السابقة تفترض أن الصمام بقطر الخط نفسه. فإذا كان الصمام أصغر من الخط ورُكب بمخفضين (Reducers) استُهلك جزء من فرق الضغط فيهما، ويُصحح ذلك بعامل Fp ≤ 1 يُضرب في Cv: Fp = \ [1 + (ΣK ÷ N2) × (Cv ÷ d²)²]^(−1/2)، حيث ΣK مجموع معاملات فقد المخفضين وحدّي برنولي (نحو 1.5 × (1 − d²/D²)² للمخفضين معًا)، وd قطر الصمام بالمليمتر، و$N2 = 2.14 \times 10^{-3}$ لـ Cv (أو 10^{-3} × 1.6 لـ Kv). وقيمه النموذجية: نحو 0.96 إلى 0.98 لصمام كروي أصغر من الخط بمقاس واحد، و0.85 إلى 0.95 لصمام أصغر بمقاسين أو لصمام كبير الـ Cv نسبةً إلى قطره (كرة كاملة أو فراشة). ويُهمل حين يكون الصمام بقطر الخط أو حين يكون Cv/d^2 صغيرًا (الكروي بترم مخفض)، ويصبح مهمًا في الصمامات الدوارة ذات السعة العالية حيث قد يخفض السعة الفعلية 10% أو أكثر.

مثال محلول (بخار بالصيغة الكتلية):

- **المعطيات:** بخار مشبع عند P1 = 11 bara (10 barg)، حرارة التشبع 184 °C، ($\rho1 = 5.6$ kg/m³)، وP2 = 6 bara، والتدفق الأقصى W = 5000 kg/h، وصمام كروي مستقيم xT = 0.72، وγ = 1.3 للبخار.
- **الافتراضات:** صمام بقطر الخط (Fp = 1)، وبخار مشبع جاف بلا رذاذ، وفرق الضغط ثابت عند التدفق الأقصى.
- **الحل بالوحدات:**
  - نسبة هبوط الضغط: x = (P1 − P2) ÷ P1 = (11 − 6) ÷ 11 = 0.455
  - معامل الحرارة النوعية: Fγ = γ ÷ 1.4 = 1.3 ÷ 0.929؛ وحد الاختناق

0.669 = 0.72 × 0.929 = Fγ·xT أكبر من x، فالجريان غير مختنق.

- عامل التمدد: Y = 1 − x ÷ (3 × Fγ·xT) = 1 − 0.455 ÷ (3 × 0.669) = 0.773
- الجذر بالبار: √(x × P1 × ρ1) = √(0.455 × 11 × 5.6) = √28.0 = 5.29 (مع N6 = 27.3)
- معامل التدفق: Cv = W ÷ (N6 × Y × الجذر) = 5000 ÷ (27.3 × 0.773 × 5.29) = 44.8 ≈ 45، أي Kv ≈ 39
- التحقق بالكيلوباسكال: √(0.455 × 1100 × 5.6) = 52.9 مع N6 = 2.73، فالنتيجة نفسها.

- **معنى النتيجة:** صمام 2 بوصة بمعامل مقنن Cv ≈ 60 يعمل عند نحو 75% من سعته في الحالة القصوى، وهو مقبول إن كان التدفق العادي نحو 60% من الأقصى، وإلا فيُختار 2.5 بوصة. وY = 0.77 يعني أن انضغاطية البخار خفضت السعة نحو 23% مقارنة بسائل بالكثافة نفسها؛ ولو ارتفع فرق الضغط حتى الاختناق (x ≥ 0.669، أي P2 ≤ 3.6 bara) لثبت Y عند 0.667 ولما زاد التدفق مهما انخفض P2.

صيغة سريعة لسرعة المخرج: v (m/s) = 354 × Q ÷ d²، حيث Q التدفق الحجمي الفعلي عند شروط المخرج بالمتر المكعب في الساعة وd قطر مخرج الصمام بالمليمتر. وللغاز والبخار تُقارن بسرعة الصوت c = √(γ × R × T ÷ M) (نحو 500 m/s للبخار المشبع عند 6 bar، و340 m/s للهواء عند 20 °C). والحدود المعتادة: للسوائل 7 إلى 10 m/s (ونحو 5 m/s في خدمات الوميض والملاط)، وللغاز والبخار يُفضَّل ماخ 0.3 أو أقل عند المخرج، ويُقبل حتى نحو 0.5 مع ضوضاء أعلى إذا سمحت حساباتها، لضبط الضوضاء والاهتزاز، وحتى 0.7 مع مخفضات الضوضاء. ففي المثال السابق: كثافة البخار عند المخرج (6 bara) نحو 3.2 kg/m³، فالتدفق الحجمي 5000 ÷ 3.2 ≈ 1560 m³/h، وفي مخرج 2 بوصة (d ≈ 50 mm):

$$v = 354 \times 1560 \div 2500 \approx 220 \text{ m/s}$$

أي ماخ 0.44 تقريبًا، فوق الحد المفضل (0.3) وضمن المقبول (0.5)، فتُراجع الضوضاء المحسوبة. وتوسيع المخرج إلى 3 بوصات (d ≈ 76 mm) يخفضه إلى نحو 96 m/s.

تحذير من الجريان ثنائي الطور: حين يدخل الصمام خليط من سائل وغاز، أو سائل يومض داخله، لا تصح صيغ السائل ولا الغاز وحدهما؛ فالكثافة الفعلية تتغير على طول المسار، وقد يبلغ التدفق الاختناق عند سرعات أقل كثيرًا من سرعة الصوت في أي من الطورين. وطريقة ISA/IEC للمخاليط (كثافة فعالة بترجيح الكسر الكتلي ونموذج تمدد متجانس) تقريبية، وتختلف نتائج المصنّعين فيها بنسبة قد تتجاوز 20%. فالقاعدة العملية: احسب بطريقة المصنّع مع بيان كسر الغاز والكثافتين عند المدخل، واطلب هامشًا في السعة، وتوقع تآكلًا وضوضاء أعلى، واختر مخرجًا موسعًا وترمًا مقاومًا.

15.5 التكهف والوميض والضوضاء: الخدمات القاسية

التكهف (Cavitation): حين يهبط الضغط في الوريد المنقبض دون ضغط البخار تتكوّن فقاعات، ثم تنهار بعنف حين يعود الضغط فوق Pv في المخرج (الشكل 15-4، اليمين). النتيجة: ضوضاء كطقطقة الحصى، واهتزاز، وتآكل حفري في الكباس والكرسي وجدار المخرج قد يثقب الجسم في أسابيع. يُقدَّر خطره بمؤشر سيغما:

الشكل 15-6: *مسار الضغط في مثال توضيحي: في الترم أحادي المرحلة يهبط الوريد المنقبض دون ضغط البخار فيتكهف، وفي الترم متعدد المراحل تبقى كل خطوة فوق Pv، ومع خانق منفصل (Choke) يحمل معظم الهبوط يقع الضرر في مقعده القابل للإبدال.*

$$\sigma = (P1 - Pv) \div (P1 - P2)$$

فكلما صغرت σ اشتد التكهف؛ وينشر المصنّعون لكل ترم قيمًا حدية (σ للبداية، وللتلف) وفق ISA-RP75.23. وعلاجه بالترتيب: تقليل ΔP عبر الصمام (فتحات مقيدة بعده تحمل جزءًا من الهبوط)، أو رفع P2 بنقل الصمام إلى موضع أخفض أو أقرب إلى الوعاء، أو ترم متعدد المراحل (Multi-Stage) يهبط فيه الضغط على خطوات لا تصل أي منها إلى Pv، أو ترم يقسم الجريان إلى نفاثات صغيرة متصادمة (Drilled Cage) تنهار فقاعاتها بعيدًا عن المعدن، وأخيرًا مواد أصلب (Stellite، Tungsten Carbide) تُطيل العمر ولا تمنع الظاهرة.

الوميض (Flashing): حين يبقى P2 دون Pv يخرج المائع خليطًا من سائل وبخار بسرعة عالية جدًا فيَبري المعدن بريًا (تآكل ناعم لامع لا حفري). لا يُمنع الوميض لأن الديناميكا الحرارية تفرضه (مياه تغذية إلى مزيل الهواء، متكثف إلى خزان مفتوح)، بل يُدار: صمام زاوي يوجّه الخليط إلى الأسفل مباشرة، ومادة مقاومة للكشط، وأنبوب مخرج أكبر قطرًا، وتقليل السرعة، وتركيب الصمام أقرب ما يمكن إلى الوعاء المستقبِل.

الضوضاء (Noise): مصدرها في الغازات اضطراب الجريان عالي السرعة (Aerodynamic)، وفي السوائل التكهف والاضطراب (Hydrodynamic)، وتُحسب وفق IEC 60534-8-3 و-8-4 على بعد متر من الأنبوب. الحد الشائع في المواصفات 85 dBA (وفي بعضها 80). والعلاج من المصدر أفضل من العلاج على المسار: ترم منخفض الضوضاء (مسارات متعددة ومتعرجة تهبط بالضغط على مراحل وتقسم النفاثة)، ثم العزل الصوتي للأنبوب (Path Treatment: يخفض 5 إلى 15 dBA لكنه لا يخفض الاهتزاز الذي قد يكسر التوصيلات الصغيرة)، وكواتم بعد الصمام، وجدار أنبوب أثخن. وسرعة المخرج فوق 0.3 ماخ تستدعي التحقق بحساب الضوضاء، وسرعته فوق نحو 0.5 ماخ، أو x فوق 0.6 على غاز، إشارة إلى أن الصمام سيكون مصدر ضوضاء يحتاج تصميمًا خاصًا لا كاتمًا.

15.6 الإغلاق وفئات التسرب

يحدد معيار ANSI/FCI 70-2 (ومكافئه IEC 60534-4) ست فئات لتسرب الكرسي في اختبار المصنع:

الفئة	التسرب المسموح	الترم النموذجي	متى تُطلب
Class I	لا يُختبر (بالاتفاق)	—	نادرًا
Class II	0.5% من سعة الصمام	معدن على معدن، كباس متوازن بحلقة	الصمامات المتوازنة الكبيرة حيث الإغلاق غير مهم
Class III	0.1%	معدن على معدن	التحكم العام
Class IV	0.01%	معدن على معدن مع تلميع (Lapping)	الافتراضي لأغلب صمامات التحكم
Class V	5×10^{-4} mL/min من الماء لكل بوصة من قطر الفتحة لكل psi	معدن على معدن بقوة إغلاق عالية، أو متوازن بحلقة مانعة	التحكم بالغاز، تجنب فقد المنتج، الخدمة الحرارية التي تلحق ضررًا بالتسرب

الفئة	التسرب المسموح	الترم النموذجي	متى تُطلب
Class VI	فقاعات في الدقيقة (0.15 إلى 6.75 mL/min بحسب القطر حتى 8 بوصات)	كرسي لين (PTFE، PEEK)	الإغلاق المحكم في الغازات والسوائل النظيفة دون حرارة عالية

كيف أختار؟ الفئة IV هي الافتراضي لصمام تحكم يعدّل ولا يعزل؛ وتُرفع إلى V حين يكون التسرب نفسه خسارة (غاز، منتج ثمين، حرارة تضر بما بعده) وإلى VI حين يلزم إغلاق شبه كامل في مائع نظيف بارد. وحدّ هذه المقارنة أنها تصف اختبار المصنع بالماء أو الهواء عند ضغط محدد، فالتسرب في الخدمة بمائع وحرارة وقوة مشغل مختلفة لا يُقرأ منها. والخطأ الأكثر كلفة هو طلب الفئة VI «احتياطًا» ثم الاعتماد عليها للعزل: يدفع المهندس ثمن مشغل أكبر وكرسي لين يفقد إحكامه مع الحرارة والزمن، ثم يكتشف يوم الصيانة أن صمام التحكم ليس صمام عزل.

> **تنبيهات:** الاختبار يجري بالماء أو الهواء في المصنع عند ضغط تفاضلي محدد (3.5 bar أو ضغط التشغيل الأقصى للفئة V)، فالتسرب في الخدمة الفعلية بمائع وحرارة وقوة مشغل مختلفة يكون مختلفًا. والصمام «الذي يغلق تمامًا» في ورقة البيانات لا يعفي من صمام عزل يدوي أو آلي مستقل حين يكون العزل مطلبًا للسلامة أو الصيانة؛ وتشغيل صمام التحكم عند الإغلاق شبه الكامل باستمرار (أقل من 5% من الشوط) يحفر الكرسي بسرعة (Wire Drawing) ويحول الفئة IV إلى II في شهور.

15.7 المشغلات: القوة والسرعة ووضع الفشل

المشغل الغشائي النابضي (Spring-Diaphragm): الأشيع في التحكم المستمر: غشاء مطاطي مقوّى فوق صحن تعمل عليه إشارة الهواء (عادة 0.2 إلى 1.0 bar، أو حتى نحو 4 bar مع موضّع بحسب الحد المسموح للغشاء) ضد نابض. رخيص، وموثوق، ووضع فشله محدد بالنابض، لكن قوته محدودة بمساحة الغشاء (نحو 300 إلى 3000 cm^2) وضغطه المسموح. نوعان: **مباشر (Direct-Acting)** يدفع الهواء الساق إلى الأسفل،

وعكسي **(Reverse-Acting)** يرفعها، والجمع بين اتجاه المشغل واتجاه الكباس (يدفع للإغلاق Push-Down-to-Close أو للفتح) هو ما يحدد وضع الفشل (الشكل 15-7).

المشغل المكبسي (Piston): مكبس في أسطوانة بضغط أعلى (3 إلى 10 bar)، أحادي الفعل مع نابض أو مزدوج الفعل. قوة أكبر وشوط أطول وصلابة أعلى (مقاومة لقوى المائع)، ويلزم موضّع دائمًا. مزدوج الفعل لا وضع فشل له بذاته (يثبت حيث هو إذا حُبس الهواء، أو ينزلق) ما لم يُضف نابض أو خزان هواء وصمام قفل. شائع في الصمامات الدوارة الكبيرة وصمامات منع الانفصال الهوائي (Surge) في الضواغط (الفصل 35) والصمامات ذات الضغط التفاضلي العالي.

المشغل الكهربائي (Electric/MOV): محرك وعلبة تروس مع مفاتيح عزم وحد، أو مشغل كهروميكانيكي خطي للتحكم المستمر (EMA). لا يحتاج هواء، ومناسب للأماكن البعيدة، لكنه أبطأ (عشرات الثواني إلى دقائق للصمامات الكبيرة)، ويثبت عند انقطاع الكهرباء (Fail-Last) إلا مع بطارية أو نابض مخزن (Spring-Return Electric) محدود الأحجام. وفي التحكم المستمر يُنتبه إلى عدد دورات البدء والتوقف المسموح للمحرك في الساعة.

المشغل الكهروهيدروليكي (Electro-Hydraulic): مضخة صغيرة ومجمّع ضغط ومكبس هيدروليكي؛ قوة عالية جدًا وصلابة وسرعة ودقة موضع، مع نابض أو مراكم لوضع الفشل؛ في التوربينات (صمامات الوقود والبخار، الفصلان 34 و37) وخطوط الأنابيب.

الشكل 15-7: *أنواع المشغلات ووضع الفشل: الغشائي المباشر (هواء فوق الغشاء) والعكسي (هواء تحته) يحددان مع اتجاه الكباس هل يفتح الصمام أم يغلق عند فقد الهواء؛ والمكبسي مزدوج الفعل والكهربائي يثبتان حيث هما ما لم يُضف نابض أو خزان أو بطارية.*

حجم المشغل: حساب القوة. يجب أن يتغلب المشغل على أربعة أحمال في أسوأ حالة: القوة غير المتوازنة من ضغط المائع على الكباس (ΔP_shutoff × مساحة الفتحة للكباس غير المتوازن)، وقوة الإغلاق اللازمة لفئة التسرب (قوة على محيط الكرسي: نحو 7 N لكل مليمتر من المحيط (نحو 40 lbf/in للفئة IV، وقيم أعلى كثيرًا للفئة V بمعدن تزداد مع ضغط الإغلاق وتؤخذ من منحنى المصنّع، وقد تبلغ عشرات N/mm، واحتكاك الحشوة (مئات النيوتنات في PTFE، وأضعافها في الغرافيت)، ووزن الأجزاء المتحركة. والمشغل الغشائي يعطي قوة = ضغط الهواء × المساحة الفعالة، ضد النابض الذي قوته = المعدل × الانضغاط. **ضبط المنضدة (Bench Set)** هو مدى ضغط الهواء الذي يحرك الساق من بداية الشوط إلى نهايته والصمام على المنضدة بلا مائع (مثلًا 0.4 إلى 1.2 bar)، وهو يحدد كم من قوة النابض متاح للإغلاق وكم من الضغط يلزم للفتح الكامل. ويُعرَّف ضبط المنضدة في ISA بلا احتكاك الحشوة (الصمام بلا حشوة أو بحشوة مرخاة)، ولذلك يُضاف الاحتكاك عند حساب القوة المتاحة في الخدمة.

مثال محلول (قوة الإغلاق وضبط المنضدة):

- **المعطيات:** صمام كروي 2 بوصة، قطر الفتحة 40 mm، كباس غير متوازن، الجريان إلى الفتح (المائع يرفع الكباس)، أقصى ضغط تفاضلي عند الإغلاق 12 bar، الفئة IV، حشوة PTFE احتكاكها 150 N، مشغل غشائي عكسي (هواء للفتح، يغلق بالنابض) مساحته الفعالة 460 cm^2.
- **الافتراضات:** قوة الإغلاق للفئة IV تُؤخذ 7 N/mm (نحو 40 lbf/in) من محيط الكرسي (قيمة نموذجية من أدلة المصنّعين)، والوزن مهمل، والضغط الساكن فوق الكباس لا يساعد على الإغلاق (الجريان إلى الفتح).
- **الحل:**
  - مساحة الفتحة: $A = \pi \times r^2 = \pi \times 0.02^2 = 1.257 \times 10^{-3}\ m^2$
  - القوة غير المتوازنة: $F = \Delta P \times A = 12 \times 10^5 \times 1.257 \times 10^{-3} =$ 1508 N (تدفع الكباس نحو الفتح)
  - قوة الكرسي: 7 N/mm × محيط الكرسي $= \approx 7 \times \pi \times 40 \approx$ 880 N
  - الاحتكاك = 150 N
  - مجموع ما يجب أن يوفره النابض عند الإغلاق = 1508 + 880 + 150 ≈ 2540 N
  - الضغط المكافئ على الغشاء = 2540 ÷ 0.046 ≈ 55,200 Pa ≈ 0.55 bar
  - التفسير: يجب أن يكون الحد الأدنى لضبط المنضدة (الضغط الذي يبدأ عنده الصمام بالتحرك عن الكرسي) ≤ 0.55 bar؛ يُختار نابض بضبط منضدة 0.6 إلى 1.4 bar فيتوفر هامش نحو 0.05 bar × 460 cm^2 ≈ 230 N فوق المطلوب، وهو هامش ضيق يُفضَّل معه نابض أقوى قليلًا إن سمح ضغط التغذية.

- **الفتح الكامل:** يلزم هواء يتغلب على النابض عند أقصى انضغاط (1.4 bar) زائد الاحتكاك (150/0.046 = 0.03 bar) مع هامش، أي نحو 1.6 bar عند الغشاء، فيُضبط منظم التغذية على 2.5 إلى 3 bar (ضمن حد الغشاء) ويعمل الموضّع في المدى 0 إلى 2.5 bar.
- **معنى النتيجة:** لو بقي ضبط المنضدة الافتراضي 0.2 إلى 1.0 bar لكانت قوة النابض عند الإغلاق 920 N = 460 cm² × 0.2 bar فقط، فلا يغلق الصمام عند 12 bar ويتسرب، ويُتهم الكرسي خطأً. تغيير النابض أو ضبطه إجراء صيانة شائع، ويجب أن يُسجَّل في ورقة بيانات الصمام لا في ذاكرة الفني.

يلخص الشكل 15-8 القوى التي يجب أن يغلبها المشغل في الاتجاهين: عند الإغلاق يجب أن يتغلب النابض (أو الهواء بحسب الفعل) على قوة الاختلال والاحتكاك وحمل الكرسي معًا، وعند الفتح الكامل يجب أن يتغلب الطرف الآخر على النابض المضغوط والاحتكاك. ومن هنا تأتي قاعدة الموردين: المشغل يُحجّم على أقصى فرق ضغط إغلاق (Shutoff ΔP) لا على فرق الضغط التشغيلي.

الشكل 15-8: *مخطط الجسم الحر لقوى الساق والكباس في صمام كروي غير متوازن بمشغل غشائي نابضي: قوة الهواء على الغشاء، وقوة النابض، واحتكاك الحشوة الذي يقاوم الحركة دائمًا، وقوة الاختلال من فرق الضغط على مساحة الكرسي، وحمل الكرسي اللازم لفئة التسرب المطلوبة.*

15.7.1 المشغلات الدوارة والترم المتوازن وزمن الشوط

حجم المشغل الدوار بالعزم: تُحدد الصمامات الدوارة (الفراشة والكرة والسدادة) بالعزم لا بالقوة. ويعطي المصنّع ثلاث قيم عند الضغط التفاضلي الأقصى للإغلاق: **عزم الانفكاك (Breakout Torque)** وهو الأكبر عادة لأنه يغلب احتكاك السكون في الكراسي والحشوة، و**العزم الديناميكي (Dynamic Torque)** أثناء الحركة بما فيه عزم المائع على القرص (وهو في الفراشة يعمل غالبًا في اتجاه الإغلاق ويبلغ ذروته قرب 70° إلى 80° من الفتح)، و**عزم الإغلاق (Seating Torque)** اللازم لضغط القرص على الكرسي اللين أو

المعدني. ويُختار المشغل بحيث يفوق عزمه المتاح في كل نقطة من الشوط العزم المطلوب بمعامل أمان 1.25 إلى 1.5 (وأكبر للخدمات الملاطية والغازات الجافة). وللمشغل ذي الرف والترس (Rack and Pinion) عزم ثابت على الشوط كله، أما النير الاسكتلندي (Scotch Yoke) فعزمه أكبر عند طرفي الشوط حيث يلزم الانفكاك والإغلاق وأقل في الوسط، فهو الأنسب للصمامات الكبيرة ربع الدورة؛ ويُقارن دائمًا منحنى عزم المشغل بمنحنى عزم الصمام على الشوط كله لا برقم واحد.

الشكل 15-9: *منحنى العزم المطلوب لصمام فراشة على الشوط مقابل عزم مشغلين: الرف والترس بعزم ثابت، والنير الاسكتلندي بعزم أكبر عند طرفي الشوط حيث يلزم الانفكاك والإغلاق؛ ويجب أن يفوق عزم المشغل العزم المطلوب في كل نقطة بمعامل أمان 1.25 إلى 1.5.*

الترم المتوازن (Balanced Trim): في الصمام الكروي غير المتوازن تعمل قوة $\Delta P \times$ مساحة الكرسي كلها ضد المشغل، فتتضخم قوة المشغل في الأقطار والضغوط الكبيرة. أما الكباس المتوازن فيحمل ثقوبًا تنقل ضغط المدخل إلى جانبيه، وتُختم فجوته مع القفص بحلقة موازنة (Balance Seal) من PTFE أو غرافيت أو معدن؛ فتنخفض القوة غير المتوازنة إلى ما يمر عبر خلوص الحلقة ويكفي مشغل أصغر بكثير. وثمنه أن حلقة

الموازنة مسار تسرب إضافي، فالفئة المعتادة IV (وقد تبلغ V بحلقة معدنية خاصة) لا VI، وهي جزء يُبدّل في الصيانة ويتأثر بالحرارة والجزيئات.

تقدير زمن الشوط: يحكم زمن الشوط حجم المشغل ومعدل تدفق الهواء إليه أو منه. وللتقدير الأولي: الهواء اللازم لشوط كامل (باللتر القياسي) ≈ حجم المشغل باللتر × (ضغط الشوط بالبار + 1)، ومعدل التدفق يحدده أضعف عنصر في المسار: الموضّع وحده يعطي عادة 5 إلى 10 m^3/h قياسي (Cv من 0.1 إلى 0.2)، والمعزز الحجمي أو الصمام الملفي كبير المنافذ 50 إلى 200 m^3/h (Cv من 1 إلى 4). فمشغل كباسي حجمه 10 L يشوط عند 4 bar يحتاج نحو 50 L قياسية؛ بالموضّع وحده (نحو 8 m^3/h ≈ 130 L/min) يستغرق نحو 20 إلى 25 s، ومع معزز Cv ≈ 2 (نحو 100 m^3/h) أقل من ثانيتين. ويُلاحظ أن الحساب الدقيق يكون بصيغ الجريان المختنق للهواء عبر المنافذ، وأن التفريغ عادة أبطأ من التعبئة لأنه يمر عبر منفذ العادم وكاتم الصوت. وهذا الحساب هو ما يقرر الحاجة إلى المعزز والصمام الملفي كبير المنافذ في صمامات منع الانفصال الهوائي وصمامات الفصل السريعة.

جدول مقارنة: مشغلات صمامات التحكم

المعيار	غشائي هوائي بنابض	مكبسي هوائي	كهربائي (محرك)	هيدروليكي / كهروهيدروليكي
القوة والشوط	متوسطة، شوط حتى نحو 100 mm	عالية، شوط طويل	عالية بالعزم، بطيء	الأعلى، أي شوط
السرعة	جيدة	جيدة إلى سريعة	بطيئة (عشرات الثواني)	سريعة جدًا (أقل من 1 s)
وضع الفشل	بالنابض تلقائيًا (FC/FO)	يحتاج نابضًا أو خزان هواء	يبقى في مكانه (إلا بمركّم نابض)	يحتاج مركّمًا أو نابضًا

المعيار	غشائي هوائي بنابض	مكبسي هوائي	كهربائي (محرك)	هيدروليكي / كهروهيدروليكي
الدقة والتموضع	جيدة مع موضّع	جيدة مع موضّع	ممتازة (تغذية راجعة داخلية)	ممتازة
ما يحتاجه	هواء أجهزة نظيف جاف	هواء بضغط أعلى (4 إلى 7 bar)	كهرباء وحماية Ex للمناطق الخطرة	وحدة هيدروليكية وصيانة الزيت
الصيانة	الأقل	متوسطة (أختام)	متوسطة (تروس، حرارة المحرك)	الأعلى
الاستخدام المعتاد	معظم صمامات التحكم	الصمامات الكبيرة والفراشة والكرة	مواقع بلا هواء، الخطوط البعيدة	صمامات التوربينات والضواغط ومنع الانفصال الهوائي

كيف أختار؟ الغشائي الهوائي بنابض هو الاختيار الافتراضي لصمام تحكم مستمر، ولا يُترك إلا لسبب محسوب: قوة أو شوط لا يوفرهما الغشاء فالمكبسي، ولا هواء أجهزة أصلًا فالكهربائي، وسرعة وقوة معًا في التوربينات والضواغط فالهيدروليكي. وحدّ الجدول أنه لا يحمل أرقام القوة اللازمة، فالقرار الحقيقي يأتي من حساب القوة عند أقصى ضغط تفاضلي للإغلاق (15.7) ومن زمن الشوط المطلوب (15.7.1)، لا من العمود «القوة والشوط». والخطأ الأكثر كلفة هو قبول مشغل بحجم افتراضي من المورد مع ضبط منضدة قياسي، فلا يغلق الصمام عند أقصى ضغط تفاضلي ويُتهم الكرسي خطأً، أو اختيار مكبسي مزدوج الفعل لصمام يحتاج وضع فشل ثم اكتشاف أنه يثبت حيث هو عند فقد الهواء.

15.8 وضع الفشل: القرار الذي يملكه مهندس العمليات والسلامة

التعريفات: FC (يغلق عند الفشل، Fail-Closed) وFO (يفتح عند الفشل) وFL (يثبت آخر موضع، Fail-Last أو Fail-Locked) وFI (غير محدد، Fail-Indeterminate). وتُوصف

الإشارة بـ ATO (هواء للفتح، فيغلق عند فقده) وATC (هواء للإغلاق). و«الفشل» هنا فقد هواء الأجهزة أو الإشارة، وليس فشل النظام الرقمي الذي يبقي الخرج غالبًا على آخر قيمة.

كيف يُقرر: بسؤال واحد يجيب عنه HAZOP (الفصل 28): إذا فُقد الهواء في المصنع كله، ما الوضع الأكثر أمانًا لهذا الصمام؟ أمثلة:

الخدمة	وضع الفشل المعتاد	السبب
وقود إلى فرن أو توربين أو مرجل	FC	يمنع تراكم وقود غير محترق
تغذية إلى وعاء أو عمود	FC	يمنع الفيضان والضغط الزائد
ماء تبريد إلى مبادل أو مفاعل	FO	يمنع ارتفاع الحرارة والانفلات
إعادة تدوير الضاغط (Anti-Surge)	FO	يحمي الضاغط من الانفصال الهوائي (Surge) عند فقد الهواء
بخار إلى مسخّن	FC عادة	يمنع الحرارة الزائدة (ما لم يكن التجمد أخطر)
تصريف سائل من فاصل عالي الضغط إلى منخفض	FC	يمنع انفلات الغاز (Gas Blow-by)
صمام تحكم ضغط إلى الشعلة	FO	يفرّغ الضغط إلى مكان آمن
صمامات تعديل في شبكة كبيرة تُفضَّل فيها استمرارية التشغيل	FL بخزان هواء وقفل	يمنع اضطراب المصنع كله من فقد هواء محلي

وضع الثبات (Fail-Last): يتحقق بصمام قفل (Lock-Up) يحبس الهواء في المشغل عند انخفاض التغذية دون قيمة مضبوطة، مع خزان هواء لتعويض التسرب؛ ويُحدَّد زمن الثبات المضمون (مثلًا 30 دقيقة) لأن الهواء يتسرب. وهو لا يصلح لصمامات السلامة، ويصلح لصمامات التعديل التي يكون تغيرها المفاجئ أخطر من ثباتها.

> **قاعدة السلامة:** وضع الفشل يُختار لحماية العملية لا لراحة التشغيل، ويُكتب على ورقة البيانات وعلى P&ID (سهم أو FC/FO تحت الصمام، الفصل 5) وعلى لوحة الصمام، ويُختبر في التشغيل التجريبي بفصل الهواء فعليًا لا بمحاكاة الإشارة؛ فالكثير من الصمامات «FC على الورق» وُجدت تثبت أو تفتح بسبب صمام ملفي مركّب معكوسًا أو موضّع يحبس الهواء.

15.9 الموضّع (Positioner): لماذا وكيف

لماذا؟ المشغل الغشائي وحده يعطي موضعًا يتناسب مع ضغط الإشارة نظريًا؛ لكن احتكاك الحشوة وقوى المائع ومرونة الغشاء تجعل الموضع الفعلي ينحرف عن المطلوب بمنطقة ميتة (Dead Band) قد تبلغ 2% إلى 5% أو أكثر. الموضّع يقيس الموضع الفعلي للساق ويعدّل ضغط المشغل حتى يطابق المطلوب (الشكل 15-10، اليسار)، فيخفض المنطقة الميتة إلى أقل من 0.5%، ويسرّع الاستجابة (يضخ هواءً أكثر من إشارة 4–20 mA عبر I/P وحده)، ويسمح بضغط مشغل أعلى لقوة أكبر (ضمن الحد المسموح للغشاء، نحو 4 bar عادة، وحتى 6 bar أو أكثر في المشغل المكبسي)، ويسمح بتقسيم المدى (Split Range: صمامان على إشارة واحدة) وعكس الفعل وتغيير الخاصية.

الأنواع:

- **الهوائي (Pneumatic):** إشارة 0.2 إلى 1.0 bar مقارنة بموضع الساق عبر كامة ونابض؛ ما زال في الوحدات القديمة والمناطق التي لا تريد كهرباء.
- **الكهروهوائي التناظري (Electro-Pneumatic):** 4–20 mA إلى محول I/P داخلي ثم توازن قوى؛ بسيط وسريع، بلا تشخيص.
- **الرقمي الذكي (Digital Valve Controller):** معالج دقيق يقارن الإشارة (4–20 mA مع HART، أو Foundation Fieldbus، أو PROFIBUS PA) بموضع مقاس بحساس لا تلامسي (Hall أو مغناطيسي) ويحرك صمام دليل بخوارزمية ضبط قابلة للتهيئة. يعطي: تهيئة آلية (Auto-Calibration للشوط)، وخاصية

مبرمجة (خطية، نسبة متساوية، فتح سريع، أو 21 نقطة مخصصة)، ومعالجة الإغلاق المحكم (Tight Shutoff Cutoff: يدفع الصمام إلى القاع دون 2% مثلًا)، وحدود السرعة، وتشخيصًا يشمل بصمة الصمام (Valve Signature: ضغط المشغل مقابل الموضع، الشكل 15-10 الوسط)، والاحتكاك، ومدى الشوط، وتسرب الهواء، وزمن الاستجابة، وعدّاد الدورات، وإنذارات الانحراف عن المطلوب.

ما يقرؤه المهندس في بصمة الصمام: ميل الخط = معدل النابض على مساحة الغشاء (ثابت للمشغل)؛ الإزاحة عند الموضع صفر = ضبط المنضدة الأدنى؛ عرض حلقة التخلف بين الصعود والنزول = ضعف قوة الاحتكاك مقسومًا على مساحة الغشاء (فحشوة غرافيت مشدودة تعطي حلقة عريضة)؛ انحناء في نهاية الشوط = تلامس الكباس بالكرسي أو بالقفص (قوة الإغلاق)؛ تعرجات = التصاق أو تآكل في الموجّه.

الشكل 15-10: *حلقة الموضّع داخل حلقة التحكم: يقارن الموضّع بين المطلوب من المتحكم والموضع الفعلي من الحساس ويعدّل هواء المشغل (أعلى)؛ بصمة الصمام وما يُقرأ من ميلها وإزاحتها وعرض حلقتها (أسفل يسارًا)؛ واختبار الخطوات وفق ISA-75.25 الذي يكشف المنطقة الميتة وزمن الاستجابة (أسفل يمينًا).*

اختبار الشوط الجزئي (Partial Stroke Test): في صمامات الإغلاق الطارئ (SDV/ESDV) التي تبقى مفتوحة سنوات، يحرك الموضّع الرقمي أو وحدة اختبار مخصصة الصمام 10% إلى 20% ثم يعيده دون إيقاف العملية، فيكشف الالتصاق ويخفض احتمال الفشل عند الطلب ويطيل فترة اختبار الإثبات الكامل (القسم 29.5). ويُشترط أن يكون منطق الاختبار غير قادر على منع الإغلاق الكامل عند طلب حقيقي.

تنبيه: الموضّع يصلح المنطقة الميتة ولا يصلح الكسب: صمام بحجم مضاعف يبقى خشنًا، وصمام باحتكاك شديد يتذبذب داخل حلقة الموضّع نفسها (Limit Cycle) بدل أن يتذبذب في حلقة العملية. والموضّع في حلقات التدفق السريعة كان يُنصح بتجنبه قديمًا (يسبب تذبذبًا لأن حلقة الموضّع الهوائية ليست أسرع بكثير من حلقة التدفق)؛ والموضّعات الرقمية الحديثة سريعة بما يكفي، ويُضبط كسبها على «مستقر» لا «سريع» في هذه الحلقات.

سلوك الموضّع عند فقد الإشارة وتقسيم المدى: عند انقطاع إشارة 4–20 mA (أو هبوطها دون 3.6 mA) يتصرف الموضّع وفق تهيئته لا وفق وضع فشل الصمام بالضرورة: الموضّع الهوائي التقليدي والمحول I/P يفرغان المشغل فيذهب الصمام إلى وضع فشله. أما الموضّع الرقمي فيُهيأ إما على التفريغ نفسه أو على **التجميد في الموضع (Fail-Freeze / Fail-in-Place)** بحيث يحبس هواء المشغل (مع صمام قفل هوائي Lock-up) ويبقى الصمام حيث كان، وهو ما يُختار في الخدمات التي يكون فيها التحرك المفاجئ أخطر من الثبات، بشرط أن تكشف الحلقة الفقد وتنذر به. ويُوثّق هذا السلوك في ورقة البيانات ويُختبر في فحص الحلقة بقطع الإشارة فعلًا. أما **تقسيم المدى (Split Range)** فيُنفَّذ إما في الموضّعين (الأول يتحرك من 4 إلى 12 mA أي 0 إلى 50% من الإشارة، والثاني من 12 إلى 20 mA؛ أو هوائيًا 0.2 إلى 0.6 ثم 0.6 إلى 1.0 bar) أو في نظام التحكم بخرجين منفصلين، وهو الأفضل لأنه يسمح بتداخل صغير أو منطقة ميتة عند نقطة الانتقال ويجعل كل موضّع يعمل بمدى إشارة كامل. وأشهر تطبيقاته التحكم بضغط الوعاء بصمام إمداد غاز وصمام تنفيس، والتحكم بالحرارة بصمامي بخار وماء تبريد؛ ويُنتبه إلى أن الخاصية المركبة تنكسر عند نقطة الانتقال، وأن الكسب يتضاعف لأن كل صمام يقطع شوطه الكامل بنصف الإشارة.

جدول مقارنة: أجيال الموضّع

المعيار	هوائي (3–15 psi)	كهروهوائي تناظري (4–20 mA)	رقمي ذكي (HART / FF)
الإشارة	هوائية من متحكم هوائي أو I/P خارجي	تيار مباشر إلى الموضّع	تيار + اتصال رقمي
الخاصية والمعايرة	ميكانيكية (كامة)، ضبط يدوي بالصفر والمدى	كامة أيضًا، ضبط يدوي	برمجية: خطية/متساوية النسبة/مخصصة، معايرة آلية
التشخيص	لا شيء	لا شيء	بصمة الصمام، الاحتكاك، الشوط الجزئي، الانحراف
استهلاك الهواء	مرتفع (انسياب مستمر)	متوسط	منخفض
الحساسية للاهتزاز	متوسطة	متوسطة	منخفضة (بلا روافع تقريبًا)
السعر	الأقل	متوسط	الأعلى (يُسترد بالتشخيص)
متى يبقى مبررًا	الأنظمة الهوائية القديمة والمواقع بلا كهرباء	الاستبدال البسيط في الحلقات غير الحرجة	الحلقات الحرجة والصمامات الكبيرة وصمامات SIS (اختبار الشوط الجزئي)

كيف أختار؟ الموضّع الرقمي هو الاختيار الافتراضي اليوم لكل صمام يُشترى جديدًا، لأن فرق السعر يُسترد بأول تشخيص، ويبقى الكهروهوائي التناظري للاستبدال المباشر في حلقة غير حرجة، والهوائي حيث لا كهرباء ولا حاجة إلى تشخيص. وحدّ الجدول أنه لا يبيّن ما يلزم لاستثمار التشخيص: بروتوكول يصل إلى نظام إدارة الأصول، وبصمة أساسية مسجلة عند التشغيل، وشخص يقرؤها. والخطأ الأكثر كلفة هو شراء موضّع رقمي ثم استخدامه كموضّع تناظري: لا بصمة أساسية، ولا إنذار انحراف، ولا اختبار شوط جزئي في صمامات SIS، فتُدفع الزيادة ولا يُجنى منها شيء.

15.10 الملحقات في مسار الهواء والإشارة

يبين الشكل 15-11 الملحقات الشائعة وترتيبها. القاعدة: كل ملحق يُبرَّر بحاجة محسوبة، لأن كل عنصر في مسار الهواء يضيف زمنًا وموضع تسرب ونقطة فشل ووثيقة صيانة.

- **مرشح ومنظم (Filter Regulator):** على كل صمام؛ يضبط ضغط التغذية للموضّع والمشغل (ولا يتجاوز الحد الأقصى للغشاء)، ويرشح 5 µm أو 40 µm بحسب المصنّع. ومقياس ضغطه هو أول ما يُنظر إليه عند أي شكوى.
- **محول I/P:** يحول 4–20 mA إلى 0.2–1.0 bar؛ اليوم داخل الموضّع غالبًا، ومستقل فقط للصمامات الصغيرة بلا موضّع.
- **المعزز الحجمي (Volume Booster):** مضخم هوائي يتبع ضغط خرج الموضّع لكنه يمرر تدفق هواء أكبر بكثير، للمشغلات الكبيرة والصمامات التي تحتاج شوطًا كاملًا في ثانية أو ثانيتين (منع الانفصال الهوائي، الفصل 35). ويُضبط تجاوزه (Bypass Needle) لتفادي التذبذب مع الموضّع.
- **صمام التنفيس السريع (Quick Exhaust):** يفرّغ هواء المشغل مباشرة إلى الجو بدل العودة عبر الموضّع، لتقصير زمن الإغلاق أو الفتح الطارئ.
- **الصمام الملفي (Solenoid Valve):** بين الموضّع والمشغل، يُغذّى من نظام السلامة أو الفصل؛ عند سقوط التغذية يفرّغ المشغل فيذهب الصمام إلى وضع الفشل بغض النظر عن إشارة التحكم. وأنواعه وبنود اختياره ومنطق تغذيته وتكراره في القسم 15.11.
- **صمام القفل (Lock-Up)** وخزان الهواء: لوضع الثبات (15.8).
- **المفاتيح الحدية ومرسل الموضع:** مفاتيح ميكانيكية أو قربية تعطي «مفتوح» و«مغلق» للمنطق والتسلسل؛ ومرسل موضع 4–20 mA (أو الموضّع الرقمي عبر HART) يعطي الموضع المستمر لغرفة التحكم والمؤرخ، وهو ضروري في صمامات السلامة وفي أي صمام يُشتبه في التصاقه.

- **العجلة اليدوية (Handwheel):** على الجانب أو الأعلى، للتشغيل عند فقد الهواء أو للتحديد الميكانيكي للشوط؛ يجب أن تكون في وضع «محايد» ومختومة أثناء التشغيل الآلي، وكثير من حالات «الصمام لا يستجيب» سببها عجلة تُركت على حد.
- **الأنابيب والوصلات:** أنابيب فولاذ مقاوم للصدأ 6 mm أو 10 mm (¼" أو ⅜")، وبقطر أكبر للمشغلات الكبيرة والزمن القصير؛ وميل لتصريف المتكثف؛ وتجنب الحلقات التي يتجمع فيها الماء.

الشكل 15-11: *ترتيب ملحقات صمام التحكم في مسار الهواء والإشارة: من هواء الأجهزة عبر المرشح والمنظم إلى الموضّع ثم المعزز ثم المشغل، مع الصمام الملفي من نظام السلامة وصمام القفل وخزان الهواء لوضع الثبات والمفاتيح الحدية ومرسل الموضع.*

استهلاك الهواء: المشغل الغشائي في الحالة المستقرة لا يستهلك إلا ما يسرّبه الموضّع (نحو 0.3 إلى 1.5 Nm^3/h للموضّع الرقمي)، لكن عند الحركة يستهلك حجم المشغل مضروبًا في نسبة الضغط؛ وتُحسب الأحمال الديناميكية (عدة صمامات تتحرك معًا عند الفصل) في حساب ضاغط هواء الأجهزة وخزانه (القسم 25.8.2).

15.11 الصمامات الملفية (Solenoid Valves): الأنواع والاختيار ومنطق التغذية

الصمام الملفي هو الجسر بين القرار الكهربائي (مخرج منفصل من DCS أو PLC أو SIS) والعالم الهوائي أو الهيدروليكي الذي يحرّك المشغل. هو أصغر عنصر في حلقة السلامة وأكثرها إهمالًا، مع أن الفصل النهائي لأي وظيفة سلامة يمر عبره: إن لم يفرّغ الملف المشغل في الزمن المطلوب فلا قيمة للمنطق ولا للحساسات. ويُستخدم الصمام الملفي أيضًا مباشرة على الموائع الصغيرة (هواء تطهير، ماء تبريد، عيّنات المحللات) بدل صمام تحكم كامل.

كيف يعمل: ملف كهربائي حول أنبوب فيه غطاس (Plunger) من حديد مغناطيسي يعود بنابض. عند تغذية الملف يُسحب الغطاس فيفتح مسارًا ويغلق آخر، وعند قطع التغذية يعيده النابض. الصمام **مباشر الفعل (Direct-Acting)** يحرّك الغطاس الكرسي بنفسه، فيعمل من الضغط صفر ولا يحتاج إلى فرق ضغط، لكنه يحتاج إلى ملف أكبر كلما كبر المنفذ. والصمام **المقاد (Pilot-Operated)** يستخدم الغطاس لفتح ثقب صغير يترك ضغط الخط نفسه يحرّك غشاءً أو كباسًا كبيرًا، فيعطي منافذ كبيرة بملف صغير، لكنه يحتاج إلى فرق ضغط أدنى (نحو 0.3 إلى 0.5 bar) ليعمل، ويفشل في التفريغ الكامل أو على الفراغ. وهناك الصمام **الثنائي الاستقرار (Latching)** الذي يبقى في وضعه بلا تغذية ويتبدل بنبضة؛ يوفّر الطاقة، لكنه لا يصلح للفشل الآمن لأنه لا «يعرف» فقد التغذية.

التسمية بالمنافذ والأوضاع: يُسمى الصمام بعدد منافذه ثم عدد أوضاعه: **2/2** (منفذان، وضعان: مفتوح أو مغلق) للموائع، وهو مغلق عادةً (NC) أو مفتوح عادةً (NO) بلا تغذية؛ **3/2** ثلاثة منافذ (تغذية 1، مخرج 2 إلى المشغل، تنفيس 3) للمشغلات أحادية الفعل ذات النابض، وهو الأشيع على صمامات الفصل؛ **5/2** خمسة منافذ للمشغلات ثنائية الفعل حيث يُضغط جانب ويُفرَّغ الآخر؛ و**5/3** بوضع وسطي (مغلق أو مفرَّغ أو مضغوط) لتثبيت الصمام في مكانه عند فقد الإشارة. ويبين الشكل 15-12 البنية والتركيب على المشغل وترتيبات التكرار.

الشكل 15-12: *الصمام الملفي: (أ) مقطع تخطيطي لصمام 3/2 مباشر الفعل في وضعي عدم التغذية (المشغل يفرّغ عبر المنفذ 3) والتغذية (الهواء يمر من 1 إلى 2)؛ (ب) تركيبه بين الموضّع والمشغل النابضي فيضمن ذهاب الصمام إلى وضع الفشل عند فقد التغذية؛ (ج) ترتيبا التكدار: على التوالي (1oo2) للسلامة، وعلى التوازي (2oo2) للإتاحة.*

التغذية للفصل أم قطع التغذية للفصل؟ الأصل في وظائف السلامة هو **قطع التغذية للفصل (De-Energize-to-Trip)**: الملف مغذًّى طوال التشغيل العادي، وأي فقد للتغذية أو انقطاع في الكابل أو عطل في بطاقة المخرج يؤدي إلى التفريغ والذهاب إلى الوضع الآمن، فالأعطال الشائعة كلها تصب في جهة الأمان. أما **التغذية للفصل (Energize-to-Trip)** فتُستخدم حيث يكون الإيقاف الكاذب خطرًا بحد ذاته (مثل تشغيل نظام الغمر بالماء أو إطلاق غاز الإطفاء)، وتشترط IEC 61511 عندها **مراقبة الخط (Line Monitoring)**: تيار صغير دائم عبر الملف والكابل يكشف الانقطاع والقصر، مع تغذية مؤمَّنة (UPS) وتشخيص للبطاقة. والخلط بين الفلسفتين على الصمام نفسه (ملف ETT في حلقة تفترض DTT) خطأ يظهر فقط يوم الطلب.

ما يُحدَّد في ورقة بيانات الصمام الملفي:

- **السعة (Cv أو Kv) وزمن التفريغ:** الملف لا يحدد فقط «يفتح/يغلق» بل بأي سرعة يفرّغ المشغل. منفذ ¼ بوصة بمعامل Cv نحو 0.5 يكفي لمشغل صغير، أما المشغلات الكبيرة (عدة لترات) فتحتاج إلى منفذ ½ أو ¾ بوصة أو إلى **صمام**

تنفيس سريع (Quick Exhaust) يفتحه الملف ويكون هو مسار التفريغ الفعلي (القسم 15.10). ويُحدد زمن الشوط المطلوب في ورقة البيانات ويُقاس في الاختبار.

- **الجهد والقدرة:** الأشيع 24 V DC، وقد يكون 110 أو 230 V AC. تُحدد قدرة الملف (من 0.5 W للملفات ذات الأمان الجوهري إلى 10 W أو أكثر للملفات الكبيرة)، وتيار الاندفاع للملفات AC (أضعاف تيار الإمساك)، ونسبة التشغيل (ED 100% = للملفات المغذاة دائمًا)، والحد الأدنى لجهد السحب (Pick-up) عادة 85% من الاسمي والحد الأعلى 110%. ويُحسب هبوط الجهد على الكابل والحاجز قبل اختيار الملف (المثال أدناه).
- **فئة الحرارة والبيئة:** الملف المغذَّى دائمًا يسخن؛ تُحدد فئة العزل (F أو H) ودرجة حرارة السطح لفئة T في المنطقة الخطرة (الفصل 26)، وحماية الغلاف IP66 أو IP67، وتصنيف Ex: **Ex d** للملفات القوية، أو **Ex ia** للملفات منخفضة القدرة عبر حاجز، أو **Ex m** (مغلّف بالراتنج) وهو الأشيع على الملفات الصغيرة. ويُحدد مدى حرارة الوسط (تجمّد الماء المتكثف في هواء الأجهزة يوقف الغطاس).
- **المواد والوسط:** جسم نحاسي للهواء النظيف، وفولاذ 316 للبيئات البحرية وغاز H_2S، وحشوات NBR أو FKM أو EPDM بحسب الزيت والحرارة؛ ويُشترط هواء أجهزة بجودة ISO 8573-1 (القسم 25.8.2) وشبكة على منفذ التنفيس تمنع الحشرات والغبار.
- **التركيب:** واجهة **NAMUR (VDI/VDE 3845)** تركّب الصمام مباشرة على المشغل بلا أنابيب، وتحدد اتجاه التنفيس؛ وتُحدد التغذية عبر الموضّع أو مستقلة عنه. ويُذكر وجود **تشغيل يدوي (Manual Override)** أم لا، مع تحذير: تركه مُعشَّقًا بعد الاختبار يعطّل وظيفة السلامة كلها، ولذلك يُفضَّل نوع يعود تلقائيًا أو يُمنع بالكامل على صمامات SIS.

- **الحماية الكهربائية:** ثنائي حر (Flyback Diode) أو كابح جهد (Varistor) على طرفي الملف يحمي بطاقة المخرج والمرحّل من جهد القطع الحثي، ويُراعى أن الثنائي يبطئ سقوط الملف قليلًا فيُحسب في زمن الاستجابة.

التكرار والتصويت: ملفان **على التوالي** في مسار الهواء (1oo2) يعني أن أيًّا منهما يكفي للتفريغ، فينخفض احتمال الفشل عند الطلب (PFD) لكن أي عطل كاذب في أحدهما يوقف الوحدة. وملفان **على التوازي** (2oo2) يعنيان أن التفريغ يحتاج إلى فصل كليهما، فلا يوقف عطل واحد الوحدة لكن PFD يرتفع. والتوليفة 2oo3 أو 1oo2 بتشخيص (1oo2D) تجمع الميزتين بكلفة أعلى. القرار من حساب SIL ومعدل الإيقاف الكاذب (الفصل 29) لا من العادة. وتُركَّب الملفات المكررة بحيث يُمكن اختبار كل منها على حدة دون إيقاف (ترتيب تجاوز مؤقت موثَّق).

التشخيص واختبار الشوط الجزئي: الصمام الملفي جزء من اختبار الإثبات (القسم 29.5)، ويمكن للنظام أن ينبّض الملف نبضة قصيرة (أجزاء من الثانية) تحرّك الصمام بضعة بالمئة دون إيقاف العملية، أو يقوم الموضّع الذكي بالوظيفة نفسها مع تسجيل زمن الاستجابة. ويُقاس تيار الملف دوريًا: تياره ينخفض قليلًا مع ارتفاع حرارة الملف لارتفاع مقاومة النحاس، ويرتفع عند حدوث قصر بين اللفات بتلف العزل.

الأعطال الشائعة: احتراق الملف (جهد زائد، حرارة محيطة عالية، ماء داخل الغلاف)، والتصاق الغطاس بالزيت أو الغبار من هواء غير نظيف، وانتفاخ الحشوة بالزيت، وانسداد منفذ التنفيس بالحشرات فيتباطأ التفريغ، وتوصيل المنافذ معكوسًا (التغذية على منفذ التنفيس)، والخلط بين NC وNO، وغياب الثنائي الحر فتتلف بطاقة المخرج، وتشغيل يدوي تُرك مُعشَّقًا.

مثال محلول (اختيار سعة الملف والتحقق من جهده):

- **المعطيات:** مشغل نابضي حجمه 2 L عند 3.0 barg يجب أن يفرّغ (يذهب الصمام إلى وضع الفشل) خلال ثانيتين. الملف بالأمان الجوهري 24 V DC، تياره الاسمي 24 mA، وأدنى جهد سحب 16 V. الحاجز 28 V/300 Ω، والكابل 200 m بمقطع 1.5 mm² (نحو 12 Ω/km للموصل الواحد)، ومصدر بطاقة المخرج 24 V.
- **الافتراضات:** هواء عند 20 °C، وتدفق مختنق أثناء معظم التفريغ (P2 جوي وP1 أعلى من ضعفه)، ونهمل مقاومة أنابيب التوصيل القصيرة، ونأخذ ضغطًا متوسطًا أثناء التفريغ 2.5 bara.
- **الحل:**
  - الهواء المخزون في المشغل = الحجم × (الضغط المطلق ÷ الضغط الجوي) = 2 L × (4.0/1.013) ≈ 7.9 NL (لتر معياري)
  - التدفق المتوسط اللازم لإخراج نحو 90% منه خلال 2 s ≈ 7.1/2 = 3.6 NL/s ≈ 12.8 Nm³/h
  - للتدفق المختنق للهواء تُستعمل الصيغة التقريبية: Q_N ≈ 13 × Kv × P1 (Q_N بوحدة Nm³/h وP1 بوحدة bara؛ تقريب هندسي بحدود ±20% يكفي للاختيار مع هامش)
  - ومنها: Kv ≈ 12.8/(13 × 2.5) ≈ 0.39، أي Cv ≈ 0.45
  - الاختيار: ملف بمنفذ ¼ بوصة بمعامل Kv من 0.5 إلى 0.7 (هامش ونسبة تفريغ أكبر). ولو كان المشغل 10 L لاحتجنا إلى Kv نحو 2 وهو ما لا يعطيه ملف صغير، فنضيف صمام تنفيس سريع.
  - **الجهد:** هبوط الحاجز = I × R = 0.024 × 300 = 7.2 V
  - هبوط الكابل (ذهابًا وإيابًا) = 0.024 × 2 × 0.2 × 12 ≈ 0.12 V

  - الجهد على الملف = 24 − 7.2 − 0.12 ≈ 16.7 V، وهو أعلى بقليل من 16 V المطلوبة.
  - التفسير: الهامش (0.7 V) ضعيف؛ أي هبوط في مصدر 24 V أو ارتفاع في مقاومة الملف بالحرارة يفشل السحب.
- **معنى النتيجة:** السعة هينة، لكن الجهد هو القيد الفعلي في حلقات الأمان الجوهري؛ الحل ملف بتيار أقل (مثلًا 12 mA) أو حاجز بمقاومة أدنى أو عازل جلفاني، مع اختبار جهد الملف بالفولتميتر عند التشغيل والتسجيل في سجل الإثبات.

خطوات فحص الصمام الملفي واختباره:

1. طابق لوحة الصمام مع ورقة البيانات: عدد المنافذ والأوضاع، NC أو NO، الجهد والقدرة، تصنيف Ex ودرجة IP، ومادة الجسم والحشوة.
2. تحقق من توصيل المنافذ (1 تغذية، 2 مشغل، 3 تنفيس) ومن اتجاه التنفيس بعيدًا عن الأجهزة، ومن وجود شبكة أو كاتم صوت على منفذ التنفيس.
3. قس مقاومة الملف باردًا وقارنها بالقيمة المحسوبة من الجهد والقدرة الاسميين؛ فرق أكبر من 10% يشير إلى لفات محترقة أو ملف خاطئ.
4. قس الجهد على طرفي الملف وهو مغذًّى في الميدان (لا عند البطاقة) وتأكد أنه فوق جهد السحب الأدنى بهامش، ثم قس التيار.
5. غذِّ الملف واقطع التغذية عدة مرات مع قياس زمن ذهاب الصمام إلى وضع الفشل بساعة إيقاف أو بمسجل الموضع؛ قارنه بالزمن المطلوب في ورقة البيانات.
6. تحقق من الفشل الآمن: افصل الكابل عند صندوق التوصيل (لا عند البطاقة) وتأكد أن الصمام يذهب إلى وضع الفشل في حلقات DTT، وأن إنذار مراقبة الخط يظهر في حلقات ETT.

7. افحص التسرب: أغلق التغذية وراقب ضغط المشغل؛ أي هبوط مستمر يشير إلى تسرب في كرسي الملف أو الحشوة.
8. اختبر التشغيل اليدوي إن وُجد، وأعده إلى وضعه الطبيعي وسجّل ذلك في نموذج الاختبار؛ على صمامات SIS تحقق أنه من النوع ذاتي العودة أو مؤمَّن بقفل.
9. في الملفات المكررة اختبر كل ملف على حدة مع الآخر مغذًّى، ثم اختبر الترتيب كاملًا.
10. سجّل النتائج (المقاومة، الجهد، التيار، الزمن) في سجل اختبار الإثبات مع التاريخ، فالاتجاه عبر السنوات يكشف الملف الذي يقترب من الفشل قبل أن يفشل.

الصمامات الأخرى: لصمامات العزل، وصمامات تنظيم الضغط ذاتية التشغيل، وصمامات الأمان وتنفيس الضغط فصلٌ خاص بها (الفصل 16)، يبدأ بمرجع سريع للصمامات الصناعية.

15.12 المواد والحشوة والتوصيلات

الجسم: الفولاذ الكربوني المصبوب WCB للخدمة العامة حتى نحو 425 °C؛ وLCB/LCC للخدمة المنخفضة الحرارة (حتى −46 °C)؛ والفولاذ المقاوم للصدأ CF8M (316) للتآكل والحرارة العالية والخدمة المبردة؛ والفولاذ المخلوط 1¼Cr-½Mo وWC6/WC9 و2¼Cr-1Mo) للبخار عالي الحرارة؛ والدوبلكس والسبائك النيكلية (Monel، Hastelloy) للمياه المالحة والأحماض والكلوريدات. وفي خدمة كبريتيد الهيدروجين (Sour) تُطبَّق NACE MR0175/ISO 15156 على الجسم والترم والمسامير (القسم 25.10).

الترم: الفولاذ 316 للعام، و17-4PH و440C للصلادة، وطلاء Stellite (سبيكة كوبالت) على أسطح الكرسي والكباس والموجّه للخدمة الكاشطة والحرارة العالية والتكهف الخفيف، والكرابيد لأشد الخدمات. وفي الحرارة فوق 300 °C تُراعى الخلوصات

(Clearances) بين الكباس والقفص لتمدد المواد المختلفة، وتُتجنب المواد المتماثلة التي تلتحم (Galling) ما لم تُطلَ.

الحشوة: PTFE بحلقات V-Ring هو الافتراضي (احتكاك منخفض، حتى نحو 230 °C، لا يصلح مع الإشعاع ولا بعض الأمينات)؛ والغرافيت للحرارة العالية والحريق (احتكاك أعلى بأربعة إلى ستة أضعاف، ويحتاج موضّعًا وحساب قوة). والتحميل الحي (Live-Loaded) بنوابض صحن يحفظ الضغط على الحلقات مع التآكل والحرارة ويقلل الحاجة إلى الشد الدوري؛ وحشوات الانبعاث المنخفض المعتمدة وفق ISO 15848-1 (فئة AH أو BH) أو API 622 لخدمات المركبات العضوية المتطايرة. وشد الحشوة أكثر من اللازم لوقف تسرب هو أشيع سبب لتحول حلقة مستقرة إلى متذبذبة (15.13).

الغطاء والمنفاخ: غطاء ممدد (Extended Bonnet) يبعد الحشوة عن الحرارة (فوق 230 °C أو تحت −29 °C) ليعمل PTFE ويُمنع تجمد الساق؛ والمنفاخ المعدني (Bellows Seal) يمنع أي تسرب حول الساق في السوائل السامة أو الفراغ العالي، مع حشوة احتياطية فوقه ووصلة لمراقبة فشله.

التوصيلات: شفاه بوجه مرتفع RF للفئات 150 إلى 600، وحلقة RTJ للفئات العالية والغاز عالي الضغط؛ ولحام تناكبي (BW) في البخار عالي الضغط؛ ومسافة الوجهين وفق ISA 75.08 (وتُطابق المسافة القياسية حتى يمكن استبدال صمام بآخر من مصنّع مختلف). ويُسجَّل اتجاه الجريان (سهم على الجسم) ووضع التركيب (الساق رأسية للأعلى غالبًا، أو أفقية للصمامات الكبيرة بدعامة) على ورقة البيانات والرسم.

تركيب الصمام في الخط: يُركب صمام التحكم عادة ضمن **محطة صمام (Valve Station)**: صمام عزل قبله وبعده، وصمام تجاوز يدوي (Bypass) بحجم يكفي التشغيل المؤقت ويُغلق ويُختم في الخدمة، ووصلة تصريف أو تنفيس بين صمامي العزل لتفريغ الضغط قبل الصيانة، ومساحة فوقه لرفع المشغل وحوله للوصول إلى الموضّع والحشوة. ويُفضّل طول مستقيم لا يقل عن 5 أقطار قبله و10 أقطار بعده لتقليل الضوضاء والتآكل واضطراب القياس المجاور، وتُثبَّت الأنابيب بحيث لا يحمل الصمام إجهادها. وتُوضع

الساق رأسيةً إلى الأعلى ما أمكن (المشغل الغشائي والموضّع فوق الخط)، ويُتجنب الوضع المقلوب لأن المكثفات والجزيئات تتجمع في الحشوة، ويُدعم المشغل الثقيل إن كان أفقيًا. ويُتحقق من اتجاه الجريان بالسهم على الجسم (الفراشة والكرة ذات الاتجاه الواحد)، ومن أن الشفاه والحشيات تطابق فئة الخط، ومن وجود مسافة لفك الجسم من الخط. **وقبل التركيب** يكون الجسم قد اجتاز في المصنع **الاختبار الهيدروستاتيكي للغلاف** عند 1.5 × ضغط التصميم لفئة الشفة (وفق IEC 60534-4 / ISA-75.19 وAPI 598)، واختبار تسرب الكرسي بالفئة المطلوبة، وتُطلب شهادتاهما ضمن وثائق الصمام.

الشكل 15-13: *محطة صمام التحكم (Control Valve Station) برموز ISA. صماما عزل قبل الصمام وبعده، وتجاوز يدوي كروي مغلق ومختوم في الخدمة، وتصريف أو تنفيس بين صمامي العزل، ومخفضان حول صمام أصغر من الخط، وطول مستقيم لا يقل عن 5D قبله و10D بعده.*

15.12.1 اختيار المواد لخدمات الإنتاج، والخانق المنفصل

مواد الصمامات في منشآت إنتاج النفط والغاز أقل تنوّعًا منها في الصناعات الكيميائية لأن الموائع أقل عدوانية؛ لكن فيها أربع خدمات لها قواعد خاصة تقلب الاختيار المعتاد رأسًا على عقب.

(أ) تشقّق الإجهاد بالكلوريد — الفخّ الذي يعكس القاعدة. الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي (السلسلة 300) عرضة لتشقّق الإجهاد بالكلوريد فوق نحو **60 °C**، ويشتدّ الأمر مع ارتفاع الحرارة. وقد يقع التشقّق عند تركيز كلوريد لا يتجاوز **100 جزء في المليون**، وهو تركيز شائع في المياه المنتَجة. أما الفولاذ الكربوني والمقاوم للصدأ المارتنسيتي (السلسلة 400) فلا تكون المشكلة فيهما عادة.

والنتيجة العملية التي تفاجئ كثيرين: في الزيت الخام المسخَّن والماء المنتَج المسخَّن، لا يُختار جسمٌ من الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي — بل يُتجنَّب. والأفضل جسم من الفولاذ الكربوني مع ترم من سبيكة النيكل-النحاس (K-Monel)، بكلفة أعلى بنحو 30% من الصمام القياسي؛ ويكفي في أغلب الحالات جسم فولاذ كربوني مع ترم مقاوم للصدأ مارتنسيتي.

(ب) الحديد الزهر — قيد يُذكر في سياق الحريق. الحديد الزهر (وبدرجة أقل الحديد المطيل) عرضة للكسر بالصدمة الميكانيكية أو بالتغيّر المفاجئ في الحرارة. **والحالة الحرجة: صمام سخّنه حريق ثم أُصيب بماء الإطفاء، فينكسر.** ولذلك لا يُستعمل الحديد الزهر في خدمة مكافحة الحريق، ولا حيث يُحتمل تعرّضه لحريق مجاور.

(ج) خدمات إنتاج بعينها

الخدمة	القاعدة	تحذير
غاز وزيت حلو (Sweet)	جسم فولاذ كربوني مصبوب وترم المصنّع القياسي	يُراجع الحد الأدنى لحرارة التصميم قبل قبول WCB
غاز وزيت حامض (Sour)	معالجة حرارية للجسم إلى صلادة لا تتجاوز 22 HRC، وإبدال أجزاء السلسلة 400 بسبائك أوستنيتية، ومسامير خاصة	**يُطلب الصمام بشهادة NACE**، ولا يُكتفى بقول المورّد؛ والحديد الزهر ممنوع
ثاني أكسيد الكربون **الرطب**	جسم مقاوم للصدأ 304 أو 316	ثاني أكسيد الكربون **الجاف** غير أكّال ولا يحتاج مواد خاصة

الخدمة	القاعدة	تحذير
الماء المنتَج	كما مواد التيار الهيدروكربوني المصاحب في أغلب الشركات؛ والحديد الزهر أحيانًا لمقاومته الماء المالح وانخفاض كلفته	ينطبق عليه فخّ تشقّق الكلوريد إن كان مسخَّنًا
ماء البحر المُهوّى	البرونز البحري هو الأمثل لكنه غالٍ؛ والحل الوسط أنبوب مبطَّن بالإيبوكسي مع ترم برونزي؛ والألياف الزجاجية تنتشر	**لا حديد زهر في خدمة الحريق**؛ والفولاذ الكربوني مع ترم مقاوم للصدأ يُستعمل مع قبول الإبدال الدوري
هيبوكلوريت الصوديوم (قبل الحقن)	PVC فوق 5 ppm ودون 38 °C؛ و CPVC حتى 93 °C	دون 5 ppm لا تلزم احتياطات؛ والتركيز **قبل الحقن** هو الخطر لا بعده
تيار بئر حامل للرمل	ترم مقسّى: كربيد التنغستن أو الكروم أو Stellite (سبيكة 6 أو 12)	**ويُختار نمط صمام لا يحبس الرمل**: كروي أحادي المنفذ موجَّه من الأعلى أو كروي زاوي؛ وتُتجنَّب الأسطح المتحركة المتقاربة والتجاويف التي تتجمع فيها المواد الصلبة

(د) هبوط الضغط العالي في السوائل، والخانق المنفصل. صمام التحكم الخانق في خدمة سائلة يتآكل بفعل هبوط الضغط، ويشتد الأمر في الوميض والتكهّف. والقاعدة العملية:

- **هبوط ضغط فوق 1000 kPa (150 psi)** في سائل نظيف أو في خدمة وميض: يُنظر في طلاء الكباس والمقعد بـ Stellite أو الكروم.
- **هبوط ضغط فوق 2800 kPa (400 psi)** أو في خدمة تكهّف: يُنظر في طلاء كربيد التنغستن.

والحل الأعمّ والأوفر: خانق منفصل (Choke) في مصبّ صمام التحكم يتحمّل 50 إلى 75% من هبوط الضغط. فيُستقبل الضرر في نبيطة بسيطة رخيصة بمقعد قابل للإبدال، ويُطال عمر الصمام الأغلى والأصعب إصلاحًا. وهذا منطق تصميمي يستحق التعميم: **حين يكون التلف حتميًا، يُوجَّه إلى القطعة التي يسهل إبدالها.**

(هـ) الخانق نفسه: الخانق صورة من الصمام الزاوي مصمَّمة لهبوط الضغط الكبير، بمقعد مقسّى قابل للإبدال (يسمّى ميدانيًا **الحبّة – Bean**) يمتد إلى المخرج. و**الخانق القابل للضبط (Adjustable Choke)** ذو فتحة متغيّرة يُستعمل حيث تتغير الظروف ويُراد التحكم بالتدفق أو بهبوط الضغط؛ و**الخانق الثابت (Fixed Choke)** حيث يُراد حدّ للتدفق فقط وتتولى نبائط أخرى ضبط المعدل الفعلي. **وفي الصمام الزاوي عمومًا يجب أن يدخل الجريان من الجانب ويخرج بعيدًا عن الساق** في خدمة هبوط الضغط الكبير، فيقع ضرر التكهّف على المخرج وأنابيب المصبّ بدل أن يقع على الكباس والساق.

اختيار نمط الصمام بحسب الموضع في منشأة إنتاج — قائمة مرجعية سريعة:

الموضع	الحل الشائع
رأس البئر	خانق
مدخل مسخّن الخط	خانق بأنف طويل
مخرج الزيت من الفاصل	كروي أحادي المنفذ موجَّه من الأعلى، أو كروي زاوي
مخرج الغاز من الفاصل	كروي بقفص، أو كروي بقفص منخفض الضوضاء
مخرج الماء من الفاصل	كروي أحادي المنفذ، أو زاوي، أو مضاد للتكهّف، أو خانق
صمامات الإيقاف	بوابي أو سدادي أو كرة (Ball)
منظومات المياه	فراشة
إعادة تدوير الضاغط	كروي بقفص منخفض الضوضاء
الجمع أو التوزيع	كروي ثلاثي المسار، أو فراشة

الموضع	الحل الشائع
الخلط	كروي مزدوج المنفذ

ملاحظة اقتصادية عامة: ترتيب الكلفة تصاعديًا في العموم: الفراشة، ثم البوابي، ثم السدادي، ثم الكرة (Ball)، ثم السدادي الدوّار، ثم الكروي المستقيم (Globe) وهو الأغلى. والصمامات بلا شفاه (فراشة رقاقية، صمام كرة بين شفتين، وصمام كرة ملولب) أرخص من نظائرها المشفَّهة، والشفاه المنزلقة أرخص من المتكاملة وخصوصًا حين تكون مادة الجسم غالية. **وهذه اتجاهات لا قواعد**، واستثناءاتها كثيرة، وتتغيّر بتغيّر السوق؛ فتُراجع البدائل المقبولة لكل تطبيق دوريًا بدل الاعتماد على ترتيب محفوظ.

◆ ◆ ◆

15.13 الأداء الديناميكي: المنطقة الميتة وزمن الاستجابة

يحدد المعيار ISA-75.25.01 (ومقابله IEC 60534-9 لاختبارات القفزة) اختبارات الأداء الديناميكي، وأهم مقاييسها:

المقياس	التعريف	القيمة الجيدة لصمام تحكم	ما يفسده
المنطقة الميتة (Deadband)	أصغر تغير في الإشارة يعكس اتجاه الحركة ويُحدث حركة	≥ 0.5% إلى 1% (مع موضّع)	الاحتكاك، والخلوص في الوصلات، وفقد الحركة في المشغلات الدوارة
التمييز (Resolution)	أصغر تغير في الاتجاه نفسه يُحدث حركة	≤ 0.5%	التصاق الحشوة، وكسب الموضّع المنخفض
زمن الاستجابة T86	الزمن حتى يبلغ الموضع 86% من خطوة صغيرة (1% إلى 2%)	أقل من 1 إلى 3 s للصمامات الصغيرة والمتوسطة	حجم المشغل، ومسار الهواء، وضبط الموضّع

المقياس	التعريف	القيمة الجيدة لصمام تحكم	ما يفسده
زمن الشوط الكامل	من 0 إلى 100% أو العكس	يحدده التطبيق (منع Surge: 1 إلى 2 s للفتح؛ عام: 10 إلى 30 s)	سعة الموضّع والمعزز والأنابيب
التجاوز (Overshoot)	تجاوز الموضع للمطلوب ثم العودة	< 10% من الخطوة	كسب الموضّع العالي، والمعزز بلا تجاوز مضبوط
الخطية (Linearity)	انحراف الموضع عن خط مستقيم بين 0 و100%	±1%	الوصلات الميكانيكية، والكامة البالية

مثال محلول (تقدير المنطقة الميتة من اختبار الخطوات):

- **المعطيات:** في الوضع اليدوي أُرسلت إلى صمام خطوات صغيرة عند 50%: خطوة +1% لم يتحرك الصمام؛ خطوة +1% أخرى (المجموع 2%) تحرك 1.4%؛ ثم خطوات 1%−: الأولى لم تحرك، والثانية حركته 1.3%−.
- **الافتراضات:** الموضّع مضبوط وحساس الموضع سليم؛ الإشارة الفعلية تساوي المطلوبة (تحققت بقياس التيار).
- **الحل:** المنطقة الميتة ≈ 0.6% ≈ 1.4% − 2% صعودًا و1.3% − 2% ≈ 0.7% نزولًا؛ فالصمام يحتاج نحو 0.6% إلى 0.7% تغير في الإشارة بعد عكس الاتجاه قبل أن يتحرك. وهذا فوق حد 0.5% لحلقة تدفق دقيقة، ومقبول لحلقة مستوى بطيئة.
- **معنى النتيجة:** المنطقة الميتة 1% في حلقة كسبها العملياتي عالٍ تعني دورة حدية (Limit Cycle) في المتغير بسعة تساوي 1% مضروبة في كسب العملية، لا يزيلها أي ضبط للمتحكم، بل يخفيها التخميد ويزيلها إصلاح الصمام.

علاقة ذلك بضبط المتحكم (الفصل 18): قبل ضبط أي حلقة تتذبذب، افحص الصمام أولًا: ضع المتحكم في اليدوي؛ فإن استمر التذبذب فمصدره خارجي (اضطراب دوري)؛ وإن توقف فأرسل خطوات صغيرة؛ فإن كانت الاستجابة متأخرة أو قافزة فالصمام هو السبب. ومن اللافت أن نسبة كبيرة من الحلقات في المصانع (تقدّرها بعض الدراسات بنحو الثلث) تعمل في اليدوي، وكثير منها بسبب الصمام لا بسبب المتحكم.

15.14 الاختيار وورقة البيانات

خطوات اختيار صمام التحكم:

1. اجمع بيانات الخدمة من مهندس العمليات لثلاث حالات على الأقل (أدنى، عادي، أقصى): التدفق، وP1 وP2 عند كل حالة، والحرارة، والكثافة أو الكتلة المولية، واللزوجة، وضغط البخار والحرج، ونسبة الحرارة النوعية، والطور، والمواد الصلبة أو الغازات المذابة.
2. حدد وظيفة الصمام: تعديل مستمر، أم إغلاق مع تعديل، أم إغلاق فقط (فالأخير صمام عزل آلي لا صمام تحكم).
3. حدد وضع الفشل من HAZOP وفلسفة التحكم (15.8).
4. حدد فئة التسرب المطلوبة فعلًا، لا الأعلى «احتياطًا» (الفئتان V وVI تكلّفان أكثر وتفرضان مشغلًا أكبر).
5. احسب Cv عند الحالات الثلاث، وتحقق من الاختناق والتكهف والوميض والضوضاء والسرعة (15.4 و15.5).
6. اختر النوع من الجدول في 15.2 بحسب الخدمة والقطر والضغط التفاضلي والميزانية، ثم الخاصية بحسب نسبة هبوط الضغط (15.3).
7. اختر الحجم بحيث تقع الحالة العادية بين 50% و70% والقصوى دون 80% إلى 90%، وراجع الحاجة إلى ترم مخفض (Reduced Trim) في جسم أكبر لخفض السرعة.

8. اختر المواد للجسم والترم والحشوة والحشيات وفق المائع والحرارة وNACE ومتطلبات الانبعاث (15.12).
9. حدد المشغل بحساب القوة عند أقصى ضغط تفاضلي عند الإغلاق (15.7)، ووقت الشوط المطلوب، والموضّع ونوع إشارته وبروتوكوله، والملحقات المبررة (15.10)، وشهادة المنطقة الخطرة (الفصل 26).
10. أعدّ ورقة البيانات (نموذج ISA-20 لصمام التحكم أو نموذج المالك) وأرفق بها حساب الحجم والضوضاء من المورد، وراجع ورقة المورد سطرًا سطرًا (القسم 27.7)، وسجّل رقم الوسم والخدمة على الجسم وفي قاعدة بيانات الأجهزة.

بنود ورقة بيانات صمام التحكم (ISA-20): الوسم والخدمة والخط ورقم P&ID؛ بيانات المائع في الحالات الثلاث؛ نوع الجسم والحجم والتصنيف والتوصيل والمادة؛ نوع الترم والخاصية وCv المقنن والمادة والفئة؛ الغطاء والحشوة؛ المشغل (النوع، والحجم، وضبط المنضدة، ووضع الفشل، وضغط التغذية)؛ الموضّع (النوع، والإشارة، والبروتوكول، والخاصية)؛ الملحقات؛ شهادات Ex وSIL وNACE والانبعاث؛ الضوضاء المحسوبة؛ الوزن والأبعاد؛ وبنود الاختبار (اختبار الضغط الهيدروستاتيكي، وتسرب الكرسي، والشوط، وبصمة الصمام).

مشروع الكتاب المتصل: وحدة ضغط الغاز (الجزء الأول). يتابع القارئ من هذا الفصل وحدة واحدة عبر الكتاب: ضاغط غاز طارد مركزي بمحرك كهربائي مع وعاء شفط (KOD) V-101 وفاصل تصريف ومبرد. في هذا الفصل نحدد صمامين:

- **صمام مستوى وعاء الشفط LV-101:** تصريف سائل هيدروكربوني خفيف من 12 barg (13 bara) إلى فاصل عند 3 barg (4 bara)؛ التدفق العادي 4 m^3/h والأقصى 10 m^3/h (حالة الحمل السائل)؛ SG = 0.72، Pv = 6 bara، Pc ≈ 45 bar. لأن P2 = 4 bara أقل من Pv فالخدمة **وميض** لا تكهف. الاختناق: FF = √(6/45) = 0.858؛ ΔP_choked = 0.81 × (13 − 0.858 × 6) = 0.96 − 0.28 bar: Kv (عادي) = 4 × ΔP الفعلي 9 bar، فيُحسب بـ 6.4 bar أقل من

(Cv = 1.6) = 1.34 (Cv = 3.9) = (أقصى) Kv، و√(0.72/6.4). الاختيار: 3.4. صمام زاوي 1 بوصة بترم مخفض Cv مقنن ≈ 6 (العادي عند 27% والأقصى عند 65%؛ وقبول الحالة العادية تحت 50% مقصود هنا لأن المدى بين العادي والأقصى 2.5:1 ولأن خدمة الوميض تفضّل جسمًا أوسع يخفض سرعة المخرج)، ترم من الفولاذ المقاوم للصدأ بطلاء Stellite ومخرج موسع موجه إلى الأسفل نحو الفاصل، خاصية نسبة متساوية (مدى التدفق واسع)، الفئة IV، مشغل غشائي هواء للفتح **يغلق عند الفشل** (لمنع انفلات الغاز إلى الفاصل المنخفض)، موضّع رقمي HART مع مرسل موضع، وصمام ملفي من وظيفة LZT-103 (المستوى المنخفض جدًا يغلقه لمنع انفلات الغاز إلى الفاصل؛ وهذا السيناريو يحلله جدول HAZOP في القسم 28.4). ويُركب أقرب ما يمكن إلى الفاصل ليبقى مخرج الخليط الوامض قصيرًا.

- **صمام إعادة التدوير (منع Surge) FV-102:** تُشرح متطلباته في القسم 35.5: من تصريف الضاغط بعد المبرد عند 31 bara (30 barg) إلى الشفط قبل V-101 عند 13 bara، غاز، x = 18 ÷ 31 = 0.58، يقترب من الاختناق، ترم منخفض الضوضاء، **يفتح عند الفشل**، مشغل مكبسي مع معزز حجمي وصمام تنفيس سريع، زمن فتح أقل من ثانيتين، خاصية خطية لأن حلقة منع الانفصال الهوائي تريد كسبًا ثابتًا، وموضّع رقمي بكسب مضبوط للسرعة.

وسيظهر الصمامان في قائمة I/O (القسم 1.8)، ومنطق التحكم (الفصل 18)، ومصفوفة السبب والنتيجة (31.16)، واختبارات الحلقات (القسم 14.13) والتشغيل التجريبي (الفصل 60 في الجزء القادم).

15.15 الفحص والمعايرة والاختبار: خطوات

(أ) ضبط المنضدة والشوط لمشغل غشائي (على المنضدة أو في الموقع بعد العزل):

1. تحقق من ورقة البيانات: نوع المشغل، ووضع الفشل، وضبط المنضدة المطلوب، والشوط المقنن.
2. افصل الموضّع (أو ضعه في وضع التجاوز) ووصّل منظم ضغط دقيقًا ومقياسًا معايرًا مباشرة إلى حجرة المشغل.
3. ارفع الضغط ببطء وسجّل الضغط الذي تبدأ عنده الساق بالحركة (يجب أن يساوي الحد الأدنى لضبط المنضدة ±5%)؛ وبلا ضغط مائع تكون الحركة الأولى ضد النابض والاحتكاك فقط.
4. واصل حتى يكتمل الشوط وسجّل ضغط نهاية الشوط (الحد الأعلى لضبط المنضدة)؛ وتحقق من مؤشر الشوط على النير أنه يطابق الشوط المقنن (مثلًا 20 mm أو 90°).
5. إن اختلف الحد الأدنى: اضبط ضاغط النابض (Spring Adjuster) وأعد الخطوتين 3 و4؛ وإن اختلف مدى الضبط (الفرق بين الحدين) فالنابض غير صحيح أو الغشاء مصاب.
6. خفّض الضغط وسجّل نقاط النزول نفسها؛ الفرق بين الصعود والنزول عند الموضع نفسه هو تخلف الاحتكاك (يجب أن يقل عن 10% من مدى الضبط لحشوة PTFE).
7. أعد الموضّع إلى الخدمة، وسجّل القيم في سجل الصمام.

(ب) تهيئة موضّع رقمي والتحقق منه:

1. تحقق من ضغط التغذية عند المنظم (وفق ورقة البيانات، عادة 3 إلى 6 bar) وأن المرشح نظيف.
2. تحقق من التوصيل الميكانيكي للتغذية الراجعة (ذراع أو مغناطيس) وأنه يغطي الشوط بلا انزلاق ولا ملامسة.
3. نفّذ المعايرة الآلية (Auto-Travel Calibration): يحرك الموضّع الصمام إلى الحدين ويسجلهما؛ وتأكد أن الصمام حرّ من العجلة اليدوية والقفل.

4. اضبط الخاصية (خطية عادة، لأن الخاصية الفعلية من الترم)، ووضع الفشل والفعل (مباشر أو عكسي)، وقيمة القطع للإغلاق المحكم، وحدود السرعة إن لزمت.
5. اختبر بخطوات 0، 25، 50، 75، 100% صعودًا ونزولًا، وسجّل الموضع الفعلي بمقياس على مؤشر الشوط لا من الموضّع نفسه، والخطأ يجب ألا يتجاوز ±1% والتخلف ±0.5%.
6. اختبر خطوات صغيرة (1% و2%) عند 50% وسجّل المنطقة الميتة وT86 (15.13).
7. سجّل بصمة الصمام الأساسية (Baseline Signature) وخزّنها في نظام إدارة الأصول لمقارنتها لاحقًا.
8. تحقق من أن إشارة 4 mA و20 mA من النظام (لا من مصدر محلي) تعطي 0% و100% في اختبار الحلقة الكامل.

(ج) اختبار تسرب الكرسي (ANSI/FCI 70-2) في الورشة:

1. ثبّت الصمام على منضدة الاختبار، وأغلقه بالمشغل عند ضغط الهواء الاسمي (لا بعزم يدوي إضافي).
2. طبّق الهواء أو الماء (للفئات II إلى IV)، والماء (للفئة V)، والهواء أو النيتروجين (للفئة VI) على المدخل بضغط الاختبار المحدد (3.5 bar أو ضغط الخدمة الأقصى للفئة V) وبالاتجاه الذي يُغلق الصمام فيه في الخدمة.
3. قس التسرب من المخرج بالمخبار المدرج أو بعدّ الفقاعات في الماء مدة دقيقة واحدة بعد الاستقرار.
4. قارن بالحد المسموح للفئة ولقطر الفتحة، وسجّل النتيجة والضغط والمائع والحرارة.
5. إن فشل: افحص الكرسي والكباس (خدوش، وترسبات، وتآكل بالقطع)، وقوة المشغل عند الإغلاق، والمحاذاة.

(د) اختبار الشوط الجزئي لصمام إغلاق طارئ:

1. تحقق من إذن التشغيل ومن أن الاختبار لن يؤثر في العملية عند حركة 15%.
2. أطلق الاختبار من الموضّع أو وحدة الاختبار أو نظام السلامة وفق الإجراء المعتمد.
3. راقب الموضع الفعلي بمرسل الموضع ومنحنى الضغط، والزمن حتى بدء الحركة (زمن الانفكاك Breakout).
4. قارن بالبصمة السابقة: زيادة ضغط الانفكاك دليل التصاق أو تآكل في الحشوة أو الكرسي.
5. سجّل النتيجة في سجل الإثبات (القسم 29.5) وأبلغ عن أي انحراف قبل أن يصبح فشلًا عند الطلب.

(هـ) جدول تشخيص سريع:

العَرَض	الاحتمالات بالترتيب	الفحص الحاسم
الصمام لا يتحرك مع الإشارة	لا هواء تغذية؛ عجلة يدوية على حد؛ صمام ملفي غير مغذى؛ الموضّع في اليدوي أو معطل؛ ساق عالقة	مقياس المنظم، ثم ضغط خرج الموضّع، ثم ضغط المشغل
يتحرك على قفزات	احتكاك حشوة عالٍ؛ التصاق في الموجّه؛ كسب موضّع منخفض	بصمة الصمام أو اختبار الخطوات
يتذبذب باستمرار	كسب الموضّع عالٍ؛ معزز بلا تجاوز؛ احتكاك مع حلقة سريعة؛ صمام كبير الحجم	ضع المتحكم في اليدوي وراقب
لا يغلق بإحكام	ضبط منضدة منخفض؛ ترسبات على الكرسي؛ تآكل بالقطع؛ قطع الإغلاق المحكم في الموضّع غير مفعّل	قس ضغط المشغل عند الإغلاق وقارن بالمطلوب
ضوضاء وتآكل سريع	تكهف أو وميض؛ سرعة مخرج عالية؛ ترم غير مناسب	احسب σ والسرعة من بيانات التشغيل الفعلية لا التصميمية

العَرَض	الاحتمالات بالترتيب	الفحص الحاسم
تسرب من الحشوة	حلقات بالية؛ ساق مخدوشة؛ فقد التحميل	شد بمقدار محدد فقط، وإلا استبدال

15.15.1 مرجع سريع: المشغلات في الأتمتة

تناول القسم 15.7 مشغلات الصمامات. ونعرض هنا مرجعًا سريعًا للمشغلات عمومًا، لأن مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس يقابلها خارج الصمامات أيضًا: في الملفات والمرحّلات والمحركات والمعدات المساعدة. فالمشغل (Actuator) جهاز يحوّل أمر المتحكم إلى تغير فيزيائي، غالبًا حركة أو قوة؛ وهو بهذا المعنى محوِّل للطاقة. ولأن أمر المتحكم ضعيف، تقع بين المتحكم والمشغل مرحلة تكبير: مرحّل، أو محرك سرعة، أو موضّع، أو صمام توجيه. وتنقسم المشغلات إلى ثلاث عائلات (الشكل 15-14 أ).

الشكل 15-14: *(أ) تصنيف المشغلات: كهروميكانيكية، وبقدرة الموائع، وبالمواد الفعالة. (ب) منحنى العزم والسرعة لمحرك تيار مستمر بمغناطيس دائم عند ثلاث فولتيات: خط مستقيم من عزم الإيقاف إلى سرعة اللاحمل.*

جدول مقارنة: عائلات المشغلات

المعيار	هوائي	هيدروليكي	محرك كهربائي	ملف لولبي	كهرضغطي
القوة أو العزم	متوسطة	عالية جدًا	متوسطة إلى عالية	صغيرة وشوط قصير	صغيرة جدًا
السرعة	عالية	عالية	متوسطة	عالية جدًا	عالية جدًا
دقة الموضع	متوسطة، وجيدة بموضّع	عالية مع مؤازر	عالية مع مشفر	فتح أو إغلاق فقط	عالية جدًا بإزاحة صغيرة
وضع الفشل الآمن	سهل بنابض	بمركم أو نابض	يحتاج بطارية أو نابضًا	بنابض عند فقد التغذية	—
المناطق الخطرة	مناسب بطبيعته	مناسب	يحتاج غلافًا معتمدًا	يحتاج ملفًا معتمدًا	يحتاج اعتمادًا
البنية التحتية	هواء أجهزة جاف	وحدة زيت ومضخة	كهرباء فقط	كهرباء فقط	مكبر جهد
الصيانة الغالبة	الأغشية والموانع والمرشحات	نظافة الزيت والموانع	التروس والمفاتيح	الملف والقلب	قليلة

قدرة الموائع: قانون باسكال. الضغط المسلط على مائع محصور ينتقل بالتساوي في كل الاتجاهات، فتكون قوة المكبس:

$$F = P \times A$$

مثال محلول (هوائي أم هيدروليكي؟):

- **المعطيات:** أسطوانة قطرها الداخلي 100 mm. التغذية الهوائية 6 bar، والهيدروليكية 100 bar.
- **الافتراضات:** نهمل الاحتكاك ومساحة الساق.
- **الحل:**

- المساحة: $A = \pi \times d^2 \div 4 = \pi \times 0.1^2 \div 4 = 7.85 \times 10^{-3}\ m^2$
- القوة الهوائية: $F = P \times A = 6 \times 10^5 \times 7.85 \times 10^{-3} \approx 4.7\ kN$
- القوة الهيدروليكية: $F = 100 \times 10^5 \times 7.85 \times 10^{-3} \approx 78.5\ kN$

- **المعنى ميدانيًا:** الأسطوانة نفسها تعطي بالزيت نحو سبعة عشر ضعف قوتها بالهواء. لذلك تُحرك صمامات البخار والوقود الكبيرة في التوربينات وصمامات خطوط الأنابيب الكبيرة بمشغلات هيدروليكية، ويبقى الهوائي للصمامات التي تكفيها قوته، لأنه أبسط وأنظف وآمن في المناطق الخطرة.

صمام التوجيه الهيدروليكي 4/3. له أربعة منافذ: P من المضخة، وT إلى الخزان، وA وB إلى طرفي الأسطوانة. وله ثلاثة أوضاع. في الأول يصل P إلى A وB إلى T فيتحرك المكبس في اتجاه. وفي الثاني يصل P إلى B وA إلى T فيتحرك في الاتجاه المعاكس. وفي الوضع الوسط المغلق تُسد المنافذ الأربعة فيقف المكبس محبوسًا، ويعود زيت المضخة إلى الخزان عبر صمام التنفيس. والتسمية نفسها تُستعمل للصمامات الملفية الهوائية (15.11).

الملف اللولبي (Solenoid). ملف ونواة حديدية متحركة يشدها المجال المغناطيسي لتقصير الفجوة الهوائية، ويعيدها نابض عند قطع التيار. والقوة تقريبًا (بإهمال مقاومة الحديد وتسرب الفيض):

$$F = N^2\, I^2\, \mu_0\, A \div (2\, x^2)$$

حيث N عدد اللفات، وI التيار، وA مساحة الفجوة، وx طولها، و$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

مثال: ملف من 1000 لفة بتيار 0.5 A ومساحة 1 cm^2. عند فجوة 2 mm تكون القوة نحو 3.9 N، وعند 1 mm نحو 15.7 N. فالقوة تتضاعف أربع مرات حين تنقص الفجوة إلى النصف. **والمعنى ميدانيًا:** قوة الملف أضعف ما تكون في بداية الشوط. لذلك يعلق الملف الضعيف أو المتسخ في موضعه الأول. وملف التيار المتناوب يسحب تيار بدء كبيرًا ما دامت الفجوة مفتوحة، فإن علقت النواة احترق الملف. ولهذا يُسأل عند كل ملف

محترق: هل كانت النواة حرة الحركة؟ وتشمل مواصفات الملف: الفولتية، ودورة التشغيل (مستمرة أم متقطعة)، والتيار والقدرة، وفئة الحرارة، والشوط، والقوة، وبيئة التركيب.

المرحّل والملامس (Contactor). ملف وذراع وتلامسات. يعزل دائرة التحكم عن دائرة الحمل عزلًا كهربائيًا كاملًا، وتسمع نقرته حين يعمل. وحدوده: تلامسات تتآكل بالشرر، وسرعة تبديل محدودة، وتيار ملف معتبر. **وتنبيه مهم:** عند فصل ملف تيار مستمر تتولد قوة دافعة عكسية (Back-EMF) قد تتلف ترانزستور المخرج الذي يقوده. ويُمنع ذلك بثنائي حر (Flyback Diode) على طرفي الملف، أو بمخمّد مناسب. وللتبديل السريع المتكرر تُستعمل المرحّلات الصلبة (SSR).

محرك التيار المستمر. الموصل الحامل للتيار في مجال مغناطيسي يتأثر بقوة ($F = B\,I\,L$)، ويعطي المحرك عزمًا يتناسب مع التيار ($T = Kt \times i$). ودوران الملف في المجال يولد قوة دافعة عكسية تتناسب مع السرعة ($Vb = Kb \times \omega$). وبإهمال محاثة الملف:

$$T = (Kt \div R) \times (V - Kb \times \omega)$$

مثال محلول (نقطة تشغيل محرك):

- **المعطيات:** $Kt = Kb = 0.1$ N·m/A (وتتساويان في النظام الدولي)، ومقاومة الملف $R = 1\ \Omega$، والفولتية 24 V.
- **الحل:**
  - عزم الإيقاف (عند $\omega = 0$): $T = Kt \times V \div R = 0.1 \times 24 \div 1 =$ 2.4 N·m
  - سرعة اللاحمل (عند $T = 0$): $\omega = V \div Kb = 24 \div 0.1 =$ 240 rad/s، أي نحو 2290 rpm
  - وعند $\omega = 120$ rad/s: $T = (0.1 \div 1) \times (24 - 0.1 \times 120) =$ 1.2 N·m (الشكل 15-14 ب)
- **المعنى ميدانيًا:** المنحنى خط مستقيم، وتغيير الفولتية يزيحه موازيًا لنفسه.

> وهذا أساس التحكم بسرعة محركات التيار المستمر بالفولتية. والمحرك المؤازر (Servo) يضيف تغذية راجعة من مولد سرعة (Tacho) أو مشفر: حين تزيد السرعة على المطلوبة تصبح الإشارة المصححة سالبة فيبطئ المحرك، وحين تقل تصبح موجبة فيسرع.

المحرك الخطوي (Stepper Motor). يحول كل نبضة كهربائية إلى خطوة زاوية ثابتة. فعدد النبضات يحدد الزاوية، وترددها يحدد السرعة، وترتيبها يحدد الاتجاه. لذلك يُتحكم فيه بحلقة مفتوحة دون حساس موضع. **مثال:** خطوة 1.8 درجة تعني 200 خطوة في الدورة، ونبضات بتردد 1000 Hz تعطي 5 دورات في الثانية، أي 300 rpm. وأنواعه: بمغناطيس دائم، وبممانعة متغيرة (دواره حديد مسنن بلا عزم إمساك دون تغذية)، وهجين. ومن مواصفاته: **عزم الإمساك** (أقصى عزم يُسلط على المحرك المغذى الساكن دون أن يتحرك)، و**عزم السحب إلى الداخل** (أقصى عزم يبدأ عنده المحرك عند تردد معين دون فقد خطوة)، و**عزم السحب إلى الخارج** (أقصى عزم يتحمله وهو يدور دون فقد التزامن). **والعطل النموذجي:** حمل أو تسارع أكبر مما يحتمل المحرك يُفقده خطوات، فيختلف الموضع الفعلي عن المحسوب دون أن يعلم المتحكم. ويُكشف ذلك بحساس مرجعي (Home) أو بمشفر.

المشغلات بالمواد الفعالة. الكهرضغطية (Piezoelectric): تتمدد أو تنحني بإزاحة صغيرة جدًا وسرعة عالية حين يُسلط عليها جهد. ومنها الصمامات القائدة (Pilot Valves) في بعض الموضّعات الرقمية، التي تستهلك هواءً قليلًا جدًا في الوضع الساكن. والمشغل ثنائي الطبقة (Bimorph) شريحتان تتمدد إحداهما وتنكمش الأخرى فتنحنيان. **والمغناطيسية التضييقية (Magnetostrictive)** تغير أبعادها في المجال المغناطيسي. **وسبائك ذاكرة الشكل (Shape Memory Alloys)** تعود إلى شكل محفوظ عند تسخينها. وتنتشر هذه العائلة في الأنظمة الدقيقة الكهروميكانيكية (MEMS) وأجهزة الدقة، وقليلًا في الخدمات العملياتية الثقيلة.

جدول تشخيص: أعطال المشغلات الشائعة

المشغل	العَرَض	السبب المرجح	الفحص
ملف لولبي	لا يتحرك	لا تغذية، أو ملف مقطوع، أو نواة عالقة	الفولتية على الأطراف، ومقاومة الملف، وحرية النواة
ملف لولبي	يحترق متكررًا	نواة عالقة مع تغذية متناوبة، أو فولتية أعلى، أو دورة تشغيل غير مناسبة	الفولتية الفعلية وتصنيف دورة التشغيل
مرحّل	تلامس لا يوصل	تلامسات محترقة أو متسخة	قياس المقاومة عبر التلامس المغلق
مخرج ترانزستور	يتلف بعد تركيب ملف جديد	لا ثنائي حر على ملف التيار المستمر	فحص الدائرة وإضافة الثنائي
محرك تيار مستمر	عزم ضعيف	فرش متآكلة، أو فولتية منخفضة تحت الحمل	الفولتية والتيار تحت الحمل، وحالة الفرش
محرك خطوي	موضع ينحرف تدريجيًا	فقد خطوات بسبب الحمل أو التسارع	مقارنة الموضع بالمرجع، وتخفيف التسارع
أسطوانة هيدروليكية	حركة بطيئة أو زحف	تسرب داخلي في المانع، أو زيت ملوث، أو ضغط منخفض	ضغط الخط، وعدّ الجسيمات، واختبار التسرب
مشغل هوائي	لا يصل إلى نهاية الشوط	ضغط تغذية غير كافٍ أو تسرب	مقياس ضغط التغذية وبصمة الصمام (39.8)

15.16 حالة ميدانية: حلقة مستوى تتذبذب بعد صيانة الصمام

نوع الحالة: مثال تعليمي مركب (يجمع أنماطًا متكررة من وحدات ضغط الغاز؛ الأرقام تعليمية).

- **العَرَض:** بعد توقف صيانة، بدأ مستوى وعاء شفط الضاغط V-101 يتذبذب بين 48% و52% بدورة ثابتة نحو ثلاث دقائق (الشكل 15-15، اليسار)، وخرج المتحكم LIC-101 يتحرك بين 42% و52% بشكل منشاري. قبل التوقف كانت الحلقة مستقرة. وحاول المشغلون تخفيض الكسب مرتين فطالت الدورة ولم تختفِ.
- **الفرضيات:** (1) ضبط المتحكم أُفسد أثناء الصيانة؛ (2) اضطراب دوري من المنبع (تكثف دفعي)؛ (3) مشكلة في مرسل المستوى؛ (4) التصاق في صمام LV-101 بعد استبدال حشوته.
- **الفحوص:** وُضع المتحكم في اليدوي: توقف التذبذب خلال دورتين، فسقطت الفرضية (2) وسقطت (3) جزئيًا (المرسل يقرأ بثبات في اليدوي). قورنت معاملات المتحكم بسجل الضبط: مطابقة، فسقطت (1) (وخفض الكسب لم يعالج). أُرسلت خطوات 1% في اليدوي (الشكل 15-15، اليمين): لم يتحرك مؤشر الشوط إلا بعد تراكم 4% ثم قفز 4% دفعة واحدة، وعرض حلقة بصمة الصمام في الموضّع الرقمي ارتفع من 0.08 bar (البصمة الأساسية) إلى 0.31 bar.
- **الدليل الحاسم:** شكل الإشارتين (PV مثلثية وOP منشارية) مع قفز الصمام في اختبار الخطوات؛ فهذه بصمة الالتصاق (Stiction) لا بصمة سوء الضبط (الذي يعطي تذبذبًا شبه جيبي تتغير سعته مع الكسب).
- **السبب الجذري:** استُبدلت حشوة PTFE بحشوة غرافيت من المخزن «لأنها أقوى» وشُدت شفة الحشوة بعزم اجتهادي أعلى بكثير من المحدد، فارتفع

الاحتكاك أربعة أضعاف؛ ومساحة الغشاء الصغيرة لهذا الصمام لا تعطي قوة كافية لكسر هذا الاحتكاك بتغيرات الإشارة الصغيرة.

- **الإجراء:** أُعيدت حشوة PTFE وفق ورقة البيانات وشُدت بالعزم المحدد؛ أُعيدت المعايرة الآلية للموضّع وسُجلت بصمة جديدة (0.09 bar)؛ اختفى التذبذب دون تغيير في ضبط المتحكم. وأُضيف إلى إجراء الصيانة: نوع الحشوة وعزم الشد من ورقة البيانات، واختبار خطوات 1% قبل إعادة الحلقة إلى الآلي.
- **الدرس:** التذبذب بدورة ثابتة وشكل مثلثي/منشاري يقول «صمام» قبل أن يقول «متحكم»؛ وثلاث دقائق في اليدوي وخطوتان صغيرتان توفران أسبوعًا من العبث بالكسب.

الشكل 15-15: *الحالة في القسم 15.16: تذبذب المستوى بدورة ثابتة مع خرج منشاري (اليسار)، واختبار الخطوات في الوضع اليدوي الذي كشف التصاق الصمام: لا حركة حتى تراكم 4% من الإشارة ثم قفزة (اليمين).*

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
الحجم والنوع	يحسب Cv عند الحالات الثلاث، ويتحقق من الاختناق والتكهف والضوضاء والسرعة، ويراجع حساب المورد سطرًا سطرًا	يطابق لوحة الصمام واتجاه السهم ومحطة الصمام مع ورقة البيانات عند الاستلام والتركيب
المشغل ووضع الفشل	يحسب قوة الإغلاق وضبط المنضدة، ويثبّت وضع الفشل من HAZOP	يقيس ضبط المنضدة والشوط، ويختبر وضع الفشل بفصل الهواء فعلًا لا بمحاكاة الإشارة
الموضّع والملحقات	يحدد نوع الموضّع وسلوكه عند فقد الإشارة، ويبرر كل ملحق بحاجة محسوبة	ينفذ المعايرة الآلية، ويسجل البصمة الأساسية، ويقيس جهد الصمام الملفي وزمن التفريغ
الصيانة والتشخيص	يقرأ البصمة واختبار الخطوات، ويقرر الإصلاح أو تغيير المواصفة	يبدّل الحشوة بالنوع والعزم المحددين في ورقة البيانات، ويجري اختبار خطوات 1% قبل إعادة الحلقة إلى الآلي

15.17 الأخطاء الشائعة

1. **صمام بحجم الخط** دون حساب، فيعمل عند أول 20% من شوطه.
2. **الحساب عند حالة واحدة** وإهمال أن P1 وP2 يتغيران مع التدفق.
3. **خلط أساس التدفق** (قياسي/فعلي، Sm^3 عند 15 °C/Nm^3 عند 0 °C) في غازات الوقود والهواء.
4. **إهمال التكهف** في تصريف السوائل الخفيفة من الضغط العالي، ثم استبدال الترم كل ستة أشهر.
5. **فئة تسرب VI «احتياطًا»** ثم الاعتماد عليها للعزل.
6. **وضع فشل من المورد** لا من HAZOP، أو مختبر بمحاكاة الإشارة لا بفصل الهواء.

7. **مشغل بحجم افتراضي** دون حساب قوة الإغلاق عند أقصى ضغط تفاضلي.
8. **حشوة أقوى وشد أكثر** لوقف تسرب، فتذبذب الحلقة.
9. **ضبط المتحكم قبل فحص الصمام** بخطوات صغيرة في اليدوي.
10. **موضّع بخاصية نسبة متساوية فوق ترم نسبة متساوية**، فتتضاعف اللاخطية.
11. **ملحقات بلا مبرر** (معزز وقفل وتنفيس سريع في حلقة حرارة بطيئة) تضيف نقاط فشل.
12. **إهمال البصمة الأساسية** عند التشغيل، فلا مرجع للمقارنة عند أول شكوى.

15.18 ملخص

صمام التحكم هو العنصر النهائي الذي يلمس العملية، ويحدد أداؤه سقف أداء الحلقة. يُختار نوعه من الخدمة (كروي للدقة والضغط التفاضلي، دوار للأقطار والملاط والتكلفة)، وخاصيته من نسبة هبوط الضغط (نسبة متساوية حين يتغير ΔP، خطية حين يثبت)، وحجمه من حساب Cv عند ثلاث حالات مع التحقق من الاختناق والتكهف والوميض والضوضاء والسرعة، ومواده من المائع والحرارة والمعايير، ومشغله من حساب القوة عند أقصى ضغط تفاضلي ومن وضع الفشل الذي يقرره HAZOP، وموضّعه رقمي يعطي الدقة والتشخيص. والاختبارات المنتظمة (ضبط المنضدة، والتهيئة، وتسرب الكرسي، والشوط الجزئي، والبصمة) تبقي الصمام كما صُمم. وأول ما يُفحص في حلقة تتذبذب هو الصمام بخطوات صغيرة في الوضع اليدوي.

وفي الفصل التالي: الفصل 16، «صمامات العزل والتنظيم الذاتي وحماية الضغط»؛ ننتقل فيه من صمام يعدّل التدفق إلى صمامات تعزل، وتنظّم الضغط بطاقة المائع نفسه، وتحمي من الضغط الزائد، ولكلٍّ منها منطق اختيار مختلف.

15.19 أسئلة التقييم الذاتي

1. صمام كروي يعمل عادة عند 25% من شوطه وتتذبذب حلقته عند الأحمال العالية. ما التشخيصان الأرجح، وكيف تميز بينهما بلا فك؟
2. متى تختار الخاصية الخطية بدل النسبة المتساوية؟ اذكر مثالين من خدمات حقيقية.
3. احسب Kv وCv لسائل SG = 1.1 بتدفق 40 m^3/h وضغط 8 barg إلى 5 barg، ثم تحقق من الاختناق إذا كان Pv = 2.0 bara وFL = 0.9 وPc = 60 bar.
4. غاز بـ x = 0.6 على صمام فراشة xT = 0.35 وγ = 1.4. هل التدفق مختنق؟ وما أثر ذلك على الحساب والضوضاء؟
5. اشرح الفرق بين التكهف والوميض من حيث السبب والضرر والعلاج، ولماذا يُفضَّل الصمام الزاوي في الثاني.
6. صمام بفتحة 50 mm وأقصى ضغط تفاضلي عند الإغلاق 20 bar والفئة V (خذ حمل الكرسي 50 N/mm من منحنى المصنّع) وحشوة غرافيت 600 N، ومشغل مساحته 650 cm^2. ما أدنى ضغط لضبط المنضدة الذي يضمن الإغلاق؟
7. لماذا لا يُقبل «البقاء على آخر موضع» لصمام وقود الفرن، ومتى يكون مقبولًا لصمام آخر في الوحدة نفسها؟
8. ما الذي تقرؤه من بصمة صمام اتسعت حلقتها ثلاثة أضعاف مع بقاء ميلها؟ وما الفحص التالي؟
9. صف خطوات اختبار الشوط الجزئي وشرطه الأساسي في منطق السلامة.
10. في مشروع وحدة ضغط الغاز، لماذا يُغلق LV-101 عند الفشل ويفتح FV-102؟ وما الذي يحدث لو عُكس الاثنان عند فقد الهواء؟

مراجع الفصل: R1 (المسودة الموحدة، أقسام الصمامات)، وR16 وR17 (أساسيات التحكم بالعمليات)، وR2 (اختبارات الصمامات في التشغيل التجريبي)، وR64 (مبادئ الأجهزة:

مواد خدمات الإنتاج والخانق المنفصل، 15.12.1)، وR71 وR72 (المشغلات عمومًا، 15.15.1)؛ وISA-75.01.01 / IEC 60534-2-1 (معادلات الحجم)، وIEC 60534-8-3 (الضوضاء الهوائية)، وISA-75.25.01 (اختبار الأداء الديناميكي)، وANSI/FCI 70-2 (فئات تسرب الكرسي)، وISA-RP75.23 (التكهف)، وISA-20 (أوراق البيانات)، وISO 15848-1 وAPI 622 (الانبعاثات من الحشوات)، وNACE MR0175/ISO 15156 (الخدمة الحامضية)، وIEC 61511 (اختبار الشوط الجزئي ومراقبة الخط)؛ و Emerson/Fisher, Control Valve Handbook (5th ed., 2017).

الفصل 16: صمامات العزل والتنظيم الذاتي وحماية الضغط

> **لمن هذا الفصل:** لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس الذي يحدد صمام عزل أو منظم ضغط أو صمام أمان في ورقة بيانات، ولمهندس الموقع الذي يضبط منظمًا أو يراجع شهادة اختبار صمام أمان، ولفني الصيانة الذي يفحص هذه الصمامات ويعيدها إلى الخدمة.
>
> **الفكرة الأساسية:** ليست كل الصمامات في الوحدة صمامات تحكم. فصمام العزل يفصل جزءًا من العملية، ويُطلب منه أن يغلق بإحكام لا أن يعدّل التدفق. والمنظم ذاتي التشغيل يضبط الضغط بطاقة المائع نفسه، دون إشارة ولا هواء أجهزة. وصمام الأمان آخر حاجز ميكانيكي، يفتح حين تفشل الطبقات قبله كلها. ولكل منها منطق اختيار ومصادر عطل تختلف عن صمام التحكم في الفصل 15، وإن تشابهت الأجسام والمواد والمواصفات.

16.1 مرجع سريع: الصمامات الصناعية وصمامات العزل

يبدأ الفصل بصمامات العزل لأنها الأكثر عددًا في الوحدة، وإن لم تكن صمامات تحكم. فصمام الإغلاق الطارئ (ESDV) في الغالب صمام كرة أو بوابي بمشغل، وصمامات الجذر والمانيفولد على خطوط النبض إبرية، وصمام عدم الرجوع على طرد الضاغط جزء من حمايته. وهذا القسم مرجع سريع لأنواعها وأجزائها وموادها ومواصفاتها وأعطالها.

التصنيف. تُصنف الصمامات بطريقتين (الشكل 16-1). **بالحركة:** خطية، يتحرك فيها عنصر الإغلاق في خط مستقيم (البوابي، والكروي، والغشائي، والإبري، والانضغاطي،

وعدم الرجوع الرفعي). ودورانية، يتحرك فيها العنصر في مسار دائري، ومنها صمامات ربع اللفة التي تنتقل من الإغلاق إلى الفتح الكامل بدوران 90 درجة (صمام الكرة، والسدادي، والفراشي). **وبالوظيفة:** صمامات عزل، وصمامات تنظيم وخنق، وصمامات منع رجوع، وأجهزة تنفيس الضغط. ويُسمى الصمام صغيرًا عادة حتى القطر الاسمي DN 50 (NPS 2)، وكبيرًا فوقه.

الشكل 16-1: *تصنيف الصمامات الصناعية بالحركة (خطية، ودورانية ربع لفة، وذاتية التشغيل) وبالوظيفة (عزل، وخنق، ومنع رجوع، وحماية من الضغط)، مع ما لا يُستعمل له كل نوع.*

جدول مقارنة: أنواع الصمامات الصناعية

النوع	الحركة	الخنق	هبوط الضغط مفتوحًا	الإغلاق المحكم	الاستعمال النموذجي
بوابي (Gate)	خطية بلفات كثيرة	لا يصلح	منخفض جدًا	جيد	عزل الخطوط الرئيسة

النوع	الحركة	الخنق	هبوط الضغط مفتوحًا	الإغلاق المحكم	الاستعمال النموذجي
كروي (Globe)	خطية بشوط قصير	جيد	مرتفع	جيد	الخنق والتصريف والتنفيس
صمام الكرة (Ball)	ربع لفة	محدود	منخفض جدًا بالمنفذ الكامل	ممتاز بالمقاعد اللينة	العزل السريع وصمامات الإيقاف الطارئ
سدادي (Plug)	ربع لفة	محدود	منخفض	جيد	خدمات فيها رواسب، وخطوط متعددة المنافذ
فراشي (Butterfly)	ربع لفة	متوسط	منخفض	متوسط، وممتاز في الأنواع اللامركزية	الأقطار الكبيرة والمياه والهواء
عدم رجوع (Check)	ذاتي	—	منخفض إلى متوسط	يعتمد على النوع	منع التدفق العكسي
غشائي (Diaphragm)	خطية	متوسط	متوسط	جيد	الموائع الأكالة والنظيفة صحيًا
إبري (Needle)	خطية دقيقة	دقيق جدًا	مرتفع	جيد	خطوط النبض والمانيفولد وأخذ العينات

كيف أختار؟ للعزل الخالص اختر البوابي في الخطوط الكبيرة وصمام الكرة حيث يلزم إغلاق سريع أو إيقاف طارئ، وللخنق والتنفيس الكروي، ولخطوط النبض والمانيفولد الإبري، وللأقطار الكبيرة والمياه الفراشي. وحدّ هذا الجدول أنه يصف النوع لا الدرجة: صلاحية الإغلاق المحكم في الحريق والخدمة الحامضية وحدود الحرارة تأتي من المواد

والمواصفة القياسية (API 607 وNACE وورقة بيانات المطاطيات) لا من اسم النوع. والخطأ الأكثر كلفة هو ترك صمام بوابي مفتوحًا جزئيًا ليؤدي عمل صمام خنق، فتُحفر مقاعده في أسابيع ويفقد الإغلاق الذي اشتُري من أجله.

أجزاء الصمام. تنقسم إلى أجزاء حاملة للضغط: الجسم، والغطاء (Bonnet)، وعنصر الإغلاق، والبراغي. وأجزاء غير حاملة للضغط: المقاعد، والساق، والحشوة، والنير (Yoke)، والمقعد الخلفي، والعجلة اليدوية. ويسمى مجموع الأجزاء الداخلية القابلة للتبديل الملامسة للمائع **التريم (Trim)**: المقاعد، وعنصر الإغلاق، والساق، والجلبات، والموجّهات.

- **وصلة الغطاء:** ملولبة أو باتحاد للأقطار الصغيرة والضغوط المنخفضة. ومربوطة بالبراغي والحشية، وهي الأشيع. وملحومة للضغوط العالية حين لا يُقبل أي تسرب، ولا تُصان إلا في المصنع. وختم ضغطي (Pressure Seal) للضغوط العالية، غالبًا من الفئة 900 فأعلى.
- **تصميم الساق:** الساق الصاعدة بلولب خارجي ونير (OS&Y) هي الأشيع للأقطار من 2 بوصة فأعلى. لولبها خارج المائع، ووضعها يدل على فتح الصمام أو إغلاقه. والساق الصاعدة بلولب داخلي للأقطار الصغيرة والضغوط المتوسطة، ولولبها في تماس مع المائع. والساق غير الصاعدة بلولب داخلي حين يضيق المكان، بشرط ألا يكون المائع أكالًا أو كاشطًا.
- **المقعد الخلفي (Back Seat):** كتف على الساق يغلق على الغطاء حين يُفتح الصمام تمامًا، فيعزل الحشوة عن المائع. وهو يسمح بتبديل بعض الحشوة والصمام في الخدمة، في حدود ما يسمح به إجراء الموقع.

الشكل 16-2: *مقطع تخطيطي لصمام بوابي بغطاء مربوط بالبراغي وساق صاعدة بلولب خارجي ونير (OS&Y) وهو مفتوح تمامًا، ملوّن حسب الفئة: الأجزاء الحاملة للضغط، والتريم (Trim)، والأجزاء غير الحاملة للضغط. ويبين التكبير أن المقعد الخلفي (Back Seat) لا يعزل الحشوة عن المائع إلا عند الفتح الكامل.*

ملاحظات لكل نوع:

- **البوابي:** لا يُترك مفتوحًا جزئيًا، فالسرعة العالية عند الفتحات الصغيرة تحفر المقاعد (Wire Drawing). وقد يُحبس فلا يُفتح بسبب التمدد الحراري أو احتباس الضغط في تجويف الجسم (Thermal Binding وPressure Locking). والإسفين المرن (Flexible Wedge) يتحمل تغير محاذاة المقاعد أكثر من الإسفين المصمت.

- **الكروي (Globe):** بثلاثة أشكال. شكل T هو الأشيع وأعلاها هبوطًا في الضغط، ويُستعمل في خنق شديد مثل خط التجاوز حول صمام التحكم. وشكل Y أقلها مقاومة، ويتحمل الفتح الجزئي طويلًا. والزاوي (Angle) يغير اتجاه التدفق 90 درجة ويتحمل التدفق النبضي.
- **عدم الرجوع:** يفتح بتدفق المائع ويغلق بعكسه، وأدنى ضغط يفتحه يسمى **ضغط البدء (Cracking Pressure).** ومن أنواعه: المتأرجح (Swing)، والرفعي (Lift) للضغوط والسرعات العالية، والقرص المائل (Tilting Disc) الذي يغلق أسرع، والقرص المزدوج (Dual Plate) الخفيف على شكل رقاقة، والمحوري أو المكبسي لخطوط التدفق النبضي مثل طرد الضواغط الترددية. وعيبه أن وضعه الداخلي لا يُرى من الخارج، وقد يعلق مفتوحًا.
- **صمام الكرة:** العائم (Floating) يدفع فيه المائعُ الكرةَ على مقعد جهة المصب (Downstream Seat)، ويناسب الأقطار الصغيرة والمتوسطة. والمثبت بمحورين (Trunnion Mounted) تحمل فيه الكرة على محورين، ويناسب الأقطار الكبيرة والضغوط العالية وخطوط الأنابيب (API 6D). والمنفذ الكامل (Full Port) بقطر الأنبوب نفسه، والمخفض (Reduced Port) أصغر بمقاس.

الشكل 16-3: *خمسة أنواع من صمامات عدم الرجوع بمقاطع تخطيطية: المتأرجح (Swing)، والرفعي (Lift)، والقرص المائل (Tilting Disc)، والقرص المزدوج (Dual Plate)، والمحوري (Axial)، كل منها مفتوحًا بالجريان الأمامي ومغلقًا بالتدفق العكسي، مع خدمته وعطلي الطَّرق (Slam) والارتجاف (Chatter).*

المواد. الجسم من الفولاذ الكربوني في الغالب: مطروق للأقطار الصغيرة، ومصبوب للكبيرة. والتريم الأشيع من الفولاذ بنسبة 13% كروم، ويُغلف بسبيكة صلدة (مثل Stellite) في الضغوط والحرارة العالية. ويُجعل المقعد أصلد من عنصر الإغلاق بفرق صلادة (نحو 50 HB) لمنع الالتحام (Galling). وترقم API 600 تراكيب التريم بأرقام قياسية. والحشوة الأشيع الغرافيت المرن. ولا يُعتمد على حشوة أو مقاعد PTFE وحدها

في خدمة الهيدروكربونات إن كان الصمام يجب أن يبقى محكمًا في الحريق، إلا بتصميم مختبر وفق اختبار الحريق. وتختار المطاطيات بحسب المائع: FKM (Viton) يقاوم الهيدروكربونات العطرية ولا يناسب الأمونيا والأمينات، وNBR شائع للماء والهيدروكربونات قليلة العطريات. وحدود الحرارة تُؤخذ من ورقة بيانات الدرجة المستعملة.

المواصفات القياسية الشائعة:

المواصفة	موضوعها
ASME B16.34	تصميم الصمامات ذات الأطراف المشفّهة والملولبة والملحومة وفئات الضغط والحرارة
ASME B16.10	أطوال الصمامات بين الوجهين
API 600	صمامات البوابة الفولاذية ذات الغطاء المربوط
API 602	الصمامات الفولاذية المدمجة الصغيرة (بوابي وكروي وعدم رجوع)
API 603	صمامات البوابة المقاومة للتآكل
API 6D	صمامات خطوط الأنابيب (الكرة والبوابي وعدم الرجوع والسدادي)
API 594	صمامات عدم الرجوع الرقاقية والمشفهة
API 609	الصمامات الفراشية
API 598	فحص الصمامات واختبارها
API 607 وAPI 6FA	اختبار الصمامات في الحريق
MSS SP-25	وسم الصمامات

كيف تُحدد الصمام في ورقة المواصفات؟ عشرة بنود: النوع، والقطر، وفئة الضغط (150 و300 و600 و900 و1500 و2500 للأطراف المشفّهة والملحومة، و800 لبعض الصمامات المطروقة الصغيرة)، ومادة الجسم والغطاء، ومادة التريم، ومادة الحشوة

والموانع، ومادة البراغي، والمواصفة القياسية للتصميم والفحص والاختبار، وضغط الاختبار الهيدروستاتيكي للجسم والمقعد، وأي متطلب خاص (اختبار الحريق، والانبعاثات الهاربة، والخدمة الحامضية وفق NACE MR0175/ISO 15156).

جدول تشخيص: أعطال صمامات العزل الشائعة

العَرَض	السبب المرجح	الإجراء
صمام بوابي لا يُفتح بعد التسخين أو الإغلاق الطويل	احتباس حراري أو ضغطي في التجويف	معادلة الضغط أو فتحة تنفيس للتجويف وفق إجراء المصنّع، لا قوة إضافية على العجلة
تسرب عبر الصمام المغلق	مقعد محفور من الخنق أو جسم غريب	منع استعمال البوابي في الخنق، وتنظيف الخط، وإصلاح المقعد
صمام عدم رجوع يطرق بقوة (Slam)	إغلاق متأخر بعد انعكاس التدفق	نوع أسرع إغلاقًا (قرص مائل أو مزدوج بنوابض)
صمام عدم رجوع يرتجف (Chatter)	تدفق أقل من اللازم لإبقائه مفتوحًا	صمام بحجم يناسب التدفق الفعلي لا قطر الخط
صمام كرة يتسرب بعد مرور حطام	مقعد لين مخدوش	تبديل المقاعد، وتنظيف الخط قبل التشغيل
ساق لا تتحرك بالعجلة	التحام الساق أو الحشوة مشدودة زيادة	فحص الحشوة واللولب وتزييت اللولب الخارجي

16.2 صمامات تنظيم الضغط ذاتية التشغيل (Self-Operated Pressure Regulators – PCV)

لماذا هذا القسم: في كل وحدة عشرات الصمامات التي تحمل الوسم PCV ولا يصل إليها كابل ولا أنبوب هواء: منظم غاز الوقود قبل المشاعل، ومنظم هواء الأجهزة على كل موضع، ومنظم غاز السدادات في الضاغط، ومنظم غطاء النيتروجين على الخزانات،

ومنظم الضغط الخلفي على خط عودة المضخة. هذه الصمامات **تقيس وتقارن وتحرك** بنفسها، فهي حلقة تحكم تناسبية كاملة في جسم واحد، ومهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس هو من يحددها ويختبرها ويشخص تصيّدها، وإن كان لا يضبطها بمعاملات.

المبدأ: غشاء (Diaphragm) يستشعر الضغط المراد تنظيمه، ونابض (Spring) يمثل نقطة الضبط، وكباس (Plug) يتحرك بالفرق بينهما. لا مصدر طاقة خارجيًا: الضغط المقاس نفسه هو القوة المحركة (الشكل 16-4). ولأنه تناسبي محض بلا فعل تكاملي، يبقى فيه **انحراف دائم** يسمى الانحدار (Droop)، وهذه هي الحقيقة التي تحكم كل ما يأتي.

الشكل 16-4: *منظم مخفض للضغط (يمين): ارتفاع ضغط المصب P2 تحت الغشاء يرفعه ضد النابض فيغلق الكباس؛ ومنظم الضغط الخلفي (يسار): ارتفاع ضغط المنبع P1 يفتح الكباس ليصرف الزيادة. في الحالتين يمثل انضغاط النابض نقطة الضبط.*

(أ) الأنواع الأربعة التي تراها في الميدان

جدول: أنواع المنظمات ذاتية التشغيل: ما تستشعره ومتى تفتح

النوع	ما يستشعره	متى يفتح
مخفض الضغط (Pressure-Reducing) مباشر التشغيل	ضغط المصب P2	عند انخفاض P2 عن الضبط

النوع	ما يستشعره	متى يفتح
مخفض الضغط مقاد (Pilot-Operated)	P2 عبر صمام قائد صغير	كذلك، لكن القائد يضخّم الإشارة
الضغط الخلفي (Back-Pressure)	ضغط المنبع P1	عند ارتفاع P1 فوق الضبط
الفرقي وغطاء الخزانات (Differential / Tank Blanketing)	فرق ضغطين، أو ضغط خزان بمليبارات	حسب الفرق أو عند انخفاض ضغط الغطاء

جدول: أنواع المنظمات ذاتية التشغيل (تابع): الاستخدام وملاحظة الاختيار

النوع	الاستخدام النموذجي	ملاحظة الاختيار
مخفض الضغط (Pressure-Reducing) مباشر التشغيل	هواء الأجهزة، غاز الوقود الصغير، تخفيض البخار لمبادل	بسيط ورخيص؛ انحدار 5 إلى 10%، مداه محدود
مخفض الضغط مقاد (Pilot-Operated)	محطات تخفيض غاز الوقود الكبيرة، البخار الرئيسي، خطوط التوزيع	دقة 1 إلى 2%، سعة عالية، سعره وتعقيده أكبر، يحتاج إلى مرشح للقائد
الضغط الخلفي (Back-Pressure)	تثبيت ضغط خط عودة، حماية جانب الشفط، ضغط تشغيل المفاعل، تصريف غاز الغطاء	ليس صمام أمان: لا يُعتمد عليه للحماية من الضغط الزائد (القسم 16.3)
الفرقي وغطاء الخزانات (Differential / Tank Blanketing)	غاز سدادات الضاغط (Δp فوق ضغط العملية)، تغطية الخزانات بالنيتروجين (10 إلى 50 mbar)	حساس جدًا للتركيب والتنفيس؛ لمنظمات الغطاء صمام تنفيس مستقل

كيف أختار؟ المنظم المباشر لمصب صغير يحتمل انحرافًا بضعة بالمئة، والمقاد حين تلزم دقة 1 إلى 2% أو سعة عالية، والضغط الخلفي حين يكون المطلوب تثبيت ضغط المنبع لا المصب، والفرقي وغطاء الخزان لمهامهما الخاصة فقط. وحدّ الجدول أنه لا يُظهر منحنى الانحدار وضغط الإغلاق الفعليين للطراز، ولا حاجة المصب إلى حماية من فشل المنظم مفتوحًا، وهما ما يقرر الاختيار النهائي (القسمان ب ود). والخطأ الأكثر كلفة هو الاعتماد

على منظم الضغط الخلفي بوصفه حماية من الضغط الزائد أو اختيار منظم بسعة أكبر بكثير من الحاجة فيعمل قرب الإغلاق ويتصيّد.

(ب) الانحدار (Droop) وضغط الإغلاق (Lockup): اقرأ منحنى المنظم قبل شرائه

منحنى المنظم (الشكل 16-5 أ) يبين ضغط المصب مقابل التدفق: عند التدفق الصفري يرتفع الضغط إلى **ضغط الإغلاق** (يزيد على الضبط بنحو 5 إلى 10% لأن الكباس يحتاج إلى قوة إضافية ليُحكم)، ثم ينخفض تدريجيًا مع التدفق (الانحدار) حتى يبلغ المنظم حد سعته فينهار الضغط. سبب الانحدار ميكانيكي بحت: كلما فتح الكباس أكثر تمدد النابض وقلّت قوته، فيلزم ضغط أقل تحت الغشاء ليوازنه.

مثال محلول (حساب الانحدار):

- **المعطيات:** منظم مباشر بغشاء مساحته الفعالة 100 cm^2 ونابض معدله 40 N/mm، وشوط الكباس من الإغلاق إلى الفتح الكامل 3 mm، وضغط الضبط 2.5 barg عند تدفق صغير.
- **الافتراضات:** إهمال قوى المائع على الكباس وتغير مساحة الغشاء مع الشوط.
- **الحل بالوحدات:**
  - تغير قوة النابض على الشوط: $\Delta F = k \times x = 40\ N/mm \times 3\ mm = 120\ N$
  - تغير الضغط المكافئ تحت الغشاء: $\Delta P = \Delta F \div A = 120\ N \div 0.01\ m^2 = 12{,}000\ Pa = 0.12\ bar$
  - الضغط عند الفتح الكامل $= 2.5 - 0.12 = 2.38$ barg
  - الانحدار $= 0.12 \div 2.5 = 4.8\%$
- **معنى النتيجة:** لو احتاج المشعل إلى ثبات ±2% لما صلح هذا المنظم إلا بمساحة غشاء أكبر أو نابض أطرى أو منظم مقاد يخفض الانحدار إلى نحو

> 1%. وضغط الإغلاق (نحو 2.75 barg) يجب أن يبقى دون ضغط تصميم المصب وضغط فتح صمام الأمان بهامش.

الشكل 16-5: *(أ) منحنى المنظم: ضغط الإغلاق عند التدفق الصفري، والانحدار مع التدفق، وانهيار الضغط عند حد السعة؛ المنظم المقاد أدق وأوسع سعة. (ب) قفزة ضغط منبع: المنظم الذاتي يستجيب خلال ثوانٍ مع انزياح صغير دائم، وحلقة PIC/PV تعود إلى نقطة الضبط تمامًا بعد تجاوز مؤقت.*

(ج) متى PCV ذاتي ومتى حلقة تحكم PIC مع صمام؟

المعيار	اختر المنظم الذاتي (PCV)	اختر حلقة تحكم (PT + PIC + PV)
دقة الضغط المطلوبة	انحراف بضعة بالمئة مقبول	مطلوب ثبات دقيق أو نقطة ضبط متغيرة من DCS
تغير نقطة الضبط	ثابتة لشهور	تتغير مع الحمل أو الوصفة أو تعاقبيًا
الطاقة المتاحة	لا هواء ولا كهرباء (موقع بعيد، رأس بئر)	توفر هواء الأجهزة والكهرباء
المدى	تدفق مستقر ضمن 10:1	تدفق يتغير 30:1 أو أكثر، أو اضطرابات كبيرة
المراقبة والتوثيق	لا حاجة إلى تسجيل وإنذار	يلزم اتجاه وإنذار ومقارنة

المعيار	اختر المنظم الذاتي (PCV)	اختر حلقة تحكم (PT + PIC + PV)
الحجم والسعر	خط صغير إلى متوسط	خطوط كبيرة (الصمام المقاد يحل الوسط)
نمط الفشل	فشل مفتوح غالبًا: يحتاج حماية مصب	يمكن تحديد الفشل المطلوب وربطه بالتعشيق

كيف أختار؟ إن كانت نقطة الضبط ثابتة لشهور، والانحراف بضعة بالمئة مقبولًا، ولا يلزم تسجيل ولا إنذار، فالمنظم الذاتي أرخص وأبسط وأقل أعطالًا؛ وأي «نعم» في العمود الأيسر تنقل القرار إلى حلقة PT وPIC وPV. وحدّ الجدول أنه يفترض توفر الطاقة والصيانة للحلقة: في موقع بعيد بلا هواء أجهزة يبقى المنظم الذاتي الاختيار الوحيد ولو كانت الدقة مطلوبة، فيُعالج ذلك بمنظم مقاد أو بمرحلتين. والخطأ الأكثر كلفة هو وضع منظم ذاتي في موضع تحتاج غرفة التحكم فيه إلى تغيير نقطة الضبط أو مراقبة الاتجاه، ثم إضافة مرسل ومتحكم وصمام لاحقًا في المكان نفسه بكلفة توقف الوحدة.

(د) التحجيم: مثال محلول (منظم غاز وقود لسخان)

- **المعطيات:** غاز طبيعي M = 17 kg/kmol، حرارة 25 °C (298 K)، Z = 0.97، γ = 1.3. ضغط المنبع 8 barg (900 kPa abs)، ضغط المصب المطلوب 2.5 barg (350 kPa abs)، التدفق الأقصى 1,200 Sm^3/h والأدنى 150 Sm^3/h. المنظم من النوع الكروي المسار xT = 0.7.
- **الافتراضات:** معادلة الغازات في القسم 15.4 بمعامل N9 = 22.5 للـ Cv، وتقريب ثبات ضغط المنبع.
- **الحل بالوحدات:**
  - نسبة هبوط الضغط: x = (P1 − P2) ÷ P1 = (900 − 350) ÷ 900 = 0.611
  - حد الاختناق: Fγ × xT = (1.3 ÷ 1.4) × 0.7 = 0.65، وهو أكبر من 0.611 فالتدفق غير مختنق لكنه قريب من الحد.

- عامل التمدد: $Y = 1 - x \div (3 \times F\gamma \times xT) = 1 - 0.611 \div (3 \times 0.65) = 0.687$
- الجذر $= \sqrt{(x \div (M \times T \times Z))} = \sqrt{(0.611 \div (17 \times 298 \times 0.97))} = \sqrt{(0.611 \div 4{,}914)} = 0.01115$
- معامل التدفق المطلوب: $Cv = Q \div (N9 \times P1 \times Y \times \text{الجذر}) = 1{,}200 \div (22.5 \times 900 \times 0.687 \times 0.01115) = 1{,}200 \div 155 = 7.7$
- الاختيار: منظم سعته $Cv \approx 12$ (بحيث يعمل الأقصى عند نحو 65% من السعة فلا يقترب من انهيار الضغط)، ونطاق نابض 1.5 إلى 4.0 barg تقع فيه نقطة 2.5 في ثلثه الأوسط.
- التحقق من المدى: الأدنى 12.5% = 150 Sm^3/h من الأقصى، أي مدى 8:1 ضمن قدرة المنظم.

- **معنى النتيجة:** المنظم الذي يُختار بسعة مساوية للحد الأقصى تمامًا يعمل عند طرف منحناه حيث يهبط الضغط، ومن يختاره أكبر بكثير يجعله يعمل قرب الإغلاق فيتصيد. وبما أن المنبع 8 barg يفوق ضغط تصميم خط المصب، فيلزم صمام أمان أو صمام قطع سريع (Slam-Shut) على المصب لحالة فشل المنظم مفتوحًا، ويُحسب PSV على السعة الكاملة للمنظم المفتوح لا على التدفق العادي.

(هـ) التركيب: ما يفسد المنظم الجيد

- خط الاستشعار الخارجي (حين وُجد) يؤخذ من نقطة هادئة على بعد 8 إلى 10 أقطار من المنظم لا من فوهة أو كوع، بميل يصرف السوائل، وبقطر لا يقل عن 10 mm لغازات الوقود.
- مرشح قبل المنظم (والقائد) دائمًا؛ الحبيبة على المقعد هي أول سبب لارتفاع ضغط المصب ببطء (Creep).

- فتحة تنفيس الغشاء (Vent) تُوجَّه إلى أسفل وتُحمى من المطر والحشرات، وفي الغازات القابلة للاشتعال تُمدد إلى مكان آمن؛ فتمزق الغشاء يعني تسريب غاز من هذه الفتحة.
- تخفيض الضغط الكبير على مرحلتين (مثلًا 60 ← 10 ← 2 barg) يحد من التجمد بتأثير جول–طومسون ومن الضوضاء، ويُسخن الغاز قبل المرحلة الأولى عند اللزوم.
- مقياسان للضغط قبل وبعد، وصمام عزل وتجاوز يدوي (Bypass) ليُصان المنظم دون إيقاف المستهلك.

الشكل 16-6: *محطة تخفيض ضغط غاز الوقود على مرحلتين (60 ← 10 ← 2 barg) بمنظمات ذاتية التشغيل: مرشح قبل كل منظم، وخط استشعار خارجي من نقطة هادئة على بعد 8 إلى 10 أقطار، وتنفيس الغشاء إلى مكان آمن، ومقاييس قبل وبعد، وعزل وتجاوز مختوم. وتُحسب حماية المصب بصمام الأمان (PSV) أو صمام القطع السريع (Slam-Shut) على السعة الكاملة للمنظم المفتوح.*

(و) الأعطال الشائعة وتشخيصها

العَرَض	السبب المرجح	الفحص	الإجراء
ضغط المصب يتذبذب دوريًا (تصيّد)	منظم أكبر من اللازم يعمل قرب الإغلاق، أو خط استشعار مضطرب، أو حجم مصب صغير جدًا	راقب المقياس مع تغيير التدفق؛ انقل الاستشعار إلى نقطة هادئة	منظم أصغر أو مدى نابض أدنى، مخمد على خط الاستشعار، إضافة حجم في المصب
ضغط المصب يرتفع ببطء عند توقف الاستهلاك	تسرب على المقعد (حبيبة، تآكل، سداد ناعم متضرر)	اعزل المصب وراقب الارتفاع خلال 10 min	تنظيف/تبديل المقعد والسداد، مرشح أنظف
المصب لا يبلغ الضبط عند التدفق العالي	حد السعة، أو تجمد، أو مرشح مسدود	قارن التدفق بمنحنى المنظم؛ افحص فرق ضغط المرشح والصقيع على الجسم	منظم أكبر أو مرحلتان، تسخين الغاز، تنظيف المرشح
غاز يخرج من فتحة التنفيس	تمزق الغشاء	اختبار فقاعات على الفتحة	تبديل الغشاء، ومراجعة سبب التمزق (ضغط زائد على الغشاء عند فشل القائد)
الضغط يتغير مع الحرارة اليومية	تمدد الغاز في خط استشعار طويل معرض للشمس، أو نابض حساس للحرارة	سجل الضغط مع الحرارة على 24 ساعة	عزل الخط أو تقصيره، منظم بتعويض حراري
ضغط المصب أعلى بكثير من الضبط بعد إعادة التشغيل	فُتح التجاوز اليدوي ونُسي، أو مسمار الضبط عُبث به	افحص وضع التجاوز وختم مسمار الضبط	إغلاق التجاوز، ختم الضبط وتوثيقه

(ز) خطوات الفحص والاختبار الدوري

1. راجع ورقة البيانات: نطاق النابض، والضبط الحالي، وضغط التصميم للمصب، والسعة، وتاريخ آخر اختبار.

2. اعزل المنظم بصمامي العزل، وتحقق من صفر الضغط بين الصمامين وتصريفه إلى مكان آمن.
3. افحص المرشح ونظّفه أو بدّله، وسجّل ما وُجد فيه (صدأ، سائل، مركبات) لأنه دليل على حالة الخط.
4. افحص غشاء المنظم عبر فتحة التنفيس باختبار الفقاعات مع الضغط على المنبع، والكباس والمقعد بالنظر إذا كان التصميم يسمح.
5. أعد الضغط تدريجيًا بفتح المنبع، وسجّل ضغط الإغلاق عند تدفق صفري: يجب ألا يزيد على الضبط بأكثر من قيمة ورقة البيانات (نحو 10%).
6. حمّل المنظم بتدفق متزايد (بفتح المستهلك أو صمام اختبار) وسجّل الضغط عند ثلاث نقاط تدفق على الأقل، وارسم المنحنى وقارنه بمنحنى المصنّع.
7. في المنظم المقاد: افحص مرشح القائد وخط الإشارة، واختبر استجابة القائد بتغيير صغير في الضبط ثم إعادته.
8. تحقق من فتحة التنفيس وامتدادها، ومن ميل خط الاستشعار، ومن ختم مسمار الضبط.
9. سجّل في سجل الأداة: الضبط، وضغط الإغلاق، والانحدار المقاس، والمرشح، والتاريخ، والفني؛ وضع الملصق.
10. بعد إعادة الخدمة راقب ضغط المصب 15 دقيقة على الاتجاه بحثًا عن تصيّد أو زحف.

حالة قصيرة (مثال تعليمي مركّب): سخان زيت حراري كانت شعلته تنطفئ عند تشغيل سخان مجاور. **العَرَض:** انخفاض ضغط غاز الوقود تحت PSLL. **الفرضيات:** سعة منظم غير كافية، أو مرشح مسدود، أو مصدر ضعيف. **الفحوص:** قياس الضغط قبل المنظم أثناء الحدث (ثابت 7.8 barg)، وفرق ضغط المرشح (طبيعي)، ومنحنى المنظم مقابل التدفق الكلي. **الدليل الحاسم:** منظم واحد مشترك للسخانين اختير على تدفق سخان واحد، فعند التشغيل المتزامن بلغ 140% من سعته وانهار ضغط المصب. **السبب الجذري:** توسعة

أُضيف فيها سخان دون مراجعة تحجيم المنظم. **الإجراء:** منظم مقاد بسعة الحمل الكلي مع منظم احتياطي متوازٍ، وإضافة بند «مراجعة المنظمات المشتركة» إلى إجراء إدارة التغيير.

16.3 صمامات الأمان وتنفيس الضغط (PSV / Safety Valve / Relief Valve): آخر خط ميكانيكي

لماذا هذا القسم: صمام الأمان ليس من أجهزة القياس، لكن مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس يقابله في كل مكان: يضع ضغط ضبطه على سلم الحمايات فوق PSHH بهامش، ويراقب فتحه، ويشهد اختباره، ويُسأل حين «ينفخ» بلا سبب ظاهر. والأسماء مربكة: PSV وRV وPRV وSRV وTRV، وتختلف بين الشركات والمعايير، فالحكم على الصمام يكون من ورقة بياناته وشهادته لا من اختصار على الوسم. ذُكرت طبقات الحماية من الضغط الزائد في القسم 12.7 (الشكل 12-7)؛ وهنا نفصّل الصمام نفسه من زاوية عملية.

المبدأ: وظيفة واحدة يشترك فيها الجميع: فتح مسار يصرف جزءًا من المائع حين يرتفع الضغط فوق حد محدد، ثم الإغلاق حين ينخفض. الصمام لا يقوّي الوعاء ولا يزيل سبب الارتفاع؛ هو يمنع الضغط من الاستمرار في الصعود ما دام مصدر الزيادة قائمًا، بشرط أن تكفي سعته لأسوأ حالة.

(أ) الأسماء وما وراءها

المصطلح	السلوك المعتاد	الخدمة المعتادة
صمام الأمان – Safety Valve (PSV)	فتح قفزي سريع (Pop Action) إلى رفع كبير خلال زيادة ضغط محدودة	الغازات والبخار
صمام التنفيس – Relief Valve (RV)	فتح تدريجي يتناسب مع مقدار تجاوز الضغط (Modulating)	السوائل

المصطلح	السلوك المعتاد	الخدمة المعتادة
صمام الأمان والتنفيس (Safety Relief Valve – SRV)	يصلح للسلوكين بحسب تصميمه وضبطه واعتماده	غاز أو سائل
صمام تنفيس الضغط (Pressure Relief Valve – PRV)	مصطلح عام يشمل ما سبق (في API 520)	أي خدمة
صمام التنفيس الحراري (Thermal Relief Valve – TRV)	صمام صغير لتصريف تمدد سائل محصور	الخطوط المعزولة تحت الشمس أو التسخين

تنبيه اصطلاحي: PRV في بعض المخططات تعني **صمام تخفيض الضغط** (Pressure Reducing Valve، القسم 16.2) لا صمام التنفيس؛ اقرأ مفتاح الرموز في المخطط دائمًا.

(ب) لماذا يرتفع الضغط؟ ولماذا تختلف السعة المطلوبة؟

انسداد المخرج مع استمرار المضخة أو الضاغط، والتمدد الحراري لسائل محصور بين صمامي عزل، وفشل التبريد أو التكثيف، والحريق الخارجي، وانفلات تفاعل كيميائي، وتمزق أنبوب في مبادل ينقل الضغط العالي إلى الجانب المنخفض، وفشل صمام تحكم أو منظم مفتوحًا بالكامل. لكل حالة تدفق تصريف مختلف: التمدد الحراري يحتاج لترات في الدقيقة، وانسداد مخرج مضخة إزاحة موجبة يحتاج كامل تدفقها، والحريق يحتاج معدل تبخر يُحسب من مساحة الوعاء المبللة. يحسب مهندس العمليات الحالة الحاكمة وفق API 521 ويختار الفوهة وفق API 520؛ ومهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس يتحقق من أن ضغط الضبط والهوامش والمراقبة تتسق مع سلم الحمايات.

(ج) المبدأ الميكانيكي وتوازن القوى

في الصمام المحمّل بنابض (Spring-Loaded) لا حساس ولا أمر خارجي: ضغط المائع على القرص (Disc) فوق الفوهة (Nozzle) يولد قوة الفتح، وانضغاط النابض عبر القضيب (Spindle) يولد قوة الإغلاق (الشكل 16-7، اللوحتان 1 و2).

مثال محلول (توازن القوى):

- **المعطيات:** مساحة التأثير الفعالة للقرص 100 mm^2، وضغط الضبط 10 barg.
- **الافتراضات:** إهمال الضغط الخلفي وقوى التدفق الديناميكية (مثال لفهم التوازن لا لضبط صمام حقيقي).
- **الحل بالوحدات:**
  - قوة الإغلاق اللازمة من النابض: $F = P \times A$
  - بالتعويض: $F = 10 \times 10^5\ Pa \times 100 \times 10^{-6}\ m^2 = 100\ N$
  - عند 8 barg: قوة الضغط $= 8 \times 10^5 \times 100 \times 10^{-6} = 80\ N$ فيبقى القرص محكمًا.
  - عند 10 barg تتساوى القوتان (100 N) فيبدأ الفتح.
- **معنى النتيجة:** الفرق بين الحالتين 20 N فقط؛ لذلك يضبط النابض على منضدة اختبار بدقة، ويُختم، ولا يُلمس في الموقع.

لماذا يفتح صمام الأمان قفزًا؟ حول القرص حجرة تسمى حجرة التجمع (Huddling Chamber): ما إن يرتفع القرص قليلًا حتى يدخل المائع إليها فيؤثر على مساحة أكبر، فتزداد قوة الرفع فجأة وتتغلب على زيادة مقاومة النابض، فينتقل الصمام إلى الرفع الكامل خلال زيادة ضغط صغيرة. فالفتح القفزي نتيجة تصميم الصمام وتفاعل القوى، لا لمجرد أن المائع غاز. أما صمام التنفيس التدريجي فيزداد رفعه مع الضغط ويقل بانخفاضه، والعلاقة ليست خطًا مستقيمًا بالضرورة (الشكل 16-7، اللوحة 3). ومهم: بلوغ ضغط الضبط لا يعني بلوغ كامل السعة؛ الصمام يحتاج إلى زيادة إضافية (Overpressure) ليعطي سعته المقننة.

الشكل 16-7: *صمامات الأمان وتنفيس الضغط: صمام الأمان مغلقًا (1) ومنفّسًا (2) مع أجزائه (النابض، القضيب، القرص، المقعد)، ومنحنى الرفع مقابل الضغط للفتح القفزي والتدريجي (3)، وحماية وعاء ضغط (4)، وحماية مضخة إزاحة موجبة بصمام تنفيس يعود إلى الخزان (5)، وصمام التنفيس الحراري على خط سائل محصور (6). رسوم تدريبية مفاهيمية لا رسوم تركيب.*

(د) الضغوط والمصطلحات التي تُقرأ في كل ورقة بيانات

المصطلح	التعريف	ملاحظة عملية
ضغط التشغيل (Operating Pressure)	الضغط في التشغيل الطبيعي	يُترك تحت الضبط بهامش يسمح بإعادة الإغلاق والإحكام (قاعدة تصميم شائعة: 10% أو نحو 1.7 bar أي 25 psi أيهما أكبر)
ضغط الضبط (Set Pressure)	الضغط الذي يبدأ عنده الصمام الاستجابة وفق معيار الفتح لنوعه	يُحدد على منضدة الاختبار بضغط ثابت؛ ليس ضغط التشغيل المستهدف
أقصى ضغط عمل مسموح (MAWP)	أعلى ضغط تسمح به المعدة عند حرارتها المحددة	ليس ضغط الانفجار؛ ضبط الصمام الأول ≥ MAWP
التجاوز (Overpressure)	مقدار الارتفاع فوق ضغط الضبط أثناء التنفيس	يُعبَّر عنه بنسبة من الضبط؛ عنده تُقاس السعة المقننة
التراكم (Accumulation)	مقدار ارتفاع ضغط المعدة فوق MAWP	نسبة من MAWP؛ يتساوى مع التجاوز حين يكون الضبط = MAWP
ضغط إعادة الإغلاق (Reseating Pressure)	الضغط الذي يعود عنده الصمام إلى الإغلاق	أدنى من الضبط دائمًا
فرق الفتح والإغلاق (Blowdown)	(الضبط − إعادة الإغلاق) ÷ الضبط × 100	لا يعني تفريغ الوعاء؛ شائع 5 إلى 10% للغازات
الضغط الخلفي المتراكب (Superimposed Back Pressure)	ضغط قائم في شبكة التصريف قبل الفتح	يُضاف أثره إلى قوة الإغلاق في الصمام التقليدي
الضغط الخلفي المتولد (Built-up Back Pressure)	ضغط ينشأ أثناء التصريف من مقاومة خط المخرج	يحد من السعة ويقلقل الصمام إن زاد على نحو 10% في التقليدي

مثال محلول (سلم الضغوط):

- **المعطيات:** ضغط التشغيل 8 barg، وضغط ضبط الصمام 10 barg، و MAWP للوعاء 10 barg، والضغط عند السعة المقننة 11 barg، وضغط إعادة الإغلاق 9.5 barg.
- **الافتراضات:** صمام واحد بلا ضغط خلفي معتبر؛ مثال تعليمي.
- **الحل بالوحدات:**
  - التجاوز = (الضغط عند السعة المقننة − الضبط) ÷ الضبط = (11 − 10) ÷ 10 = 10%
  - التراكم = (الضغط عند السعة المقننة − MAWP) ÷ MAWP = (11 − 10) ÷ 10 = 10% أيضًا لأن الضبط يساوي MAWP.
  - فرق إعادة الإغلاق = (الضبط − إعادة الإغلاق) ÷ الضبط = (10 − 9.5) ÷ 10 = 5%
  - هامش التشغيل = (الضبط − ضغط التشغيل) ÷ الضبط = (10 − 8) ÷ 10 = 20%
- **معنى النتيجة:** الصمام يبدأ الفتح عند 10 barg ويبلغ سعته عند 11 barg ويعود للإغلاق عند 9.5 barg (الشكل 16-8 أ). وعلى مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس أن يضع PSHH بين 8 و10 barg (مثلًا 9.2 barg) بحيث يفصل SIS قبل الفتح بهامش يشمل دقة المرسل وزمن استجابة الحلقة. الحدود الفعلية (نسب التجاوز والتراكم) يحددها كود المعدة والحالة (حريق أم غيره) وتصميم الصمام، فهذه الأرقام ليست ثابتة لكل الصمامات.

الشكل 16-8: *(أ) حدث تنفيس على محور الزمن: ارتفاع من ضغط التشغيل، والفتح عند الضبط، وبلوغ السعة عند التجاوز، ثم إعادة الإغلاق بعد فرق إعادة الإغلاق؛ مع موضع PSHH تحت الضبط (والمنحنى يفترض فشل فصل SIS). (ب) الصمام المقاد: ضغط العملية يملأ القبة فوق المكبس فيبقى محكمًا حتى ضغط الضبط تقريبًا، ثم يفرغ القائد القبة فيفتح الصمام الرئيسي.*

(هـ) أنواع التصميم الثلاثة (تصنيف بكيفية توليد قوة الإغلاق والتعامل مع الضغط الخلفي)

- **التقليدي المحمّل بنابض (Conventional):** مرجع الإغلاق هو النابض مباشرة، والضغط الخلفي يؤثر في ضغط الفتح والسعة؛ لذلك لا يكفي معرفة ضغط الدخول وحده. يصلح حين يكون الضغط الخلفي صغيرًا وثابتًا (تصريف إلى الجو أو إلى شبكة منخفضة الضغط).
- **المتوازن بمنفاخ (Balanced Bellows):** منفاخ معدني يعزل الجانب الخلفي من القرص فيقل أثر الضغط الخلفي (المتراكب والمتولد) على قوى الفتح، حتى نحو 30 إلى 50% من الضبط بحسب المصنّع. «متوازن» لا تعني بلا حدود، وتمزق المنفاخ يغيّر ضغط الفتح والسعة ويسرّب إلى الغطاء؛ لذلك يُراقب تنفيس الغطاء (Bonnet Vent) ويُوجَّه إلى مكان آمن. الأشيع على مجمعات الشعلة.

- **المقاد (Pilot-Operated):** صمام رئيسي بمكبس وصمام قائد صغير؛ ضغط العملية نفسه يُنقل إلى القبة (Dome) فوق المكبس، ومساحة القبة أكبر من مساحة الفوهة فيبقى الصمام محكمًا بإحكام يقترب من ضغط الضبط (تشغيل حتى 95% منه). عند الضبط يفرغ القائد القبة فيفتح الرئيسي (الشكل 16-8 ب). قد يكون قفزيًا أو تدريجيًا، ولا يتأثر بالضغط الخلفي كثيرًا، لكنه يحتاج مائعًا نظيفًا للقائد ومرشحًا، ولا يناسب الخدمات اللزجة أو المتجمدة أو التي تحمل بوليمرات. وكلمة «قائد» هنا لا تعني تشغيلًا كهربائيًا.

(و) أمثلة الاستخدام

- **وعاء غاز أو نظام بخار:** استمرار دخول الغاز مع تعطل التحكم، أو استمرار التوليد مع انخفاض السحب: صمام أمان قفزي يصرف إلى الشعلة أو إلى الجو بحسب المائع، وتُحمى معدات البخار بعد محطة تخفيض الضغط لأن فشل المنظم مفتوحًا يعرضها لضغط المنبع.
- **مضخة إزاحة موجبة:** إغلاق خط الطرد يرفع الضغط في ثوانٍ؛ صمام تنفيس على وصلة T قبل أي عائق يعيد السائل إلى الخزان أو إلى الشفط. عند الانسداد الكامل يجب أن يمرر كامل تدفق المضخة (مضخة 100 L/min مسدودة تحتاج مسار 100 L/min لا كمية صغيرة)، والتدوير المستمر على التجاوز يسخّن السائل، فوجود الصمام لا يجعل التشغيل عليه آمنًا.
- **سائل محصور:** بين صمامي عزل مغلقين تحت الشمس أو قرب مصدر حرارة يرتفع الضغط دون مضخة؛ صمام تنفيس حراري صغير يكفي، ولا يجوز افتراض أنه يحمي الخط من كامل تدفق المضخة أو من حالة حريق.

(ز) ما يجعل الحماية فعالة فعلًا: قائمة تحقق مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس

1. ضغط الضبط في ورقة البيانات = المسجل في شهادة الاختبار = الملصق على الصمام، و≥ MAWP للمعدة المحمية.

2. PSHH وإنذار PAH على سلم الضغوط تحت ضغط الضبط بهامش يراعي دقة المرسل وزمن الفصل (الشكل 12-7 والشكل 16-9 ب).
3. نوع الصمام مناسب للضغط الخلفي الفعلي (تقليدي/متوازن/مقاد) ولنوع المائع وحرارته ومواده.
4. سعة الصمام مطابقة للحالة الحاكمة، ومقاس التوصيل لا يدل على السعة (صمامان بمقاس واحد قد تختلف فوهتاهما D إلى T).
5. خط الدخول قصير وفقد ضغطه أقل من 3% من الضبط، وإلا حدث قلقلة (Chattering): فتح وإغلاق سريعان يصطدم فيهما القرص بالمقعد ويتلف الإحكام، وليس مجرد صوت.
6. مسار التصريف إلى وجهة آمنة، بلا صمام عزل مغلق في الدخول أو المخرج (أو بصمامات مختومة على الفتح (Car-Sealed Open) موثقة في سجل الأختام والأقفال).
7. تنفيس الغطاء في الصمام المتوازن موصول إلى مكان آمن ومراقب.
8. مراقبة الفتح: مفتاح نهاية شوط أو حساس صوتي/اهتزازي على الصمام لتسجيل الأحداث والانبعاثات.
9. فترة الاختبار على المنضدة (Pop Test) من سجل الأداء و576 API، والاختبار في الموقع بجهاز رفع مساعد إن كان مقررًا.
10. لا يُغيَّر الضبط ولا ترتيب العزل لمعالجة مشكلة تشغيلية دون مراجعة هندسية وإدارة تغيير؛ وتكرار الفتح يستدعي البحث عن السبب لا اعتبار الصمام أسلوب تشغيل.

الشكل 16-9: *(أ) تركيب صمام الأمان على وعاء: خط دخول قصير فقده أقل من 3% من ضغط الضبط، وصماما عزل مختومان على الفتح (CSO)، وتصريف مائل نحو رأس الشعلة، وتنفيس غطاء الصمام المتوازن بمنفاخ إلى مكان آمن، ومؤشر فتح، ومرسل حماية مستقل إلى SIS. (ب) سلم الضغوط في المثال المحلول: التشغيل 8، وPSHH عند 9.2، وإعادة الإغلاق 9.5، والضبط 10، والسعة المقننة 11 barg، وإنذار PAH بين التشغيل وPSHH.*

(ح) الأعطال الشائعة

العَرَض	السبب المرجح	الفحص	الإجراء
تسريب دائم (Simmer) تحت الضبط	ضغط التشغيل قريب جدًا من الضبط، أو مقعد متضرر أو شوائب	قياس الضغط الفعلي مقابل الضبط؛ كشف صوتي	رفع هامش التشغيل، إعادة تلبيس المقعد، مرشح

العَرَض	السبب المرجح	الفحص	الإجراء
قلقلة أثناء التنفيس	فقد ضغط الدخول كبير، أو صمام أكبر من اللازم، أو ضغط خلفي متولد عالٍ	حساب فقد الدخول؛ مراجعة السعة مقابل الحالة	تقصير الدخول وتكبيره، صمام أصغر أو صمامان، نوع متوازن/مقاد
لا يفتح عند الضبط في الاختبار	التصاق القرص بالمقعد (تآكل، بوليمر)، أو ضبط عُبث به	اختبار على المنضدة؛ فحص الختم	تنظيف وإعادة تلبيس، مواد أنسب، ختم وتوثيق
يفتح تحت الضبط	نابض متعب أو مكسور، أو حرارة عالية تُضعف النابض، أو ضغط خلفي على المقاد	فحص النابض ومقارنة الضبط البارد بالحار	تبديل النابض أو نوع مناسب للحرارة
مؤشر فتح بلا حدث ضغط	مفتاح الشوط متضرر أو اهتزاز الخط	مقارنة سجل الضغط مع إشارة الفتح	إصلاح المؤشر وتثبيت الخط

الخلاصة العملية: صمام الأمان عادة قفزي للغاز والبخار، وصمام التنفيس عادة تدريجي للسوائل، لكن الاختيار الصحيح يقوم على الخدمة والسلوك والسعة والضغط الخلفي والاعتماد، لا على الاسم. ومهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس يضمن أن سلم الحمايات الإلكترونية يقف تحت هذا الخط الميكانيكي الأخير، ويعرف أن وظيفة هذا الخط أن يعمل مرة ثم يُراجع، لا أن يعمل كل يوم.

حالة ميدانية (مثال تعليمي مركّب): صمام أمان «ينفخ» ليلًا.

- **العَرَض:** صمام الأمان على مصب منظم غاز الوقود لسخانين يفتح إلى الشعلة مرتين أو ثلاثًا في الأسبوع، وليلًا دائمًا، حين يعمل السخانان على الحمل الأدنى أو يتوقف أحدهما. ضبط المنظم 2.5 barg، وضبط صمام الأمان 4.5 barg، وهو ضغط تصميم خط المصب.
- **الفحص:** اقترح المشغلون رفع ضبط الصمام إلى 5 barg، فرُفض الاقتراح لأنه يتجاوز ضغط التصميم ويحتاج إلى إدارة تغيير. نُزع الصمام واختُبر

على المنضدة قبل أي تنظيف، فبدأ الفتح عند 4.45 barg: الضبط سليم، لكن المقعد متضرر من الفتح المتكرر. ثم عُرض اتجاه ضغط المصب على المؤرخ: بعد توقف السحب يرتفع الضغط ببطء من ضغط الإغلاق (نحو 2.7 barg) حتى 4.5 barg في نحو 40 دقيقة. وأعاد اختبار عزل المصب مع إيقاف الاستهلاك الزحفَ نفسه.

- **السبب:** زحف في المنظم (Creep)، لا عطل في صمام الأمان. نُزع عنصر المرشح قبل المنظم في صيانة سابقة ولم يُعَد، فتراكمت قشور على مقعد المنظم، ولم يعد يُحكم عند التدفق الصفري.
- **الإجراء:** نُظّف المنظم وبُدّل مقعده، وأُعيد عنصر المرشح وأُضيف فحصه إلى قائمة الصيانة، وأُعيد تلبيس مقعد صمام الأمان واختُبر. وأُضيف إنذار ضغط عالٍ (PAH) على المصب عند 3.2 barg لينبّه إلى الزحف قبل أن يبلغ الضغط ضبط الصمام.
- **الدرس:** صمام الأمان الذي يفتح متكررًا يدل في الغالب على مشكلة قبله: منظم يزحف، أو تجاوز مفتوح، أو صمام تحكم فشل مفتوحًا. ابحث عن مصدر الضغط قبل أن تتهم الصمام أو تغيّر ضبطه، وسجّل حالته كما استُلمت (As-Found) قبل أي تنظيف.

دور المهندس ودور الفني:

الصمام	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
صمام العزل	النوع والقطر والفئة والمواد والمواصفة ومتطلبات الحريق والخدمة الحامضية في ورقة المواصفات	يفحص الإحكام والحشوة وحركة الساق، ويسجل حالات الاحتباس والتسرب والطَّرق

الصمام	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
المنظم الذاتي	النوع ونطاق النابض والسعة والانحدار المقبول، وحماية المصب عند فشله مفتوحًا	ينظف المرشح، ويقيس ضغط الإغلاق والانحدار عند ثلاث نقاط تدفق، ويختم مسمار الضبط ويوثقه
صمام الأمان	اتساق ضغط الضبط مع MAWP ومع سلم الحمايات (PAH وPSHH)، ونوع الصمام أمام الضغط الخلفي، وترتيب العزل المختوم على الفتح	يسجل حالة الصمام كما استُلم، ويشهد اختبار المنضدة، ويتحقق من الختم والملصق ووضع صمامات العزل

16.4 الأخطاء الشائعة

- اختيار صمام عزل بمعايير صمام التحكم، أو الاعتماد على صمام تحكم لعزل معدة للصيانة.
- تحديد منظم ذاتي التشغيل دون حساب الانحدار (Droop) عند أقصى تدفق.
- وضع منظم ذاتي التشغيل حيث يلزم تسجيل الضغط أو تغيير نقطة الضبط من غرفة التحكم.
- تحجيم صمام الأمان على حالة تنفيس واحدة دون دراسة حالات التنفيس كلها.
- إهمال الضغط الخلفي وهبوط الضغط في خط الدخول عند تحجيم صمام الأمان.
- ترك صمام العزل أسفل صمام الأمان دون قفل في وضع الفتح (Car-Sealed Open).
- اختبار صمام الأمان على المنضدة بعد تنظيفه دون تسجيل حالته كما استُلم (As-Found).
- الاعتماد على منظم الضغط الخلفي (Back-Pressure Regulator) للحماية من الضغط الزائد بدل صمام أمان مستقل.

16.5 ملخص

- صمام العزل يُختار لإحكام الإغلاق وسرعته ووضع فشله، لا لخاصية التدفق.
- المنظم ذاتي التشغيل بسيط وموثوق، لكنه يعمل بانحدار، ولا يعطي إشارة ولا سجلًا.
- صمام الأمان آخر خط ميكانيكي: يُحجَّم من دراسة حالات التنفيس، ويُركّب بخط دخول وخروج محسوبين، ويُختبر ويُوثَّق دوريًا.
- أسماء صمامات التنفيس (PSV وRV وPRV وSRV وTRV) تختلف بين الشركات والمعايير؛ فيُحكم على الصمام من ورقة بياناته وشهادته، ويوضع PSHH تحت ضغط ضبطه بهامش، ويبقى ضغط إغلاق المنظم في المصب دونه بهامش أيضًا.

وفي الفصل التالي: الفصل 17، «الدوائر والبوابات المنطقية والتصميم المنطقي»؛ فبعد العناصر النهائية ننتقل إلى المنطق الذي يأمرها: شروط الفصل والسماح التي تغلق صمام الإغلاق الطارئ أو تفرّغ مشغله.

16.6 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق في معايير الاختيار بين صمام العزل وصمام التحكم؟ ولماذا لا يُعتمد على صمام تحكم لعزل معدة للصيانة؟
2. منظم ضغط ذاتي التشغيل يضبط 4.0 bar عند تدفق صغير، وينخفض الضغط إلى 3.7 bar عند أقصى تدفق. ما اسم هذه الظاهرة؟ وكيف تُقلَّل؟
3. لماذا لا يُستعمل منظم ذاتي التشغيل حيث يلزم تسجيل الضغط أو تغيير نقطة الضبط من غرفة التحكم؟
4. صمام أمان ضغط ضبطه 20 barg. ما أقصى هبوط ضغط مقبول في خط دخوله إذا طُبّقت قاعدة 3% من ضغط الضبط؟

5. ما الفرق بين صمام الأمان (Safety Valve) وصمام التنفيس (Relief Valve) في طريقة الفتح ونوع المائع؟

6. لماذا يُقفل صمام العزل أسفل صمام الأمان في وضع الفتح؟ ومتى يُسمح بإغلاقه؟

7. ما البيانات التي تُسجَّل عند استلام صمام أمان من الخدمة للاختبار؟ ولماذا تُسجَّل قبل أي تنظيف أو ضبط؟

8. اذكر ثلاثة أنواع من صمامات العزل، وخدمة تناسب كلًا منها.

9. منظم مباشر بغشاء مساحته الفعالة 200 cm^2 ونابض معدله 30 N/mm وشوطه 4 mm، وضغط ضبطه 3.0 barg. احسب الانحدار بالبار وبالنسبة المئوية، واذكر طريقتين لتقليله.

10. صمام أمان ضغط ضبطه 10 barg يصرّف إلى شبكة شعلة يبلغ ضغطها الخلفي المتولد أثناء التصريف نحو 2.5 barg. هل يصلح الصمام التقليدي المحمّل بنابض؟ وأي نوعي التصميم الآخرين تختار، وما الذي يجب مراقبته فيه؟

مراجع الفصل: R73 (الصمامات الصناعية وصمامات العزل: التصنيف والأجزاء والمواد والمواصفات، 16.1)؛ وASME B16.34 وB16.10، وAPI 600 و602 و603 و6D و594 و609 و598 و607 و6FA، وSP-25 MSS، وNACE MR0175/ISO 15156؛ وIEC 60534-2-1 لتحجيم المنظمات، وEmerson/Fisher Regulator Handbook (المنظمات والانحدار، 16.2)؛ وR55 (مذكرة المؤلف في صمامات الأمان والتنفيس)، وAPI 520 و521 و526 و576، وASME BPVC Sec. VIII، وISO 4126 (16.3).

الفصل 17: الدوائر والبوابات المنطقية والتصميم المنطقي

لمن هذا الفصل: مهندس التحكم والفني الذي يقرأ منطق الحمايات والتسلسلات في PLC أو DCS أو نظام السلامة، ويحتاج إلى فهم ما وراء الرموز: لماذا تُكتب الحماية بهذه الطريقة، وكيف تُبسط، وكيف تُختبر. ويفيد أيضًا من يتعامل مع بطاقات الإدخال والإخراج الرقمية ومستويات الجهد فيها.

الفكرة الأساسية: كل قرار «نعم أو لا» في المصنع، من بدء مضخة إلى فصل توربين، هو دالة منطقية في مجموعة من الإشارات الثنائية. هذه الدالة تُكتب مرة بتلامسات مرحلات، ومرة ببوابات في مخطط، ومرة بسلّم أو كتل وظيفية في PLC، لكنها الدالة نفسها. ومن يتقن الجبر البولياني يستطيع أن يتحقق من أن الترجمة بين هذه الأشكال صحيحة، وأن يكتشف الخطأ قبل أن يكتشفه الحادث.

17.1 لماذا يحتاج مهندس التحكم إلى المنطق الرقمي؟

قد يبدو علم الدوائر الرقمية بعيدًا عن غرفة التحكم، لكن مهندس التحكم يستخدمه يوميًا دون أن يسميه:

- **الحمايات والتعشيقات (Interlocks):** شروط الفصل مجموعة من بوابات «أو»، وشروط السماح بالبدء مجموعة من بوابات «و»، ومنطق التصويت «اثنان من ثلاثة» دالة منطقية معروفة.
- **التسلسلات:** بدء توربين أو ضاغط سلسلة حالات، تنتقل من حالة إلى أخرى بشروط وتوقيتات، وهذا هو المنطق التتابعي.

- **الإنذارات:** معرفة أول إنذار ظهر قبل غيره (First-Out) تحتاج إلى قلابات وإمساك.
- **الاتصالات وقراءة البيانات:** كلمات الحالة (Status Words) في مشغلات المحركات والمرسلات الذكية تُقرأ بتًا بتًا بالنظام الثنائي والسداسي عشري.
- **العتاد:** بطاقات الإدخال الرقمي لها عتبات جهد وتيار، ومخارجها مصادر أو مستهلكات تيار، وسوء فهمها يسبب إشارات متقطعة وأعطالًا غامضة.

17.2 أنظمة العد والترميز

النظام الثنائي (Binary): أساسه 2، وكل خانة بت (Bit) قيمته 0 أو 1، ووزن الخانة يتضاعف من اليمين إلى اليسار: 1، 2، 4، 8، 16... فالعدد 1011 بالثنائي = 8 + 0 + 2 + 1 = 11.

النظام السداسي عشري (Hexadecimal): أساسه 16، ورموزه 0–9 ثم A إلى F للقيم 10 إلى 15. وفائدته أن كل رمز يقابل أربعة بتات تمامًا، فيختصر كتابة الكلمات الطويلة. ويُكتب في أنظمة التحكم بصيغ مثل 8C12#16 أو 0x8C12.

> **مثال محلول (قراءة كلمة حالة):** مشغّل محرك يعيد كلمة حالة قيمتها 8C12#16. ودليل المصنّع يقول: البت 1 «جاهز»، والبت 4 «يعمل»، والبت 10 «تحذير حرارة»، والبت 11 «تحكم عن بعد»، والبت 15 «عطل».
>
> - نحول كل رمز إلى أربعة بتات: 1000 = 8، و1100 = C، و0001 = 1، و0010 = 2.
> - الكلمة كاملة: 1000 1100 0001 0010، والبتات من اليسار هي 15 إلى 0.
> - البتات المرفوعة: 15 و11 و10 و4 و1.
> - المعنى: المحرك جاهز ويعمل تحت التحكم عن بعد، ومعه تحذير حرارة، وبت

> العطل مرفوع أيضًا. فالسؤال التالي: هل العطل حقيقي أم أن هذا الطراز يرفع البت 15 مع التحذيرات؟ والجواب في دليل المصنّع لا في التخمين.

ترميز BCD: كل خانة عشرية تُمثل بأربعة بتات منفصلة، فالعدد 59 يُكتب 0101 1001. يُستخدم في المفاتيح الدوارة المرقمة وشاشات العرض القديمة.

رمز غراي (Gray): ترميز يتغير فيه بت واحد فقط بين كل قيمة والتي تليها: 000، 001، 011، 010، 110، 111، 101، 100. ويُستخدم في المشفرات المطلقة (Absolute Encoders) لقياس الموضع. فلو استُخدم الثنائي العادي، لتغيرت عدة بتات معًا عند الانتقال من 011 إلى 100، ولو قُرئت الكلمة في لحظة الانتقال لظهرت قيمة بعيدة تمامًا عن الحقيقة. أما في رمز غراي فأسوأ خطأ ممكن خطوة واحدة.

17.3 مستويات الإشارة والعائلات المنطقية

الواحد والصفر في الدائرة الحقيقية ليسا رقمين، بل نطاقان من الجهد. وبينهما منطقة غير محددة يجب ألا تبقى الإشارة فيها.

العائلة أو المعيار	صفر الدخل (أقصى)	واحد الدخل (أدنى)	ملاحظات
TTL بتغذية 5 V	0.8 V	2.0 V	خرجها: الصفر حتى 0.4 V، والواحد من 2.4 V
CMOS بتغذية 5 V	نحو 1.5 V	نحو 3.5 V	استهلاك منخفض جدًا، وحساسة للكهرباء الساكنة
مداخل PLC الصناعية 24 V DC وفق IEC 61131-2	حتى 5 V	من نحو 11 إلى 15 V حسب النوع	تُعرّف أيضًا بتيار أدنى، مثل 2 mA، لتمييز التلامس الحقيقي من التسريب

هامش الضجيج (Noise Margin): هو الفرق بين ما يضمنه الخرج وما يحتاجه الدخل. في TTL: هامش الواحد = 2.0 − 2.4 = 0.4 V، وهامش الصفر = 0.8 − 0.4 = 0.4 V. أي

أن ضجيجًا يزيد على 0.4 V قد يقلب الإشارة. ولهذا لا تُنقل إشارات 5 V إلى مسافات طويلة في المصنع، وتُستخدم بدلًا منها إشارات 24 V، وهامشها عدة فولتات.

> **مثال محلول (تسريب يوهم بتلامس):** مفتاح تقاربي ثنائي الأسلاك موصول بمدخل PLC، وتيار تسريبه في حالة الإطفاء 1.5 mA، ومقاومة دخل البطاقة نحو 3 kΩ.
>
> - الجهد على الدخل في حالة الإطفاء = 1.5 mA × 3 kΩ = 4.5 V.
> - هذا أقل من حد الصفر 5 V بقليل، فالمدخل يرى صفرًا في الظروف العادية. لكن أي زيادة في التسريب مع الحرارة، أو بطاقة مقاومتها أعلى، قد تدفع الجهد إلى المنطقة غير المحددة فيومض المؤشر.
> - الحل: مقاومة تحميل (Bleeder) على التوازي مع الدخل تخفض الجهد، أو اختيار بطاقة من النوع المناسب للحساسات ثنائية الأسلاك، أو حساس ثلاثي الأسلاك.

مصدر التيار ومستهلكه: في مداخل ومخارج PLC يُقال عن الوحدة إنها مصدر للتيار (Sourcing) حين يخرج التيار منها إلى الحمل ويعود إلى السالب، وإنها مستهلكة (Sinking) حين يدخل التيار إليها من الحمل الموصول بالموجب. ويجب أن يتطابق نوع الحساس (PNP أو NPN) مع نوع البطاقة، وإلا لن تعمل الدائرة.

17.4 البوابات المنطقية وجداول الحقيقة

البوابة دائرة تعطي خرجًا ثنائيًا وفق قاعدة ثابتة في مداخلها. ويُعرض سلوكها كاملًا في جدول الحقيقة (Truth Table)، الذي يسرد كل تركيبات المداخل، وعددها 2^n لعدد n من المداخل.

الشكل 17-1: *البوابات المنطقية الأساسية برمزها الأمريكي (ANSI/IEEE 91) ورمزها الدولي IEC (60617-12)، مع التعبير البولياني وجدول الحقيقة لكل منها.*

- **«و» (AND):** خرجها 1 فقط إذا كانت كل المداخل 1. في المصنع: شروط السماح بالبدء، كأن يكون الزيت متوفرًا والصمام مفتوحًا والحماية مُعاد ضبطها.
- **«أو» (OR):** خرجها 1 إذا كان أي مدخل 1. في المصنع: أسباب الفصل؛ أي سبب منها يكفي.
- **النفي (NOT):** يعكس الإشارة.
- **«نفي و» (NAND) و«نفي أو» (NOR):** بوابة «و» أو «أو» يليها نفي. وأهميتهما أن كلًّا منهما «عامة» (Universal): يمكن بناء أي دالة منطقية من NAND وحدها أو من NOR وحدها.

- **«أو» الاستثنائية (XOR):** خرجها 1 إذا اختلف المدخلان. تُستخدم لكشف عدم التطابق، مثل مقارنة حالة صمام بأمره، أو مقارنة قناتين يجب أن تتفقا.

المنطق الموجب والسالب: في المنطق الموجب يعني الجهد المرتفع 1. لكن كثيرًا من الحمايات تُبنى بمنطق «الإشارة الطبيعية مرتفعة»: فالحساس السليم والدائرة المغلقة يعطيان 1، والفصل يعني 0. وهذا هو مبدأ «التغذية للتشغيل» أو قطع التغذية للفصل (De-Energize-to-Trip) (القسم 15.11)، ويسميه بعضهم تجوزًا «المنطق السالب» لأن إشارة الفصل فيه فعالة عند الصفر. والأمر المهم أن يُكتب على كل إشارة في مخطط المنطق معنى الواحد فيها: هل هو «الضغط طبيعي» أم «الضغط منخفض»؟ فكثير من أخطاء البرمجة سببه نسيان هذا السؤال.

17.5 الجبر البولياني ونظريتا دي مورغان

الجبر البولياني هو الحساب الذي تُكتب به الدوال المنطقية وتُبسط. نرمز لـ «و» بنقطة أو بتجاور الحروف (A·B أو AB)، ولـ «أو» بعلامة +، وللنفي بشرطة أو فاصلة عليا (A').

أهم القوانين:

القانون	صيغة «و»	صيغة «أو»
العنصر المحايد	A · 1 = A	A + 0 = A
العنصر الماحي	A · 0 = 0	A + 1 = 1
التكرار	A · A = A	A + A = A
المتمم	A · A' = 0	A + A' = 1
التبديل	A · B = B · A	A + B = B + A
التوزيع	A · (B + C) = A·B + A·C	A + B·C = (A + B) · (A + C)
الامتصاص	A · (A + B) = A	A + A·B = A

القانون	صيغة «و»	صيغة «أو»
دي مورغان	(A · B)' = A' + B'	(A + B)' = A' · B'

نظريتا دي مورغان في لغة المصنع: سلسلة من تلامسات مغلقة عادةً، واحد لكل سبب فصل، تُبقي ملف المرحل مُغذّى ما دامت كلها مغلقة. فالتشغيل = (لا انخفاض زيت) · (لا سرعة زائدة) · (لا حرارة زائدة). وبتطبيق دي مورغان: الفصل = انخفاض زيت + سرعة زائدة + حرارة زائدة. أي أن سلسلة «و» على الإشارات الطبيعية هي نفسها «أو» على إشارات الفصل. وهذه الترجمة بالذات هي مصدر خطأ شهير عند نقل منطق المرحلات إلى برنامج (17.12).

> **مثال محلول (تبسيط جبري):** برنامج قديم يسمح بفتح صمام وفق الشرط: F = A·B + A'·B + A·B'، حيث A «الضغط طبيعي» وB «الأمر اليدوي».
>
> 1. نجمع الحدين الأولين: A·B + A·B' = A·(B + B') = A·1 = A.
> 2. تصبح الدالة: F = A + A'·B.
> 3. نطبق قانون التوزيع في صيغة «أو»: (A + A')·(A + B) = 1·(A + B) = A + B.

النتيجة: F = A + B. أي أن الصمام يُفتح إذا كان الضغط طبيعيًا أو إذا صدر الأمر اليدوي. والتبسيط هنا لا يوفر بوابات فقط، بل يكشف معنى الشرط: الأمر اليدوي يفتح الصمام حتى مع ضغط غير طبيعي. فإن لم يكن هذا مقصودًا، فالبرنامج القديم فيه خطأ تصميمي كان مخفيًا وراء التعقيد.

17.6 التبسيط بخرائط كارنو

حين يزيد عدد المتغيرات يصعب التبسيط الجبري، فتُستخدم خريطة كارنو (Karnaugh Map). وهي جدول حقيقة مرتب بحيث تختلف كل خانتين متجاورتين في متغير واحد فقط. نضع 1 في خانات الحالات التي يكون فيها الخرج 1، ثم نجمع الخانات المتجاورة

في مجموعات من 1 أو 2 أو 4 أو 8، وتكون المجموعات أكبر ما يمكن. كل مجموعة تعطي حدًا واحدًا، لا يبقى فيه إلا المتغيرات التي لا تتغير داخلها.

مثال محلول: دالة بثلاثة متغيرات A وB وC، خرجها 1 في الحالات: 001، و011، و101، و111، و110.

- الخانات الأربع التي فيها C = 1 متجاورة وتشكل مجموعة واحدة، يتغير فيها A وB ويبقى C. فالحد الأول: C.
- الخانتان 111 و110 تشكلان مجموعة يثبت فيها A = 1 و B = 1 ويتغير C. فالحد الثاني: A·B.
- الدالة المبسطة: F = C + A·B.

الشكل 17-2: *تبسيط دالة بثلاثة متغيرات بخريطة كارنو: مجموعة من أربع خانات تعطي C، ومجموعة من خانتين تعطي A·B.*

ومن الجيد أن نتذكر أن الخانة الواحدة يجوز أن تدخل في أكثر من مجموعة، كما دخلت الخانة 111 في المجموعتين. وأن حواف الخريطة متجاورة كأن الخريطة ملفوفة على أسطوانة. وفي الأنظمة الحديثة لا يحتاج المهندس غالبًا إلى تبسيط يدوي لتوفير

البوابات، لكن الخريطة تبقى أداة ممتازة للتحقق من أن منطق حماية كتبه غيره يغطي كل الحالات، ولا يترك تركيبة من المداخل بلا قرار.

17.7 الدوائر التوافقية

الدائرة التوافقية (Combinational) خرجها في أي لحظة يعتمد على مداخلها في تلك اللحظة فقط، ولا تحتفظ بذاكرة. وأهم أنواعها:

- **الجامع (Adder):** الجامع النصفي يجمع بتين فيعطي المجموع S = A ⊕ B والمحمول C = A·B، والجامع الكامل يضيف المحمول الداخل. ومنه تُبنى وحدات الحساب في المعالجات.
- **المقارن (Comparator):** يقارن عددين ثنائيين ويبيّن أيهما أكبر أو أنهما متساويان. وفي المصنع نراه في مقارنة القيمة بحد الإنذار، وإن كان يُنفذ اليوم برمجيًا.
- **الناخب أو المازج (Multiplexer):** يختار أحد عدة مداخل ويمرره إلى خرج واحد وفق مداخل اختيار. مثاله في التحكم: اختيار مرسل من مرسلين يدويًا أو آليًا حين يتعطل أحدهما.
- **الموزع (Demultiplexer):** عكس الناخب، يوجه مدخلًا واحدًا إلى أحد عدة مخارج.
- **المشفر وفاك التشفير (Encoder وDecoder):** يحول المشفر عدة خطوط إلى رمز ثنائي، ويحوله فاك التشفير إلى خطوط منفصلة، كما في تشغيل شاشات العرض ذات الأجزاء السبعة. والمشفر ذو الأولوية (Priority Encoder) يعطي رقم أعلى مدخل نشط، وفكرته قريبة من منطق الإنذار الأول.

17.8 الدوائر التتابعية: القلابات والعدادات والمسجلات

الدائرة التتابعية (Sequential) تعتمد على مداخلها وعلى حالتها السابقة، أي أن لها ذاكرة. وأبسط عنصر ذاكرة هو القلاب.

قلاب SR: يُبنى من بوابتي NOR متقاطعتين، يعود خرج كل منهما إلى مدخل الأخرى. المدخل S يضع الخرج Q على 1، والمدخل R يعيده إلى 0، فإذا زال المدخلان بقي الخرج على حاله. وهذا هو الإمساك نفسه الذي تؤديه دائرة البدء والإيقاف بالمرحلات. وتركيبة S = 1 و R = 1 معًا غير مسموحة في القلاب البسيط. أما في PLC فتُحدد الأولوية صراحة بكتلتي SR (الأولوية للضبط) وRS (الأولوية لإعادة الضبط). والمبدأ في منطق الحمايات: عند تزامن أمر الفصل مع أمر البدء أو إعادة الضبط يجب أن تنتصر حالة الفصل المطلوبة. ولا تُختار الكتلة قبل تحديد معنى الخرج Q: إذا كان Q يعني «السماح بالتشغيل» فالفصل هو جعل Q = 0 وتكون الأولوية لإعادة الضبط (RS)؛ وإذا كان Q يعني «فصل محفوظ» (Trip Latched) فالفصل هو جعل Q = 1 وتكون الأولوية للضبط (SR). نقل القاعدة اللفظية «الأولوية لإعادة الضبط» إلى دائرة معناها معكوس خطأ شائع.

القلاب D: يأخذ الخرج قيمة المدخل D عند الحافة الصاعدة لإشارة الساعة فقط، ويبقى ثابتًا بين الحافتين. ومنه تُبنى المسجلات والعدادات المتزامنة.

القلابان JK وT: قلاب JK يزيل الحالة الممنوعة في SR، فحين يكون المدخلان 1 ينقلب الخرج. وقلاب T ينقلب مع كل نبضة، ويقسم التردد على 2.

الشكل 17-3: *قلاب SR من بوابتي NOR متقاطعتين، والمخطط الزمني للقلاب D الذي لا يتغير خرجه إلا عند الحافة الصاعدة للساعة.*

العدادات (Counters): سلسلة قلابات T تعد النبضات بالثنائي. ومنها العداد التصاعدي والتنازلي والعداد العشري. وفي المصنع نراها في عد نبضات عداد التدفق التوربيني، وعد مرات بدء المحرك لمنع البدء المتكرر، وعد ساعات التشغيل.

مسجلات الإزاحة (Shift Registers): تنقل البتات خطوة مع كل نبضة ساعة. تُستخدم في تحويل البيانات بين التوازي والتسلسل في الاتصالات، وفي تتبع المنتج على خطوط التعبئة: فحين يُكتشف منتج معيب يُسجل بت في المسجل، ويُزاح مع حركة السير حتى يصل إلى مكان الطرد.

كشف الحافة: كثير من أوامر التحكم يجب أن تُنفذ مرة واحدة عند الضغط على الزر لا طوال فترة الضغط. لذلك تُستخدم كتلتا R_TRIG لكشف الحافة الصاعدة وF_TRIG لكشف الهابطة، وتعطي كلٌّ منهما نبضة مدتها دورة برنامج واحدة.

17.9 المؤقتات

المؤقت 555: دائرة متكاملة شهيرة تعمل مهتزًا غير مستقر (Astable) يولد نبضات مستمرة، أو مهتزًا أحادي الاستقرار (Monostable) يعطي نبضة واحدة بطول تحدده

مقاومة ومكثف. وزمن النبضة في الوضع أحادي الاستقرار نحو $t = 1.1 \times R \times C$. فمقاومة 100 kΩ مع مكثف 10 µF تعطي نحو

$$1.1 \times 100{,}000 \times 0.00001 = 1.1$$

ثانية. ونجده في لوحات الإنذار القديمة ومولدات الوميض وبعض مرحلات الزمن الإلكترونية.

مؤقتات PLC وفق IEC 61131-3: ثلاثة أنواع قياسية، ولكل منها مدخل IN وزمن ضبط PT:

- **تأخير التشغيل (TON):** يرتفع الخرج بعد أن يبقى المدخل مرتفعًا مدة PT متصلة، ويسقط فور سقوط المدخل. يُستخدم لتجاهل النبضات القصيرة، كتأخير إنذار انخفاض الضغط ثانيتين حتى لا تُطلقه تذبذبات عابرة.
- **تأخير الإطفاء (TOF):** يرتفع الخرج فور ارتفاع المدخل، ويبقى مرتفعًا مدة PT بعد سقوطه. يُستخدم لإبقاء مروحة تبريد أو مضخة زيت تعمل بعد توقف الآلة.
- **النبضة (TP):** يعطي نبضة بطول PT ثابت عند الحافة الصاعدة للمدخل، مهما طال المدخل أو قصر.

الشكل 17-4: *سلوك المؤقتات القياسية الثلاثة لإشارة دخل واحدة بزمن ضبط 3 ثوانٍ؛ النبضة القصيرة لا تظهر في خرج مؤقت تأخير التشغيل.*

مثال محلول (تأخير الإنذار): مفتاح مستوى منخفض في خزان يتذبذب بسبب الأمواج، فيعطي نبضات مدتها بين 0.5 و1.5 ثانية حين يكون المستوى قرب نقطة الضبط. والمطلوب ألا يصدر الإنذار إلا إذا ثبت انخفاض المستوى.

- نضع مؤقت TON بزمن PT = 5 s بعد إشارة المفتاح.
- النبضات القصيرة لا تبلغ 5 ثوانٍ فلا تصل إلى الإنذار.
- لكن يجب التأكد من أن 5 ثوانٍ لا تؤخر إجراءً وقائيًا مرتبطًا بالإشارة، مثل إيقاف مضخة تسحب من الخزان. فإن كان التأخير غير مقبول للحماية، يُستخدم تأخير قصير للحماية وطويل للإنذار، أو يُعالج أصل المشكلة بأنبوب تهدئة (Stilling Well) حول المفتاح.

17.10 من سلّم المرحلات إلى البوابات ولغات PLC

الدالة المنطقية الواحدة لها في المصنع ثلاثة أشكال شائعة، ويجب أن ينتقل المهندس بينها دون أن يتغير المعنى:

- **سلّم المرحلات (Relay Ladder):** التلامسات على التوالي تعني «و»، والتلامسات على التوازي تعني «أو»، والتلامس المغلق عادةً يعني النفي.
- **مخطط البوابات أو الكتل الوظيفية (FBD):** الشكل نفسه برموز البوابات، وهو الأقرب إلى مخططات المنطق في وثائق التصميم.
- **لغات PLC وفق IEC 61131-3:** السلّم (LD) والكتل الوظيفية (FBD) والنص المهيكل (ST) والمخطط التسلسلي (SFC).

الشكل 17-5: *دائرة البدء والإيقاف بالإمساك بشكليها: سلّم المرحلات، والبوابات المكافئة التي تعيد فيها التغذية الراجعة من الخرج حالة التشغيل.*

دائرة البدء والإيقاف: معادلتها

$$\mathrm{M} = (\mathrm{START} + \mathrm{M}) \cdot \mathrm{NOT\ STOP}.$$

زر البدء أو تلامس الإمساك يغذي الملف، وزر الإيقاف يقطعه. ولاحظ أن زر الإيقاف يُوصل مغلقًا عادةً، فإذا انقطع سلكه توقف المحرك بدل أن يفقد المشغل القدرة على إيقافه. وهذه قاعدة عامة في كل ما يوقف أو يفصل: السلك المقطوع يجب أن يؤدي إلى الحالة الآمنة.

منطق التصويت: حين تُركب ثلاثة حساسات مستقلة للمتغير نفسه، يُتخذ قرار الفصل إذا طلبه اثنان منها على الأقل. ومعادلته: TRIP = A·B + A·C + B·C.

الشكل 17-6: *منطق التصويت اثنان من ثلاثة (2oo3) مبنيًا من ثلاث بوابات «و» وبوابة «أو»، مع جدول حقيقته.*

وفائدة هذا التصويت أنه يجمع الأمان والتوافر: فحساس واحد معطل في اتجاه الفصل لا يوقف المصنع، وحساس واحد معطل في اتجاه عدم الفصل لا يمنع الحماية. ويختلف ذلك عن 1oo2 الذي يفصل بأي حساس فيكون آمنًا جدًا وأقل توافرًا، وعن 2oo2 الذي يحتاج الاثنين فيكون أكثر توافرًا وأقل أمانًا. ويأتي حساب ذلك كميًا في الفصل 29.

مخططات المنطق الثنائي وفق ISA-5.2: وثيقة التصميم التي يُكتب بها منطق الحمايات والتعشيقات قبل البرمجة. تُرسم فيها المداخل بأسهم تحمل الوسوم، والدوال بصناديق «و» و«أو» والتصويت والإمساك والمؤقتات، والمخارج بأسهم إلى المعدات. وتُربط عادةً بمصفوفة السبب والنتيجة (Cause & Effect) وبمخططات P&ID (الفصل 5).

الشكل 17-7: *مخطط منطق ثنائي مبسط لحماية مضخة: تصويت اثنين من ثلاثة على المستوى المنخفض جدًا، وأسباب فصل أخرى، وإمساك للفصل لا يُعاد ضبطه ما دام السبب قائمًا، وسماح بالبدء بشرط غياب الفصل.*

قراءة الشكل 17-7 بالمعادلات: الدائرة الصغيرة على مدخل بوابة تعني نفيًا (NOT)، والواحد في كل إشارة دخل يعني «السبب قائم». والمنطق ثلاث معادلات:

$$\text{ANY_CAUSE} = \text{LL_2oo3} + \text{PT_HH} + \text{ESD_PB} + \text{MCC_FAULT}$$

$$\text{TRIP_LATCHED} = \text{S}(\text{ANY_CAUSE}) \;/\; \text{R}(\text{RESET} \cdot \text{NOT ANY_CAUSE})$$

$$\text{RUN} = \text{START} \cdot \text{NOT TRIP_LATCHED}$$

الممسك بأولوية S: إذا تزامن سبب فصل مع إعادة ضبط يبقى الفصل؛ ولا تُقبل إعادة الضبط إلا بعد زوال كل الأسباب (البوابة «و» أسفل الشكل)؛ ولا يُسمح بالبدء إلا والممسك صفر (البوابة «و» أعلى اليمين).

واقرأ المخطط بالترتيب: كل سبب من الأسباب الأربعة يكفي وحده لضبط قلاب الإمساك، وخرج القلاب يوقف المضخة ويصدر الإنذار ويمنع أمر البدء عبر المدخل المنفي في بوابة السماح؛ أما شرط إعادة الضبط فكما في المعادلة الثانية أعلاه.

جدول مقارنة: وسائل تنفيذ المنطق

المعيار	مرحّلات سلكية	إلكترونيات صلبة (بوابات)	PLC عادي	PLC / حلّال سلامة
تغيير المنطق	إعادة توصيل	إعادة تصميم اللوحة	برمجيًا	برمجيًا بإدارة تغيير واعتماد
السرعة	ms (زمن التلامس)	ns إلى µs	1 إلى 10 ms	10 إلى 100 ms مع تشخيص
التشخيص الذاتي	لا	لا	محدود	شامل (SIL)
أنماط العطل	تلامس ملتصق أو مفتوح	مكوّن تالف	برمجية وعتادية	مكشوفة ومحسوبة
العدد الاقتصادي للمداخل	حتى نحو 20	دوائر مخصصة	مئات إلى آلاف	مئات إلى آلاف
الشفافية للفني	عالية (يرى التلامس)	منخفضة	متوسطة (مراقبة السلّم)	متوسطة، محمية بكلمة سر
أين يبقى	أزرار الإيقاف السلكية، تعشيقات بسيطة مستقلة	حساسات ونبائط	الآلات والحزم والعمليات	ESD وF&G و BMS

كيف أختار؟ الافتراضي اليوم PLC عادي للآلات والحزم والعمليات، وحلّال سلامة معتمد لكل وظيفة لها مستوى SIL (ESD وF&G وBMS)، وتبقى المرحّلات السلكية لأزرار الإيقاف والتعشيقات المستقلة البسيطة التي يجب أن تعمل ولو سقط النظام كله. وحدّ الجدول أنه لا يقرر التصنيف بين «عادي» و«سلامة»: هذا يأتي من تحليل المخاطر وتخصيص SIL (الفصلان 28 و29) لا من رغبة المصمم، ولا يُظهر كلفة إدارة التغيير والاعتماد التي تلازم

حلّال السلامة طوال عمره. والخطأ الأكثر كلفة هو تنفيذ وظيفة حماية ذات SIL في PLC التحكم نفسه لتوفير خزانة، أو العكس: إغراق حلّال السلامة بمنطق تشغيلي يتغير كل شهر فيصبح كل تعديل فيه إجراء اعتماد كامل.

17.10.1 مخطط السبب والنتيجة (C&E): من الفكرة إلى مصفوفة وحدة تحكم فعلية

ما هو: جدول يربط كل **سبب** (حالة أو إشارة في النظام: ضغط مرتفع، أو مستوى منخفض جدًا، أو كشف حريق، أو زر إيقاف) بـ**النتيجة** التي ينفذها النظام تلقائيًا (إنذار، أو إيقاف مضخة، أو إغلاق صمام، أو بدء تسلسل). فهو يحدد استجابة نظام التحكم أو الإيقاف الطارئ لكل حالة حمايةً للأشخاص والمعدات، ويكون مرجع المبرمج في PLC و DCS وESD، وأساس مراجعة التصميم واختبار القبول وتشخيص الأعطال. وقيمته الأولى أنه يمنع الغموض: لكل إنذار وخطر إجراء محدد مكتوب. رأينا صورته في أنظمة الحريق والغاز (القسم 30.8) وفي حمايات الأوعية (القسم 31.16)؛ وهنا نعرض المبدأ العام، ثم بنية مصفوفة فعلية لوحدة تحكم توربين غازي كما تصدرها الشركات المصنّعة.

الشكل المعتاد: مصفوفة: الأسباب صفوفًا والنتائج أعمدة، وعلامة X عند التقاطع تعني أن حدوث السبب يُنفّذ هذه النتيجة. مثال مبسط لخزان تسحب منه مضخة:

السبب ← النتيجة	إنذار	إيقاف المضخة	إغلاق صمام المخرج
ضغط مرتفع	X	X	X
مستوى الخزان منخفض	X	—	—
مستوى الخزان منخفض جدًا	X	X	—
كشف حريق	X	X	X

انخفاض المستوى إلى الحد الأدنى يُصدر إنذارًا؛ وانخفاضه إلى الحد الأدنى جدًا يوقف المضخة تلقائيًا لمنع تشغيلها بلا سائل. وقد تحمل المصفوفة شروطًا إضافية تُكتب في

عمود ملاحظات أو بحرف عند التقاطع: **تأخير زمني** (T مع الزمن)، **تثبيط** أثناء البدء (Suppression)، **إعادة ضبط يدوية** قبل السماح بالتشغيل (L)، وطريقة **تأكيد الإشارة** (تصويت أو تأخير تأكيد).

بنية مصفوفة فعلية لوحدة تحكم توربين غازي (R62، مجهّلة): الوثيقة التي يُسلّمها مصنّع وحدة التحكم للعميل ليست مصفوفة واحدة بل مجموعة وثائق مترابطة، والمصفوفة تُقرأ مع **الوصف الوظيفي** و**مخططات المنطق** و**فهرس الإشارات**، ويُحال في كل ورقة إلى P&ID الذي تظهر فيه الأسباب. وتتكون من:

1. **قائمة اختصارات** موحدة (AH/AHH/AL/ALL، ESD، MCC، UCP، N25/NSD، F&G، LO...).
2. **تفسيرات عامة** تُكتب مرة واحدة لتُطبَّق على كل الأوراق: إشارات التغذية الراجعة من MCC (نتيجة «فشل معدة» YF إذا لم يصل تأكيد التشغيل خلال زمن المؤقت أو فُقد أثناء التشغيل)؛ التحكم بالعامل/الاحتياطي (تبديل تلقائي عند فقد الجاهزية أو فقد تأكيد التشغيل أو فشل الحفاظ على الضغط أو الحرارة خلال زمن محدد، وتبديل يدوي في أي وقت)؛ **منطق المرحّلات الاحتياطي** الذي تُوصل إليه سلكيًا أزرار الإيقاف وإيقاف الأنظمة الخارجية ومفاتيح السرعة الزائدة الاحتياطية وإيقاف الاهتزاز (القسم 34.9.1)؛ و**التثبيط** (Suppression): كبت إعلان الإنذار والإجراء لإشارات محددة، وهي عادةً الإشارات التناظرية ذات حدود AL/ALL أثناء البدء.
3. **جدول الأسباب** بمفاتيح موحدة تصف حدّ كل سبب، وهذا أهم ما يجب أن تتقنه عند قراءة أي مصفوفة:

المفتاح	معناه	الإجراء المعتاد
AHH / ALL	مرتفع جدًا / منخفض جدًا	إيقاف الوحدة أو إيقاف طبيعي

المفتاح	معناه	الإجراء المعتاد
WH / WL	مرتفع / منخفض	إنذار فقط
BXH / BXL (و BXHH / BXLL)	حدث مرتفع / منخفض لا يُطلق إنذارًا (مثل إيقاف سخان أو تشغيله)	تحكم داخلي
YF	فشل إشارة: خارج المدى للتناظرية، أو عدم توافق الأمر والتغذية الراجعة للمحركات والسخانات والصمامات	إنذار عطل ± تبديل
BCH / BCL	محرك أو صمام في حالة تشغيل/فتح مؤكدة أو إيقاف/إغلاق مؤكدة	شرط تسلسل
Y / NOT_Y	الدخل الرقمي صحيح / غير صحيح (مثلًا: Y = الباب مغلق، إذن NOT_Y = الباب مفتوح)	حسب الجدول
DEV_H / DEV_HH / DEV_AL	انحراف بين قياسين (A وB مثلًا)	إنذار أو إيقاف
DER_HH	معدل تغير مرتفع جدًا (مشتقة)	إيقاف

4. **قائمة النتائج المرقمة** موحدة لكل الأوراق، ولا تُطبع في كل ورقة إلا الأعمدة المستعملة فيها. ترتيبها ذو دلالة: النتائج 1 إلى 5 هي **الإجراءات الرئيسية** (1 إنذار؛ 2 إيقاف الوحدة بقطع الوقود فورًا؛ 3 إيقاف طبيعي: تعمل الوحدة عند خمول N25 خمس دقائق ثم يُقطع الوقود، ويجوز للمشغل إلغاؤه إن زال السبب، ويتحول إلى إيقاف كامل إن وقع أثناء تسلسل البدء؛ 4 خطوة إلى الخمول؛ 5 تخفيض إلى الحمل الأدنى لنقل الحمل إلى وحدات أخرى)؛ ثم 11 إلى 14 تعشيقات تبديل الوقود وتغييره؛ ثم 21 إلى 25 تعشيقات التسلسلات (إذن التدوير اليدوي، إذن البدء، إذن الغسيل بالماء، السماح باستمرار التسلسل أو تعليقه، تعطيل تدوير التبريد)؛ ثم 31 فصاعدًا **أوامر المعدات المفردة** (بدء/إيقاف مراوح التهوية والسخانات والمضخات، إغلاق صمامات إيقاف الغاز

والسائل وفتح صمام التطهير، إيقاف بادئ الهواء، فتح القاطع، وعزل المعدات غير المصنّفة Ex داخل الحاوية بمرحّلات عزل).

5. **أوراق المصفوفة**: ورقة لكل P&ID (الهواء والتهوية، الوقود، البدء، زيت التزييت، الحريق والغاز...) مع ورقة للإشارات التي لا تنتمي إلى P&ID محدد (بين لوحة المولد وDCS ووحدة التحكم). ولكل صف: السبب، والوسم، وملاحظة، والحد (بالمفاتيح أعلاه)، ثم X في أعمدة النتائج (الشكل 17-8).

كيف تقرأ صفًا: «فرق ضغط حاوية التوربين 83 ،82 ،22 ،3 ،1 ← PDT-7036 ALL»: هبوط فرق الضغط إلى الحد الأدنى جدًا يعطي إنذارًا، ويبدأ إيقافًا طبيعيًا، ويمنع إذن البدء، ويغلق صمامي إيقاف الغاز؛ بينما الحد WL للمرسل نفسه يعطي إنذارًا وبدء مروحة التهوية الاحتياطية فقط. الحدّ يقرر الإجراء، لا الجهاز.

ما يُخطئ فيه الناس:

1. مصفوفة بلا مفاتيح موحدة للحدود، فيُفهم «مستوى منخفض» إنذارًا في ورقة وإيقافًا في أخرى.
2. اعتبار المصفوفة بديلًا عن مخطط المنطق: التأخيرات والتصويت وتسلسل الخطوات لا تظهر فيها إلا في صورة ملاحظات.
3. عدم تحديث المصفوفة بعد تعديل البرنامج؛ الاختبار الدوري (القسم 29.5) يُجرى على المصفوفة، فإن اختلفت عن البرنامج اختُبر الشيء الخطأ.
4. نسيان صف «فشل الإشارة YF» لكل مرسل حماية: ماذا يفعل النظام إذا خرج المرسل عن المدى؟ إنذار فقط أم إيقاف؟ هذا قرار تصميم يجب أن يُكتب.
5. الخلط بين أعمدة الإجراء الرئيسي (إيقاف الوحدة) وأعمدة أوامر المعدات المفردة التي تنتج عنه ضمنًا؛ المصفوفة تعرض الإجراء **الأولي**، والثانوي في الوصف الوظيفي.

الشكل 17-8: *مقتطف تعليمي مجهّل من مصفوفة السبب والنتيجة لوحدة تحكم توربين غازي (ورقة الهواء والتهوية): الأسباب بوسومها وحدودها صفوفًا، والنتائج المرقمة من القائمة الموحدة أعمدة، وX للإجراء الفوري (على نمط R62، بوسوم مخترعة).*

17.11 مخططات الحالات والتسلسل

كثير من عمليات المصنع ليست شرطًا واحدًا، بل تسلسلًا من خطوات: فتح صمام السحب، ثم تشغيل مضخة الزيت، ثم انتظار الضغط، ثم تشغيل المحرك، ثم فتح صمام التصريف تدريجيًا. وأوضح طريقة لتصميم ذلك آلة الحالات (State Machine): قائمة حالات، ولكل

حالة أفعال تُنفذ فيها، وشروط انتقال إلى الحالة التالية، وحالة آمنة يُنتقل إليها عند أي عطل.

مثال (بدء مضخة بتسلسل):

الحالة	الأفعال	شرط الانتقال	عند الفشل
0 متوقفة	كل المخارج مطفأة	أمر بدء مع سماح	—
1 تجهيز	فتح صمام السحب، وتشغيل مضخة الزيت	الصمام مفتوح وضغط الزيت طبيعي خلال 30 s	إلى الحالة 9
2 تشغيل المحرك	أمر تشغيل المحرك	إشارة التشغيل والتيار طبيعي خلال 10 s	إلى الحالة 9
3 فتح التصريف	فتح صمام التصريف بتدرج	ضغط التصريف طبيعي خلال 60 s	إلى الحالة 9
4 تعمل	مراقبة	أمر إيقاف أو فصل	إلى 0 أو 9
9 فشل تسلسل	إيقاف آمن وإنذار بالخطوة التي فشلت	إعادة ضبط من المشغل	إلى 0

وتُنفذ آلة الحالات في PLC بلغة المخطط التسلسلي SFC، حيث تُرسم الخطوات والانتقالات صراحة، أو بمتغير رقمي للحالة وجملة CASE في النص المهيكل. والفائدة الكبرى للتصميم بالحالات أن الشاشة تستطيع أن تعرض للمشغل الخطوة الحالية والشرط الذي تنتظره، فيعرف فورًا لماذا توقف التسلسل.

17.12 حالة ميدانية: دي مورغان المنسي في مشروع تحديث

نوع الحالة: مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في مشروع لاستبدال لوحة حماية مرحلات قديمة بنظام PLC في محطة ضخ، كان منطق فصل المضخة في اللوحة القديمة سلسلة من خمسة تلامسات مغلقة عادةً: انخفاض ضغط السحب، وارتفاع حرارة المحامل، وارتفاع الاهتزاز، وانخفاض ضغط الزيت، وزر الطوارئ. وكلها على التوالي مع ملف مرحل السماح بالتشغيل.

عند البرمجة، نُقلت السلسلة إلى كتلة «و» كما هي في الرسم. لكن إشارات الحساسات في النظام الجديد عُرّفت بمعنى «إنذار» لا بمعنى «طبيعي»: فالواحد يعني أن الضغط منخفض. فأصبح الشرط المبرمج: الفصل = انخفاض الضغط · ارتفاع الحرارة · ارتفاع الاهتزاز · انخفاض ضغط الزيت · الطوارئ. أي أن المضخة لا تُفصل إلا إذا حدثت الأسباب الخمسة معًا.

لم يظهر الخطأ في الاختبار الأول، لأن الفريق اختبر الحماية بفصل تغذية لوحة الحساسات، فسقطت كل الإشارات معًا وتوقفت المضخة. وظهر الخطأ في اختبار القبول في المصنع (FAT) حين طلب مهندس المالك اختبار كل سبب وحده: فعُكست إشارة ضغط السحب وحدها، ولم تتوقف المضخة.

ويوضح الجدول التالي كيف انقلب معنى الإشارة عند النقل من المرحلات إلى البرنامج، ولماذا نجح اختبار «إسقاط الكل» وفشل اختبار «سبب واحد»:

جدول: انقلاب معنى الإشارة عند النقل من المرحلات إلى البرنامج

المرحلة	حالة الحساس (ضغط السحب)	التلامس في اللوحة القديمة (NC)	المدخل الخام في PLC
تشغيل طبيعي	الضغط طبيعي	مغلق (السلسلة موصلة)	1
سبب واحد	الضغط منخفض وحده	مفتوح (السلسلة مقطوعة ← فصل)	0
اختبار إسقاط التغذية	كل الحساسات بلا تغذية	كلها مفتوحة	0 لكل المداخل

جدول: انقلاب معنى الإشارة عند النقل (تابع): ما يراه البرنامج ونتيجة المنطقين

المرحلة	إشارة «الإنذار» بعد العكس في البرنامج	نتيجة منطق «و» الخاطئ	نتيجة منطق «أو» الصحيح
تشغيل طبيعي	0	لا فصل (صحيح)	لا فصل (صحيح)
سبب واحد	1 (وبقية الإنذارات 0)	**لا فصل (خطأ)**	فصل (صحيح)
اختبار إسقاط التغذية	1 لكل الإنذارات	فصل (يبدو صحيحًا ويخفي الخطأ)	فصل

فالمدخل الخام يسقط إلى 0 عند العطل (منطق «آمن عند الفشل»)، والبرنامج يعكسه إلى إنذار = 1، ثم يجمع الإنذارات بـ«و» فلا يفصل إلا حين ترتفع كلها معًا؛ وهذا لا يحدث إلا بإسقاط التغذية كلها.

صُحح المنطق بتطبيق دي مورغان: الفصل = مجموع «أو» للأسباب، وأُعيد اختبار كل سبب على حدة، مع اختبار تركيبة من سببين، وتوثيق النتائج في مصفوفة السبب والنتيجة.

الدروس:

- كل إشارة في مخطط المنطق يجب أن يُكتب معنى الواحد فيها صراحة.
- الترجمة من المرحلات إلى البرنامج ليست نسخًا للرسم، بل إعادة كتابة للدالة، ودي مورغان جزء منها.
- اختبار الحماية بإسقاط كل الإشارات معًا لا يثبت شيئًا عن منطقها؛ يُختبر كل سبب وحده.

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
تصميم المنطق	يكتب مخطط المنطق (ISA-5.2) ومصفوفة السبب والنتيجة، ويحدد معنى الواحد في كل إشارة، وأولوية الممسك، والتأخيرات وأثرها في زمن استجابة الحماية	—
العتاد والإشارات	يختار نوع البطاقة ومبدأ التغذية (قطع التغذية للفصل أم التغذية للفصل)	يطابق نوع الحساس (PNP أو NPN) مع البطاقة، ويقيس جهد الدخل وتيار التسريب في حالتي التشغيل والإطفاء
الاختبار	يعد إجراء الاختبار سببًا سببًا ويعتمد نتائجه	يختبر كل سبب وحده ثم تركيبة من سببين، ويسجل النتيجة مقابل المصفوفة، ويزيل كل فرض (Force) أو تجاوز بعد الاختبار

17.13 الأخطاء الشائعة

- نسيان معنى الواحد في الإشارة، والخلط بين «طبيعي» و«إنذار».
- نقل تلامسات مغلقة عادةً على التوالي إلى «و» دون تطبيق دي مورغان على إشارات الإنذار.
- استخدام قلاب بأولوية للضبط في منطق فصل حين يعني Q «السماح بالتشغيل»، فيتغلب أمر بدء عالق على إشارة الفصل.
- مؤقتات تأخير على إشارات حماية دون مراجعة زمن الاستجابة المطلوب لها.
- حساسات ثنائية الأسلاك على بطاقات لا تتحمل تيار تسريبها، فتومض المداخل.
- عدم تطابق نوع الحساس PNP أو NPN مع بطاقة الإدخال.

- قراءة كلمات الحالة بترتيب بتات خاطئ، أو الخلط بين ترقيم البتات من صفر ومن واحد.
- أوامر تُنفذ طوال الضغط على الزر بدل حافة واحدة، فتتكرر العملية.
- اختبار منطق الحمايات بإسقاط كل المداخل معًا بدل اختبار كل سبب وحده.

17.14 ملخص

المنطق الرقمي لغة كل قرار ثنائي في المصنع. الإشارات نطاقات جهد لا أرقام، ولكل عائلة عتباتها وهامش ضجيجها. والبوابات الأساسية «و» و«أو» والنفي ومشتقاتها تُكتب بجداول الحقيقة، وتُبسط بالجبر البولياني وخرائط كارنو، وتربط نظريتا دي مورغان بين سلسلة تلامسات السماح ومجموع أسباب الفصل. والدوائر التوافقية بلا ذاكرة، والتتابعية لها ذاكرة تبدأ بالقلاب، ومنها العدادات والمسجلات والإمساك. والمؤقتات TON وTOF وTP أدوات يومية في PLC. وينتقل المهندس بين سلّم المرحلات والكتل الوظيفية ومخططات ISA-5.2 وآلات الحالات، ويختبر كل سبب حماية وحده.

وفي الفصل التالي: الفصل 18، «متحكمات PID وضبطها»؛ ننتقل من القرارات الثنائية (نعم أو لا) إلى التحكم المستمر الذي يحرك صمام التحكم بقيم متدرجة ليبقي المتغير عند نقطة الضبط.

17.15 أسئلة التقييم الذاتي

1. حوّل العدد 3A7#16 إلى الثنائي والعشري.
2. لماذا تستخدم المشفرات المطلقة رمز غراي بدل الثنائي العادي؟
3. احسب هامش الضجيج لعائلة CMOS بتغذية 5 V إذا كان خرجها يضمن 4.4 V للواحد و0.5 V للصفر.
4. (أ) اكتب جدول حقيقة بوابة XOR بثلاثة مداخل. (ب) بيّن أن خرجها يساوي 1 حين يكون عدد الواحدات في المداخل فرديًا (فتصلح لكشف التكافؤ (Parity))

لا حين تختلف الإشارات: فالمدخلات 011 مختلفة وخرجها 0، و111 متطابقة وخرجها 1. (ج) اكتب دالة تكشف فعلًا عدم اتفاق ثلاث إشارات مكررة، مثل D = (A ⊕ B) + (B ⊕ C)، وتحقق منها بجدول الحقيقة.

5. بسّط الدالة F' = A·B·C + A·B·C + A·B'·C جبريًا.

6. استخدم خريطة كارنو لتبسيط دالة خرجها 1 في الحالات 000 و010 و100 و110.

7. ارسم قلاب SR من بوابتي NAND، وبيّن الحالة الممنوعة فيه.

8. مضخة زيت يجب أن تستمر في العمل دقيقتين بعد توقف الآلة. أي مؤقت تستخدم؟ ولماذا؟

9. اكتب معادلة التصويت 2oo3، وبيّن ماذا يحدث إذا تعطل حساس واحد في اتجاه الفصل.

10. في الحالة الميدانية (القسم 17.12)، ما الاختبار الذي كشف الخطأ؟ ولماذا لم يكشفه الاختبار الأول؟

مراجع الفصل: R31 (الدوائر المنطقية والمعالجات الدقيقة، حقيبة تدريبية: أنظمة العد، والبوابات، والجبر البوليانى، ودي مورغان، وخرائط كارنو، والقلابات، والعدادات، والمسجلات، والمؤقت 555)؛ وR32 (دوائر رقمية ومنطقية، وزارة التربية والتعليم المصرية: العائلات المنطقية TTL وCMOS، والأجهزة القابلة للبرمجة، والمشفرات، والناخبات، والمقارنات)؛ وR33 (Digital Electronics، المحاضرة 4: الدوائر التوافقية وتحويل البوابات)؛ وR13 (Shardt، Automation Engineering: التصميم المنطقي وآلات الحالات)؛ وR62 (مذكرة المؤلف ووثيقة مصفوفة سبب ونتيجة مجهّلة، 17.10.1)؛ وR18 (خبرة المؤلف في مشاريع تحديث أنظمة الحماية)؛ وIEC 61131-2 (مداخل ومخارج أنظمة التحكم المبرمجة)، وIEC 61131-3 (لغات البرمجة والمؤقتات)، وIEC 60617-12 وIEEE 91 (رموز البوابات)، وISA-5.2 (مخططات المنطق الثنائي).

الفصل 18: متحكمات PID وضبطها

لمن هذا الفصل: مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم الذي يقف أمام حلقة تتذبذب أو تزحف ولا يعرف أيعدّل الكسب أم زمن التكامل، أو يهيئ كتلة PID في DCS جديد ويحتار بين «متوازية» و«مثالية» و«متسلسلة»، أو يُطلب منه ضبط حلقات وحدة جديدة في التشغيل التجريبي بلا وقت ولا أدوات. ويفيد مهندس العمليات الذي يريد أن يفهم لماذا يرفض مهندس التحكم «رفع الكسب قليلًا»، والمشغّل الذي يحوّل الحلقة إلى اليدوي كلما اضطربت ولا يعيدها.

الفكرة الأساسية: المتحكم PID خوارزمية من ثلاثة أفعال: التناسبي يرد على الخطأ الحالي، والتكاملي يرد على الخطأ المتراكم، والتفاضلي يرد على سرعة تغير الخطأ. وهو يحكم أكثر من 90% من حلقات الصناعة، لا لأنه الأفضل نظريًا، بل لأنه يكفي إذا فُهمت العملية وضُبط بطريقة منهجية: تجربة قفزة واحدة في الحلقة المفتوحة تعطي ثلاثة أرقام (الكسب والثابت الزمني والزمن الميت) تُحسب منها معاملات الضبط كلها. ومعظم الحلقات «السيئة» في المنشآت ليست سيئة الضبط بل مضبوطة على صمام يلتصق أو قياس يضج أو خوارزمية بصيغة غير التي حُسبت لها المعاملات؛ فالفصل يبدأ بالخوارزمية وينتهي بما يقع بينها وبين العملية.

18.1 التحكم On-Off والمنطقة المحايدة

أبسط متحكم هو المفتاح: يعمل الخرج بكامله إذا كان المتغير دون نقطة الضبط ويتوقف إذا تجاوزها. ولو كان التبديل عند نقطة واحدة لتذبذب الخرج بسرعة لا يحتملها ملامس كهربائي (Contactor) ولا صمام ملفي، ولذلك تُضاف **منطقة محايدة (Differential Gap)**، وتُسمّى أيضًا **المنطقة الميتة (Dead Band)**، حول نقطة الضبط: يعمل الخرج

عند الحد الأدنى ويتوقف عند الحد الأعلى (الشكل 18-1). فيتأرجح المتغير بين الحدين باتساع يساوي المنطقة المحايدة مضافًا إليه ما تسببه سعة العملية وزمنها الميت من تجاوز، وبدورة (Cycle) تطول كلما اتسعت المنطقة وكبرت سعة العملية.

الشكل 18-1: *التحكم On-Off بمنطقة محايدة ℃ 1± حول ℃ 80. الحرارة تتأرجح بين الحدين، والخرج مربع الموجة؛ تضييق المنطقة يقصّر الدورة ويزيد عدد التبديلات، وتوسيعها يكبّر التأرجح.*

يصلح هذا النوع حين يكون التأرجح مقبولًا وسعة العملية كبيرة نسبةً إلى الخرج: تدفئة الخزائن، وحرارة خزانات التخزين، ومستوى أحواض التجميع بمضخة تعمل وتتوقف (Pump-down)، وضواغط الهواء التي تعمل وتتوقف على ضغط الخزان. ويُختار اتساع المنطقة بموازنة أمرين: عدد التبديلات في الساعة الذي يحتمله المحرك أو الملامس أو الصمام (الصانع يعطيه)، والانحراف الذي تحتمله العملية. والخطأ الشائع هو تضييق المنطقة «لتحسين الدقة» فيحترق الملامس، أو استخدام On-Off لعملية سريعة ذات زمن ميت ملموس فيتضاعف التأرجح.

18.2 الفعل التناسبي والنطاق التناسبي والانحراف الدائم

الفعل التناسبي (Proportional) يجعل الخرج متناسبًا مع الخطأ الحالي e = SP − PV:

$$u = Kc \times e + u_0$$

حيث Kc **الكسب (Gain)** وu_0 **الانحياز (Bias)** أي الخرج عند خطأ صفر. وتعبّر المتحكمات القديمة والكثير من أنظمة DCS عن الكسب بمقلوبه: **النطاق التناسبي (Proportional Band) PB** وهو النسبة المئوية من مدى القياس التي تحرك الخرج من 0 إلى 100%: PB (%) = 100 ÷ Kc. فكسب 2 يعني نطاقًا 50%، وكسب 0.5 نطاقًا 200%، وهذا مصدر أخطاء لا حصر لها عند نقل معاملات من نظام إلى آخر: رفع «القيمة» في نظام يعمل بالنطاق التناسبي يخفض الكسب.

الانحراف الدائم (Offset): المتحكم التناسبي وحده لا يعيد المتغير إلى نقطة الضبط بعد تغير الحمل، لأن الخرج لا يتغير عن الانحياز إلا إذا بقي خطأ. فبعد اضطراب يستقر المتغير عند قيمة تبعد عن نقطة الضبط بمقدار:

الانحراف = ΔPV المطلوب ÷ (1 + K × Kc)

حيث K كسب العملية (تغير PV لكل تغير في الخرج، كلاهما بالنسبة المئوية من المدى). الشكل 18-2 يبين أن زيادة الكسب تقلل الانحراف لكنها تقرب الحلقة من التذبذب، ولذلك يُترك P وحده للحلقات التي لا يهمها الانحراف (مستوى خزان تخزين وسيط يُراد فيه امتصاص الاضطراب لا تثبيت المستوى) أو يُضاف إليه الفعل التكاملي.

الشكل 18-2: *الفعل التناسبي وحده على عملية من الرتبة الأولى بزمن ميت: إلى اليسار استجابة قفزة نقطة الضبط لأربع قيم للكسب، وإلى اليمين الانحراف الدائم مقابل الكسب: يقل بزيادته لكنه لا يصل إلى الصفر أبدًا، والكسب الكبير يقود إلى التذبذب.*

مثال محلول (النطاق التناسبي والانحراف):

- **المعطيات:** حلقة ضغط شفط PIC-102 في مشروع الكتاب، مدى المرسل 0 إلى 20 barg، نقطة الضبط 12.0 barg، متحكم تناسبي بنطاق PB = 50%، كسب العملية K = 1.5 (كل 1% في فتحة صمام إعادة التدوير يغير الضغط 1.5% من المدى في الاستقرار). تغير في الحمل يزيح الضغط، لو بقي الخرج ثابتًا، بمقدار 1.2 bar.
- **الافتراضات:** العملية خطية حول نقطة التشغيل، والصمام بلا منطقة ميتة، والقياس بلا تأخير يُذكر.
- **الحل بالوحدات:**
  - الكسب من النطاق التناسبي: Kc = 100 ÷ PB = 100 ÷ 50 = 2
  - الإزاحة المكافئة: 1.2 bar ÷ 20 bar × 100 = 6% من المدى
  - الانحراف = الإزاحة ÷ (1 + K × Kc) = 6 ÷ (1 + 1.5 × 2) = 1.5% من المدى = 0.3 bar

- ولو رُفع الكسب إلى (PB = 25%) 4: الانحراف = 1.5 × (1 + 6 ÷ 4) = 0.17 bar = 0.86% = 6 ÷ 7 = 6 ÷ 4، لكن الحلقة تقترب من حد التذبذب (18.8).

- **معنى النتيجة:** الضغط يستقر عند 11.7 barg لا عند 12.0 مهما طال الانتظار؛ إن كان ذلك مقبولًا لحلقة ضغط شفط (وغالبًا مقبول) فالمتحكم التناسبي كافٍ، وإن لم يكن فالفعل التكاملي هو الحل لا رفع الكسب.

18.3 الفعل التكاملي ومنع التشبع (Anti-windup)

الفعل التكاملي (Integral / Reset) يضيف إلى الخرج مقدارًا يتناسب مع تكامل الخطأ في الزمن، فما دام هناك خطأ يستمر الخرج في التغير حتى يزول الخطأ؛ وبهذا يزيل الانحراف الدائم. في الصيغة المثالية:

$$u = Kc \times [e + (1 \div Ti) \times \int e\,dt] + u_0$$

حيث **Ti زمن التكامل (Integral Time / Reset Time)** بالثواني أو الدقائق: وهو الزمن الذي يحتاجه الفعل التكاملي ليكرر ما فعله الفعل التناسبي عند خطأ ثابت. وتعبّر بعض الأنظمة عنه بمقلوبه **التكرارات في الدقيقة (Repeats per Minute)** = 60 ÷ Ti (بالثواني)، ومرة أخرى يجب أن تعرف أي الوحدتين يستعمل نظامك: تكبير الرقم في نظام «التكرارات» يعني تكاملًا أقوى، وفي نظام «الزمن» يعني تكاملًا أضعف.

مثال محلول (زمن التكامل بالوحدتين):

- **المعطيات:** متحكم PI بكسب Kc = 1.67 وTi = 40 s، وخطأ ثابت مقداره 5% من المدى.
- **الافتراضات:** الخطأ يبقى ثابتًا خلال المدة المحسوبة (العملية بطيئة نسبةً إلى Ti).
- **الحل بالوحدات:**

  - المساهمة التناسبية = Kc × e = 1.67 × 5 = 8.35%
  - الفعل التكاملي يضيف 8.35% أخرى كل Ti = 40 s؛ فبعد دقيقتين يكون قد أضاف 8.35 × 120 ÷ 40 = 25% إلى الخرج.
  - وبوحدة التكرارات: Ti = 60 ÷ 40 = 1.5 تكرار في الدقيقة
- **معنى النتيجة:** إن لم تستجب العملية خلال هذه الدقيقتين (زمن ميت طويل أو صمام عالق) يكون الخرج قد تحرك 33% بلا سبب حقيقي، وهذا هو جذر تذبذب الحلقات ذات الزمن الميت الطويل حين يكون Ti أقصر من اللازم: القاعدة أن Ti لا يقل عن الزمن الميت بكثير، ويقارب الثابت الزمني للعملية في معظم الطرق (18.7).

تشبع التكامل (Integral Windup): إذا بلغ الخرج حده (الصمام مفتوح بالكامل) وبقي الخطأ، يستمر التكامل في التراكم إلى قيم وهمية فوق 100%. وحين ينعكس اتجاه الخطأ يحتاج المتحكم وقتًا طويلًا «لتفريغ» هذا التراكم، فيبقى الصمام مفتوحًا بالكامل والمتغير يتجاوز نقطة الضبط بشدة (الشكل 18-3). ويحدث ذلك في البدء (نقطة الضبط بعيدة)، وفي الحلقات ذات الحد الأقصى لخرج المتحكم (Output Limits)، وفي الحلقات التعاقبية حين تتشبع الحلقة الداخلية، وحين يُحوَّل الصمام يدويًا والمتحكم في الآلي. والعلاج **منع التشبع (Anti-windup / Anti-reset Windup)**: إيقاف التكامل حين يكون الخرج على حده والخطأ يدفعه إلى أبعد منه، أو إعادة حساب التكامل بحيث يساوي الخرج الحد (Back-calculation)، أو التحويل التلقائي إلى التتبع حين تتشبع الحلقة الداخلية. كل نظام DCS حديث يقدّم ذلك، لكنه يحتاج تفعيلًا وضبطًا صحيحًا لحدود الخرج بحيث تطابق حدود الصمام الفعلية (مثلًا 3 إلى 97% بدل 0 إلى 100%).

الشكل 18-3: *تشبع الفعل التكاملي: نقطة ضبط 95% لا يستطيع الصمام بلوغها؛ بلا منع تشبع يتراكم التكامل فوق حد الخرج ويتأخر النزول بعد عودة نقطة الضبط إلى 60%، ومع منع التشبع يعود المتحكم فورًا.*

18.4 الفعل التفاضلي وترشيحه

الفعل التفاضلي (Derivative / Rate) يضيف إلى الخرج مقدارًا يتناسب مع سرعة تغير الخطأ: Kc × Td × de/dt، حيث **Td زمن التفاضل (Derivative Time)**. وهو يتوقع: إذا كان المتغير يقترب من نقطة الضبط بسرعة خفّض الخرج قبل أن يتجاوزها، فيسمح بكسب أعلى وتخميد أفضل في العمليات البطيئة ذات الثوابت الزمنية المتعددة (الحرارة في المفاعلات والأفران وأعمدة التقطير). لكنه يضخّم أي ضجيج في القياس (الضجيج تغير سريع) فيحرك الصمام بلا فائدة ويتلفه، ولذلك:

- يُطبَّق على القيمة المقاسة لا على الخطأ (Derivative on PV)، حتى لا تُحدث قفزة نقطة الضبط ضربة (Kick) في الخرج.

- يُرشَّح بمرشح من الرتبة الأولى ثابته الزمني Td ÷ N حيث N من 8 إلى 10 (بعض الأنظمة تجعله معاملًا مستقلًا).
- يُهمل (Td = 0) في حلقات التدفق والضغط السريعة والحلقات ذات القياس الضاج والمستوى؛ وغالبية حلقات الصناعة PI لا PID.
- زمن التفاضل النموذجي من ربع إلى نصف الزمن الميت، أو Ti ÷ 4 في الصيغة المتسلسلة.

18.5 أشكال خوارزمية PID: المتوازية، والمثالية، والمتسلسلة

هنا يقع أكثر أخطاء الضبط صمتًا: المعادلات الثلاث تعطي «كسبًا وزمن تكامل وزمن تفاضل» لكن بمعانٍ مختلفة (الشكل 18-4):

الشكل 18-4: *أشكال خوارزمية PID الثلاثة: المتوازية بثلاثة كسوب مستقلة، والمثالية (ISA) بكسب واحد يضرب مجموع الأفعال الثلاثة، والمتسلسلة (التفاعلية) حيث يعمل التفاضلي على خرج PI. المعاملات لا تُنقل بين الأشكال بلا تحويل.*

الشكل	المعادلة	خصائصه
المثالية / ISA (Ideal, Non-interacting)	$u = Kc\,[e + (1/Ti)\int e\,dt + Td\,de/dt]$	الأكثر شيوعًا في DCS الحديثة؛ الكسب يضرب الأفعال الثلاثة؛ معظم قواعد الضبط مكتوبة لها

الشكل	المعادلة	خصائصه
المتوازية / المستقلة (Parallel, Independent)	$u = Kp\, e + Ki \int e\, dt + Kd\, de/dt$	في كثير من PLC والمتحكمات المدمجة؛ Ki = Kc/Ti وKd = Kc·Td؛ تغيير الكسب لا يغير التكامل
المتسلسلة / التفاعلية (Series, Interacting)	$u = Kc' [e + (1/Ti') \int e\, dt] \times (1 + Td'\, d/dt)$	إرث المتحكمات الهوائية والإلكترونية التناظرية، وبعض DCS تحتفظ بها للتوافق؛ الأفعال تتفاعل: تغيير Td' يغير الكسب الفعلي وزمن التكامل

وتحويل المعاملات من المتسلسلة إلى المثالية: $F = 1 + Td' \div Ti'$، ثم $Kc = Kc' \times F$، و$Ti = Ti' \times F$، و$Td = Td' \div F$. وعند Td = 0 تتطابق الصيغتان. ومن المثالية إلى المتوازية: $Kp = Kc$، و$Ki = Kc \div Ti$، و$Kd = Kc \times Td$.

مثال محلول (نقل معاملات بين نظامين):

- **المعطيات:** متحكم حرارة قديم بالصيغة المتسلسلة معاملاته Kc' = 2.0 وTi' = 30 s وTd' = 5 s، يُنقل إلى DCS بالصيغة المثالية ثم إلى PLC بالصيغة المتوازية.
- **الافتراضات:** التفاضلي في النظامين على القيمة المقاسة، والوحدات ثوانٍ في الجميع، والمدى نفسه للقياس والخرج.
- **الحل بالوحدات:**
  - عامل التفاعل: $F = 1 + Td' \div Ti' = 1 + 5 \div 30 = 1.167$
  - إلى المثالية: $Kc = Kc' \times F = 2.0 \times 1.167 = 2.33$
  - $Ti = Ti' \times F = 30 \times 1.167 = 35\ \text{s}$
  - $Td = Td' \div F = 5 \div 1.167 = 4.29\ \text{s}$
  - إلى المتوازية: Kp = Kc = 2.33
  - $Ki = Kc \div Ti = 2.33 \div 35 = 0.0667\ \text{s}^{-1}$ (أو 4.0 في الدقيقة)
  - $Kd = Kc \times Td = 2.33 \times 4.29 = 10.0\ \text{s}$

- **معنى النتيجة:** لو نُسخت الأرقام 2.0 و30 و5 كما هي إلى الصيغة المثالية لكان الكسب الفعلي أقل بنحو 14% والتكامل أسرع، ولو نُسخت إلى الصيغة المتوازية لصار Ki = 30 (بدل 0.067) أي تكاملًا أقوى 450 مرة، وهذا يتذبذب فورًا. ولذلك يُطلب من مورد النظام وثيقة معادلة الكتلة ووحداتها قبل أي نقل، ويُختبر الضبط بعد النقل بقفزة صغيرة.

جدول مقارنة: P مقابل PI مقابل PID مقابل PD

المعيار	P	PI	PID	PD
الانحراف الدائم	يبقى	يزول	يزول	يبقى
السرعة	سريع	أبطأ قليلًا (التكامل يضيف طورًا)	الأسرع مع تخميد التفاضلي	سريع مع تخميد
حساسية الضجيج	منخفضة	منخفضة	عالية (يلزم ترشيح D)	عالية
خطر التشبع	لا	نعم (Anti-windup)	نعم	لا
الحلقات المعتادة	مستوى الوعاء العازل (يُسمح بالانحراف)	التدفق، الضغط، المستوى، معظم الحلقات (نحو 90%)	الحرارة والتركيب بتأخر كبير وقياس هادئ	الموضع والمؤازرات والعمليات التكاملية المتذبذبة
لا تستخدمه في	حلقة تحتاج نقطة الضبط بدقة	العمليات التكاملية بـ Ti قصير	التدفق والقياسات الضاجّة	الحلقات التي تحتاج إزالة الانحراف

كيف أختار؟ PI هو الافتراضي لنحو 90% من الحلقات؛ ويُترك P وحده حيث يُراد امتصاص الاضطراب لا إزالة الانحراف (المستوى العازل)، ويُضاف D فقط للحلقات

البطيئة ذات القياس النظيف (الحرارة والتركيب)، ويبقى PD للمؤازرات والعمليات التكاملية المتذبذبة. وحدّ الجدول أنه يفترض صمامًا وقياسًا سليمين وخوارزمية معروفة الصيغة؛ فاختيار النمط لا يعوّض التصاق صمام أو ضجيجًا أو Ti بوحدة خاطئة (18.5). والخطأ الأكثر كلفة هو تفعيل التفاضلي في حلقة تدفق أو ضغط ضاجة «لتسريعها»، فيتلف الصمام بحركة لا تنتهي، أو ترك حلقة مستوى على PI بـ Ti قصير فتتذبذب ببطء ويُخفض كسبها أكثر فأكثر.

18.6 الفعل المباشر والعكسي

الفعل العكسي (Reverse Acting): يقل الخرج حين تزيد القيمة المقاسة (e = SP − PV)، وهو الافتراضي: حلقة تدفق بصمام يفتح بالهواء، ومستوى بصمام على خط التغذية. **الفعل المباشر (Direct Acting):** يزيد الخرج حين تزيد القيمة المقاسة (e = PV − SP): مستوى بصمام على خط التصريف (كلما ارتفع المستوى فُتح الصمام)، وضغط بصمام تنفيس. ويعتمد الاختيار على حاصل ضرب إشارتي أمرين: اتجاه العملية (هل زيادة الخرج ترفع المتغير أم تخفضه؟) واتجاه الصمام (يفتح بالهواء أم يغلق بالهواء، وهل الموضع بفعل عكسي؟). القاعدة العملية: يجب أن يكون **الكسب الكلي للحلقة سالبًا** (تغذية راجعة سالبة)؛ فإذا كانت العملية «موجبة» (زيادة الخرج ترفع PV) والصمام مباشرًا كان المتحكم عكسيًا، وأي قلب في أحد العناصر يقلب المتحكم. وفي مشروع الكتاب: LIC-101 يفتح صمام التصريف LV-101 حين يرتفع المستوى، والصمام يغلق عند الفشل (يفتح بالهواء)، فالمتحكم مباشر. أما PIC-102 فيفتح صمام إعادة التدوير FV-102 حين ينخفض ضغط الشفط (إعادة الغاز إلى الشفط ترفع ضغطه)، والصمام يفتح عند الفشل (يغلق بالهواء)، فيُعكس الفعل في الموضع أو في المتحكم، ويُختبر الاتجاه في فحص الحلقة قبل أي ضبط، لأن حلقة بفعل مقلوب «تهرب» إلى أحد الحدين فور وضعها في الآلي.

18.7 طرق الضبط: زيغلر–نيكولز (Ziegler–Nichols)، وكوهين–كون (Cohen–Coon)، ولامدا (Lambda)، وIMC

كل طرق الضبط الكلاسيكية تبدأ من نموذج بسيط للعملية: **من الرتبة الأولى بزمن ميت (FOPDT)** بثلاثة معاملات: الكسب K، والثابت الزمني τ، والزمن الميت θ؛ أو **تكاملي بزمن ميت** للمستوى والضغط في الأوعية الكبيرة بمعاملين: كسب التكامل 'Kp (ميل PV لكل % من الخرج) وθ. وتُستخرج المعاملات من تجربة قفزة (18.8). ثم تُطبق إحدى القواعد الآتية (كلها للصيغة المثالية، والوحدات متسقة):

الطريقة	Kc	Ti	Td	طابعها
زيغلر–نيكولز (حلقة مفتوحة) PI	0.9 τ ÷ (K θ)	3.33 θ	—	سريعة وعنيفة؛ تجاوز كبير ونسبة اضمحلال ¼
زيغلر–نيكولز (حلقة مفتوحة) PID	1.2 τ ÷ (K θ)	2 θ	0.5 θ	كما فوق مع تخميد أفضل
زيغلر–نيكولز (الكسب النهائي) PI	0.45 Ku	Pu ÷ 1.2	—	من تجربة حلقة مغلقة: Ku الكسب النهائي وPu دورة التذبذب
زيغلر–نيكولز (الكسب النهائي) PID	0.6 Ku	Pu ÷ 2	Pu ÷ 8	الأشهر تاريخيًا
كوهين–كون PI	(τ ÷ Kθ)(0.9 + θ ÷ 12τ)	θ (30 + 3θ/τ) ÷ (9 + 20θ/τ)	—	تحسّن ZN حين يكون θ/τ كبيرًا

الطريقة	Kc	Ti	Td	طابعها
IMC / لامدا / SIMC PI	τ ÷ [K (λ + θ)]	min(τ، 4(λ + θ))	—	المستخدم يختار λ (ثابت زمن الحلقة المغلقة المطلوب): λ = θ سريع، و= λ 3θ هادئ؛ وقيد min في Ti خاص بـ SIMC، أما لامدا وIMC التقليديتان فتجعلان Ti = τ
SIMC للعملية التكاملية PI	1 ÷ [Kp' (λ + θ)]	4 (λ + θ)	—	للمستوى والضغط في الأوعية
IMC PID (FOPDT)	(τ + θ/2) ÷ [K (λ + θ/2)]	τ + θ/2	τθ ÷ (2τ + θ)	نسخة PID من طريقة النموذج الداخلي

كيف تختار؟ طرق زيغلر–نيكولز وكوهين–كون تستهدف نسبة اضمحلال ربع (كل قمة ربع سابقتها) وهي عنيفة على الصمامات وتسبب تجاوزًا كبيرًا في قفزات نقطة الضبط (نحو 40% إلى 70% عادةً)، وتبقى مفيدة كنقطة بداية تُخفف (بقسمة الكسب على 2) أو لحلقات رفض الاضطراب حيث الأهم عودة سريعة. أما طريقة **لامدا (SIMC / IMC)** فهي المعتمدة اليوم في معظم المنشآت لأنها تعطي استجابة بلا تجاوز تقريبًا مع معامل واحد مفهوم: λ زمن الاستجابة المطلوب؛ وتُختار λ = θ إلى 2θ للحلقات التي تحتاج سرعة (ضغط، تدفق، ضد Surge)، وλ = 3θ أو τ للحلقات التي يُراد منها الهدوء وامتصاص الاضطرابات (مستوى، حرارة أعمدة). وميزتها الحاسمة أن الحلقات المتجاورة تُنسّق باختيار λ لكل منها بحيث تكون الحلقة الخارجية في التعاقب أبطأ 3 إلى 5 مرات من الداخلية.

18.8 الضبط الميداني العملي وتجارب القفزة

(أ) تجربة القفزة في الحلقة المفتوحة (Step Test) لاستخراج K وτ وθ:

1. تحقق أولًا من الصمام والقياس: اختبار خطوات الصمام (القسم 15.13) يجب أن يظهر منطقة ميتة أقل من 1%، والقياس بلا ترشيح مبالغ فيه ولا ضجيج يزيد على 1% من المدى؛ فالضبط على صمام يلتصق مضيعة للوقت.
2. اختر وقتًا مستقرًا (حمل ثابت، لا تغييرات مجدولة)، وأبلغ المشغّل، وحدد حدود الأمان للمتغير (الإنذارات وحدود الحماية) وقيمة القفزة التي لا تتجاوزها: عادة 3% إلى 10% من الخرج، تكفي لتحريك PV بما يفوق الضجيج خمس مرات على الأقل.
3. ضع المتحكم في اليدوي وانتظر حتى يستقر المتغير تمامًا (خط مستقيم لمدة ثابتين زمنيين تقريبًا).
4. سجّل PV وOP بمعدل عيّنات لا يقل عن 10 عيّنات في الزمن الميت المتوقع (سجل المؤرخ بدقته الكاملة لا المضغوطة).
5. غيّر الخرج قفزة واحدة ΔOP، وانتظر حتى يستقر المتغير عند قيمة جديدة (عملية ذاتية التنظيم) أو يثبت ميله (عملية تكاملية).
6. أعد القفزة في الاتجاه المعاكس للتحقق من الخطية والتخلف؛ فاختلاف K بين الاتجاهين أكثر من 20% يعني لا خطية أو التصاقًا في الصمام.
7. استخرج المعاملات (الشكل 18-5): K = ΔPV ÷ ΔOP (بالنسبة المئوية من المدى في كلا الطرفين)؛ وبطريقة النقطتين: t_{28} وt_{63} زمنا بلوغ 28.3% و63.2% من التغير الكلي من لحظة القفزة، فيكون $\tau = 1.5 \times (t_{63} - t_{28})$ و$\theta = t_{63} - \tau$. وللعملية التكاملية: Kp' = (ميل ΔOP ÷ PV)، وθ الزمن من القفزة إلى بداية تغير الميل.
8. أعد المتحكم إلى وضعه الأصلي وسجّل التجربة (التاريخ، الحمل، القيم، الرسوم) في سجل الحلقة.

الشكل 18-5: *تجربة قفزة في الحلقة المفتوحة على حلقة PIC-102: قفزة 10% في الخرج تعطي تغيرًا 15% في القيمة المقاسة (K = 1.5)؛ ومن نقطتي 28.3% و63.2% يُستخرج τ = 40 s و θ = 8 s، ويتحقق من ذلك المماس عند نقطة الانقلاب.*

(ب) تجربة الكسب النهائي في الحلقة المغلقة (Ultimate Gain) حين تكون القفزة المفتوحة غير مقبولة (حلقات لا تُترك في اليدوي): اجعل المتحكم تناسبيًا فقط (Ti أكبر ما يمكن، Td = 0)، وارفع الكسب تدريجيًا مع قفزات صغيرة في نقطة الضبط حتى يتذبذب المتغير بسعة ثابتة لا تنمو ولا تضمحل. فالكسب عندها هو Ku ودورة التذبذب Pu، وتُطبق قواعد ZN للكسب النهائي (18.7). وهي خطرة في الحلقات التي لا تحتمل التذبذب، وبديلها **ضبط المرحّل (Relay Auto-tuning)** الذي تنفذه أدوات الضبط الآلي: تبديل الخرج بين حدين حول نقطة التشغيل بسعة d فينتج تذبذبًا بسعة a ودورة Pu، و Ku = 4d ÷ (π a).

(ج) الضبط الميداني بلا نموذج (حين لا تتاح تجربة):

1. ابدأ بمعاملات آمنة: Kc صغير (0.5 أو PB 200%)، Ti طويل (3 إلى 5 أضعاف الزمن الميت المتوقع)، Td = 0.

2. ضع الحلقة في الآلي وأحدث قفزة صغيرة في نقطة الضبط (2 إلى 5%)، وراقب: زحف بطيء بلا تجاوز يعني كسبًا يمكن رفعه.
3. ضاعف الكسب على مراحل حتى يظهر تجاوز صغير أو تذبذب يضمحل خلال دورتين إلى ثلاث، ثم أعده إلى نصف هذه القيمة إن ظهر تذبذب، أو إلى ثلثيها إن اقتصر الأمر على تجاوز صغير.
4. قصّر Ti تدريجيًا حتى يزول الانحراف بسرعة مقبولة دون أن يظهر تذبذب بطيء (تذبذب بدورة أطول بكثير من دورة الكسب العالي علامة على Ti قصير جدًا).
5. أضف Td فقط للحلقات البطيئة ذات القياس النظيف، وابدأ بربع الزمن الميت.
6. اختبر برفض اضطراب حقيقي (تغيير حمل) لا بقفزة نقطة ضبط فقط، فالحلقة تتصرف في الحالتين تصرفًا مختلفًا.
7. سجّل المعاملات النهائية وسبب اختيارها، وثبّتها في نظام إدارة التغيير حتى لا «يحسّنها» أحد ليلًا.

الشكل 18-6: *الطرق الأربع على العملية نفسها (K = 1.5، τ = 40 s، θ = 8 s). زيغلر–نيكولز وكوهين–كون سريعتان لكن بتجاوز كبير وحركة صمام عنيفة؛ SIMC بـ λ = θ تصل بلا تجاوز يُذكر وبنصف حركة الصمام، و λ = 3θ أهدأ لكنها أبطأ في رفض الاضطراب.*

الشكل 18-7: *خريطة الأداء ثلاثية الأبعاد لمتحكم PI على العملية نفسها: تكامل الخطأ المطلق (IAE) مقابل الكسب وزمن التكامل لقفزة نقطة ضبط واضطراب حمل. الوادي عريض ومسطح حول الضبط المعقول، فلا تُطلب «القيمة المثلى» بل تجنب الجدران حيث يرتفع IAE فجأة بالتذبذب (كسب عالٍ أو تكامل قصير).*

مثال محلول (ضبط PIC-102 من تجربة القفزة):

- **المعطيات:** من الشكل 18-5: $K = 1.5$، $\tau = 40\ s$، $\theta = 8\ s$. المطلوب معاملات PI بثلاث طرق ومقارنتها بالكسب النهائي.
- **الافتراضات:** الصيغة المثالية، والتفاضلي مهمل لأن القياس ضاج نسبيًا والحلقة سريعة.
- **الحل بالوحدات:**
  - زيغلر–نيكولز (حلقة مفتوحة): $K_c = 0.9\ \tau \div (K\ \theta) = 0.9 \times 40 \div$

(1.5 × 8) = 3.0

- $\mathrm{Ti} = 3.33\ \theta = 3.33 \times 8 = 27\ \mathrm{s}$
- كوهين–كون: θ/τ = 8/40 = 0.2
- $\mathrm{Kc} = (\tau \div \mathrm{K}\theta)(0.9 + \theta \div 12\tau) = (40 \div 12) \times (0.9 + 0.2 \div 12) = 3.06$
- $\mathrm{Ti} = \theta\ (30 + 3\theta/\tau) \div (9 + 20\theta/\tau) = 8 \times (30 + 0.6) \div (9 + 4) = 18.8\ \mathrm{s}$
- SIMC بـ λ = θ = 8 s: Kc = τ ÷ (K (λ + θ)) = 40 ÷ (1.5 × 16) = 1.67
- Ti = min(τ، 4(λ + θ)) = min(40، 64) = 40 s
- وللمقارنة، الكسب النهائي لهذا النموذج نحو Ku ≈ 5.7 بدورة Pu ≈ 30 s (يُحسب من شرط الطور 180−°)، فتعطي قاعدة ZN المغلقة: Kc = 0.45 Ku = 0.45 × 5.7 = 2.6 وTi = Pu ÷ 1.2 = 30 ÷ 1.2 = 25 s، قريبة من المفتوحة.

- **معنى النتيجة:** حلقة ضغط الشفط تحمي الضاغط من الانفصال الهوائي بالتعاون مع FV-102، فالأولوية لرفض الاضطراب بسرعة دون تذبذب يجعل الصمام يهتز؛ SIMC بـ λ = θ (Kc 1.67، Ti 40 s) هي نقطة البداية، وتُسرَّع بخفض λ إلى 0.7θ إن تبيّن أن الاستجابة أبطأ من المطلوب. ولاحظ أن الكسب 3.0 من ZN يساوي نصف الكسب النهائي تقريبًا، وهذا هامش صغير إن تغيرت ديناميكا الضاغط مع الحمل.

مثال محلول (LIC-101: عملية تكاملية):

- **المعطيات:** وعاء الشفط V-101؛ خطوة 5% في خرج LIC-101 (فتح LV-101) جعلت المستوى ينخفض بميل ثابت 0.25% في الثانية بعد زمن ميت 5 s (الشكل 18-8، أ). المطلوب ضبط PI بطريقة λ بحيث يُمتص اضطراب دفعي دون أن يقترب المستوى من حدود الإنذار (20% و80%)، ونقطة الضبط 55%.
- **الافتراضات:** التدفق الداخل يتغير ببطء نسبةً إلى الحلقة، والصمام خطي في نطاق العمل، وسعة الوعاء ثابتة في مدى المستوى.
- **الحل بالوحدات:**
  - كسب التكامل: $K_p' = \text{ميل } \% = \Delta OP \div PV = 5 \div 0.25 = 0.05$ في الثانية لكل % من الخرج)
  - باختيار $\lambda = 60$ s: $K_c = 1 \div (K_p' \times (60 + \theta)) = 1 \div (0.05 \times (60 + 5)) = 0.31$
  - $T_i = 4 (\lambda + \theta) = 4 \times 65 = 260$ s (نحو 4.3 min)
  - وبـ $\lambda = 20$ s: $K_c = 1 \div (0.05 \times 25) = 0.8$ و$T_i = 4 \times 25 = 100$ s
- **معنى النتيجة:** الشكل 18-8 (ب) يبين أن الضبط الهادئ ($\lambda = 60$ s) يترك المستوى يرتفع نحو 20% عند زيادة مفاجئة في التدفق الداخل 8% ثم يعيده بلا تذبذب، وهذا ما يريده وعاء شفط: امتصاص الدفعة بدل نقلها إلى الفاصل التالي بحركة عنيفة في LV-101. أما تقصير T_i مع إبقاء الكسب صغيرًا ($T_i = 60$ s) فيعطي تذبذبًا بطيئًا بدورة نحو 7 دقائق، وهو الخطأ الأشهر في حلقات المستوى: حين يُرى تذبذب بطيء يُخفض الكسب أكثر فيسوء الأمر، والصواب إطالة T_i (القاعدة: $T_i \geq 4 (\lambda + \theta)$ و$K_p' \times K_c \times T_i \geq 4$ تقريبًا لتجنب التذبذب).

الشكل 18-8: *حلقة مستوى وعاء الشفط LIC-101 كعملية تكاملية: (أ) خطوة في الخرج تعطي ميلًا ثابتًا لا قيمة نهائية؛ (ب) ضبط λ بقيمتين وحالة زمن تكامل قصير تعطي تذبذبًا بطيئًا رغم صغر الكسب.*

(د) اقرأ الاتجاه قبل أن تلمس أي معامل: أكثر ما يُطلب من مهندس التحكم ميدانيًا ليس «ضبط الحلقة» بل تشخيص حلقة تتذبذب، والخطأ الشائع تغيير المعاملات قبل معرفة السبب. الشكل 18-9 يجمع الأنماط الستة التي تتكرر على شاشة المؤرخ، والجدول بعده يحولها إلى قرار: ما تراه، والسبب الأرجح، والفحص الذي يحسم، وما تفعله.

الشكل 18-9: *ستة أنماط شائعة على شاشة المؤرخ (PV بالأزرق وOP بالبرتقالي): كسب عالٍ، زمن تكامل قصير، التصاق الصمام، ضجيج مع تفاضلي، اضطراب خارجي يستمر في اليدوي، وضبط سليم؛ وفي كل لوحة ملاحظة مختصرة، والقرار الميداني المقابل لكل نمط في الجدول التالي.*

ما تراه على شاشة المؤرخ	السبب الأرجح	الفحص الحاسم	ما تفعله
تذبذب سريع منتظم دورته قريبة من الدورة النهائية Pu، ويشتد مع رفع الكسب	كسب عالٍ	خفّض الكسب إلى النصف: إن خفتت السعة فورًا فالسبب الضبط	أعد الضبط بطريقة λ بقيمة λ أكبر
تذبذب بطيء دورته 3 إلى 5 أضعاف Pu وسعته لا تتغير كثيرًا بخفض الكسب	زمن تكامل قصير	ضاعف Ti: يزول التذبذب خلال دورة أو دورتين	أطل Ti؛ وفي المستوى تحقق من Kc × Ti × Kp' ≥ 4
PV مربعة الشكل وOP سن منشار بسعة ثابتة لا تنمو ولا تضمحل	التصاق الصمام أو منطقة ميتة كبيرة	ضع الحلقة في اليدوي وغيّر OP بخطوات 0.5%: لا يتحرك PV حتى تتراكم 2 إلى 5% ثم يقفز	اختبار خطوات الصمام (القسم 15.13) والحشوة والموضع؛ لا تلمس الضبط
OP مرتجفة بشدة بلا حركة مقابلة في PV	ضجيج قياس مع فعل تفاضلي أو كسب عالٍ	اجعل Td = 0 مؤقتًا وراقب OP	مرشح PV (1 إلى 2 s)، إلغاء التفاضلي، مراجعة تركيب القياس
تذبذب يستمر بالسعة والدورة نفسها بعد التحويل إلى اليدوي	اضطراب خارجي دوري	حوّل إلى اليدوي مدة 5 دورات كاملة	ابحث في المنبع: حلقة مجاورة تتفاعل معها، دفعات، مضخة، ضاغط يعمل ويتوقف دوريًا
زحف بطيء نحو نقطة الضبط بلا تجاوز؛ الحلقة «نائمة»	كسب صغير جدًا أو Ti طويل جدًا (قيم افتراضية)	قفزة نقطة ضبط 2% وقياس زمن الوصول	ارفع الكسب وقصّر Ti بقاعدة λ من تجربة قفزة

ما تراه على شاشة المؤرخ	السبب الأرجح	الفحص الحاسم	ما تفعله
انحراف دائم لا يزول مهما طال الوقت	متحكم تناسبي فقط، أو OP على حده، أو صمام صغير	انظر إلى OP: هل هو عند 100% أو عند حد الخرج؟	فعل تكاملي؛ أو حجم الصمام (القسم 15.4) أو حدود الخرج
تجاوز كبير عند كل تغيير لنقطة الضبط مع رفض جيد للاضطرابات	ضبط مخصص للاضطرابات (وهو الصحيح لحلقات التشغيل المستقر)	هل تغييرات نقطة الضبط نادرة؟	لا تُعد الضبط؛ استخدم ترجيح نقطة الضبط أو تدرجها

(هـ) قيم البداية النموذجية حسب نوع الحلقة: حين لا تتاح تجربة قفزة فورًا (التشغيل التجريبي، أو حلقة لا تُترك في اليدوي) تُستخدم القيم الآتية نقطة بداية آمنة ثم تُصحح بالخطوات (ج). وهي للصيغة المثالية بوحدة الثواني، وتختلف كثيرًا بين المنشآت، فالجدول للاتجاه لا للنسخ:

جدول: قيم البداية النموذجية حسب نوع الحلقة

نوع الحلقة	الديناميكا المعتادة	Kc (PB)	Ti	Td
تدفق سائل أو غاز	سريعة: τ من 1 إلى 5 s ، θ من 0.5 إلى 2 s	0.3 إلى 0.7 (PB 150 إلى 300%)	2 إلى 10 s	0
ضغط سائل بمضخة أو صمام	سريعة جدًا كالتدفق	0.3 إلى 1	2 إلى 10 s	0
ضغط غاز في وعاء أو شبكة	متوسطة: τ من 10 إلى 120 s حسب الحجم	1 إلى 3	20 إلى 120 s	0

نوع الحلقة	الديناميكا المعتادة	Kc (PB)	Ti	Td
مستوى وعاء تخزين أو فاصل (امتصاص)	تكاملي	0.3 إلى 1	200 إلى 1000 s	0
مستوى يجب إحكامه (وعاء صغير، حماية قريبة)	تكاملي	2 إلى 5	60 إلى 200 s	0
مستوى درم مرجل	تكاملي مع انكماش وانتفاخ	1 إلى 3	60 إلى 300 s	0
حرارة مبادل أو فرن	بطيئة: τ من 2 إلى 20 min، θ من 0.5 إلى 3 min	1 إلى 5	3 إلى 20 min	Ti ÷ 4 إلى Ti ÷ 8
حرارة مفاعل أو عمود تقطير	بطيئة جدًا بزمن ميت طويل	0.5 إلى 2	10 إلى 60 min	Ti ÷ 4
محلل (تركيب)	زمن ميت طويل من دورة المحلل	0.2 إلى 1	2 إلى 3 أضعاف الزمن الميت	0
ضغط شفط ضاغط أو منع الانفصال الهوائي	سريعة وحرجة	1 إلى 3	5 إلى 20 s	0

جدول: قيم البداية النموذجية (تابع): ملاحظات عملية

نوع الحلقة	ملاحظات عملية
تدفق سائل أو غاز	القياس ضاج: مرشح 0.5 PV إلى 1 s ولا تفاضلي؛ الكسب أقل من 1 دائمًا تقريبًا
ضغط سائل بمضخة أو صمام	تُعامل معاملة حلقة تدفق

نوع الحلقة	ملاحظات عملية
ضغط غاز في وعاء أو شبكة	حجم الوعاء يحدد τ؛ الشبكات الكبيرة أبطأ
مستوى وعاء تخزين أو فاصل (امتصاص)	يُضبط هادئًا عمدًا؛ Kc' × Ti × Kp ≤ 4 لتجنب التذبذب البطيء
مستوى يجب إحكامه (وعاء صغير، حماية قريبة)	يُقبل تحريك الصمام أكثر مقابل بقاء المستوى ضمن نطاق ضيق
مستوى درم مرجل	ثلاثي العناصر (القسم 36.7) وإلا خدع الانتفاخ الحلقة
حرارة مبادل أو فرن	التفاضلي مفيد إن كان القياس نظيفًا؛ تعاقب على تدفق البخار أو الوقود
حرارة مفاعل أو عمود تقطير	تعاقب مع حلقة داخلية وتدرج نقطة الضبط
محلل (تركيب)	يُنفَّذ الحساب مرة كل دورة محلل؛ متنبئ سميث (Smith Predictor)، وهو نموذج للعملية يُطرح به أثر الزمن الميت من التغذية الراجعة (يُفصَّل في القسم 41.7)
ضغط شفط ضاغط أو منع الانفصال الهوائي	مع الخطوة المفتوحة ومعدل الاقتراب (القسم 35.4)

كيف أختار؟ حدد أولًا الديناميكا: سريعة (تدفق، ضغط سائل) فكسب أقل من 1 وTi بضع ثوانٍ ولا تفاضلي؛ تكاملية (مستوى) فكسب صغير وTi طويل جدًا مع قاعدة Kc' × Ti × Kp ≤ 4؛ بطيئة (حرارة) فكسب أعلى وTi بالدقائق وتفاضلي مرشّح إن كان القياس نظيفًا. وحدّ هذا الجدول أنه للاتجاه لا للنسخ: القيم للصيغة المثالية بالثواني، والمنشآت تختلف، وتجربة قفزة واحدة (18.8 أ) تُغني عنه كله. والخطأ الأكثر كلفة هو ترك القيم الافتراضية للنظام في مئات الحلقات بعد التشغيل التجريبي، أو نسخ قيم هذا الجدول إلى نظام يعبّر عن الكسب بالنطاق التناسبي أو عن التكامل بالتكرارات في الدقيقة.

مثال محلول (حلقة تدفق أثناء التشغيل التجريبي):

- **المعطيات:** حلقة تدفق ماء التغذية FIC-101 بصمام تحكم، تُركت بعد فحص الحلقة على القيم الافتراضية للنظام (Kc = 0.15، Ti = 60 s) فكانت «تنام»: قفزة نقطة ضبط 10% لا تصل خلال دقيقة (الشكل 18-10، يمين). تجربة قفزة 10% في الخرج أعطت تغيرًا 10% في التدفق (K = 1.0) بلغ 63% منه بعد نحو 3 s من القفزة، والقياس يحمل ضجيجًا ±0.4%.
- **الافتراضات:** الصمام خطي في نطاق العمل (خاصيته متساوية النسبة لكنها بعد التركيب تقارب الخطية)، والحلقة لا تتفاعل مع حلقة مجاورة، والزمن الميت θ ≈ 1 s و τ ≈ 2 s من التجربة.
- **الحل بالوحدات:**
  - حلقة تدفق ضاجة، فتُختار λ = 3θ = 3 s
  - الكسب: Kc = τ ÷ (K (λ + θ)) = 2 ÷ (1.0 × 4) = 0.5
  - زمن التكامل: Ti = min(τ، 4(λ + θ)) = min(2 s، 16) = 2 s (أي 30 تكرارًا في الدقيقة، وهي القيمة المألوفة لحلقات التدفق)
  - $\mathrm{Td} = 0$
  - ولو أدخل النظام Ti بالدقائق لكانت 0.033 min = 60 ÷ 2.
- **معنى النتيجة:** الشكل 18-10 (يسار) يبين الوصول خلال نحو 10 s بلا تجاوز. الضجيج ±0.4% يظهر على الصمام مضروبًا بالكسب أي ±0.2% وهو مقبول؛ لو ظهر ارتجاف يُضاف مرشح PV بثابت 1 s لا رفع λ. وتُسجل المعاملات في سجل الحلقة مع تاريخ التجربة والحمل؛ فالقيم الافتراضية «الآمنة» التي يتركها المقاول في مئات الحلقات هي أول ما يُراجع في أي وحدة جديدة.

الشكل 18-10: *حلقة تدفق FIC-101 في التشغيل التجريبي بالقيم الافتراضية للنظام (يمين) ثم بعد ضبط SIMC من تجربة قفزة واحدة (يسار): من حلقة لا تصل خلال دقيقة إلى وصول في نحو عشر ثوانٍ بلا تجاوز.*

(و) ترتيب ضبط الحلقات التعاقبية: الحلقة الداخلية أولًا وهي في الوضع المحلي (نقطة ضبط ثابتة) حتى تستقر بسرعة، ثم الخارجية والداخلية في التعاقب. والقاعدة أن يكون ثابت زمن الحلقة الخارجية المطلوب (λ الخارجي) 3 إلى 5 أضعاف زمن استقرار الداخلية، وإلا تنافست الحلقتان وتذبذبتا معًا. مثال: حلقة حرارة مخرج مسخن TIC-201 تعطي نقطة ضبط لحلقة تدفق البخار FIC-201: تُضبط FIC-201 أولًا (Kc 0.5، Ti 2 s، تستقر في نحو 10 s)، ثم تجربة قفزة على نقطة ضبط FIC-201 في المحلي تعطي للحرارة K = 0.8، τ = 5 min، θ = 1 min، فباختيار λ = 2 min (أكبر من 10 s بكثير): Kc = [0.8 × (2 + 1)] ÷ 5 = 0.12. ولو ضُبطت الخارجية سريعة (λ = 10 s) لطلبت من الداخلية ما لا تستطيع تنفيذه في وقتها فتذبذب النظام كله.

18.9 التتبع والتحويل السلس بين اليدوي والآلي

كل تحويل بين أوضاع التشغيل قد يُحدث ضربة في العملية إن لم يُهيَّأ له:

- **التحويل السلس (Bumpless Transfer):** عند الانتقال من اليدوي إلى الآلي يجب أن يبدأ خرج المتحكم من القيمة اليدوية الحالية لا من قيمة قديمة مخزونة، وذلك بجعل الفعل التكاملي **يتتبع (Track)** الخرج اليدوي ما دام المتحكم في اليدوي (الشكل 18-11). وكذلك من الآلي إلى اليدوي: يبقى الخرج حيث كان.
- **تتبع نقطة الضبط (Setpoint Tracking / SP = PV):** في اليدوي تتبع نقطة الضبط القيمة المقاسة، فلا يبدأ الآلي بخطأ كبير ويقفز الصمام. وهذا الخيار يُعطَّل حين يجب أن تبقى نقطة الضبط ثابتة (حلقات لها قيمة تصميمية واحدة) فيُدرَّب المشغّل على تقريب PV منها قبل التحويل.
- **التعاقب (Cascade):** عند تحويل الحلقة الداخلية إلى المحلي (Local SP) يجب أن يتتبع خرج المتحكم الخارجي نقطة الضبط المحلية للداخلي حتى لا يُحدث الرجوع إلى التعاقب قفزة، وتتشبع الخارجية إن لم تتتبع.
- **التدرج (Setpoint Ramping):** تغييرات نقطة الضبط الكبيرة تُدرَّج بمعدل محدود (مثلًا 2% في الدقيقة لحرارة فرن) حتى لا يتشبع الخرج ويحدث تجاوز؛ ويُستخدم أيضًا ترجيح نقطة الضبط (Setpoint Weighting) بضرب SP في معامل أقل من 1 في الحد التناسبي فقط، فتهدأ قفزات نقطة الضبط دون إبطاء رفض الاضطراب.
- **حدود الخرج ومعدل تغيره:** تطابق حدود الصمام الحقيقية، ومعدل التغير الأقصى يحمي المعدات (صمامات البخار الكبيرة، وصمامات الوقود) من الضربات.
- **فقد القياس:** عند حالة جودة سيئة للقياس (Bad Quality) يُحوَّل المتحكم إلى اليدوي على آخر خرج مع إنذار، ولا يستمر في الآلي على قياس كاذب (الفصل 40).

الشكل 18-11: *التحويل من اليدوي إلى الآلي: بلا تتبع يقفز الخرج إلى القيمة التي تركها المتحكم قبل ساعات (هنا 57%) وتُضرب العملية؛ مع تتبع الخرج ونقطة الضبط تمر لحظة التحويل بلا أثر.*

قائمة تحقق تهيئة كتلة PID قبل الضبط (تُملأ لكل حلقة في التشغيل التجريبي):

1. صيغة الخوارزمية ووحدات المعاملات موثقة من دليل النظام (مثالية/متسلسلة/متوازية؛ Kc أم PB؛ Ti بالثواني أم الدقائق أم التكرارات).
2. المدى الهندسي في الكتلة يساوي مدى المرسل المعاير (LRV وURV)، والوحدات الهندسية نفسها على الشاشة.
3. الفعل (مباشر/عكسي) مختبر بقفزة يدوية: زيادة OP في اليدوي ثم مراقبة اتجاه PV.
4. مرشح PV صفر للحلقات السريعة النظيفة، و0.5 إلى 1 s لحلقات التدفق الضاجة، و1 إلى 3 s للمستوى والقياس الضاج، ويُبقى عمومًا صغيرًا أمام الثابت الزمني للعملية (نحو عُشره حيث أمكن)، وأي مرشح أكبر يُحسب ضمن الزمن الميت عند الضبط.

5. حدود OP تطابق شوط الصمام الفعلي (من اختبار الحلقة)، ومعدل تغير OP مضبوط حيث تحتاجه المعدات.
6. منع التشبع مفعّل، وحدود التكامل تساوي حدود OP.
7. تتبع OP في اليدوي وتتبع SP = PV (أو تثبيت SP بقرار موثق) والتحويل السلس مختبر فعليًا بالتبديل يدوي/آلي.
8. حدود SP ومعدل تدرجها ومصدرها (محلي/تعاقبي) محددة، وتهيئة التعاقب تتتبع.
9. سلوك فقد القياس (Bad Quality) محدد: يدوي على آخر خرج مع إنذار، لا قيمة بديلة صامتة.
10. إنذار الانحراف SP − PV بمهلة تمنع الإنذار أثناء الاستجابة الطبيعية.
11. الحالة بعد إعادة تحميل المتحكم أو انقطاع التغذية: يدوي بخرج آمن، لا آلي بمعاملات افتراضية.
12. سجل الحلقة جاهز: مكان لتسجيل تجربة القفزة والمعاملات قبل/بعد وسبب التغيير والمعتمد.

الشكل 18-12: *خريطة تهيئة كتلة PID: إلى جانب معاملات الضبط الثلاثة تحتاج الكتلة إلى تهيئة مدخل PV ونقطة الضبط وخرج المتحكم والأوضاع والتوثيق؛ نصف مشكلات «الضبط» في الوحدات الجديدة تقع في هذه الحقول لا في Kc وTi.*

18.9.1 المتحكم الهوائي المحلي — كيف تُنفَّذ الأفعال الثلاثة ومنع التشبع والتحويل السلس ميكانيكيًا

المتحكم الهوائي المحلي ما زال في الخدمة في الحقول القديمة والمواقع البعيدة، والمهندس الذي يفهم آليته يُشخّصه في دقائق بدل أن يستبدله. ومبدؤه كله في **الفوهة والصفيحة (Flapper-Nozzle)** مع منافيخ تغذية راجعة.

مسار الإشارة: عنصر الاستشعار (أنبوب بوردون للضغوط العادية، أو خلية غشائية للمديات المنخفضة جدًا) موصول بوصلات إلى مؤشر المتغيّر وإلى الصفيحة. فارتفاع المتغيّر في متحكم مباشر الفعل يقرّب الصفيحة من الفوهة فيرتفع ضغط الفوهة، فيعمل المرحّل ويرفع ضغط الخرج.

- **الفعل التناسبي:** الخرج يعود إلى **منفاخ التناسب**، فيدفع الصفيحة بعيدًا عن الفوهة ويوقف الارتفاع عند نقطة اتزان جديدة. ومتحكم تناسبي فقط لا يملك غير هذا، ولذلك يستقر عند قيمة غير نقطة الضبط — وهو **الانحراف الدائم** بعينه (18.2).
- **عكس الفعل** لا يُنجَز بمفتاح بل **بتدوير ضبط النطاق التناسبي** حتى تقع الفوهة على الجزء العلوي من حلقة الصفيحة، فينعكس أثر حركة عنصر الاستشعار. ولذلك يوجد **مصدّ** يمنع تغيير الفعل من مباشر إلى عكسي إلا بفكّ غطاء مؤشر النطاق بمفك: وهذا احتياط مقصود ضد التغيير العَرَضي.
- **الفعل التكاملي:** يُضاف **منفاخ إعادة الضبط** موصول بالخرج عبر **صمام إعادة الضبط**. فمع ارتفاع الضغط يعاكس منفاخُ إعادة الضبط منفاخَ التناسب ويسمح للخرج بالارتفاع ببطء حتى تتعادل القوى عند نقطة الضبط. ونقطة الضبط والمؤشر معايران على القرص نفسه، فما يستقر عنده المتغيّر هو نقطة الضبط.
- **الفعل التفاضلي:** يُدرَج **صمام المعدّل** (Rate Valve) في الخط إلى منفاخ التناسب فيبطئ استجابته في كبح ارتفاع الخرج، فكلما أسرع تغيّر المتغيّر ارتفع الخرج أبعد قبل أن يوقفه المنفاخ.

> **والتحذير العملي الحاسم:** إذا ضُبط صمام المعدّل وصمام إعادة الضبط بحيث يرتفع الضغط في منفاخ إعادة الضبط **أسرع** منه في منفاخ التناسب، اندفع الخرج بسرعة كبيرة ونشأ تذبذب. وهذا نظير القاعدة الرقمية المعروفة: **لا يُجعل التفاضلي أعلى من نحو 25% من التكاملي** وإلا فقد الاستقرار.

منع تشبع التكامل ميكانيكيًا: يُركَّب **صمام تنفيس** بين منفاخ إعادة الضبط ومنفاخ التناسب، يُضبط ليفتح عند ضغط محدد فيعادل الضغط بينهما، فيتوقف منفاخ إعادة الضبط عن رفع الخرج. وهذا هو منع التشبع (18.3) منفَّذًا بنابض وغشاء بدل حد برمجي. وموضعه على الجهاز أسفل مقياس الخرج مباشرة.

التحويل السلس بين اليدوي والآلي ميكانيكيًا: بين ضغط الخرج وضغط المحمّل اليدوي (Manual Loader) يُركَّب **مؤشر اتزان** — أنبوب شفاف فيه كرة معدنية. والإجراء:

1. قبل التحويل إلى اليدوي، اضبط المحمّل اليدوي حتى **تتوسّط الكرة** الأنبوب، أي حتى يتساوى خرج المحمّل مع خرج المتحكم.
2. حوّل المفتاح إلى اليدوي، ثم حرّك الخرج بالمحمّل كما تريد.
3. للعودة إلى الآلي: إمّا أن تُقرّب المتغيّر من نقطة الضبط، وإمّا أن تُقرّب نقطة الضبط من المتغيّر، ثم حوّل.

وأي انتقال بلا هذين الشرطين ينقل الصمام قفزةً. والدرس الذي يبقى بعد زوال الجهاز: **التحويل السلس شرطه دائمًا مساواة قيمتين قبل التحويل، سواء أنجزها منطق التتبع في النظام الرقمي أو كرةٌ في أنبوب.**

أشبع عطلين: انسداد الفوهة بالزيت أو الرطوبة (فيندفع الخرج إلى أقصاه أو يجمد)، وتسريب في أحد المنفاخين (فيتغير النطاق التناسبي أو زمن إعادة الضبط من دون أن يمسّ أحد الضبط). ويُفحص الأول بنفخ الفوهة بهواء نظيف، والثاني بمراقبة ثبات الخرج عند حجب الفوهة تمامًا.

◆ ◆ ◆

18.10 مقاييس الأداء: IAE، والتجاوز، وزمن الاستقرار

عبارة «الحلقة جيدة» تحتاج إلى أرقام، وهذه أشهرها:

المقياس	التعريف	ما يقوله
التجاوز (Overshoot)	(أعلى قمة − القيمة النهائية) ÷ حجم القفزة	مقبول حتى 10% في معظم الحلقات، وصفر في الحلقات التي يضر التجاوز فيها (حرارة المعقمات، الضغط قرب PSV)
نسبة الاضمحلال (Decay Ratio)	القمة الثانية ÷ القمة الأولى	¼ هدف ZN الكلاسيكي؛ الأقل أهدأ
زمن الارتفاع (Rise Time)	من 10% إلى 90% من التغير	سرعة الاستجابة الأولية
زمن الاستقرار (Settling Time)	حتى يبقى الخطأ ضمن ±2% (أو ±5%) من القفزة	كم تدوم الاضطرابات
IAE	$\int \lvert e \rvert dt$	مجموع الانحراف؛ الأشيع في مقارنة الضبط
ISE	$\int e^2 \, dt$	يعاقب الأخطاء الكبيرة أكثر
ITAE	$\int t \lvert e \rvert dt$	يعاقب الأخطاء التي تدوم
حركة الصمام (Valve Travel / Reversals)	مجموع $\lvert \Delta u \rvert$ وعدد انعكاسات الاتجاه في اليوم	ثمن الضبط: الحلقة «الممتازة» التي تهلك الصمام ليست ممتازة
الانحراف المعياري لـ PV	σ على فترة تشغيل عادية	مقياس التشغيل اليومي وأساس مؤشرات الفصل 40

مثال محلول (قراءة المقاييس من الشكل 18-6):

- **المعطيات:** قفزة نقطة ضبط من 50% إلى 60% عند 20 s، ثم اضطراب حمل عند 300 s. قمم الاستجابة بضبط ZN: 65.9% ثم 63.1%؛ وبضبط SIMC (λ = θ): 60.8% بلا قمة ثانية.
- **الافتراضات:** القيمة النهائية 60%، وحد الاستقرار ±2% من القفزة (±0.2%).
- **الحل بالوحدات:**
  - التجاوز (ZN) = (أعلى قمة − القيمة النهائية) ÷ حجم القفزة = (65.9 − 60) ÷ 10 = 59%
  - نسبة الاضمحلال (ZN) = القمة الثانية ÷ القمة الأولى = 3.1 ÷ 5.9 = 0.52
  - زمن الاستقرار (ZN) نحو 136 s، وIAE للقفزة نحو 267 (وحدات % × s)
  - SIMC: التجاوز = 8% = 10 ÷ (60 − 60.8)، بلا اضمحلال يُقاس، زمن الاستقرار 50 s، IAE 180
  - أما لرفض الاضطراب: أقصى انحراف 3.2% (ZN) مقابل 4.6% (SIMC)، وIAE 63 مقابل 239.
- **معنى النتيجة:** SIMC أفضل لقفزات نقطة الضبط في كل المقاييس، وZN أفضل في رفض الاضطراب بأربعة أضعاف في IAE لكن بثمن حركة صمام أكبر وتجاوز عنيف. فالسؤال قبل الضبط: ما الذي تعانيه هذه الحلقة، تغييرات نقطة ضبط أم اضطرابات حمل؟ وحلقات التشغيل المستقر تعاني الثانية غالبًا، فيُقبل ضبط أقرب إلى ZN مخففًا (الكسب على 2) أو SIMC بـ λ أقل من θ.

18.11 مشروع الكتاب المتصل: وحدة ضغط الغاز (ضبط الحلقتين)

تجمع الأمثلة السابقة ما يلزم لحلقتي المشروع:

جدول: ضبط حلقتي مشروع الكتاب

الحلقة	نوع العملية	النموذج من التجربة	الضبط المعتمد (مثالي)
PIC-102 (ضغط الشفط عبر FV-102)	ذاتية التنظيم FOPDT	$K = 1.5$، $\tau = 40$ s، $\theta = 8$ s	PI: $K_c = 1.67$، $T_i = 40$ s ($\lambda = \theta$)
LIC-101 (مستوى V-101 عبر LV-101)	تكاملية	$K_p' = 0.05$ %/s لكل 1%، $\theta = 5$ s	PI: $K_c = 0.31$، $T_i = 260$ s ($\lambda = 60$ s)

جدول: ضبط حلقتي مشروع الكتاب (تابع): الفعل وملاحظات التهيئة

الحلقة	الفعل	ملاحظات التهيئة
PIC-102 (ضغط الشفط عبر FV-102)	عكسي مع صمام يفتح عند الفشل (الفعل مقلوب في الموضع)	$T_d = 0$؛ حدود الخرج 3 إلى 97%؛ منع التشبع؛ تتبع في اليدوي؛ تُنسَّق مع متحكم منع الانفصال الهوائي (الفصل 35) الذي يملك الأولوية على FV-102 بانتقاء الأعلى
LIC-101 (مستوى V-101 عبر LV-101)	مباشر (صمام تصريف يغلق عند الفشل)	ترشيح PV 2 s؛ منطقة ميتة على الخطأ 0.5% لتقليل حركة الصمام؛ إنذار عند 20% و80%؛ الحماية LSLL/LSHH مستقلة (الفصل 31)

وتُختبر الحلقتان بعد الضبط باضطراب حقيقي (دفعة سائل من المنبع لـ LIC-101، وتغيير حمل الضاغط لـ PIC-102) وتُسجَّل مقاييس القسم 18.10 أساسًا لمؤشرات التحسين في القسم 40.6.

نموذج سجل ضبط الحلقة (يُحفظ في نظام إدارة الأصول أو ملف الوحدة):

الحقل	PIC-102 (مثال مملوء)	LIC-101 (مثال مملوء)
التاريخ والحمل أثناء التجربة	2026-09-17، حمل الضاغط 75%	2026-09-17، تدفق داخل 60%
اختبار الصمام قبل الضبط (المنطقة الميتة، T86)	FV-102: 0.6%، 2.5 s (مقبول)	LV-101: 0.8%، 6 s (مقبول)
نموذج العملية من تجربة القفزة	K = 1.5، τ = 40 s، θ = 8 s (قفزة −10% في OP)	Kp' = 0.05 %/s لكل %، θ = 5 s (قفزة +5% في OP)
الطريقة والمعامل المختار	SIMC، λ = θ = 8 s	SIMC للعملية التكاملية، λ = 60 s
المعاملات قبل (الصيغة والوحدات)	Kc 1.0، Ti 120 s، Td 0 (مثالية، ثوانٍ)	Kc 0.5، Ti 60 s، Td 0 (مثالية، ثوانٍ)
المعاملات بعد	Kc 1.67، Ti 40 s، Td 0	Kc 0.31، Ti 260 s، Td 0
اختبار القبول ونتيجته	قفزة 5%+ SP: تجاوز 6%، استقرار 55 s؛ اضطراب حمل: انحراف أقصى 3.1%	دفعة سائل تعادل +8% تدفقًا: ذروة المستوى 75% تحت إنذار 80%، وعودة بلا تذبذب خلال 12 min
مؤشرات الأساس بعد أسبوع	σ = 0.6%، في الآلي 99%، انعكاسات الصمام 180/يوم	σ = 1.1%، في الآلي 100%، انعكاسات 60/يوم
ملاحظات وسبب التغيير	كانت الحلقة بطيئة في رفض اضطرابات الحمل	تذبذب بطيء سابق سببه Ti قصير
المعتمد	مهندس التحكم + مشرف العمليات	مهندس التحكم + مشرف العمليات

ويُلاحظ في صف LIC-101 أن اختبار القبول هو ما يثبت أن الضبط الهادئ (λ = 60 s) يوافق حدود الإنذار: لو كان إنذار المستوى العالي عند 65% لا 80% لبلغته الذروة، ولوجب إما تسريع الحلقة (λ = 20 s) يعطي ذروة نحو 63%) أو مراجعة حد الإنذار مع

مهندس العمليات. وهذا هو معنى «اختبار القبول باضطراب حقيقي» لا بقفزة نقطة ضبط فقط.

18.12 حالة ميدانية: حلقة حرارة تذبذبت بعد ترقية نظام التحكم

- **العَرَض:** بعد ترقية DCS في وحدة معالجة غاز، بدأت حلقة حرارة مخرج مسخن الغاز TIC-205 (صمام بخار) تتذبذب بسعة ±4 °C ودورة نحو 6 دقائق، وكانت قبل الترقية مستقرة بمعاملات نُسخت «كما هي» من النظام القديم: كسب 3.5، وتكامل 2.0، وتفاضل 0.5.
- **الفرضيات:** (1) صمام البخار تضرر أثناء التوقف؛ (2) المرسل الجديد أسرع فانكشف تذبذب كان مرشّحًا؛ (3) المعاملات نُسخت إلى صيغة خوارزمية مختلفة؛ (4) اضطراب دوري من ضغط البخار.
- **الفحوص:** اختبار خطوات الصمام في اليدوي: منطقة ميتة 0.6% وT86 قصير (سليم). وضع الحلقة في اليدوي: التذبذب يزول تمامًا خلال دورتين، وضغط البخار مستقر (يستبعد 1 و4). مراجعة وثائق الكتلتين: النظام القديم بصيغة متسلسلة يعبّر عن التكامل بالتكرارات في الدقيقة (2.0 تكرار/دقيقة = Ti' 30 s) والتفاضل بالدقائق (0.5 min)؛ النظام الجديد بصيغة مثالية يعبّر عن التكامل بالثواني والتفاضل بالثواني.
- **الدليل الحاسم:** المعاملات المنسوخة فُسّرت في النظام الجديد على أنها Ti = 2.0 s وTd = 0.5 s، أي تكامل أسرع 30 مرة من الصحيح (60 s) وتفاضل شبه معدوم، مع كسب لم يُصحح بعامل التفاعل. حساب التحويل الصحيح: Td' = 30 s، Ti' = 30 s، F = 2؛ Kc = 7.0، Ti = 60 s، Td = 15 s. وعند إدخال هذه القيم مع ترشيح التفاضلي (N = 10) استقرت الحلقة فورًا، ثم خُفف الكسب إلى 5 لأن المرسل الجديد أقل ترشيحًا فظهر ضجيجه مضخّمًا بالتفاضلي.

- **السبب الجذري:** نقل معاملات بين صيغتين ووحدتين مختلفتين بلا تحويل ولا اختبار، وغياب وثيقة تحدد صيغة كتلة PID ووحداتها في مواصفة الترقية.
- **الإجراء:** جدول تحويل موثّق لكل حلقات الوحدة (218 حلقة) قبل التشغيل؛ بند في مواصفة أي ترقية يطلب معادلة الكتلة ووحداتها؛ اختبار بقفزة 2% لكل حلقة حرجة بعد النقل ضمن الاختبارات الموقعية. (مثال تعليمي مركّب.)

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
قبل الضبط	يوثق صيغة الخوارزمية ووحدات معاملاتها، ويحدد الفعل وحدود الخرج وسلوك فقد القياس	يختبر خطوات الصمام، ويتحقق من مدى المرسل في الكتلة، ويختبر اتجاه الفعل بقفزة يدوية
تجربة القفزة	يحدد وقت التجربة وحجم القفزة وحدود الأمان، ويستخرج النموذج (K وτ وθ)	ينسق مع المشغّل، وينفذ القفزة، ويسجل PV وOP بدقة المؤرخ الكاملة
الضبط والاعتماد	يختار الطريقة وλ لكل حلقة، وينسق الحلقات المتعاقبة، ويعتمد التغيير بإدارة التغيير	يدخل المعاملات، ويجري اختبار القبول باضطراب حقيقي، ويملأ سجل ضبط الحلقة

18.13 الأخطاء الشائعة

- ضبط المتحكم قبل التحقق من الصمام والقياس: نصف «مشكلات الضبط» التصاق صمام أو ضجيج قياس أو ترشيح مبالغ فيه.
- الخلط بين الكسب والنطاق التناسبي، وبين زمن التكامل والتكرارات في الدقيقة، وبين الثواني والدقائق، عند النقل بين الأنظمة.
- نسخ المعاملات بين صيغ الخوارزمية (متسلسلة، مثالية، متوازية) بلا تحويل.

- تشخيص التذبذب البطيء في حلقة مستوى على أنه كسب عالٍ فيُخفض الكسب، والسبب زمن تكامل قصير.
- تفعيل التفاضلي على الخطأ بدل القيمة المقاسة، أو بلا ترشيح، في حلقة ضاجة.
- إهمال منع التشبع وحدود الخرج، فتتجاوز الحلقة بعد كل بدء أو تشبع.
- ضبط الحلقة على قفزة نقطة ضبط فقط بينما مشكلتها اضطرابات الحمل، أو العكس.
- ضبط الحلقات المتجاورة أو المتعاقبة كل على حدة بالسرعة نفسها فتتفاعل؛ الخارجية يجب أن تكون أبطأ 3 إلى 5 مرات.
- «تحسين» المعاملات بلا تسجيل ولا إدارة تغيير، ثم البحث عن سبب سوء الأداء بعد شهور.
- ترك الحلقة في اليدوي بعد اضطراب لأنها «لا تعمل جيدًا» بدل إبلاغ مهندس التحكم؛ نسبة الحلقات في الآلي أول مؤشر لصحة الضبط في المنشأة (الفصل 40).

18.14 ملخص

المتحكم PID ثلاثة أفعال بمعانٍ واضحة: التناسبي يرد على الخطأ ويترك انحرافًا، والتكاملي يزيل الانحراف ويحتاج منع تشبع، والتفاضلي يخمّد ويحتاج ترشيحًا. الأشكال الثلاثة للخوارزمية والوحدات المختلفة للمعاملات هي أول ما يُتحقق منه قبل أي ضبط أو نقل. وتجربة قفزة منهجية تعطي نموذجًا بثلاثة معاملات تُحسب منه المعاملات بطريقة لامدا التي تعطي استجابة هادئة قابلة للتنسيق بين الحلقات، مع بقاء زيغلر–نيكولز مرجعًا للحلقات التي تحتاج رفضًا سريعًا للاضطراب. والحلقة الجيدة تُقاس بأرقام: التجاوز وزمن الاستقرار وIAE وحركة الصمام والانحراف المعياري، لا بالانطباع.

وفي الفصل التالي: الفصل 19، «المتحكم المنطقي المبرمج (PLC) ومنطق التحكم والبرمجة»؛ فيه نرى كيف يُنفَّذ المنطق الثنائي من الفصل 17 وكتل PID من هذا الفصل

برامجَ داخل دورة المسح. ومن أراد أن يتجاوز حدود الحلقة الواحدة، بالتعاقبي والتغذية الأمامية والنسبة والانتقاء، فموضعها (الفصل 41).

18.15 أسئلة التقييم الذاتي

1. متحكم بنطاق تناسبي 40%: ما كسبه؟ وإذا كان زمن تكامله 0.5 دقيقة، فكم تكرارًا في الدقيقة؟
2. حلقة ضغط بمتحكم تناسبي فقط، كسب العملية 2.0 والكسب 1.5؛ اضطراب يزيح الضغط 8% من المدى لو ثبت الخرج. ما الانحراف الدائم؟ وكيف يزول؟
3. تجربة قفزة: ΔOP = 8%، PV ارتفع من 40% إلى 52%، وبلغ 28.3% من التغير بعد 25 s و63.2% بعد 46 s من القفزة. استخرج K وτ وθ ثم احسب معاملات PI بطريقة SIMC مع λ = θ.
4. لماذا يظهر التذبذب البطيء في حلقة مستوى حين يُقصَّر زمن التكامل مع كسب صغير؟ وما القاعدة التي تمنعه؟
5. متحكم بصيغة متسلسلة Kc' = 1.5، Ti' = 20 s، Td' = 10 s. حوّله إلى الصيغة المثالية ثم المتوازية.
6. حلقة مستوى بصمام على خط التغذية يفتح عند الفشل. ما فعل المتحكم (مباشر أم عكسي)؟ وماذا يتغير لو صار الصمام يغلق عند الفشل؟
7. ما الفرق بين ضبط زيغلر–نيكولز وضبط لامدا في التجاوز وحركة الصمام؟ ومتى تفضّل كلًّا منهما؟
8. اشرح ثلاث آليات لمنع تشبع التكامل، وبيّن ما يحدث في حلقة تعاقبية إذا تشبعت الحلقة الداخلية بلا معالجة.
9. عملية تكاملية Kp' = 0.02 %/s لكل %، وθ = 10 s. احسب معاملات PI لـ λ = 90 s.

10. استجابة قفزة 10%: القمة الأولى 63.5% والثانية 61.0% والقيمة النهائية 60%. احسب التجاوز ونسبة الاضمحلال، وقرر إن كان الضبط مناسبًا لحلقة حرارة مفاعل.

مراجع الفصل: R16 (PAControl، أساسيات التحكم بالعمليات: أنماط PID والضبط)؛ R12 (Manesis & Nikolakopoulos، الفصل الخاص بـ PID)؛ R13 (Shardt، النمذجة وتجارب القفزة)؛ R9 (دليل مختبر أنظمة التحكم: تجارب Ziegler–Nichols والاستجابة الزمنية)؛ R1؛ وقواعد Skogestad (SIMC) وZiegler–Nichols وCohen–Coon كما تُدرَّس في المراجع القياسية للتحكم بالعمليات؛ ISA-5.1 لرموز الحلقات؛ وخبرة المؤلف في ضبط حلقات محطات التوليد ومنشآت الغاز (R18)؛ وR64 (مبادئ الأجهزة: المتحكم الهوائي المحلي، 18.9.1).

الباب الرابع: الأنظمة والبرمجة والاتصالات

ينقل هذا الباب المنطق والتحكم من الورق إلى الأنظمة التي تنفذهما: المتحكم المنطقي المبرمج (الفصل 19)، والكتل الوظيفية التي تُكتب بها البرامج (الفصل 20)، ونظام التحكم الموزع وSCADA (الفصل 21)، وواجهات التشغيل وإدارة الإنذارات (الفصل 22)، ثم الشبكات التي تربطها (الفصل 23)، والأمن السيبراني الذي يحميها (الفصل 24).

الفصل 19: المتحكم المنطقي المبرمج (PLC) ومنطق التحكم والبرمجة

لمن هذا الفصل: المهندس الذي يُسلَّم برنامج PLC لحزمة ضاغط أو محطة ضخ ويُطلب منه أن يفهمه ويعدّله ويختبره، والفني الذي يقف أمام مضخة لا تبدأ فيفتح البرنامج على الحاسوب ولا يعرف من أين يبدأ القراءة، ومهندس التصميم الذي يكتب وصف التحكم (Control Narrative) ثم يسلّمه لمبرمج لا يعرف العملية. ويفيد مهندس DCS الذي يربط نظامه بحزم كثيرة لكل منها PLC بلغة ومنصة مختلفة.

الفكرة الأساسية: المتحكم المنطقي المبرمج (Programmable Logic Controller – PLC) حاسوب صناعي يكرر ثلاث خطوات بلا توقف: يقرأ المداخل كلها، ثم ينفذ البرنامج على هذه الصورة المجمدة، ثم يكتب المخارج كلها. كل سلوك غريب في الميدان تقريبًا يُفسَّر بهذه الدورة: نبضة أقصر من الدورة لا تُرى، ومخرج يُكتب في موضعين يأخذ قيمة آخر موضع، وتلامس إيقاف موصول مغلقًا يُقرأ في البرنامج بعكس ما يظن المبتدئ. واللغات الخمس المعروفة في المواصفة IEC 61131-3 (بقي منها أربع في طبعتها الرابعة) طرق مختلفة لكتابة المنطق نفسه؛ والبرنامج الجيد ليس الذي يعمل في المكتب، بل الذي يتصرف تصرفًا آمنًا ومتوقعًا حين ينقطع سلك أو تعود التغذية أو يُضغط زران معًا.

19.1 PLC ودورة المسح: ما يحدث في كل دورة

يعمل PLC في دورة متكررة تسمى **دورة المسح (Scan Cycle)** من أربع مراحل (الشكل 19-1):

1. **قراءة المداخل:** تُنسخ حالات كل المداخل المنفصلة والتناظرية إلى منطقة في الذاكرة تسمى **صورة المداخل (Input Image)**. من هذه اللحظة لا يرى البرنامج الميدان، بل يرى هذه الصورة.
2. **تنفيذ البرنامج:** تُنفذ التعليمات من الأعلى إلى الأسفل، ويُحسب كل مخرج في **صورة المخارج (Output Image)** دون أن يصل بعد إلى الأطراف.
3. **كتابة المخارج:** تُنقل صورة المخارج إلى البطاقات دفعة واحدة، فتتغير المرحلات والتيارات.
4. **الخدمات الداخلية:** الاتصال بالشاشات وأنظمة DCS وأدوات البرمجة، والتشخيص الذاتي، وإعادة ضبط **مؤقت المراقبة (Watchdog Timer)** الذي يوقف المعالج ويضع المخارج في وضعها الآمن إذا طالت الدورة عن حد مضبوط.

الشكل 19-1: *دورة المسح في PLC وزمن الاستجابة الأسوأ: التغير الذي يصل بعد قراءة المداخل مباشرة ينتظر دورة كاملة قبل أن يُرى ودورة ثانية حتى يُكتب مخرجه؛ والنبضة الأقصر من الدورة قد تقع كلها بين قراءتين فلا تُرى أبدًا.*

ثلاث نتائج عملية من هذه الدورة:

- **زمن الاستجابة ليس زمن الدورة.** الأسوأ أن يتغير المدخل بعد قراءته مباشرة، فينتظر دورة كاملة، ثم تُنفذ دورة ثانية يُكتب في آخرها المخرج. لذلك يُحسب زمن الاستجابة الأسوأ بجمع تأخير مرشح المدخل ودورتين كاملتين وتأخير المخرج.
- **النبضة القصيرة قد تضيع.** لا يرى البرنامج إلا ما كان قائمًا لحظة قراءة المداخل؛ فالنبضة التي تبدأ وتنتهي بين قراءتين تضيع. ولضمان رؤيتها يجب أن يزيد عرضها على زمن الدورة مضافًا إليه تأخير المرشح، والممارسة الآمنة ضعف ذلك. النبضات السريعة (عدادات التدفق، مجسات السرعة) لا تُقرأ بالمداخل العادية بل ببطاقات **العدادات السريعة (High-Speed Counter)** التي تعدّ بالعتاد مستقلة عن الدورة.
- **ترتيب التعليمات له معنى.** لأن التنفيذ من الأعلى إلى الأسفل، فالقيمة التي يحسبها سطر تكون متاحة للأسطر التي تحته في الدورة نفسها، ولا تصل إلى الأسطر التي فوقه إلا في الدورة التالية.

مثال محلول (زمن الاستجابة وعرض النبضة):

- **المعطيات:** مرشح المداخل المنفصلة 3 ms، وزمن الدورة المقيس 25 ms (يُقرأ من تشخيص المعالج، والأعلى المسجل 32 ms)، وتأخير مخرج المرحّل 10 ms، وزمن جذب الملامس (Contactor) في مركز المحركات 40 ms. ونظام DCS يرسل أمر «إيقاف» بنبضة عرضها 200 ms، وعداد تدفق توربيني يعطي نبضات بتردد 400 Hz.
- **الافتراضات:** نأخذ الدورة الأعلى المسجلة لا المتوسطة، لأن الدورة تطول حين تكثر الاتصالات أو تُنفذ أجزاء مشروطة من البرنامج.
- **الحل:** زمن الاستجابة الأسوأ حتى تحرك الملامس = تأخير المرشح + 2 × الدورة الأعلى + تأخير المخرج + زمن جذب الملامس:

$$3 + 2 \times 32 + 10 + 40 = 117 \text{ ms}$$

عرض النبضة الآمن = 2 × (الدورة الأعلى + تأخير المرشح)

$$= 2 \times (32 + 3) = 70 \text{ ms}$$

فنبضة DCS بعرض 200 ms تُرى بثقة.

زمن الدورة الواحدة لنبضات العداد التوربيني = 1 ÷ التردد

$$= 1 \div 400 = 2.5 \text{ ms}$$

أي أقصر بكثير من دورة المسح (32 ms)، فتضيع أغلبها.

- **المعنى ميدانيًا:** أمر الإيقاف مقبول، لكن زمن 117 ms لا يصلح لحماية تحتاج استجابة أسرع (مثل السرعة الزائدة في توربين، التي تتولاها وحدات حماية مستقلة، الفصل 32). والعداد التوربيني يحتاج بطاقة عدّاد سريع أو مرسلًا يعطي 4–20 mA. وإذا كانت نبضة DCS قد صُممت بعرض 50 ms «لتسريع النظام» فستضيع أحيانًا، وهذا عطل متقطع يصعب تشخيصه.

جدول مقارنة: ما يحدد زمن الدورة وما يُفعل به

العامل	أثره في الدورة	ما يُفعل عمليًا
حجم البرنامج وعدد التعليمات	يطيل الدورة خطيًا تقريبًا	تقسيم البرنامج إلى مهام دورية بأزمنة مختلفة (19.7)
التعليمات الثقيلة (الرياضيات العائمة، النصوص، الحلقات التكرارية)	قد تضاعف زمن الدورة في دورات بعينها	تجنب الحلقات التكرارية الطويلة، ونقل الحساب الثقيل إلى مهمة بطيئة
الاتصالات (الشاشات، Modbus، DCS)	تضيف زمنًا متغيرًا في مرحلة الخدمات	تحديد معدلات التحديث، وعدم ربط عشر شاشات تستطلع كل شيء كل 100 ms

العامل	أثره في الدورة	ما يُفعل عمليًا
الإدخال والإخراج البعيد عبر الشبكة	يضيف زمن تحديث الشبكة إلى زمن الاستجابة	حساب زمن تحديث الشبكة ضمن ميزانية الاستجابة
مرشحات المداخل	تؤخر رؤية التغير بمقدار ثابت	ترك المرشح الافتراضي للأزرار والمفاتيح، وتقصيره للإشارات السريعة فقط

19.2 لغات IEC 61131-3: طرق كتابة المنطق نفسه

اشتهرت المواصفة IEC 61131-3 في طبعاتها السابقة بخمس لغات، اثنتان نصيتان وثلاث رسومية. ثم أعلنت الطبعة الثالثة (2013) لغة قائمة التعليمات (IL) مهجورة، وحذفتها الطبعة الرابعة (2025)، فبقيت أربع لغات. وتُعرض هنا الخمس جميعًا، لأن برامج IL ما زالت كثيرة في الأنظمة القائمة. كلها تعمل على المتغيرات نفسها، ويمكن أن يجمع البرنامج الواحد أكثر من لغة (الشكل 19-2):

- **مخطط السلّم (Ladder Diagram – LD):** رسم يحاكي دوائر المرحلات: قضيبان رأسيان للتغذية، وبينهما أسطر (Rungs) عليها تلامسات وملفات. هو لغة الفني الكهربائي، والأسهل في التتبع أثناء التشغيل لأن البرنامج يلوّن التلامسات المغلقة.
- **مخطط الكتل الوظيفية (Function Block Diagram – FBD):** كتل موصولة بخطوط كمخطط إشارة؛ مناسب للحلقات التناظرية والتحكم المستمر، وهو اللغة الغالبة في أنظمة DCS وأنظمة السلامة.
- **النص المهيكل (Structured Text – ST):** لغة نصية تشبه Pascal، فيها IF و CASE وFOR؛ الأنسب للحسابات والجداول ومعالجة النصوص والمنطق الطويل الذي يصير في LD أسطرًا لا تنتهي.

- **قائمة التعليمات (Instruction List – IL):** لغة شبيهة بلغة التجميع (Assembly)، تعليمة في كل سطر على مسجل واحد. لا يُبدأ بها مشروع جديد بعد حذفها من المواصفة، لكن المهندس يحتاج إلى قراءتها في الأنظمة القديمة عند الترحيل.
- **مخطط الوظائف التتابعية (Sequential Function Chart – SFC):** لغة لتنظيم التسلسلات: خطوات وانتقالات وأفعال، وداخل كل خطوة أو انتقال يُكتب المنطق بأي لغة أخرى (19.5).

الشكل 19-2: *منطق تشغيل محرك بالإمساك الذاتي مكتوبًا بأربع لغات: LD وFBD وST وIL. المعنى واحد: يعمل المحرك إذا ضُغط زر البدء أو كان يعمل من قبل، بشرط ألا يكون زر الإيقاف مضغوطًا ولا الحمل الحراري قد فصل.*

جدول مقارنة: لغات IEC 61131-3 ومتى تُختار كل منها

اللغة	النوع	أقوى ما فيها	أضعف ما فيها	الاستخدام الغالب
LD	رسومية	سهولة التتبع الحي أثناء التشغيل، ومألوفة لفنيي الكهرباء	تضخم مع الحسابات والجداول، وصعوبة التعبير عن التسلسلات الطويلة	الأقفال والتعشيقات وتشغيل المحركات والصمامات
FBD	رسومية	وضوح مسار الإشارة، وكتل جاهزة لـ PID والمعالجة التناظرية	ترتيب التنفيذ غير ظاهر للقارئ دائمًا	الحلقات التناظرية، وبرامج DCS وأنظمة السلامة
ST	نصية	الحساب والجداول والمنطق المعقد في أسطر قليلة، وسهولة المقارنة بين النسخ	أصعب في التتبع الحي على المشغل والفني	الحسابات، ومعالجة البيانات، والكتل المكتبية
IL	نصية	صغيرة وسريعة في الأجهزة القديمة	محذوفة من الطبعة الرابعة، وصعبة القراءة والصيانة	قراءة البرامج القديمة وترحيلها فقط
SFC	رسومية	إظهار الخطوة الحالية للمشغل والمهندس، وتنظيم التسلسل ومهل الفشل	تحتاج انضباطًا في قواعد الصحة (19.5)	تسلسلات البدء والإيقاف والدفعات

> **قاعدة الاختيار العملية:** لا تختر اللغة بذوق المبرمج، بل بمن سيصون البرنامج بعد عشر سنوات. في محطة يصونها فنيو كهرباء اكتب الأقفال والتعشيقات بـ LD، وضع الحسابات في كتل ST مكتبية مختبرة يستدعيها السلّم، والتسلسلات في SFC، والحلقات في FBD. ويُكتب هذا التقسيم في المعيار البرمجي للمشروع (الفصل 85) قبل أن يكتب أحد سطرًا.

19.2-أ اللغات في مشروع واحد: من فلسفة التشغيل إلى البرنامج

عرض القسم السابق اللغات الخمس ومتى تُختار كل منها. وهذا القسم يجيب عن السؤال التالي مباشرة: **كيف تتوزع هذه اللغات داخل برنامج واحد لمعدة واحدة؟** فالخطأ الشائع أن يُتصور المشروع على أنه «إما سلّم وإما كتل»، بينما المشروع الصناعي الواحد يجمع عادة ثلاث لغات أو أربعًا، لكل منها الجزء الذي تعبّر عنه أوضح من غيرها. وتسمح بيئات البرمجة الحديثة وفق IEC 61131-3 بذلك صراحة: وحدة برنامج (Program Organization Unit – POU) بلغة تستدعي وحدة بلغة أخرى، فتستدعي أفعال SFC أسطر LD، وتستدعي كتل FBD دوال مكتوبة بـ ST.

من أين يأتي المنطق أصلًا؟ برمجة PLC ليست كتابة برنامج يشغّل مخرجًا، بل **ترجمة متطلبات التشغيل** الموجودة في وثائق المشروع إلى منطق ينفذه المتحكم: مخطط الأنابيب والأجهزة (P&ID) للوسوم والصمامات (الفصل 6)، ووصف التحكم (Control Narrative) لأوضاع التشغيل والحلقات (القسم 34.4)، ومصفوفة السبب والنتيجة للسماحيات والتعشيقات والفصل (القسم 17.10.1)، وتسلسل التشغيل للبدء والإيقاف. فقبل السؤال «بأي لغة أكتب؟» يُسأل «أي نوع من المنطق هذا؟».

> **مثال: مضخة حقن ماء عالية الضغط P-201.** وصف التحكم يقول: لا تبدأ المضخة إلا إذا كان مستوى خزان الشفط فوق الأدنى، وصمام السحب مفتوحًا، والإيقاف الطارئ سليمًا، والمحرك متاحًا بلا فصل. وعند البدء يُفتح صمام السحب ثم صمام التدفق الأدنى ثم يُشغَّل المحرك ثم يُنتظر بناء ضغط الطرد. وأثناء التشغيل يتحكم متحكم PIC-201 بضغط الطرد عبر صمام إعادة التدوير، ويحد منه متحكم تدفق أدنى. وتُحسب كفاءة المضخة من الضغط والتدفق والقدرة وتُقارن بمنحناها. وعند انخفاض ضغط السحب انخفاضًا شديدًا لأكثر من 5 s تُفصل المضخة، وعند ارتفاع حرارة المحمل يظهر إنذار ثم فصل عند الحد الأعلى. والشكل 19-3 يبين كيف يتوزع هذا كله على اللغات الأربع.

الشكل 19-3: *توزيع منطق مضخة حقن الماء P-201 على اللغات الأربع بحسب طبيعة كل جزء: السماحيات والتعشيقات والفصل في مخطط السلّم، والحلقات التناظرية والانتقاء في الكتل الوظيفية، والحسابات والحلقات التكرارية وأوضاع التشغيل في النص المهيكل، وتسلسلات البدء والإيقاف والتبادل في SFC. واللغات تستدعي بعضها داخل المشروع الواحد.*

جدول: أي جزء من وصف التحكم يذهب إلى أي لغة، ولماذا

الجزء من وصف التحكم	اللغة	لماذا هذه اللغة	أين تفصيله
سماحيات البدء (مستوى، صمام سحب، إيقاف طارئ، محرك متاح)	LD	خمسة تلامسات على سطر واحد؛ يرى الفني فورًا أي شرط منع البدء	القسمان 19.3 و 19.4
فصل بانخفاض ضغط السحب لأكثر من 5 s	LD مع مؤقت TON	مؤقت التأخير يمنع الفصل الكاذب بهبوط لحظي، والسطر يُتتبع حيًا	القسم 21.4

الجزء من وصف التحكم	اللغة	لماذا هذه اللغة	أين تفصيله
إنذار حرارة المحمل ثم فصل عند الحد الأعلى	LD أو FBD بمقارنين	حدان على القياس نفسه: مقارن للإنذار ومقارن للفصل، ولا يُخلط الإنذار بالفصل	القسمان 20.3 و 20.12
تحكم ضغط الطرد بصمام إعادة التدوير مع حد تدفق أدنى	FBD	تحجيم ثم ترشيح ثم PID ثم اختيار الأدنى ثم مخرج تناظري: مسار إشارة يُقرأ من اليمين إلى اليسار	القسمان 20.7 و 20.11 والفصل 69
حساب الكفاءة ومقارنة نقطة التشغيل بمنحنى المضخة	ST	معادلة في سطر بدل عشر كتل حسابية، وحلقة تكرار على عدة نقاط	هذا القسم
أوضاع التشغيل: إيقاف، يدوي، آلي	ST بجملة CASE أو LD	حالة واحدة نشطة في كل لحظة وتصرف مختلف لكل حالة	هذا القسم
تسلسل البدء والإيقاف والتبادل بين المضختين	SFC	خطوات وانتقالات ومهل فشل، ويرى المشغل الخطوة الحالية	القسمان 19.5 و 19.11

ما يضيفه النص المهيكل تحديدًا. رأى القارئ في القسم 19.2 صيغة IF، وسيرى في القسم 19.9 برنامجًا كاملًا بـ ST. وهنا تركيبان آخران لا يوجد لهما مقابل مريح في السلّم:

جملة الحالة (CASE) لأوضاع التشغيل: المتغير MODE يحمل الوضع المختار من الشاشة، وتُنفذ فقرة واحدة فقط بحسب قيمته، فلا يمكن أن يتنازع وضعان على المخرج:

```
CASE P201_MODE OF
  0: P201_CMD := FALSE;                                  (*
إيقاف: لا تشغيل بأي حال *)
  1: P201_CMD := P201_MAN_CMD AND P201_PERMISSIVE;   (*
يدوي: أمر المشغل ضمن السماحيات *)
  2: P201_CMD := P201_AUTO_DEMAND AND P201_PERMISSIVE;
(* آلي: طلب التسلسل ضمن السماحيات  *)
ELSE
```

```
  P201_CMD := FALSE;                                  (* قيمة
غير معرّفة: الحالة الآمنة *)
END_CASE;
```

ويُلاحظ أن السماحيات تدخل في الوضعين اليدوي والآلي معًا؛ فالوضع اليدوي يتجاوز التسلسل، لا الحماية.

حلقة التكرار (FOR) على قياسات متشابهة: اثنتا عشرة حرارة لملفات المحرك والمحامل، لكل منها الحدان نفسهما. بدل اثني عشر سطرًا متطابقًا في السلّم، حلقة واحدة على مصفوفة (Array):

```
FOR i := 1 TO 12 DO
  TEMP_ALARM[i] := TEMP[i] > 90.0;                    (* إنذار
عند 90 °C *)
  TEMP_TRIP[i]  := TEMP[i] > 105.0;                   (*
فصل عند 105 °C *)
END_FOR;
P201_TEMP_TRIP := FALSE;
FOR i := 1 TO 12 DO
  P201_TEMP_TRIP := P201_TEMP_TRIP OR TEMP_TRIP[i];
(* أي حرارة واحدة تفصل *)
END_FOR;
```

الحساب: كفاءة المضخة من القدرة الهيدروليكية والقدرة الكهربائية المقاسة:

```
(* Q بوحدة m3/h، وdP بوحدة bar، وP_ELEC بوحدة kW *)
P_HYD := Q * dP / 36.0;                               (*
القدرة الهيدروليكية kW: m3/h × bar ÷ 36 *)
IF P_ELEC > 1.0 THEN
  EFF := 100.0 * P_HYD / P_ELEC;
ELSE
  EFF := 0.0;                                         (* لا
قسمة على قدرة شبه معدومة *)
END_IF;
```

والثابت 36 ناتج من تحويل الوحدات:

$$1\ m^3/h \times 1\ bar = 100\,000\ Pa \times (1 \div 3600)\ m^3/s = 27.78\ W،$$

فالقدرة بالكيلوواط تساوي $\Delta P \times Q \div 36$. وهذا مثال على ما ينبغي أن يُكتب في ST ويُختبر وحدةً مستقلة (القسم 19.7)، ثم يُستدعى من الكتل كأنه كتلة جاهزة.

والفرق الذي يجب ألا يضيع بين اللغات: السماحية (Permissive) شرط يجب أن يتحقق **قبل** السماح بالبدء، والتعشيق (Interlock) شرط يمنع فعلًا أو يفرضه **أثناء** التشغيل، والفصل (Trip) فعل حماية يوقف المعدة، والإنذار (Alarm) ينبّه المشغل ولا يفعل شيئًا في العملية. وهذه الأربعة تُكتب بلغات مختلفة أحيانًا، لكنها تُوثَّق في مصفوفة السبب والنتيجة نفسها، وتُختبر كل منها وحدها (القسم 21.12). وما كان منها وظيفة سلامة مصنفة فلا يُكتب في PLC التشغيلي أصلًا، بل في نظام السلامة الآلي (الفصل 58).

أين تقف الواجهة (HMI) من هذا كله؟ خارج مسار المنطق: تعرض الحالة والخطوة الحالية والإنذارات، وتستقبل أوامر المشغل ونقاط الضبط، ولا تنفذ منطق حماية. فإذا توقفت الشاشة بقيت المضخة تعمل بمنطقها داخل المتحكم (القسم 52.1 والفصل 22).

> **دور المهندس ودور الفني:** المهندس يقرر توزيع المنطق على اللغات ويكتبه في مواصفة البرمجة قبل أن يبدأ المبرمج، ويراجع أن الحسابات في وحدات ST مختبرة وأن السماحيات ظاهرة في السلّم لا مدفونة في نص. والفني يتتبع السطر في السلّم ليعرف أي شرط منع البدء، ويقرأ الخطوة النشطة في SFC ليعرف أين وقف التسلسل، ولا يعدل نص ST في الموقع إلا بإدارة تغيير.

19.3 تعليمات مخطط السلّم: ما يحتاجه المهندس فعلًا

(أ) التلامسات والملفات: الفرق بين التلامس في الميدان والتلامس في البرنامج. هذا أهم ما في الفصل وأكثره إرباكًا. تعليمة «افحص إن كان مغلقًا» (Examine If Closed – XIC، ويُرسم في السلّم بخطين رأسيين متوازيين) تكون صحيحة حين يكون **بت المدخل**

= 1، أي حين يصل الجهد إلى طرف المدخل، **أيًا كان نوع التلامس في الميدان**. وتعليمة «افحص إن كان مفتوحًا» (Examine If Open – XIO، ويُرسم بالخطين نفسيهما يقطعهما خط مائل) صحيحة حين يكون البت = 0. فالتعليمة في البرنامج لا تعرف إن كان التلامس الميداني مفتوحًا أو مغلقًا في الوضع الطبيعي؛ هي تسأل عن البت فقط.

جدول: زر إيقاف موصول مغلقًا في الوضع الطبيعي (NC)

حالة الزر في الميدان	الجهد على طرف المدخل	بت المدخل	تعليمة XIC	تعليمة XIO
غير مضغوط (الوضع الطبيعي)	موجود	1	صحيحة: السطر يمر	خاطئة: السطر مقطوع
مضغوط	منقطع	0	خاطئة: السطر مقطوع	صحيحة: السطر يمر
سلك مقطوع أو طرف مفكوك	منقطع	0	خاطئة: المحرك يقف (آمن)	صحيحة: خطر

فزر الإيقاف الموصول مغلقًا (وهو الصحيح لأن انقطاع السلك يوقف المحرك، القسم 17.10) يُكتب في البرنامج بتعليمة **XIC** لا XIO. والمبرمج الذي يرى كلمة «إيقاف» فيضع XIO يصنع برنامجًا لا يبدأ فيه المحرك أبدًا في الوضع الطبيعي، ويبدأ حين يُضغط زر الإيقاف أو ينقطع سلكه. وتوثق كل قائمة إشارات (I/O List) هذا بعمود «حالة التلامس في الوضع الطبيعي» وعمود «معنى 1»، فيعرف المبرمج أن بت STOP_PB = 1 معناه «غير مضغوط».

(ب) مجموعة التعليمات الأساسية وأسماؤها عند المنصات:

الوظيفة	IEC 61131-3	Allen-Bradley (Logix)	Siemens (TIA Portal)	ملاحظة ميدانية
تلامس مفتوح طبيعيًا في البرنامج	تلامس NO	XIC	تلامس NO	صحيح حين البت = 1
تلامس مغلق طبيعيًا في البرنامج	تلامس NC	XIO	تلامس NC	صحيح حين البت = 0
ملف مخرج	ملف ( )	OTE	ملف ( )	يُكتب في موضع واحد فقط
ضبط وإعادة ضبط مستبقيان	ملفا S وR	OTL وOTU	ملفا S وR	OTL وOTU تحفظان قيمتهما في Logix؛ وفي IEC وSiemens حسب تعريف المتغير مستبقى (RETAIN)
كشف الحافة الصاعدة	R_TRIG	ONS أو OSR	P_TRIG أو تلامس P	نبضة لدورة واحدة
مؤقت تأخير التشغيل	TON	TON	TON	الأكثر استخدامًا
مؤقت تأخير الإطفاء	TOF	TOF	TOF	يمدد الإشارة بعد زوالها
مؤقت نبضة	TP	(يُبنى بـ TON)	TP	نبضة بطول ثابت
المؤقت المتراكم	—	RTO	TONR	يجمع الزمن عبر فترات
عداد صاعد ونازل	CTU وCTD	CTU وCTD	CTU وCTD	يحتاج تعليمة تصفير
مقارنة	GT وLT و EQ	GRT وLES و LIM وEQU	CMP	تُستعمل مع تخلف (Hysteresis)

الوظيفة	IEC 61131-3	Allen-Bradley (Logix)	Siemens (TIA Portal)	ملاحظة ميدانية
نقل ورياضيات	MOVE و ADD و MUL	MOV وCPT	MOVE و CALCULATE	انتبه لنوع البيانات

ملاحظة: أسماء التعليمات تتغير بين أجيال المنصة الواحدة، فالمرجع دائمًا دليل تعليمات المنصة المستخدمة.

(ج) المؤقتات: ثلاثة سلوكيات يجب أن تُرسم قبل أن تُبرمج (الشكل 19-4). مؤقت **تأخير التشغيل (TON)** يرفع خرجه بعد أن يبقى مدخله صحيحًا مدة الضبط كاملة، ويعود إلى الصفر فور زوال المدخل؛ فهو «مرشح زمني» يمنع إنذارًا من ارتعاش قصير أو يؤكد أن المضخة بلغت الضغط. ومؤقت **تأخير الإطفاء (TOF)** يرفع خرجه فور صحة المدخل، ويبقيه مدة الضبط بعد زوال المدخل؛ فهو يمدد تشغيل مروحة تبريد بعد إيقاف المحرك. ومؤقت **النبضة (TP)** يعطي نبضة بطول ثابت عند الحافة الصاعدة مهما طال المدخل أو قصر.

الشكل 19-4: *المخططات الزمنية للمؤقتات الثلاثة على المدخل نفسه (ضبط 5 s): TON لا يرى النبضة القصيرة (3 s) ويرفع خرجه بعد 5 s من بداية النبضة الطويلة؛ TOF يمدد كل نبضة 5 s بعد زوالها؛ TP يعطي 5 s ثابتة عند كل حافة صاعدة.*

مثال محلول (مؤقت تأكيد التشغيل): مضخة يُفترض أن يرتفع ضغط تصريفها فوق مفتاح PSL خلال 10 s من إغلاق قاطعها.

- **المعطيات:** إشارة «القاطع مغلق» MOTOR_RUN، ومفتاح الضغط PSL_DISCH (1 = الضغط فوق الحد)، وزمن التأكيد 10 s، ودورة المسح 20 ms.
- **الحل:** مؤقت TON مدخله «القاطع مغلق AND NOT الضغط فوق الحد»؛ إذا بقي هذا الشرط 10 s متصلة ارتفع خرج المؤقت فأُعلن «فشل البدء». لو ارتفع الضغط بعد 6 s زال الشرط وعاد المؤقت إلى الصفر دون إنذار. ودقة المؤقت محكومة بالدورة: الخطأ الأقصى دورة واحدة (20 ms)، أي 0.2% من 10 s.
- **المعنى ميدانيًا:** لا تستعمل TOF هنا ولا TP؛ فالمطلوب أن يستمر الشرط

> الخاطئ مدة كاملة. ويُعرض خرج المؤقت على الشاشة سببًا واضحًا («فشل بدء: لا ضغط خلال 10 s»)، وقيمة الضبط تُجعل قابلة للتعديل من واجهة الصيانة لا مدفونة في الشيفرة.

(د) العدادات: العداد الصاعد (CTU) يزيد قيمته عند كل حافة صاعدة لمدخله ويرفع خرجه عند بلوغ القيمة المضبوطة؛ ويحتاج تعليمة تصفير صريحة. وأشهر استخدامات مهندس التحكم: عدد مرات البدء في الساعة لمحرك كبير (الحماية من البدء المتكرر)، وعدد محاولات البدء الفاشلة، وساعات التشغيل لجدولة الصيانة وتبديل المضخات.

19.4 الإمساك والتعشيقات والأوامر النبضية

(أ) دائرة الإمساك الذاتي (Seal-in) وأولوية الإيقاف. زر البدء نبضة، والمحرك يجب أن يستمر بعد تركه؛ فيُوضع تلامس من مخرج المحرك نفسه على التوازي مع زر البدء (الشكل 19-5). وعلى التوالي مع الاثنين تُوضع شروط الإيقاف كلها: زر الإيقاف (NC في الميدان، XIC في البرنامج)، والحمل الحراري، وأمر الإيقاف الطارئ. بهذا الترتيب تكون **الأولوية للإيقاف**: إذا ضُغط الزران معًا توقف المحرك.

الشكل 19-5: *سطر تشغيل مضخة في LD: البدء المحلي أو البعيد على التوازي مع تلامس الإمساك، وعلى التوالي معها الإيقاف والحمل الحراري والتعشيقات (مستوى السحب، صمام السحب مفتوح، لا إيقاف طارئ)؛ وسطر ثانٍ يعرض سبب المنع أولًا بأول.*

والمقابل في كتل IEC 61131-3 هو الممسك: **SR** كتلة أولويتها للضبط (المدخل S1 يغلب)، و**RS** كتلة أولويتها لإعادة الضبط (المدخل R1 يغلب). فأمر التشغيل الذي يجب أن يغلبه الإيقاف يُبنى بكتلة **RS** ومدخل الإيقاف على R1. أما ممسك الفصل الذي يعني خرجه «مفصول» فيُبنى بكتلة **SR** ومدخل الفصل على S1، لأن الفصل يجب أن يغلب أمر إعادة الضبط ما دام سببه قائمًا (انظر التمييز نفسه في القسم 17.8). وتعكس سيمنس اسمي الكتلتين، فالعبرة بالمدخل الغالب المرقم 1 لا باسم الكتلة (القسم 20.1).

(ب) لماذا لا يُبنى أمر التشغيل بـ OTL وOTU؟ تعليمتا الضبط وإعادة الضبط OTL و OTU تحفظان قيمتهما عند انقطاع التغذية في منصات Logix، وكذلك أي بت في منصات IEC وSiemens إذا عُرّف متغيرًا مستبقى (RETAIN). فإذا انقطعت التغذية عن PLC والمحرك يعمل، ثم عادت، وجد البرنامج بت التشغيل = 1 فأعاد تشغيل المحرك وحده. وهذا ممنوع في معظم مواصفات السلامة للمعدات الدوارة (لا بدء آلي بعد عودة التغذية دون أمر جديد) إلا حين يكون البدء الآلي مقصودًا وموثقًا ومحللًا في دراسة المخاطر.

الإمساك الذاتي بملف عادي (OTE) يسقط عند انقطاع التغذية، وهذا ما نريده. وإن احتاج التصميم ممسكًا مستبقى لغرض آخر، فيُصفَّر صراحة في **الدورة الأولى (First Scan)** بعد التشغيل.

(ج) الأمر النبضي والأمر المستمر من DCS. يصل أمر البدء من DCS إلى PLC الحزمة بإحدى صورتين: **نبضة** (بت يرتفع ثانية واحدة ثم يعود) أو **أمر مستمر** (بت يبقى 1 ما دام المطلوب أن يعمل المحرك). النبضي يحتاج إمساكًا في PLC، وعيبه أن فقد الاتصال لا يوقف شيئًا. والمستمر لا يحتاج إمساكًا، ويحتاج قرارًا صريحًا لما يحدث عند فقد الاتصال: هل يستمر المحرك على آخر حالة، أم يقف؟ هذا القرار يُكتب في وثيقة الواجهة (القسم 25.7) ويُختبر في اختبار التكامل (الفصل 107). وأخطر الحالات الخلط: DCS يرسل نبضة، وPLC مبرمج على أمر مستمر، فيعمل المحرك ثانية واحدة ثم يقف.

(د) التعشيقات والسماحيات وأول سبب. السماحية (Permissive) شرط يجب أن يتحقق **قبل** البدء فقط (مثل: ضغط زيت التزييت قائم قبل بدء الضاغط)، و**التعشيق (Interlock)** شرط يوقف المعدة أو يمنعها **في أي وقت** (مثل: مستوى السحب منخفض جدًا). ويُصمم البرنامج ليعرض للمشغل كل سماحية ناقصة باسمها، وليسجل **أول سبب (First-Out)** للإيقاف: عند الفصل تُجمد حالة الأسباب كلها ويُعلَّم أول سبب ظهر، لأن الأسباب اللاحقة غالبًا نتائج للإيقاف نفسه (الضغط ينخفض لأن المضخة وقفت، لا العكس).

جدول: السماحية والتعشيق والفصل الآلي

المفهوم	متى يُفحص	ماذا يفعل	مثال على مضخة	هل يحتاج إعادة ضبط؟
السماحية	قبل البدء فقط	يمنع البدء	صمام السحب مفتوح	لا، يزول بزوال السبب
التعشيق التشغيلي	دائمًا	يوقف أو يمنع	الحمل الحراري	حسب الفلسفة، غالبًا إعادة ضبط محلية

المفهوم	متى يُفحص	ماذا يفعل	مثال على مضخة	هل يحتاج إعادة ضبط؟
الفصل الآلي من العملية	دائمًا	يوقف ويُمسك حالة الفصل	مستوى السحب منخفض جدًا	نعم، بعد زوال السبب وبأمر مقصود
الفصل من نظام السلامة	دائمًا، من نظام مستقل	يوقف بسلك مباشر لا يمر بمنطق PLC التشغيلي	إيقاف طارئ من SIS	نعم، من نظام السلامة نفسه

كيف أختار؟ صنّف كل شرط بعمودي «متى يُفحص» و«هل يحتاج إعادة ضبط»: ما يُفحص قبل البدء فقط ويزول بزوال سببه سماحية، وما يُفحص دائمًا ويزول بزواله تعشيق، وما يُفحص دائمًا ويُمسك حتى أمر مقصود فصل آلي، وما جاء من دراسة السلامة يخرج من هذا PLC كله. ولا يحسم الجدول الحالات الرمادية، كصمام سحب يُغلق أثناء التشغيل: سماحية في تصميم وتعشيق في آخر، والحكم لوصف التحكم المكتوب لا لرأس المبرمج. والخطأ الأكثر كلفة أن يُصنف شرط فصل سماحية، فتقبل المضخة أمر بدء جديدًا والسبب قائم، أو أن يُبنى تعشيق يزول بزوال سببه ممسكًا بلا إعادة ضبط، فيقف المصنع بانتظار زر لا يعرفه أحد.

والقاعدة الحاكمة أن وظيفة السلامة المصنفة لا تُنفذ في PLC التشغيلي؛ فهذا PLC يُعدَّل ويُفرض عليه ويُحمَّل عليه برنامج جديد، ووظيفة السلامة تحتاج نظامًا مستقلًا مصنفًا (الفصلان 55 و29). ويستطيع PLC التشغيلي أن يعرض حالة الفصل ويسجلها، لا أن يكون طريقه الوحيد.

19.5 SFC: الخطوات والانتقالات وقواعد الصحة

التسلسل المكتوب في LD بأقفال ومؤقتات متشابكة يعمل، لكن لا أحد يعرف بعد سنة في أي «خطوة» هو. أما SFC فيعرض التسلسل كما يُفكَّر فيه: **خطوات (Steps)** مستطيلة،

بينها **انتقالات (Transitions)** بشرط منطقي، ومع كل خطوة **أفعال (Actions)** تنفذ ما دامت الخطوة نشطة (الشكل 19-6).

الشكل 19-6: *مخطط SFC لتسلسل بدء المضخة الاحتياطية P-102 في مشروع الكتاب: من الانتظار إلى فتح صمام السحب ثم تشغيل المحرك ثم تأكيد الضغط؛ ولكل خطوة مهلة تنقل التسلسل إلى خطوة «فشل» تبقى فيها حتى إعادة ضبط يدوية.*

قواعد الصحة (تُراجع في كل SFC قبل قبوله):

1. خطوة ابتدائية واحدة بالضبط (مستطيل مزدوج الإطار)، وهي الحالة الآمنة التي يعود إليها التسلسل بعد إعادة الضبط أو عودة التغذية.
2. تتناوب الخطوات والانتقالات دائمًا: لا تتصل خطوتان مباشرة ولا انتقالان مباشرة.
3. **التفرع الاختياري (OR)** بخط مفرد: انتقالات بشروط متنافية، فيُختار فرع واحد. وإن لم تكن الشروط متنافية حددت المنصة أولوية (غالبًا من اليسار إلى اليمين)، وهذا مصدر أخطاء يُفضَّل تجنبه بجعل الشروط متنافية صراحة.
4. **التفرع المتوازي (AND)** بخط مزدوج: تنشط الفروع كلها معًا، ولا يُتجاوز خط الالتقاء المزدوج إلا حين تكتمل الفروع كلها.
5. لا يُغلق فرع اختياري بخط التقاء متوازٍ ولا العكس؛ هذا يصنع تسلسلًا «غير آمن» تتكاثر فيه الخطوات النشطة، أو تسلسلًا ينتظر فرعًا لم ينشط أبدًا فيتجمد.
6. لكل خطوة تنتظر حدثًا من الميدان مهلة (Timeout) تنقلها إلى معالجة فشل صريحة، لا انتظار إلى الأبد.
7. الأفعال التي يجب أن تستمر بعد مغادرة الخطوة تُضبط بصفة الفعل المناسبة (S للضبط المستمر ثم R لإلغائه في خطوة لاحقة)، والأفعال المؤقتة بصفة N التي تنتهي بانتهاء الخطوة.

جدول: صفات الأفعال الأكثر استخدامًا في SFC

الصفة	الاسم	السلوك	استخدام نموذجي
N	غير مخزّن (Non-stored)	ينفذ ما دامت الخطوة نشطة	فتح صمام أثناء خطوة التعبئة
S	مخزّن (Set)	يبقى بعد مغادرة الخطوة حتى يُلغى بـ R	تشغيل محرك في خطوة وإيقافه في خطوة لاحقة

الصفة	الاسم	السلوك	استخدام نموذجي
R	إعادة ضبط (Reset)	يلغي فعلًا مخزّنًا	إيقاف المحرك في خطوة الإيقاف
P	نبضي (Pulse)	ينفذ مرة واحدة عند دخول الخطوة	تصفير عداد أو تسجيل حدث
L	محدود زمنيًا (Limited)	ينفذ مدة محددة داخل الخطوة	تشغيل بوق تحذير 10 s
D	مؤخَّر (Delayed)	يبدأ بعد مدة من دخول الخطوة	تشغيل مروحة بعد 5 s

كيف أختار؟ ابدأ بالصفة N لكل فعل، ولا تخرج عنها إلا لسبب: فعل يجب أن يبقى بعد مغادرة الخطوة (محرك يستمر عبر خطوات) يأخذ S ويُقابله R صريح في خطوة لاحقة، وفعل يُنفذ مرة واحدة (تصفير عداد) يأخذ P، وما يحتاج زمنًا داخل الخطوة يأخذ L أو D. ولا يبين الجدول ما يحدث للأفعال المخزنة عند إعادة الضبط أو عودة التغذية أو الانتقال إلى خطوة الفشل، فتُكتب لكل S خطوة تُلغيها في مسارات الإيقاف والفشل أيضًا. والخطأ الأكثر كلفة فعل S نُسي إلغاؤه، فيبقى محرك يعمل أو صمام مفتوحًا بعد أن غادر التسلسل إلى خطوة الفشل وظن المشغل أن كل شيء توقف.

مثال محلول (مدة التسلسل ومهله): تسلسل P-102 في الشكل 19-6: فتح صمام السحب (زمن الشوط المقاس 12 s)، ثم إغلاق قاطع المحرك (تأكيد خلال 2 s)، ثم ضغط التصريف فوق PSL (نموذجيًا خلال 4 s).

- **الافتراضات:** المهلة لكل خطوة 1.5 ضعف أسوأ زمن مقاس، ولا تقل عن الزمن المقاس مضافًا إليه 3 s لتقلبات الهواء والجهد.
- **الحل:** المهلة = الأكبر من (1.5 × الزمن المقاس) و(الزمن المقاس + 3 s):
  - مهلة الصمام = max(1.5 × 12، 12 + 3) = 18 s.

  - مهلة القاطع = 3)max، 5 s = 5).
  - مهلة الضغط = 10 s، يحددها وصف التحكم (40.4).
  - المدة الطبيعية = 4 + 2 + 12 = 18 s.
  - الأسوأ قبل إعلان الفشل = 10 + 5 + 18 = 33 s.
- **المعنى ميدانيًا:** إذا كان مستوى السحب يسمح بغياب المضختين 20 s فقط قبل الفصل الآلي للوحدة، فالتسلسل بصمام سحب يُفتح عند الطلب لا يكفي؛ الحل أن يبقى صمام سحب المضخة الاحتياطية مفتوحًا دائمًا وأن تبدأ من الخطوة الثانية. هذه النتيجة تُكتب في وصف التحكم، لا يكتشفها المشغل في أول إيقاف.

19.6 الإشارات التناظرية والتحجيم

(أ) من التيار إلى القيمة الهندسية. بطاقة الإدخال التناظري تحول التيار إلى عدد صحيح يسمى **القيمة الخام (Raw Counts)**، ولكل منصة مداها: بعض بطاقات Siemens مثلًا تجعل 4 mA = 0 و20 mA = 27648، مع هامش فوق المدى حتى 32511 وتحته إلى قيم سالبة. ومنصات أخرى تستعمل 0–32767 أو 0–65535 أو تحوّل مباشرة إلى وحدات هندسية تُضبط في تهيئة البطاقة. والتحجيم (Scaling) علاقة خطية (الشكل 19-7):

$$\text{EU} = \text{LRV} + (\text{Raw} - \text{RawMin}) \div (\text{RawMax} - \text{RawMin}) \times (\text{URV} - \text{LRV})$$

الشكل 19-7: *سلسلة التحجيم من تيار الحلقة إلى القيمة الخام إلى الضغط الهندسي (0–10 bar) على بطاقة مداها 0–27648، مع مناطق NAMUR NE43: 3.6 mA أو أقل و21 mA أو أكثر عطل، وبين 3.8 و20.5 mA قياس صالح، والشريطان بينهما (3.6 إلى 3.8 mA و20.5 إلى 21 mA) منطقتان غير محددتين بين حد التشبع وإشارة العطل، فتُعلَّم القراءة فيهما «قيمة مشكوك فيها».*

مثال محلول (التحجيم وحدود العطل):

- **المعطيات:** مرسل ضغط PT-302 مداه 0–10 bar، وبطاقة 4 mA = 0 و 20 mA = 27648، والقيمة المقروءة 13824.
- **الحل:** بالعلاقة EU = LRV + (Raw − RawMin) ÷ (RawMax − RawMin) × (URV − LRV):
  - الضغط = 0 + 13824 ÷ 27648 × 10 = **5.00 bar**.
  - التيار المقابل = 4 + 16 × 0.5 = **12 mA**، أي أن القراءة في منتصف المدى.
  - حد العطل السفلي وفق NE43: القيمة الخام عند 3.6 mA = (3.6 − 4) ÷ 16 × 27648 = **−691**.
  - حد العطل العلوي: القيمة الخام عند 21 mA = 17 ÷ 16 × 27648

= 29376.

- **المعنى ميدانيًا:** يُكتب في البرنامج: القيمة الخام أقل من 691− أو أكثر من 29376 تعني «عطل المرسل»؛ فتُرفع حالة العطل، وتُجمَّد القيمة أو يُنتقل إلى قيمة بديلة حسب فلسفة الحلقة (الفصل 40)، ولا تُترك القيمة «0 bar» تدخل منطق التحكم على أنها قياس حقيقي. وفقد الحلقة (سلك مقطوع) يجعل التيار صفرًا، فتعطي البطاقة قيمة دون الحد الأدنى أو قيمة عطل خاصة مع بت تشخيص للقناة حسب المنصة، ويُكشف بالشرط نفسه مقرونًا ببت حالة القناة.

(ب) أربع معالجات تُطبق على كل مدخل تناظري قبل استعماله:

1. **كشف العطل والصلاحية:** حدود NE43 أعلاه، وحالة البطاقة وقناتها، وحالة HART إن وُجدت.
2. **الترشيح (Filtering):** مرشح رتبة أولى بثابت زمني صغير (غالبًا 0.5 إلى 2 s للضغط والتدفق) لإخماد الضجيج، مع الحذر: الترشيح المبالغ فيه يضيف تأخيرًا يفسد الحلقة (الفصل 18) ويبطئ الإنذار.
3. **الجذر التربيعي لعناصر الضغط التفاضلي:** $Q = Q_{max} \times \sqrt{(\Delta P\%/100)}$، في المرسل أو في PLC لا في الاثنين معًا، مع **قطع التدفق المنخفض (Low Flow Cutoff)**: تحت نحو 1% من الضغط التفاضلي (نحو 10% من التدفق) يصفَّر التدفق، لأن ميل الجذر عند الصفر لانهائي فيكبّر الضجيج.
4. **منطقة ميتة للإنذار (Alarm Deadband):** الإنذار الذي يرتفع عند 80% لا يزول قبل 78% مثلًا، وإلا تكرر مع كل تذبذب صغير (القسم 22.3).

مثال محلول (الجذر وقطع التدفق المنخفض): لوح فتحة مداه 0–250 mbar يقابل 0–40,000 Sm^3/h، والمرسل خطي.

- عند 62.5 mbar (25% من المدى): $Q = 40{,}000 \times \sqrt{0.25} = \mathbf{20{,}000\ S}$ **m^3/h**، أي 50% من التدفق.
- عند 2.5 mbar (1%):
  - $Q = 40{,}000 \times \sqrt{0.01} = \mathbf{4{,}000\ Sm^3/h}$.
  - ولو كان ضجيج المرسل ±1 mbar عند التدفق الصفري: Q الوهمي $= 40{,}000 \times \sqrt{0.004} \approx$ **2,530 Sm^3/h**.
  - فيقرأ البرنامج تدفقات وهمية تصل إلى هذا الحد، وتتراكم في المجمِّع (Totalizer) كمية غاز لم تمر.
- **المعنى ميدانيًا:** قطع عند 1% من الضغط التفاضلي يزيل هذا الوهم، ومدى القياس الموثوق للوح الفتحة يبقى نحو 3:1 إلى 4:1 على أي حال (القسم 8.14).

19.7 تنظيم البرنامج: المهام والكتل والمكتبات

(أ) المهام (Tasks). البرنامج الحديث لا يُنفذ كله في دورة واحدة متصلة، بل يوزع على مهام:

نوع المهمة	متى تُنفذ	ما يوضع فيها	خطأ شائع
مستمرة (Continuous/Main Cycle)	بلا توقف، بأسرع ما يمكن	المنطق المنفصل والأقفال والشاشات	وضع PID فيها فيتغير زمن تنفيذه مع كل دورة
دورية (Periodic/Cyclic Interrupt)	كل فترة ثابتة (10 ms إلى 1 s)	حلقات PID، والمرشحات، والتكامل الزمني للعدادات	فترة أقصر مما يكفي لتنفيذها فتتراكم

نوع المهمة	متى تُنفذ	ما يوضع فيها	خطأ شائع
حدثية (Event)	عند حدث: حافة مدخل، أو وصول رسالة	الاستجابة الفورية لحدث نادر	الإكثار منها فيصير توقيت البرنامج غير متوقع

كيف أختار؟ ضع كل ما يفترض فترة عيّنة ثابتة (PID، والمرشحات، والتكامل الزمني والمجمِّعات) في مهمة دورية فترتها أقصر بكثير من ثابت زمن العملية، وكل المنطق المنفصل والأقفال والشاشات في المهمة المستمرة، ولا تلجأ إلى المهمة الحدثية إلا لحدث نادر تُقاس استجابته بأجزاء الملي ثانية. ولا يبين الجدول تنافس المهام على المعالج: المهمة الدورية تقاطع المستمرة، فإذا كثرت أو قصرت فترتها تضخم زمن الدورة المستمرة وتأخر ما فيها من أقفال، ويظهر ذلك في «أطول دورة» بتشخيص المعالج لا في المتوسط. والخطأ الأكثر كلفة مخرج أو ممسك يُكتب من مهمتين مختلفتين، فيأخذ قيمة آخر من كتبه في كل دورة ويظهر عطل متقطع لا يُعاد إنتاجه في المكتب.

وسبب وضع PID في مهمة دورية أن خوارزمية PID الرقمية تفترض فترة عيّنة ثابتة؛ فإذا تغيرت الدورة من 20 إلى 60 ms تغير أثر زمن التكامل والتفاضل فعليًا دون أن يلمس أحد المعاملات.

(ب) وحدات تنظيم البرنامج (Program Organization Units – POU). تعرّف IEC 61131-3 ثلاثة أنواع: **البرنامج (Program)** وهو أعلاها ويُربط بمهمة؛ و**الكتلة الوظيفية (Function Block)** ولها ذاكرة داخلية (مؤقتاتها وحالتها) وتُستنسخ نسخة لكل استعمال، مثل كتلة «مضخة» تُستعمل لعشرين مضخة؛ و**الدالة (Function)** بلا ذاكرة، تعطي الخرج نفسه للمدخلات نفسها دائمًا، مثل التحجيم. والمكتبة المختبرة من كتل «محرك» و«صمام تشغيل/إيقاف» و«مدخل تناظري» و«PID» هي أكبر ما يرفع جودة المشروع: تُكتب مرة وتُختبر مرة وتُستعمل مئة مرة بسلوك واحد في الإنذارات والأوضاع والشاشات.

(ج) هيكل البرنامج الموصى به: أولًا معالجة المداخل (التحجيم، والعطل، والارتداد، وعكس المعنى إن لزم) في مكان واحد؛ ثم المنطق على قيم نظيفة؛ ثم كتابة المخارج في

مكان واحد. وأهم قاعدة: **كل مخرج يُكتب في موضع واحد فقط.** فالملف الذي يُكتب في سطرين يأخذ قيمة السطر الأخير في كل دورة، والسطر الأول يبدو في المراقبة الحية صحيحًا ومخرجه لا يتحرك، فيضيع الفني ساعات (الشكل 19-8 يبين هيكل مشروع وفق هذه القاعدة).

الشكل 19-8: *هيكل برنامج مقترح: مهمة مستمرة لمعالجة المداخل والمنطق والمخارج بهذا الترتيب، ومهمة دورية كل 100 ms للحلقات التناظرية، ومكتبة كتل موحدة يستدعيها البرنامجان، وقاعدة بيانات وسوم واحدة بأسماء تتبع وسوم P&ID.*

(د) الوسوم والتسمية. في المنصات الحديثة لا يُكتب البرنامج على عناوين (I:1/3، I0.3%) بل على **وسوم (Tags)** بأسماء، تُربط بالعناوين مرة واحدة. والاسم يتبع وسم P&ID (مثل LT101A_PV وP102_RUN_CMD) مع لاحقة تبين المعنى، ويُكتب معنى القيمة 1 في وصف الوسم. وتتيح المنصات **أنواع بيانات يعرّفها المستخدم (User-Defined Type – UDT)** تجمع حقول معدة واحدة (أمر، حالة، أعطال، عدادات) في بنية واحدة، فتُبنى الشاشات والاتصالات على البنية لا على مئات الوسوم المتفرقة.

19.8 أمثلة من منصات شائعة

المفاهيم واحدة، والأسماء تختلف. يساعد هذا الجدول المهندس الذي ينتقل بين حزم من موردين مختلفين:

جدول مقارنة: المفاهيم نفسها بأسماء ثلاث منصات شائعة

المفهوم	Allen-Bradley (ControlLogix، Studio 5000)	Siemens (S7-1500، TIA Portal)	Schneider (Modicon M580، Control Expert)
المهمة المستمرة	Continuous Task	OB1 (Program Cycle)	MAST Task
المهمة الدورية	Periodic Task	Cyclic Interrupt OB (OB30–OB38)	FAST Task
البرنامج والأجزاء	Program وRoutines	FB وFC تُستدعى من OB	Sections وDFB
تخزين البيانات	Tags بنطاق المتحكم أو البرنامج	Data Blocks (DB)	متغيرات ومتغيرات مهيكلة
النوع المعرّف من المستخدم	UDT	PLC Data Type (UDT)	DDT
الكتلة المعرفة من المستخدم	Add-On Instruction (AOI)	FB بنسخة DB	DFB
مؤقت IEC	TON بحقول .PRE و.ACC و.DN	TON (IEC_TIMER)	TON
تحجيم تناظري جاهز	SCP أو CPT	NORM_X ثم SCALE_X	SCALING

ملاحظات ميدانية من هذه المنصات:

- في Logix، حقل .DN في المؤقت هو «انتهى»، و.TT «يعدّ»، و.EN «مدخله صحيح»؛ ويُقرأ المؤقت من هذه الحقول في الأسطر اللاحقة.
- في TIA Portal، كل نسخة FB تحتاج كتلة بيانات (Instance DB) تحفظ حالتها؛ ونسخ FB دون نسخ DB الخاصة بها يعطي كتلة تبدأ من حالة مختلفة.
- في كل المنصات يوجد **وضع التعديل الحي (Online Edit)**؛ وهو مفيد وخطر معًا، ويخضع لإدارة التغيير (الفصل 85) واختبار قبل التطبيق، لأن تعديلًا صغيرًا حيًا قد يعيد تهيئة مؤقتات أو ممسكات في منتصف تسلسل.

19.9 التحويل بين اللغات: مثال تحكم بالمستوى بمضختين

المسألة: خزان تجميع مياه صرف بمضختين، تبدأ المضخة المختارة عند 80% وتقف عند 20% (تحكم بتشغيل وإيقاف بمنطقة محايدة، القسم 18.1)، والمستوى العالي جدًا 90% يشغل المضختين معًا، وتتبادل المضختان الدور عند كل بدء لتوزيع ساعات التشغيل.

بالنص المهيكل (ST):

```
(* LT-301: مستوى الخزان بالنسبة المئوية بعد معالجة العطل *)
IF LT301_FAULT THEN
    PUMP_DEMAND := FALSE;                    (* لا: عطل القياس
تشغيل آلي، إنذار للمشغل *)
ELSIF LT301_PV >= 80.0 THEN
    PUMP_DEMAND := TRUE;                     (* بدء عند 80%
*)
ELSIF LT301_PV <= 20.0 THEN
    PUMP_DEMAND := FALSE;                    (* إيقاف عند 20%
*)
END_IF;                                      (* بين الحدين:
تبقى الحالة كما هي *)
```

```
DEMAND_EDGE(CLK := PUMP_DEMAND);            (* R_TRIG:
حافة صاعدة لكل طلب جديد *)
IF DEMAND_EDGE.Q THEN
    DUTY_IS_A := NOT DUTY_IS_A;             (*  تبادل الدور عند
كل بدء *)
END_IF;

P301A_CMD := (PUMP_DEMAND AND DUTY_IS_A) OR (LT301_PV
>= 90.0 AND NOT LT301_FAULT);
P301B_CMD := (PUMP_DEMAND AND NOT DUTY_IS_A) OR
(LT301_PV >= 90.0 AND NOT LT301_FAULT);
```

وبمخطط الكتل (FBD): كتلتا مقارنة (GE 80 وLE 20) تغذيان ممسكًا من نوع RS (الإيقاف عند 20% هو R1 الغالب)، وخرجه يدخل كتلة R_TRIG ثم قلابًا يبدل الدور، ومنه بوابتا AND وOR للمضختين (الشكل 19-9). وإشارة عطل القياس تدخل كما في ST: تُسقط الطلب وتحجب تجاوز المستوى العالي جدًا، فعطل المرسل إلى أعلى المدى لا يشغل المضختين معًا (لم تُرسم في الشكل للتبسيط)، ويبقى للحماية من الفيضان مفتاح مستوى مستقل سلكي. والمقارنة بين الصيغتين تعلّم أمرًا مهمًا: **سطر «بين الحدين تبقى الحالة» ضمني في ST** (لأن المتغير يحتفظ بقيمته إذا لم يُكتب)، و**صريح في FBD** (الممسك). ومن يحوّل البرنامج بين اللغات أو المنصات يجب أن يحافظ على هذا السلوك، وإلا صارت المضخة تبدأ عند 80% وتقف عند 79%.

الشكل 19-9: *المنطق نفسه بمخطط الكتل الوظيفية: مقارنتان تغذيان ممسكًا RS أولويته للإيقاف، ثم كشف الحافة الصاعدة وقلاب تبديل الدور، ثم بوابات المضختين مع تجاوز المستوى العالي جدًا.*

وبقائمة التعليمات (IL) لسطر أمر المضخة A فقط (للقراءة عند ترحيل نظام قديم):

```
LD    PUMP_DEMAND
AND   DUTY_IS_A
OR    LEVEL_HH          (* LT301_PV >= 90 محسوبة سابقًا *)
ST    P301A_CMD
```

الكتل الوظيفية: يشرح الفصل 20 كل كتلة برمزها ومداخلها وإعداداتها واستعمالها في دائرة كاملة، ويضم في آخره جداول المرجع السريع للكتل وسلسلة حماية نموذجية (20.18).

19.9.1 إشارة مختصرة: آلات التحكم الرقمي (CNC) والروبوتات الصناعية

وهذه إشارة جانبية قبل الانتقال إلى الاختبار: آلتان لكل منهما متحكمها الخاص، لا يبرمجهما مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس عادة، لكنه يربطهما بـ PLC الخط ويصمم تعشيقاتهما.

آلة التحكم الرقمي بالحاسوب (Computer Numerical Control – CNC): مخرطة أو آلة تفريز أو آلة قطع يقودها متحكم مخصص ينفذ برنامجًا بلغة (G-code)، يحدد مسار

الأداة وسرعتها. وكل محور فيها حلقة موضع مغلقة: محرك مؤازر (Servo Motor) ومشغّله، ومشفّر (Encoder) يقيس الموضع الفعلي (الفصل 11)، ويعمل المتحكم على تصفير الخطأ في كل دورة.

الروبوت الصناعي (Industrial Robot): ذراع بعدة محاور، لها متحكمها ولوحة التعليم (Teach Pendant)، تُستعمل في اللحام والتعبئة والنقل والدهان. وتُصمم سلامتها وفق (ISO 10218)، بأسوار وأبواب مراقبة وحساسات حضور.

ما يخص مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم فيهما: لا يُطلب منه في الغالب أن يبرمج الآلة أو الذراع، بل أن يصمم **الواجهة** مع PLC الخط: إشارات الجاهزية والبدء والانتهاء والأعطال عبر مداخل ومخارج سلكية أو شبكة صناعية مثل (PROFINET) أو (EtherNet/IP) (الفصل 23)، و**التعشيقات** بين الآلة والناقل والأبواب، و**الإيقاف الطارئ** بفئات الإيقاف في (IEC 60204-1): الفئة 0 بقطع الطاقة فورًا، والفئة 1 بإيقاف مضبوط ثم قطع الطاقة. والقاعدة كما في الحمايات كلها: الإيقاف الطارئ وأبواب السلامة سلكية أو عبر وحدة سلامة معتمدة، لا عبر رسالة شبكة عادية.

19.10 الاختبار والتشخيص الميداني

خطوات تشخيص مخرج لا يعمل (المضخة لا تبدأ رغم الأمر):

1. **ابدأ من المخرج إلى الخلف:** افتح المراقبة الحية على السطر الذي يكتب مخرج المضخة. هل الملف مفعّل في البرنامج؟
2. **إذا كان مفعّلًا في البرنامج ولم يتحرك المرحّل:** افحص مؤشر القناة على البطاقة، ثم المصهر، ثم المرحّل البيني، ثم دائرة التحكم في مركز التحكم بالمحركات (MCC). المشكلة في العتاد لا في البرنامج.
3. **إذا لم يكن مفعّلًا:** ابحث بالإسناد المتقاطع (Cross Reference) عن كل مواضع كتابة هذا المخرج؛ إن وُجد أكثر من موضع فهذا هو السبب غالبًا.

4. **تتبع السطر من اليسار:** أي تلامس مقطوع؟ ولكل تلامس مقطوع ارجع إلى مصدره: مدخل ميداني (افحصه بالمقياس على الطرف)، أو بت داخلي (ابحث عمّن يكتبه).
5. **افحص المؤقتات والممسكات:** مؤقت ما زال يعدّ، أو ممسك فصل لم يُعد ضبطه، أو سماحية ناقصة يعرضها البرنامج.
6. **افحص الفرض (Forcing):** هل على أي مدخل أو مخرج فرض نُسي من اختبار سابق؟ معظم المنصات تضيء مؤشرًا على المعالج حين يوجد فرض.
7. **وثّق ما وجدت** في سجل الأعطال، وإن كان السبب في البرنامج فالتعديل يمر بإدارة التغيير، لا يُصلح حيًا في منتصف الليل.

الفرض (Forcing) أخطر أداة في يد المهندس. الفرض يثبت قيمة مدخل أو مخرج بغض النظر عن الميدان أو البرنامج، ويفيد في فحص الحلقات قبل التشغيل. لكنه قد يُنسى: فمدخل مستوى عالٍ جدًا مفروض على «طبيعي» منذ فحص الحلقات يلغي حماية الخزان بصمت. ولذلك: لا فرض في منشأة عاملة إلا بتصريح مكتوب، وسجل للفروض القائمة يُراجع في كل وردية، وفحص إزالة الفروض كلها ضمن قائمة التسليم قبل التشغيل (الفصل 108).

جدول تشخيص سريع:

العرض	السبب الأرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
المخرج مفعّل في البرنامج ولا يتحرك في الميدان	مصهر القناة، أو بطاقة معطلة، أو مرحّل بيني	مؤشر القناة ثم الجهد على الطرف	استبدال المصهر أو البطاقة وفحص سبب احتراقه
السطر صحيح في المراقبة والملف لا يتفعل	المخرج مكتوب في موضع آخر لاحق	الإسناد المتقاطع	توحيد الكتابة في موضع واحد
أمر من DCS يُنفذ أحيانًا ويضيع أحيانًا	نبضة أقصر من الدورة أو من دورة الاتصال	عرض النبضة مقابل الدورة والاستطلاع	أمر مستمر أو نبضة أطول مع إقرار

العرض	السبب الأرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
المحرك بدأ وحده بعد عودة التغذية	أمر تشغيل مبني بممسك مستبقى	نوع التعليمة وبت الدورة الأولى	إمساك غير مستبقى وتصفير في الدورة الأولى
المعالج يتوقف ويضع المخارج في الوضع الآمن بعد تعديل	تجاوز مؤقت المراقبة بحلقة تكرارية طويلة	سجل تشخيص المعالج وأطول دورة	إعادة كتابة الحلقة أو نقلها إلى مهمة أبطأ
قراءة تناظرية تقفز إلى الصفر ثم تعود	عطل متقطع في الحلقة يُقرأ كقيمة	القيمة الخام دون −691	كشف العطل وتجميد القيمة، ثم إصلاح الطرف

19.11 مشروع الكتاب المتصل: منطق المضختين P-101 وP-102

نحوّل هنا الجدول الوارد في القسم 40.4 (الأسئلة الستة للمضخة الاحتياطية) إلى قائمة إشارات وشيفرة. المضختان تصرّفان السوائل المفصولة من وعاء الشفط V-101 إلى فاصل التصريف، ومنطقهما في PLC حزمة الضاغط، ويتبادل PLC الحالات والأوامر مع DCS عبر رابط تسلسلي، بينما الإيقاف الطارئ يصل بسلك مباشر.

قائمة الإشارات المختصرة (لمضخة واحدة، والثانية مثلها):

الوسم	النوع	التلامس الطبيعي أو المدى	معنى القيمة 1	المصدر
P102_RUN_FB	مدخل منفصل	تلامس مساعد في القاطع، مفتوح طبيعيًا	القاطع مغلق (تعمل)	مركز المحركات
P102_TRIP_FB	مدخل منفصل	مغلق طبيعيًا	لا عطل في المحرك	مركز المحركات

الوسم	النوع	التلامس الطبيعي أو المدى	معنى القيمة 1	المصدر
P102_LOCAL	مدخل منفصل	مفتوح طبيعيًا	مفتاح الاختيار على «محلي»	اللوحة المحلية
PSL_DISCH	مدخل منفصل	مغلق طبيعيًا	ضغط التصريف فوق الحد	مفتاح ضغط ميداني
XV102_ZSO	مدخل منفصل	مفتوح طبيعيًا	صمام السحب مفتوح تمامًا	مفتاح حدي
LSLL_V101	مدخل منفصل	مغلق طبيعيًا	المستوى فوق المنخفض جدًا	من SIS (مكرر للعرض والمنع)
ESD_HEALTHY	مدخل منفصل	مغلق طبيعيًا	لا إيقاف طارئ	من SIS بسلك مباشر
P102_START_CMD	مخرج منفصل	مرحّل بيني	أمر تشغيل	إلى مركز المحركات

الشيفرة المختصرة لقرار البدء الآلي (ST):

```
(* الموانع: كلها يجب أن تكون صحيحة قبل أي بدء *)
P102_READY := ESD_HEALTHY AND LSLL_V101 AND XV102_ZSO
              AND P102_TRIP_FB AND NOT P102_LOCAL AND
NOT P102_FAILED;

(* طلب البدء الآلي: هبوط الضغط 2 ثانية أو فشل المضخة العاملة *)
T_PSL(IN := NOT PSL_DISCH AND AUTO_MODE, PT := T#2S);
AUTO_START_REQ := (T_PSL.Q OR P101_FAILED) AND
P102_READY
                  AND NOT P102_RUN_FB AND NOT
ABORT_TRY;

(* القاطع مغلق والضغط فوق الحد: تأكيد البدء خلال 10 s *)
```

```
T_CONF(IN := P102_START_CMD AND NOT (P102_RUN_FB AND
PSL_DISCH), PT := T#10S);
CONF_EDGE(CLK := T_CONF.Q);                (* R_TRIG:
مرة واحدة لكل محاولة فاشلة *)
IF CONF_EDGE.Q THEN
    ATTEMPTS := ATTEMPTS + 1;
    ABORT_TRY := TRUE;                     (*  يُسقط أمر هذه
60 المحاولة ويبدأ حظر s  *)
    IF ATTEMPTS >= 2 THEN
        P102_FAILED := TRUE;               (*  يبقى حتى
إعادة ضبط يدوية *)
    END_IF;
END_IF;
T_BLOCK(IN := ABORT_TRY, PT := T#60S);
IF T_BLOCK.Q THEN ABORT_TRY := FALSE; END_IF;

(* الأمر: إمساك غير مستبقى، والإيقاف والموانع والحظر غالبة  *)
P102_START_CMD := (AUTO_START_REQ OR MAN_START OR
P102_START_CMD)
                  AND P102_READY AND NOT STOP_CMD AND
NOT ABORT_TRY;
```

والنقاط التي تستحق التوقف عندها أربع. **الأولى:** الموانع مجموعة في متغير واحد يُعرض على الشاشة بأسبابه. **الثانية:** المحاولة الفاشلة تُعد مرة واحدة بكشف الحافة الصاعدة لخرج مؤقت التأكيد؛ ولو عُدّت بالمستوى لزاد العداد في كل دورة يبقى فيها الخرج صحيحًا. **الثالثة:** بعد المحاولة الأولى الفاشلة يسقط الأمر ويُحظر البدء 60 s ثم يُسمح بمحاولة ثانية، فإن فشلت صار «فشل البدء» حالة صريحة (P102_FAILED) لا مجرد غياب «تعمل»؛ وإعادة الضبط اليدوية تصفّر P102_FAILED وATTEMPTS وتسجل من ضغطها. **الرابعة:** مؤقت التأكيد يبقى فعالًا ما دام الأمر قائمًا، فأي هبوط لاحق في ضغط التصريف أكثر من 10 s يُعد محاولة فاشلة أيضًا؛ وهذا مقبول إن أُريد منه مراقبة

التشغيل، وإلا قُيِّد مدخله بمدة المحاولة. وتُختبر هذه الشيفرة بالحالات T-07 إلى T-09 في القسم 40.4 قبل تحميلها على المتحكم.

19.12 حالة ميدانية: مضخة بدأت وحدها بعد عودة التغذية

مثال تعليمي مركّب.

- **العَرَض:** في محطة ضخ مياه تبريد، انقطعت تغذية لوحة PLC لبضع دقائق أثناء أعمال على لوحة التوزيع، وكانت إحدى المضخات تعمل قبلها. عند عودة التغذية بدأت المضخة وحدها بينما كان فني يعمل على صمام تصريفها المعزول يدويًا، فارتفع الضغط على الصمام نصف المفكوك وتسرب الماء بقوة. لم يُصب أحد.
- **الفرضيات:** (1) أمر بدء وصل من DCS لحظة عودة الاتصال؛ (2) مفتاح الاختيار على «يدوي محلي» وزر بدء عالق؛ (3) البرنامج أعاد الأمر من ذاكرته؛ (4) مرحّل بيني ملتحم.
- **الفحوص:** سجل أحداث DCS لم يسجل أي أمر في تلك الدقائق، والرابط كان مقطوعًا أصلًا حتى بعد البدء بعشرين ثانية (يستبعد 1). المفتاح على «بعيد» والزر سليم (يستبعد 2). المرحّل البيني يفتح ويغلق مع المخرج في اختبار على المنضدة (يستبعد 4). مراجعة البرنامج: أمر التشغيل مبني بتعليمتي ضبط وإعادة ضبط مستبقيتين (OTL وOTU)، ولا شيء في الدورة الأولى يصفّره.
- **الدليل الحاسم:** اختبار على نسخة المحاكاة: تشغيل المضخة ثم قطع تغذية المعالج وإعادتها؛ بت الأمر يبقى 1 والمخرج يرتفع في أول دورة.
- **السبب الجذري:** نمط برمجي مستبقى للأمر، وغياب متطلب «لا بدء آلي بعد عودة التغذية» في وصف التحكم ومعيار البرمجة، وغياب عزل كهربائي للمضخة (القفل والبطاقة، الفصل 13) أثناء عمل على معدة متصلة بها.

- **الإجراء والدرس:** أُعيدت كتابة أوامر كل المحركات بكتلة موحدة بإمساك غير مستبقى، مع تصفير صريح في الدورة الأولى وإنذار «عودة التغذية» يطلب إقرار المشغل؛ وأُضيف بند إلى معيار البرمجة وإلى اختبار FAT: «قطع التغذية وإعادتها وكل المعدات تعمل: لا يبدأ شيء دون أمر جديد». والدرس الأوسع أن العزل الكهربائي هو ما يحمي من يعمل على المعدة، لا منطق البرنامج.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
المداخل المنفصلة	نوع التلامس الطبيعي (NC للإيقاف والفصل) ومعنى القيمة 1 في قائمة الإشارات	يتحقق بالمقياس على الطرف من أن بت المدخل = 1 في الوضع الطبيعي، ويفك السلك ليرى أن المعدة تقف
زمن الاستجابة والنبضات	ميزانية الاستجابة، وعرض النبضات بين DCS وPLC، ومتى تلزم بطاقة عداد سريع	يقرأ أطول دورة من تشخيص المعالج ويسجلها بعد كل تعديل
المداخل التناظرية	التحجيم، وحدود NE43، والترشيح، والجذر وقطع التدفق المنخفض	يحقن 4 و12 و20 mA ثم 3.5 و21.5 mA بالمعاير، ويقارن القراءة وحالة العطل
أوامر المحركات والتسلسلات	الإمساك غير المستبقى وأولوية الإيقاف، ومهل SFC وحالة الفشل	ينفذ اختبار قطع التغذية وإعادتها، ويسجل أن شيئًا لم يبدأ وحده
التعديل والفرض	قبول التعديل الحي عبر إدارة التغيير، وتصريح كل فرض	يسجل الفروض القائمة ويزيلها قبل التسليم، ويشخص المخرج المعطل بخطوات القسم 19.10

19.13 الأخطاء الشائعة

- كتابة زر الإيقاف الموصول مغلقًا بتعليمة XIO لأن اسمه «إيقاف»، فيعمل المنطق بالعكس ويصير انقطاع السلك أمر تشغيل.
- كتابة المخرج نفسه في أكثر من سطر أو مهمة، ثم البحث طويلًا عن سبب عدم تحركه.
- بناء أوامر التشغيل بممسكات مستبقاة فتبدأ المعدات وحدها بعد عودة التغذية.
- تصميم أوامر نبضية أقصر من دورة المسح أو من دورة الاتصال بين DCS وPLC.
- قراءة نبضات عداد سريع بمداخل عادية فيضيع أغلبها ويبدو العداد «يقرأ أقل».
- وضع حلقات PID في المهمة المستمرة فيتغير أداؤها مع حجم البرنامج.
- ترك القيمة التناظرية المعطلة تدخل المنطق على أنها صفر أو مئة بالمئة، بلا كشف لحدود NE43.
- استخراج الجذر في المرسل وفي PLC معًا، أو دون قطع للتدفق المنخفض.
- تسلسل SFC بلا مهل ولا حالة فشل، فيتجمد في خطوة تنتظر حدثًا لن يأتي.
- ترك فروض من فحص الحلقات في برنامج منشأة عاملة.
- تنفيذ وظيفة سلامة مصنفة في PLC التشغيلي لأن «الإشارات موجودة فيه أصلًا».
- التعديل الحي في منتصف تسلسل عامل دون تقدير أثره في المؤقتات والممسكات، ودون إدارة تغيير.

19.14 ملخص

PLC حاسوب يقرأ ثم ينفذ ثم يكتب في دورة متكررة، ومن هذه الدورة يُفهم زمن الاستجابة وضياع النبضات القصيرة وأثر ترتيب الأسطر. واللغات الخمس المعروفة في IEC 61131-3 أدوات لأغراض مختلفة: LD للأقفال، وFBD للحلقات، وST للحساب، وSFC

للتسلسلات، وIL للقراءة عند الترحيل فقط. والتعليمة في البرنامج تسأل عن بت المدخل لا عن نوع التلامس الميداني، فزر الإيقاف الموصول مغلقًا يُقرأ بتعليمة «مغلق». وأوامر المحركات تُبنى بإمساك غير مستبقى أولويته للإيقاف، وتُفصل السماحيات عن التعشيقات عن الفصل الآلي، ولا تُنفذ وظيفة سلامة مصنفة في PLC التشغيلي. وكل مدخل تناظري يمر بكشف العطل والترشيح والجذر إن لزم قبل أن يدخل المنطق، والحلقات توضع في مهام دورية. والبرنامج الجيد يُكتب بمكتبة كتل مختبرة، ويُكتب كل مخرج فيه في موضع واحد، ويُختبر بقطع التغذية وإعادتها وبانقطاع الأسلاك، لا بالتشغيل الطبيعي وحده.

وفي الفصل التالي: الفصل 20 «الكتل الوظيفية في برمجيات أنظمة التحكم: قراءة مخطط الكتل وبناء المنطق»، لأن مخطط الكتل الذي عرضناه هنا لغةً من خمس هو اللغة الغالبة في DCS وأنظمة السلامة ومتحكمات التوربينات، فنعرض كتله واحدة واحدة بسلوكها في الحالات الحدية.

19.15 أسئلة التقييم الذاتي

1. مرشح مدخل 5 ms، ودورة مسح أعلاها 40 ms، وتأخير مخرج ترانزستوري 1 ms. ما زمن الاستجابة الأسوأ؟ وما أقصر نبضة يُضمن أن يراها البرنامج بهامش آمن؟
2. زر إيقاف طارئ محلي موصول بتلامس مغلق طبيعيًا. بأي تعليمة يُكتب في البرنامج؟ وماذا يحدث في كل حالة لو كُتب بالتعليمة الأخرى وانقطع سلكه؟
3. ارسم المخطط الزمني لمخرج TON وTOF بضبط 4 s لمدخل يبقى صحيحًا 3 s ثم خاطئًا 2 s ثم صحيحًا 6 s.
4. متى تُستعمل كتلة SR ومتى RS؟ أعط مثالًا لكل منهما من منطق مضخة.

5. بطاقة إدخال 0 = 4 mA و27648 = 20 mA، ومرسل حرارة مداه 50− إلى 150 °C يقرأ 17280. ما الحرارة والتيار؟ وما القيمتان الخاميتان لحدي العطل 3.6 mA و21 mA؟

6. لماذا توضع حلقة PID في مهمة دورية؟ وماذا يحدث لأثر زمن التكامل الفعلي إذا تضاعفت دورة التنفيذ بلا تعديل للمعاملات في خوارزمية تفترض فترة ثابتة؟

7. عدد ثلاث من قواعد صحة SFC، وبيّن ما يحدث عند إغلاق تفرع اختياري بخط التقاء متوازٍ.

8. عنصر ضغط تفاضلي مداه 0–100 mbar يقابل 0–5000 kg/h. ما التدفق عند 16 mbar وعند 1 mbar؟ ولماذا يلزم قطع التدفق المنخفض؟

9. أمر تشغيل من DCS إلى PLC حزمة عبر Modbus: قارن الأمر النبضي والأمر المستمر، وبيّن القرار الذي يجب أن يُكتب لكل منهما عند فقد الاتصال.

10. مضخة لا تبدأ، وسطرها في المراقبة الحية يبدو مكتملًا والملف مفعّلًا، والمرحّل البيني لا يتحرك. رتّب خطوات التشخيص.

مراجع الفصل: R12 (Manesis & Nikolakopoulos، فصول PLC ومخطط السلّم والتصميم التتابعي)؛ R13 (Shardt، برمجة PLC والتمثيل التتابعي)؛ R8 (Nevase، عتاد PLC ومنطق السلّم)؛ R23 (El Ahrache، لغات IEC 61131-3 والتحويل بينها)؛ R5 (عرض أنظمة التحكم الصناعية: مكونات PLC ودوره)؛ R1؛ وخبرة المؤلف في حزم التوربينات والضواغط وأنظمة (R18) Allen-Bradley. المواصفات: IEC 61131-3 (لغات البرمجة، الطبعة الثالثة 2013 والرابعة 2025)، وIEC 61131-2 (متطلبات العتاد والمداخل والمخارج)، وNAMUR NE43 (مستويات إشارة العطل)، وIEC 61511-1 (فصل وظائف السلامة عن نظام التحكم الأساسي)؛ وR76 وR77 (الكتل الوظيفية الشائعة، 20.18).

الفصل 20: الكتل الوظيفية في برمجيات أنظمة التحكم: قراءة مخطط الكتل وبناء المنطق

> **لمن هذا الفصل:** لمهندس الموقع الذي يفتح برنامج DCS أو PLC أو متحكم توربين ليعرف لماذا لم تبدأ مضخة أو لماذا فصلت وحدة. ولمهندس التصميم الذي يكتب وصف التحكم ويريد أن يعرف كيف سيُنفذ بالكتل. وللمبرمج الذي يعرف الأداة ولا يعرف لماذا تقتضي العملية كتلة دون أخرى.
>
> **الفكرة الأساسية:** برامج أنظمة التحكم، مهما اختلف المصنّع، تُبنى من عدد محدود من الكتل الوظيفية (Function Blocks): بوابات منطقية، ومقارنات، ومؤقتات، وممسكات، وكتل اختيار، وكتل حساب ومعالجة إشارة، وكتل تحكم. وتُوصل هذه الكتل بأسلاك في مخطط الكتل الوظيفية (Function Block Diagram – FBD)، فتتحول إشارات الأجهزة إلى حسابات وشروط سماح وأوامر تحكم وحماية. ومن يفهم نحو ثلاثين كتلة يقرأ منطق أي منصة. والفرق بين الأسماء عند المصنّعين أقل بكثير من الفرق في **السلوك عند الحالات الحدية**: ماذا يحدث حين تأتي إشارتان معًا، أو تنقطع إشارة، أو تصبح القيمة غير صالحة. وهذا ما يركز عليه الفصل.

وقد عرض الفصل 19 لغات IEC 61131-3 (القسم 19.2) وتعليمات مخطط السلّم (القسم 19.3)، وبقي أن نقرأ المنطق كما يُكتب في أغلب أنظمة DCS والسلامة: كتلًا موصولة بأسلاك. ويعرض هذا الفصل كل كتلة بالطريقة نفسها: **الرمز، والمداخل والمخارج، وطريقة العمل، والإعدادات، ومثال رقمي أو زمني، والاستعمال في دائرة كاملة،**

والخطأ الشائع. وبعض ما في الفصل كتل جاهزة في كل المكتبات، وبعضه وظائف تُبنى من عدة كتل، ويُنبه إلى ذلك في موضعه.

20.1 كيف تقرأ مخطط الكتل الوظيفية

الشكل 20-1: *تشريح كتلة وظيفية: المداخل إلى اليسار والمخارج إلى اليمين، والمعاملات الثابتة، واسم النسخة (Instance) الذي تُحفظ فيه حالتها الداخلية، ورقم ترتيب التنفيذ داخل المهمة.*

ست قواعد للقراءة:

1. **المداخل إلى اليسار والمخارج إلى اليمين.** والتدفق من اليسار إلى اليمين. والأسلاك تحمل متغيرات، لا تيارات.
2. **لكل طرف نوع بيانات:** منطقي (BOOL)، وصحيح (INT وDINT)، وحقيقي (REAL)، وزمن (TIME). ولا يوصل طرف إلا بمتغير من نوعه، إلا عبر كتلة تحويل. والخط العريض في بعض المنصات يدل على قيمة تناظرية، والرفيع على منطقية.
3. **الكتلة إما دالة وإما كتلة ذات ذاكرة.** الدالة (Function) مثل AND أو ADD تعطي مخرجًا يعتمد على المداخل الحالية فقط. أما الكتلة الوظيفية (Function

(Block مثل المؤقت والممسك والعداد وPID فلها ذاكرة، ولكل استعمال لها **نسخة** باسم مستقل تحفظ حالتها بين الدورات.

4. **ترتيب التنفيذ مهم.** تُنفذ الكتل بترتيب محدد داخل المهمة، يُعرض برقم على كل كتلة في كثير من الأدوات. والكتلة التي تقرأ مخرج كتلة لم تُنفذ بعد في هذه الدورة تقرأ قيمتها من الدورة السابقة (19.1 و34.9.2).
5. **المعاملات جزء من المنطق.** زمن المؤقت، وحد المقارن، والتخلف، ومعاملات PID قيم تغيّر السلوك. وبعضها ثابت لا يتغير إلا بتنزيل جديد، وبعضها قابل للضبط أثناء التشغيل. فاقرأ القيمة الفعلية في المتحكم، لا القيمة في الوثيقة.
6. **حالة جودة الإشارة ترافق القيمة** في أغلب أنظمة DCS: قيمة «جيدة» (Good) أو «سيئة» (Bad) أو «مشكوك فيها» (Uncertain) (3.5 و19.6). وكثير من الكتل يمرر الجودة إلى مخرجه، وبعضها يتصرف بحسبها.

جدول: الأسماء الشائعة للكتل نفسها في المنصات المختلفة

الوظيفة	المواصفة (IEC 61131-3)	سيمنس (Siemens TIA Portal)
المقارنة	GT وGE وLT وLE وEQ وNE	CMP < و>= و< و<= و== و<>
المقارنة بتخلف	تُبنى	تُبنى
فحص المجال	تُبنى	IN_RANGE وOUT_RANGE
تأخير التشغيل	TON	TON
تأخير الإطفاء	TOF	TOF
النبضة	TP	TP
المؤقت المتراكم	لا يوجد في المكتبة القياسية	TONR
الممسك	SR (أولوية الضبط) وRS (أولوية الإعادة)	RS (أولوية الضبط) وSR (أولوية الإعادة)، عكس IEC

الوظيفة	المواصفة (IEC 61131-3)	سيمنس (Siemens TIA Portal)
كشف الحافة	R_TRIG وF_TRIG	R_TRIG وF_TRIG
العداد	CTU وCTD وCTUD	CTU وCTD وCTUD
الأعلى والأدنى	MAX وMIN	MAX وMIN
الوسيط	لا يوجد في المكتبة القياسية	يُبنى
المبدّل	SEL وMUX	SEL وMUX
الحاصر	LIMIT	LIMIT
محدد المعدل	لا يوجد في المكتبة القياسية	يُبنى أو من مكتبة
مولد الدالة	لا يوجد في المكتبة القياسية	من مكتبة
PID	لا يوجد في المكتبة القياسية	PID_Compact وغيرها

جدول: الأسماء الشائعة للكتل نفسها في المنصات المختلفة (تابع)

الوظيفة	روكويل (Rockwell Logix)	جنرال إلكتريك (GE Mark VIe)
المقارنة	GRT وGEQ وLES وLEQ وEQU و NEQ	COMPARE
المقارنة بتخلف	تُبنى	COMPHYS
فحص المجال	LIM	تُبنى
تأخير التشغيل	TON (سلّم) وTONR (FBD)	TIMER أو BFILT
تأخير الإطفاء	TOF (سلّم) وTOFR (FBD)	TIMER أو BFILT
النبضة	تُبنى	PULSE
المؤقت المتراكم	RTO (سلّم) وRTOR (FBD)	TIMER بخيار

الوظيفة	روكويل (Rockwell Logix)	جنرال إلكتريك (GE Mark VIe)
الممسك	SETD وRESD	LATCH
كشف الحافة	OSRI وOSFI	كتلة حافة
العداد	CTU وCTD (سلّم) وCTUD (FBD)	COUNTER
الأعلى والأدنى	ESEL بخيار	MIN_MAX
الوسيط	ESEL بخيار الوسيط	MEDIAN
المبدّل	SEL وMUX	SELECT
الحاصر	HLL	CLAMP
محدد المعدل	RLIM	RAMP
مولد الدالة	FGEN	FUNGEN أو INTERP
PID	PIDE	PID

وتختلف الأسماء بين الإصدارات والمكتبات، فالمرجع النهائي دليل المنصة المستعملة (R77). ويلاحظ أن المكتبة القياسية في IEC 61131-3 نفسها لا تحتوي كتل التحكم ومعالجة الإشارة (PID، والوسيط، ومحدد المعدل)، فهذه من مكتبات المصنّعين.

> **تنبيه:** في سيمنس (TIA Portal) الكتلة SR بأولوية الإعادة والكتلة RS بأولوية الضبط، عكس تسمية IEC 61131-3. والقاعدة الثابتة في الحالتين أن المدخل الذي يحمل الرقم 1 (S1 أو R1) هو الغالب، فاقرأ المدخل لا اسم الكتلة.

20.2 الكتل المنطقية

الشكل 20-2: *البوابات المنطقية الست برموز IEC 60617 وجداول حقيقتها. والدائرة الصغيرة على المخرج تعني النفي، فتصبح AND إلى NAND وOR إلى NOR وXOR إلى XNOR.*

AND: كل الشروط معًا

- **المداخل والمخارج:** مدخلان أو أكثر منطقية، ومخرج منطقي واحد.
- **طريقة العمل:** المخرج 1 فقط إذا كانت كل المداخل 1.

- **مثال:** سماح تشغيل المضخة P-101 يتطلب أربعة شروط: مستوى السحب سليم، وصمام السحب مفتوح، ولا إيقاف طارئ، والمضخة متاحة في مركز المحركات. إن سقط أي شرط سقط السماح.
- **في الدائرة:** كتلة AND للسماح، ثم AND ثانية مع أمر البدء (الشكل 20-10).
- **الخطأ الشائع:** مدخل غير موصول. بعض المنصات تعدّه 1 وبعضها 0، فيسقط شرط من المنطق بصمت. ويُكشف ذلك في مراجعة البرنامج لا في الاختبار العادي.

OR: أي سبب واحد يكفي

- **طريقة العمل:** المخرج 1 إذا كان أي مدخل 1.

> - **مثال:** أسباب إيقاف المضخة: أمر إيقاف من المشغل، أو تعشيق (إيقاف طارئ أو المضخة غير متاحة في مركز المحركات)، أو فصل حماية. أي منها يوقفها.
> - **الخطأ الشائع:** جمع أسباب الفصل في OR دون تسجيل أيها وقع أولًا. وحل ذلك كتلة «أول سبب» (First-Out) التي تمسك السبب الأول وتتجاهل ما يليه، وهي أداة التحليل الأولى بعد كل فصل (19.4)، ويُكمّلها سجل تسلسل الأحداث (SOE) بدقة الملّي ثانية (39.14).

NOT: عكس الحالة

- **طريقة العمل:** المخرج عكس المدخل.

> - **مثال:** تحويل إشارة «يوجد عطل» إلى شرط «لا يوجد عطل» لإدخاله في AND السماح.
> - **الخطأ الشائع:** سلسلة من النفي المزدوج (إشارة نشطة بالصفر، ثم NOT، ثم مقارنة بالصفر) تجعل المنطق صحيحًا على الورق وتخفي أثر انقطاع السلك. فاكتب المنطق بحيث يبقى واضحًا ما يحدث حين يصبح المدخل الميداني صفرًا بسبب عطل (20.13).

XOR وXNOR: الاختلاف والتطابق

- **طريقة العمل:** في مدخلين، مخرج XOR يساوي 1 إذا اختلفت الحالتان، ومخرج XNOR يساوي 1 إذا تطابقتا.

- **مثال:** صمام بمفتاحي نهاية «مفتوح» و«مغلق». في الوضع السليم يكون أحدهما فقط نشطًا، فمخرج XOR يساوي 1. فإن كانا نشطين معًا (عطل مفتاح) أو خاملين معًا أكثر من زمن الشوط (صمام عالق في المنتصف)، فمخرج XNOR يساوي 1. وتوصيل XNOR بمؤقت تشغيل يساوي زمن الشوط مع هامش يعطي إنذار «تعارض موضع الصمام».
- **الخطأ الشائع:** استعمال XOR حيث المطلوب «أحدهما على الأقل». وفي أكثر من مدخلين يختلف تعريف XOR بين المنصات (زوجية العدد أم «واحد فقط»)، فيُراجع الدليل.

NAND وNOR: نفي AND ونفي OR. نادرًا ما تُستعمل كتلًا مستقلة في برامج العمليات، لكنها تظهر في دوائر المرحّلات والمنطق الإلكتروني (الفصل 17)، وتُفهم بقانوني دي مورغان: نفي (A وB) يساوي (نفي A) أو (نفي B).

20.3 كتل المقارنة

المقارن (COMPARE: GT وGE وLT وLE وEQ وNE)

- **المداخل والمخارج:** مدخلان تناظريان (أو قيمة وحد ثابت)، ومخرج منطقي.
- **طريقة العمل:** GT أكبر من، وGE أكبر من أو يساوي، وLT أصغر من، وLE أصغر من أو يساوي، وEQ يساوي، وNE لا يساوي.

- **مثال:** الضغط 8.3 bar والحد 8.0 bar، فمخرج GT يساوي 1.
- **الخطأ الشائع:** مقارنة المساواة بين عددين حقيقيين. فالحاسوب يمثل الأعداد الحقيقية تقريبيًا، ونتيجة 0.2 + 0.1 في الحساب الحقيقي ليست 0.3 تمامًا. لذلك لا تُستعمل EQ مع القيم الحقيقية، بل يُقارن الفرق المطلق بسماحية صغيرة: ABS(A − B) < ε.

المقارن بتخلف (COMPHYS) والمنطقة الميتة

- **طريقة العمل:** حد للتفعيل وحد آخر للإلغاء. في إنذار عالٍ يتفعّل المخرج عند تجاوز الحد، ولا يلغى إلا بعد انخفاض القيمة إلى الحد ناقص التخلف.
- **الإعدادات:** الحد، والتخلف (Hysteresis أو Deadband)، والاتجاه (عالٍ أو منخفض). ويُسمّى هذا الفرق في المفاتيح الميكانيكية (11.4) وفي إدارة الإنذارات (ISA-18.2) «المنطقة الميتة» أو «الفرق التشغيلي» (Deadband)، والمقصود واحد.

- **مثال:** إنذار ضغط عالٍ عند 8.0 bar بتخلف 0.3 bar: يتفعّل عند 8.0 ولا يلغى حتى يعود الضغط إلى 7.7 bar (الشكل 20-3 أ).
- **في الدائرة:** كل إنذار وكل بدء أو إيقاف آلي لمضخة بحسب المستوى.
- **الخطأ الشائع:** تخلف صفري، فيرتجف المخرج عشرات المرات قرب الحد، وتنهمر الإنذارات، أو تبدأ المضخة وتقف مرة بعد مرة.

الشكل 20-3: *(أ) مقارن عادي يرتجف قرب الحد، ومقارن بتخلف 0.3 bar يعطي انتقالًا واحدًا في كل اتجاه. (ب) فحص المجال: فولتية تغذية 24 V ± 5%، والمخرج 1 ما دامت القيمة بين 22.8 و 25.2 V.*

فحص المجال (WINDOW أو IN_RANGE)

- **طريقة العمل:** المخرج 1 إذا كانت القيمة بين حدين (داخل المجال)، أو خارجه بحسب الكتلة.

- **مثال:** مراقبة تغذية 24 V بسماحية ±5%: الحدان 22.8 و25.2 V (الشكل 20-3 ب).
- **في الدائرة:** مراقبة التغذية، والتحقق من أن قراءة ما ضمن مداها المعقول قبل استعمالها.

- **ملاحظة:** إن لم تتوفر كتلة جاهزة، تُبنى من مقارنين وبوابة AND.

20.4 كتل الزمن

الشكل 20-4: *المخططات الزمنية على المدخل نفسه: تأخير التشغيل TON يتجاهل النبضة القصيرة، وتأخير الإطفاء TOF يمد كل نبضة، والنبضة TP تعطي طولًا ثابتًا، والمؤقت المتراكم يجمع زمن النبضات حتى 9 s، وكشف الحافة ينبض عند كل صعود، والعداد يزيد عند كل حافة.*

تأخير التشغيل (TON)

- **المداخل والمخارج:** المدخل IN، والزمن المضبوط PT. والمخرج Q، والزمن المنقضي ET.
- **طريقة العمل:** يرتفع Q بعد بقاء IN في الحالة 1 مدة PT دون انقطاع، ويسقط فور سقوط IN، ويُصفّر العد عند كل انقطاع.

- **مثال:** إنذار «ضغط منخفض» إذا استمر الانخفاض 5 s. نبضة انخفاض لمدة 3 s لا تعطي إنذارًا.
- **في الدائرة:** تأكيد الحالة قبل الإنذار أو الفصل، وتجاهل الارتجاف.
- **الخطأ الشائع:** تأخير أطول من زمن سلامة العملية (Process Safety Time) في مسار حماية.

تأخير الإطفاء (TOF)

- **طريقة العمل:** يرتفع Q فور ارتفاع IN، ويبقى مرتفعًا مدة PT بعد سقوط IN.

- **مثال:** مروحة تبريد تبقى تعمل 120 s بعد إيقاف المحرك.
- **الخطأ الشائع:** وضعه في مسار فصل، فيبقى أمر الفصل بعد زوال السبب، أو يُستعمل ليُخفي انقطاعًا قصيرًا في إشارة حماية فيؤخر كشفه.

النبضة (TP)

- **طريقة العمل:** عند الحافة الصاعدة لـ IN يعطي Q نبضة طولها PT مهما كان طول IN.

- **مثال:** أمر إغلاق قاطع بنبضة 2 s.
- **الخطأ الشائع:** افتراض أن النبضة تُعاد إن جاءت حافة جديدة أثناءها. ففي IEC 61131-3 لا تُعاد النبضة بحافة جديدة أثناءها (غير قابلة لإعادة القدح)، وقد تختلف كتل المصنّعين.

المؤقت المتراكم (RTO أو TONR)

- **طريقة العمل:** يجمع زمن بقاء IN في الحالة 1 عبر فترات متقطعة، ولا يُصفّر إلا بإعادة ضبط صريحة.

> - **مثال:** ساعات تشغيل المضخة للصيانة الوقائية، أو زمن تراكمي فوق حد حرارة.
> - **الخطأ الشائع:** نسيان إعادة الضبط بعد الصيانة، أو فقد القيمة عند انقطاع التغذية إن لم تكن محفوظة (Retentive).

المرشح المنطقي (BFILT): تأخير تشغيل وتأخير إطفاء في كتلة واحدة، لتنقية مفتاح مستوى أو تدفق يرتجف. وتفاصيل دقة المؤقتات وعلاقتها بدورة المسح في 19.3.

20.5 الذاكرة واكتشاف التغير

الشكل 20-5: *الممسك بأولوية الضبط (SR) والممسك بأولوية الإعادة (RS). الفرق بينهما يظهر فقط حين تأتي إشارتا الضبط والإعادة معًا.*

الممسك (SR وRS أو LATCH)

- **المداخل والمخارج:** مدخل ضبط، ومدخل إعادة، ومخرج.
- **طريقة العمل:** نبضة على الضبط ترفع المخرج ويبقى مرتفعًا بعد زوالها. ونبضة على الإعادة تسقطه. وإذا جاءت الإشارتان معًا، فالممسك بأولوية الضبط (SR) يبقى 1، والممسك بأولوية الإعادة (RS) يصبح 0.

- **مثال:** إمساك الفصل: ضغط منخفض جدًا يضبط الممسك فتفصل الوحدة، ويبقى الفصل حتى يُعاد يدويًا.
- **في الدائرة:** الفصل والإنذارات الممسوكة وأوامر التشغيل بالإمساك (الشكل 10-20).

- **قاعدة الاختيار:** ممسك الفصل بأولوية الضبط، حتى لا يُعاد ضبط فصل ما زال سببه قائمًا. وتُضاف إلى الإعادة شروط: زوال السبب، وأمر يدوي، وربما صلاحية. وممسك تشغيل المحرك بأولوية الإيقاف (الإعادة)، حتى يغلب أمر الإيقاف أمر البدء (19.4).

كشف الحافة (R_TRIG وF_TRIG)

- **طريقة العمل:** نبضة لدورة تنفيذ واحدة عند انتقال المدخل من 0 إلى 1 (الصاعدة)، أو من 1 إلى 0 (الهابطة).

- **مثال:** زيادة عداد مرات البدء عند كل تشغيل، أو تنفيذ حساب مرة واحدة عند تغير الوضع.
- **الخطأ الشائع:** نبضة الدورة الواحدة لا تراها كتلة في مهمة أبطأ. فكشف الحافة وما يستعملها يوضعان في المهمة نفسها (34.9.2).

20.6 العدادات

العداد (CTU وCTD وCTUD)

- **المداخل والمخارج:** مدخل عد، ومدخل إعادة (أو تحميل)، وقيمة مضبوطة PV. والمخرج Q، والعدد الحالي CV.
- **طريقة العمل:** CTU يزيد العدد عند كل حافة صاعدة، ويرفع Q حين يبلغ PV. و CTD ينقص، وCTUD بالاتجاهين.

- **مثال:** محرك كبير يسمح مصنّعه بعدد محدود من مرات البدء المتتالية لحماية الملفات من الحرارة (يؤخذ من ورقة بيانات المحرك، مثلًا مرتان من البارد ومرة من الساخن). يعد العداد مرات البدء، ويمنع السماح إذا بلغ الحد، ويُصفّر بمؤقت تبريد.
- **الخطأ الشائع:** توصيل إشارة مستمرة لا نبضية، فلا يَعُدّ إلا مرة واحدة. وتجاوز العدد أقصى قيمة لنوع البيانات في عدادات الأحداث الطويلة.

20.7 كتل اختيار الإشارة

الشكل 20-6: *(أ) ثلاث مزدوجات لحرارة العادم وثلاث كتل اختيار: حين تنقطع المزدوجة C وتقرأ أعلى المدى، يتبعها اختيار الأعلى، ويبقى الوسيط على قراءة سليمة (الأعلى بين القراءتين السليمتين). (ب) التصويت على حالات منطقية: 1 من 3، و2 من 3، و3 من 3.*

اختيار الأعلى (HIGH SELECT أو MAX)

- **طريقة العمل:** يمرر أكبر المداخل التناظرية.

- **مثال:** مزدوجات بقراءات 512 و515 و830 °C، والمخرج 830 °C.
- **في الدائرة:** اختيار أعلى حرارة محامل للمراقبة، والتحكم الانتقائي حين يجب أن يسيطر الطلب الأكبر.
- **الخطأ الشائع:** حساس معطوب يقرأ أعلى المدى (مزدوجة احترقت واتجاه كشف الاحتراق إلى الأعلى) يسيطر على المخرج، وقد يسبب فصلًا كاذبًا (20.16).

اختيار الأدنى (LOW SELECT أو MIN)

- **طريقة العمل:** يمرر أصغر المداخل.

- **مثال:** في المثال السابق المخرج 512 °C. وفي التوربين الغازي يختار أصغر طلب وقود بين حلقات السرعة والحرارة والتسارع، فتسيطر الحلقة الأكثر تقييدًا (34.3).
- **الخطأ الشائع:** حساس معطوب يقرأ صفرًا يسيطر على المخرج.

الوسيط (MEDIAN أو MID SELECT)

- **طريقة العمل:** يرتب ثلاث قيم ويمرر الوسطى.

- **مثال:** 512 و515 و830، والوسيط 515 °C. فالقيمة الشاذة في أي اتجاه تُستبعد.
- **الإعدادات:** كثير من الكتل تعطي أيضًا مخرج تباعد (DEV) إذا ابتعدت قراءة عن الوسيط أكثر من فرق محدد، وتتصرف بحسب جودة المداخل: إن فسدت قراءة، تعمل على الاثنتين المتبقيتين (بمتوسطهما أو بالأعلى أو بالأدنى بحسب الإعداد).
- **في الدائرة:** المرسلات الثلاثية للتحكم (الشكل 20-11) ولحلقات حرجة مثل مستوى الدرم.

- **الخطأ الشائع:** وسيط لقراءتين فقط، وهو في الحقيقة متوسطهما.

المبدّل والمجمّع المتعدد (SEL وMUX)

- **طريقة العمل:** SEL يمرر أحد مدخلين بحسب إشارة منطقية. وMUX يمرر مدخلًا برقمه.

- **مثال:** اختيار نقطة ضبط محلية أو بعيدة، أو مرسل رئيسي أو احتياطي.
- **الخطأ الشائع:** قفزة في المخرج عند التبديل إن اختلفت القيمتان. فيُتبع المبدّل بمحدد معدل حين تكون القفزة ضارة.

فرقان يستحقان الحفظ:

- **اختيار الأعلى ليس OR.** اختيار الأعلى يعمل على **قيم عددية** ويمرر أكبرها، أما OR فيعمل على **حالات منطقية** ويعطي 1 إن كانت أي حالة 1.
- **الوسيط ليس تصويت 2 من 3.** الوسيط يختار **القراءة** الوسطى من ثلاث قيم تناظرية، أما التصويت 2 من 3 فيتحقق من **اتفاق حالتين منطقيتين** على الأقل من ثلاث. والحماية الحديثة تجمع الاثنين أحيانًا: وسيط للقيمة المعروضة، وتصويت على مقارنات منفصلة لكل قناة للفصل.

20.8 كتل التصويت

التصويت (Voting) يعمل على **حالات منطقية** تأتي من قنوات مستقلة، كل قناة منها مقارنة لحساس مستقل مع حد الفصل. ويُكتب بالصيغة «M من (MooN) «N: يفصل النظام إذا طلبت الفصلَ M قناةً على الأقل من أصل N. وبعض المكتبات تقدمه كتلة جاهزة (2oo3 أو VOTE)، وبعضها يُبنى من بوابات: فتصويت 2 من 3 هو (A AND B) OR (B AND C) OR (A AND C).

- **المداخل والمخارج:** N مدخلًا منطقيًا، ومداخل جودة أو تجاوز (Bypass) لكل قناة في الكتل الجاهزة. والمخرج طلب الفصل، ومخرج إنذار عدم اتفاق (Discrepancy) في كثير منها (ويقابله في القيم التناظرية إنذار التباعد، 40.1).
- **الإعدادات:** قيمة M، وسلوك الكتلة عند فساد قناة أو تجاوزها (التحول إلى معمارية أخرى)، وزمن تأخير إنذار عدم الاتفاق.

> - **مثال:** ثلاثة مفاتيح ضغط منخفض جدًا PSLL على سحب ضاغط. قراءة واحدة تطلب الفصل: لا فصل في 2 من 3، مع إنذار عدم اتفاق. قراءتان: فصل.

جدول: معماريات التصويت الشائعة

المعمارية	متى يحدث الفصل	الأثر على الفصل الكاذب	الأثر على الفشل عند الطلب	الاستعمال النموذجي
1 من 1 (1oo1)	حين تطلبه القناة الوحيدة	أي عطل آمن في القناة يفصل	عطل خطر واحد يمنع الفصل	الحمايات البسيطة والإنذارات
1 من 2 (1oo2)	حين تطلبه أي قناة	أعلى من 1oo1 تقريبًا بمرتين	لا يمنع الفصل إلا عطلان خطران	الوظائف التي تُقدَّم فيها السلامة على الاستمرارية
2 من 2 (2oo2)	حين تطلبه القناتان معًا	أقل من 1oo1	عطل خطر واحد يمنع الفصل	حيث الفصل الكاذب مكلف والخطر محدود
2 من 3 (2oo3)	حين تطلبه قناتان على الأقل	منخفض: عطل آمن واحد لا يفصل	لا يمنع الفصل إلا عطلان خطران	الوظائف الحرجة التي تطلب السلامة والاستمرارية معًا

كيف أختار؟ حدد أولًا أيهما أثقل كلفة في هذه الوظيفة بعينها: الفصل الكاذب أم الفشل عند الطلب. فإن كان الخطر عاليًا والإيقاف رخيصًا فـ 1oo2؛ وإن كان الإيقاف مكلفًا والخطر محدودًا فـ 2oo2؛ وإن طُلب الاثنان معًا، كما في ضاغط أو توربين رئيسي، فـ 2oo3 مع إنذار عدم الاتفاق. ولا يبين الجدول ما يحدث حين تفسد قناة أو تُوضع في

التجاوز، وهو ما يقرره جدول التشغيل المنقوص ومستند SRS لا الإعداد الافتراضي للكتلة. والخطأ الأكثر كلفة اختيار 2oo3 ثم تركه يتحول بصمت إلى 2oo2 كلما فسدت قناة أو تُركت في التجاوز، فتعمل الوظيفة شهورًا بمعمارية أضعف مما صُممت له ولا يعرف أحد.

التشغيل المنقوص (Degraded Mode): حين تفسد قناة أو توضع في التجاوز للصيانة، تتحول معمارية 2oo3 إلى معمارية أخرى، ويحدد ذلك مستند مواصفة متطلبات السلامة (SRS) لا المبرمج (29.5). والخيارات الشائعة:

ماذا يُفعل بالقناة الفاسدة	المعمارية الناتجة	النتيجة
تُعدّ في حالة فصل، أو تُعاد تهيئة التصويت على القناتين الباقيتين إلى 1oo2 (29.8 و 40.2)	1oo2 على القناتين الباقيتين	أكثر أمانًا: أي قناة سليمة تفصل
تُستبعد ويُشترط اتفاق القناتين الباقيتين	2oo2 على القناتين الباقيتين	أكثر استمرارية وأقل أمانًا، ويُقيد بزمن ويحتاج تعويضًا
فساد قناتين	1oo1 أو فصل مباشر بحسب SRS	يجب أن يكون السلوك محددًا مكتوبًا

- **في الدائرة:** مسار الفصل في الشكل 20-11: ثلاث قنوات PSLL، ثم 2oo3، ثم ممسك، ثم فصل الضاغط.
- **الخطأ الشائع:** بناء الفصل على قيمة الوسيط دون تعريف سلوكه عند العطل. وأسلوب «الوسيط ثم المقارنة» شائع، في متحكمات التوربينات خاصة (34.9.1)، ويعرضه الشكل 20-13 على ضاغط. وحين تكون القنوات الثلاث سليمة وحد الفصل واحدًا يعطي النتيجة نفسها رياضيًا، لأن الوسيط لا يتجاوز الحد إلا إذا تجاوزته قراءتان. لكن الفرق يظهر عند العطل: فالوسيط قرار واحد في كتلة واحدة لا يعرف أي قناة طلبت الفصل، فلا يعطي إنذار عدم اتفاق، ولا يسمح بتجاوز قناة للصيانة، ويتبع حين تفسد قناة إعداد الكتلة (متوسط القناتين

الباقيتين مثلًا) لا ما تقرره (20.7) SRS. فإن استُعمل، ضُبط سلوك الكتلة عند فساد قناة بما يطابق SRS وأُضيف إنذار التباعد؛ وفي وظائف نظام السلامة تُفضَّل المقارنة لكل قناة ثم التصويت. **وخطأ ثانٍ:** ترك قناة في التجاوز بلا إنذار دائم ولا سجل، فتعمل الوظيفة شهورًا بمعمارية أضعف مما صُممت له.

20.9 كتل الحساب

هذه دوال بلا ذاكرة، جاهزة في كل المكتبات. وقيمتها في التفاصيل: نوع البيانات، والقسمة على الصفر، والجودة.

جدول: كتل الحساب

الكتلة	العمل	مثال	الحالة الحدية التي تُعالج
الجمع ADD	مجموع المداخل	تدفق خطين 42 و37 t/h يعطي 79 t/h	تجاوز المدى في الأعداد الصحيحة
الطرح SUB	الفرق	فرق حرارة مدخل ومخرج مبادل 85 − 60 = 25 °C	ترتيب المدخلين: IN1 − IN2
الضرب MUL	حاصل الضرب	تدفق حجمي 120 m³/h في كثافة 0.8 t/m³ يعطي 96 t/h	الوحدات يجب أن تتسق
القسمة DIV	خارج القسمة	نسبة الهواء إلى الوقود 150 ÷ 10 = 15	المقام صفر أو قريب من الصفر
المتوسط AVG	متوسط المداخل الصالحة	198 و202 و200 تعطي 200	استبعاد القراءة الفاسدة لا حسابها صفرًا
القيمة المطلقة ABS	القيمة بلا إشارة	انحراف −4 يعطي 4	تُستعمل قبل مقارنة الانحراف بحد

الكتلة	العمل	مثال	الحالة الحدية التي تُعالج
الجذر SQRT	الجذر التربيعي	جذر 64 يساوي 8، أي أن فرق ضغط 64% من المدى يعطي تدفقًا 80%	المدخل السالب بسبب انزياح الصفر

- **القسمة على الصفر:** في حساب النسبة، إذا توقف تدفق الوقود صار المقام صفرًا. بعض المنصات تعطي قيمة لا نهائية أو «ليس عددًا» (NaN)، وبعضها يوقف المهمة بخطأ. فيُحمى المقام دائمًا: إذا كان أقل من حد صغير يُستعمل الحد، أو تُجمَّد النسبة ويُرفع إنذار.
- **المتوسط والجودة:** متوسط ثلاث قراءات فيها قراءة فاسدة بقيمة صفر يعطي ثلثي القيمة الصحيحة. فكتلة المتوسط يجب أن تستبعد القراءة ذات الجودة السيئة. وإذا بُنيت بجمع وقسمة، فالاستبعاد يُبنى صراحة.
- **الأعداد الصحيحة:** قسمة عددين صحيحين 2 ÷ 7 تعطي 3 في كثير من المنصات. فتُحوّل القيم إلى حقيقية (REAL) قبل الحساب.

20.10 كتل معالجة الإشارة

الشكل 20-7: *أربع كتل تشكّل الإشارة: (أ) مرشح التأخير بثابت زمني 2 s يؤخر وصول القراءة إلى حد الفصل 3.2 s. (ب) محدد المعدل بـ 5 %/s ينقل الطلب من 40% إلى 80% في 8 s. (ج) الحاصر بين 10% و90%. (د) المنطقة الميتة ±0.5 حول الصفر.*

التحجيم (SCALE)

- **المداخل والمخارج:** القيمة الخام من البطاقة، ومخرج بالوحدات الهندسية.
- **الإعدادات:** حدا المدخل الخام، وحدا المدى الهندسي.
- **طريقة العمل:** القيمة الهندسية = (الخام − أدنى الخام) ÷ (أعلى الخام − أدنى الخام) × (أعلى المدى − أدنى المدى) + أدنى المدى.

- **مثال:** بطاقة تمثل 4–20 mA بالقيم 0–27648، ومرسل مداه 0–10 bar. القيمة 13824 تعطي 13824 ÷ 27648 × 10 = 5.0 bar، وهي تقابل 12 mA (الشكل 20-8 أ).
- **الخطأ الشائع:** مدى في الكتلة يختلف عن مدى المرسل بعد تغييره في الميدان، فتظهر قراءة خاطئة بنسبة ثابتة (19.6).

الجذر التربيعي (SQRT)

- **طريقة العمل:** التدفق عبر عنصر فرق الضغط يتناسب مع جذر فرق الضغط: التدفق = أعلى التدفق × √(فرق الضغط ÷ أعلى فرق الضغط).

- **مثال:** فرق ضغط 25% من المدى يعطي تدفقًا 50%، وفرق ضغط 1% يعطي تدفقًا 10% (الشكل 20-8 ب).
- **الإعدادات:** قطع التدفق المنخفض (Low-flow Cutoff): تحت نسبة صغيرة من فرق الضغط، مثل 1%، يُعرض التدفق صفرًا، لأن الجذر يضخّم الضجيج قرب الصفر، فانزياح بسيط في صفر المرسل يُظهر تدفقًا 10% والخط متوقف.
- **الخطأ الشائع:** تنفيذ الجذر مرتين، في المرسل وفي النظام. فالمرسل الذي يخرج إشارة خطية بالتدفق لا يُطبق عليه جذر ثانٍ في الكتلة (8.3).

التوصيف (CHARACTERIZER أو مولد الدالة)

- **طريقة العمل:** جدول نقاط (المدخل، المخرج)، ويُحسب الخرج بينها باستكمال خطي.

- **مثال:** خزان أسطواني أفقي. المستوى 25% من القطر يقابل حجمًا 19.6% فقط، والمستوى 50% يقابل 50%. فجدول بسبع نقاط يحول المستوى إلى حجم بخطأ صغير (الشكل 20-8 ج).
- **في الدائرة:** تحويل مستوى إلى حجم، وتعويض خصائص صمام غير خطي، وحدود تشغيل تتغير مع متغير آخر.
- **الخطأ الشائع:** نقاط قليلة في الجزء الأكثر انحناءً، أو نقاط غير مرتبة تصاعديًا، فتعطي الكتلة قيمًا غير متوقعة.

مرشح التأخير (LAG أو FILTER)

- **طريقة العمل:** تأخير من الرتبة الأولى بثابت زمني τ: يقترب المخرج من المدخل بنسبة تقارب $\Delta t \div \tau$ من الفرق المتبقي في كل دورة (حين تكون الدورة أقصر كثيرًا من τ). وبعد زمن يساوي τ يبلغ نحو 63% من التغير.

- **مثال:** ضغط يهبط فجأة من 20 إلى 10 bar، وحد الفصل بالضغط المنخفض 12 bar. المرشح بثابت 2 s يصل إلى 12 bar بعد $2 \times \ln 5 \approx 3.2$ s (الشكل 20-7 أ)، أي أنه أخّر الفصل 3.2 s (الحل الكامل في المثال المحلول بالقسم 20.18).
- **المعنى ميدانيًا:** المرشح يهدئ الضجيج في العرض والتحكم، لكنه يضيف زمنًا إلى استجابة الحماية. فإن وُضع في مسار فصل، دخل زمنه في حساب زمن استجابة الوظيفة.
- **الخطأ الشائع:** مرشح كبير لإخفاء تذبذب سببه في الحلقة نفسها، فيبطئ الحلقة ويزيد التذبذب.

محدد المعدل (RATE LIMIT أو RAMP)

- **طريقة العمل:** يمنع المخرج من التغير أسرع من معدل محدد، ارتفاعًا أو انخفاضًا، وقد يكون المعدلان مختلفين.

- **مثال:** طلب يقفز من 40% إلى 80% بمعدل 5 %/s، فيبلغ المخرج 80% بعد 8 s (الشكل 20-7 ب).
- **في الدائرة:** تحميل التوربين، وتغيير نقطة الضبط، والتبديل بين مصدرين.
- **الخطأ الشائع:** وضعه في مسار الإغلاق الطارئ، فيبطئ ما يجب أن يكون فوريًا.

الحاصر (LIMIT أو CLAMP)

- **طريقة العمل:** المخرج = المدخل إن كان بين الحدين، وإلا فالحد الأقرب.

- **مثال:** بين 10% و90%: المدخل 95% يعطي 90%، والمدخل 3% يعطي 10% (الشكل 20-7 ج).
- **الخطأ الشائع:** حاصر بعد PID دون إبلاغ PID بأن مخرجه محصور، فيستمر التكامل في الزيادة (التشبع). وحله التتبع أو حدود المخرج داخل كتلة PID نفسها (20.11).

المنطقة الميتة (DEADBAND)

- **طريقة العمل:** ما دام المدخل داخل ±النطاق يكون المخرج صفرًا، وخارجه يُطرح النطاق (الشكل 20-7 د). وبعض الكتل تُبقي المخرج على آخر قيمة بدل الصفر.

- **مثال:** انحراف 0.3 داخل 0.5± يعطي صفرًا، وانحراف 1.2 يعطي 0.7.
- **في الدائرة:** تقليل حركة صمام أو مشغل مع ضجيج صغير.
- **الخطأ الشائع:** الخلط بينها وبين تخلف المقارن (20.3)، وإن حملا أحيانًا الاسم الإنجليزي نفسه (Deadband): المنطقة الميتة هنا تعمل على قيمة تناظرية، والتخلف على قرار منطقي.

الشكل 20-8: *(أ) التحجيم من 0–27648 إلى 0–10 bar. (ب) الجذر التربيعي: فرق ضغط 25% يعطي تدفقًا 50%، مع منطقة قطع التدفق المنخفض. (ج) التوصيف لخزان أسطواني أفقي بجدول سبع نقاط. (د) تقسيم المدى: التبريد من 0 إلى 50% من خرج المتحكم، والتسخين من 50 إلى 100%.*

20.11 كتل التحكم

الشكل 20-9: *حلقة تحكم بالكتل: PID ثم محطة يدوي/آلي ثم حاصر إلى الصمام PV-302. والخط المتقطع إشارة التتبع: في الوضع اليدوي يتبع خرج PID الخرج الفعلي، فلا قفزة عند العودة إلى الآلي.*

متحكم PID

- **المداخل والمخارج:** القيمة المقاسة PV، ونقطة الضبط SP، ومداخل التتبع (قيمة وأمر)، ومدخل تغذية راجعة خارجية للتكامل في بعض المنصات. والمخرج OUT، ومخارج حالة (الوضع، والتشبع).
- **الإعدادات:** الكسب Kp أو النطاق التناسبي، وزمن التكامل Ti، وزمن التفاضل Td، والفعل مباشر أو عكسي، وحدا المخرج، ومدى PV، وشكل الخوارزمية، وعلى أي شيء يعمل التناسبي والتفاضلي (الانحراف أو PV).
- **طريقة العمل وضبطها:** في الفصل 18. والمهم هنا ما يخص الكتلة:
- **الفعل:** صمام تبريد يُفتح بزيادة الخرج يحتاج فعلًا مباشرًا في حلقة حرارة (ارتفاع الحرارة يزيد الخرج)، وصمام تسخين يحتاج فعلًا عكسيًا (18.6). والخطأ فيه يجعل الحلقة تهرب إلى أحد الحدين فور تحويلها إلى الآلي.
- **منع التشبع:** حين يبلغ المخرج حده يتوقف التكامل عن الزيادة (18.3). وهذا لا يعمل إلا إذا عرفت الكتلة الحد الفعلي، أي حدود الكتلة نفسها أو تغذية راجعة من آخر السلسلة.
- **الأوضاع:** يدوي (MAN)، وآلي (AUTO)، وتتالٍ (CAS) تأتي فيه نقطة الضبط من متحكم رئيسي. وبعض المنصات تضيف أوضاعًا للتحكم الحاسوبي.

> - **مثال:** حلقة ضغط وعاء PIC-302 بمدى 0–10 bar وSP = 6.0 bar، وصمامها على خط خروج الغاز. ارتفاع الضغط يتطلب فتحًا أكبر، فالفعل **مباشر** (بافتراض أن زيادة خرج المتحكم تفتح الصمام؛ فإن كان الصمام يُغلق بزيادة الإشارة ولم يُعكس الخرج في كتلة المخرج، انعكس الفعل المطلوب). ولو كان الصمام على خط التغذية الداخلة إلى الوعاء لكان الفعل عكسيًا. ويُترك اختيار Kp وTi للفصل 18، والمهم في الكتلة هنا: حدا المخرج 5–95%، والتتبع مفعّل في الوضع اليدوي.

محطة يدوي/آلي (A/M Station)

- **طريقة العمل:** تمرر خرج PID في الآلي، والقيمة التي يكتبها المشغل في اليدوي. وفي كثير من أنظمة DCS تكون هذه الوظيفة داخل كتلة PID نفسها، وفي PLC تُبنى غالبًا بمبدّل SEL.
- **التحويل السلس (Bumpless Transfer):** عند الانتقال من اليدوي إلى الآلي، يجب أن يبدأ PID من الخرج الحالي لا من قيمته القديمة. وهذا وظيفة **التتبع**: في اليدوي يُجبر مخرج PID على أن يتبع الخرج الفعلي (18.9).
- **الخطأ الشائع:** مبدّل يدوي/آلي مبني بالكتل دون توصيل التتبع إلى PID، فيقفز الصمام عند كل تحويل.

تقسيم المدى (Split Range)

- **طريقة العمل:** مخرج متحكم واحد يوزع على صمامين أو أكثر، لكل صمام جزء من المدى. وهو وظيفة تُبنى من كتلتي تحجيم وحاصرين، أو كتلة جاهزة في بعض المكتبات.

> - **مثال:** حرارة مفاعل بصمام تبريد وصمام تسخين. خرج المتحكم 0% يعني تبريدًا كاملًا، و50% كلا الصمامين مغلق، و100% تسخينًا كاملًا. خرج 25% يعني صمام تبريد مفتوحًا 50%، وخرج 75% يعني صمام تسخين مفتوحًا 50% (الشكل 20-8 د).
> - **الخطأ الشائع:** فجوة أو تداخل حول نقطة التقسيم لم يُقصد، فيعمل الصمامان معًا أو تظهر منطقة لا يستجيب فيها شيء. والمعايرة الفعلية للموضّعات جزء من هذا الاختبار.

التحكم الانتقائي (Override Control) بكتلة اختيار

- **طريقة العمل:** متحكمان أو أكثر لمتغيرات مختلفة، ومخارجها إلى كتلة اختيار الأدنى أو الأعلى، ومخرج الاختيار إلى الصمام. فيسيطر المتحكم الأكثر تقييدًا. وهو وظيفة تُبنى من عدة كتل.

- **مثال:** صمام وقود يتحكم به متحكم السرعة، ومتحكم حرارة العادم يحد منه. في التشغيل العادي يطلب متحكم الحرارة أكثر من متحكم السرعة، فيختار الأدنى متحكم السرعة. وحين تقترب الحرارة من حدها ينخفض طلب متحكم الحرارة ويسيطر (34.3).
- **الشرط الحاسم:** المتحكم غير المختار يجب ألا يتشبع تكامله، وإلا تأخر في استلام السيطرة حين يُحتاج. فيُغذى تكامل كل متحكم بمخرج كتلة الاختيار (External Reset Feedback)، أو يُضبط على تتبع المخرج المختار.
- **الخطأ الشائع:** كتلة اختيار بلا تغذية راجعة إلى المتحكمات، فيبقى المتحكم الخامل عند 100% دقائق بعد أن يحتاجه النظام.

20.12 الوظائف المركبة: السماحية والتعشيق والفصل والتسلسل

هذه ليست كتلًا جاهزة في الغالب، بل وظائف تُبنى من الكتل السابقة. وأهم ما فيها أن يكون **نوع كل شرط** واضحًا، لأن السلوك المطلوب يختلف.

جدول: الفرق بين السماحية والتعشيق والفصل

الوظيفة	متى تُفحص	ماذا يحدث إذا سقط الشرط	هل تحتاج إعادة ضبط؟	البناء النموذجي
السماحية (Permissive)	قبل البدء فقط	يُمنع البدء، ولا يتوقف ما يعمل	لا	AND لشروط البدء، إلى مدخل البدء
التعشيق (Interlock)	طوال التشغيل	تتوقف المعدّة أو تُمنع من الحركة، ويعود حين يعود الشرط إن لم يكن ممسوكًا	بحسب التصميم	AND أو OR إلى مدخل الإيقاف أو إلى شرط الحركة

الوظيفة	متى تُفحص	ماذا يحدث إذا سقط الشرط	هل تحتاج إعادة ضبط؟	البناء النموذجي
الفصل (Trip)	طوال التشغيل	تتوقف المعدّة ويُمسك الفصل	نعم، بعد زوال السبب وبأمر مقصود	مقارنة أو تصويت، ثم ممسك بأولوية الضبط، ثم مخرج آمن عند فقد الطاقة

كيف أختار؟ اقرأ العمود الثالث قبل غيره: إذا سقط الشرط والمعدّة تعمل، هل يجب أن تتوقف؟ إن كان الجواب لا فهو سماحية توضع على مدخل البدء فقط؛ وإن كان نعم فهو تعشيق أو فصل، والفاصل بينهما هو الإمساك: ما يُراد التحقق منه قبل العودة يُمسك بأولوية الضبط ويحتاج إعادة ضبط مقصودة، وما يُراد له أن يعود مع عودة الشرط لا يُمسك. ولا يبين الجدول مصدر الشرط: ما جاء من HAZOP أو LOPA لا يُبنى في نظام التحكم أصلًا بل في نظام السلامة، وإن بدا «مقارنة وممسكًا» بسيطين. والخطأ الأكثر كلفة إعادة ضبط تعيد تشغيل المعدّة مباشرة، أو ممسك فصل بأولوية الإعادة يُلغى والشرط قائم، وكلاهما لا يظهر إلا في اختبار الحالة «الإشارتان معًا» لا في التشغيل العادي.

- **مثال على الفرق:** شرط «صمام السحب مفتوح» سماح للمضخة، فإن أُغلق بعد البدء فلا يوقفها هذا الشرط وحده. بينما «مستوى السحب منخفض جدًا» فصل، يوقفها في أي لحظة ويُمسك حتى يعود المستوى ويضغط المشغل إعادة الضبط. وفي الشكل 20-10 كلاهما.
- **إعادة الضبط (Reset):** لا تُعيد تشغيل المعدّة. هي تُزيل الإمساك فقط، ثم يلزم أمر بدء جديد. وإعادة ضبط تبدأ المعدّة مباشرة خطأ خطير (19.4 و 19.12).
- **أول سبب (First-Out):** حين تفصل الوحدة تتبعها إشارات كثيرة. فكتلة «أول سبب» تمسك الشرط الذي حدث أولًا وتحجب ما بعده، فيعرف الفريق السبب لا النتائج. وتُبنى من ممسكات وبوابات، وبعض المنصات تقدمها جاهزة. ودقتها محدودة بزمن دورة المهمة، فإن حدث شرطان في الدورة نفسها ظهرا معًا. ولذلك يُعتمد على سجل تسلسل الأحداث (SOE) حين تلزم دقة أعلى (39.14).

التسلسل (Sequence)

- **طريقة العمل:** خطوات متتالية، لكل خطوة أفعال، وشرط انتقال إلى التالية. ويُكتب بمخطط الوظائف التتابعية (19.5) (SFC)، أو يُبنى في FBD بممسك لكل خطوة، أو بمتغير رقم الخطوة مع مقارنات.

- **مثال:** بدء مضخة بخط تصريف: ① افتح صمام السحب وانتظر تأكيد الفتح. ② شغّل المحرك وانتظر تأكيد التشغيل خلال 10 s. ③ افتح صمام التصريف تدريجيًا بمحدد معدل. ④ سلّم التحكم إلى حلقة التدفق. ولكل خطوة مؤقت مراقبة: إن لم يتحقق شرط الانتقال في الزمن المحدد، تتوقف السلسلة ويُرفع إنذار يسمّي الخطوة.
- **الخطأ الشائع:** سلسلة بلا حالة خطأ محددة لكل خطوة، فتتوقف عند خطوة دون أن تُعلم المشغل بها. أو سلسلة لا تعرف ماذا تفعل عند عودة التغذية في منتصفها.

20.13 المنطق الآمن عند الفشل (Fail-Safe Logic)

المنطق الآمن عند الفشل يعني أن أي عطل متوقع، من انقطاع سلك، أو فقد تغذية، أو توقف المتحكم، أو فساد إشارة، يقود العملية إلى الحالة الآمنة المحددة، أو على الأقل يُكتشف ويُعلن. وليس كتلة جاهزة، بل قواعد في التصميم تمر بكل الكتل السابقة.

قواعد التصميم:

1. **قطع التغذية للفصل (De-Energize-to-Trip).** مخرج الفصل في الوضع السليم 1 (الملف ممغنط)، والفصل يجعله 0. فانقطاع السلك أو فقد التغذية أو توقف بطاقة الخرج يعطي فصلًا. وهذا هو الأصل في أنظمة السلامة (15.11 و29). والاستثناء التغذية للفصل (Energize-to-Trip)، كبعض أنظمة الحريق، ويحتاج مراقبة للدائرة لأن انقطاعها يمنع الفصل (30).
2. **المداخل الميدانية مغلقة في الوضع السليم.** مفتاح الفصل يفتح عند الخطر، فانقطاع سلكه يبدو كطلب فصل لا كحالة سليمة (الشكل 20-10). وحين لا يمكن ذلك، تُراقب الدائرة بمقاومة نهاية الخط (Line Monitoring) فيُكتشف القطع والقصر (30).

3. **المداخل التناظرية بمراقبة الجودة.** تيار 3.6 mA أو أقل، أو 21 mA أو أكثر، يعني عطلًا لا قيمة (NAMUR NE43). والمنطق يحدد ماذا يفعل: يعدّ القناة في حالة فصل، أو يستبعدها ويرفع إنذارًا، كما في جدول التشغيل المنقوص (20.8). والاختيار يُكتب في SRS.

4. **حالة المخرج عند فقد الاتصال أو توقف المتحكم.** لكل مخرج حالة آمنة معرفة في الإعداد: يأخذ 0، أو يحتفظ بآخر قيمة، أو يأخذ قيمة محددة. فصمام التحكم في خدمة عادية قد يُضبط على الاحتفاظ بآخر قيمة، أما مخرج فصل فيأخذ 0 دائمًا. ويجب أن تتفق هذه الحالة مع وضع الفشل الميكانيكي للصمام (15).

5. **لا تأخير إطفاء (TOF) على إشارة «سليم» في مسار الفصل.** في تصميم قطع التغذية للفصل تكون الإشارة 1 في الوضع السليم، فإذا مرت بتأخير إطفاء بقيت 1 مدة PT بعد أن تطلب الفصل، أي أن الفصل يتأخر. أما تأخير الإطفاء على إشارة طلب الفصل نفسها فيمد الفصل ولا يؤخره، ولا يُستعمل بديلًا عن الإمساك. وتأخير التشغيل (TON) لتصفية الارتجاف مقبول إذا كان زمنه محسوبًا ضمن زمن استجابة الوظيفة.

6. **الفصل ممسوك وإعادة الضبط مقصودة.** ممسك بأولوية الضبط، وإعادة ضبط لا تعمل ما دام الشرط قائمًا، ولا تبدأ المعدّة.

7. **لا يعتمد الفصل على الشبكة وحدها.** الفصل يُنفذ في المتحكم الذي يملك المدخل والمخرج. وإشارة فصل تمر عبر شبكة بين متحكمين تُراقب بنبض حياة (Heartbeat)، ويعدّ انقطاعها حالة عطل معرفة السلوك (23).

8. **عودة التغذية لا تبدأ شيئًا.** بعد عودة التغذية أو إعادة تشغيل المتحكم تبدأ الممسكات والتسلسلات في الحالة الآمنة، ويلزم أمر بدء جديد (19.12).

> **مثال رقمي:** صمام إغلاق طارئ يُشغَّل بصمام ملفي 24 V DC (Solenoid Valve) يُغذى في التشغيل العادي. حين يفصل النظام، أو تنقطع التغذية، أو ينقطع السلك، يفقد الملف تغذيته، فيُنفَّس الهواء من المشغّل الهوائي (Actuator) ويُغلق النابضُ الصمام. ثلاثة أعطال مختلفة والنتيجة واحدة: الوضع الآمن.

الخطأ الشائع: منطق يعدّ القيمة الفاسدة صفرًا ثم يقارنها بحد عالٍ. فمرسل ضغط انقطع سلكه يقرأ 0 bar أو 25%−، فلا يصل أبدًا إلى حد الضغط العالي، وتعمل الوظيفة وكأنها سليمة وهي معطلة. فكل مقارنة في مسار حماية يجب أن تعرف ماذا تفعل حين تكون الإشارة فاسدة.

20.14 كتل الجودة والإنذار

فحص جودة الإشارة (QUALITY أو BAD PV)

- **المداخل والمخارج:** القيمة الخام أو التيار، ومخرج القيمة، ومخرج منطقي «فاسدة»، وفي كثير من أنظمة DCS تُحمل الجودة مع القيمة نفسها.
- **ما تفحصه:** الخروج عن المدى (NE43: 3.6 mA أو أقل، أو 21 mA أو أكثر، عطل؛ وبين 3.6 و3.8 mA أو بين 20.5 و21 mA قيمة مشكوك فيها)، وحالة التشخيص من المرسل الذكي عبر HART أو الشبكة، والتجمد (قيمة لم تتغير أكثر من فرق صغير خلال زمن طويل، مع حذر لأن بعض المتغيرات مستقرة فعلًا)، ومعدل التغير غير الممكن فيزيائيًا.

> - **مثال:** مرسل ضغط في خدمة نابضة يتغير عادة بأكثر من 0.05 bar كل دقيقة. ثبات قراءته 15 دقيقة يرفع إنذار «قراءة مجمدة» (40.8).
> - **الخطأ الشائع:** حدود جودة بلا تأخير، فترتعش الجودة مع الضجيج قرب الحد.

كتلة الإنذار (ALARM)

- **المداخل والمخارج:** القيمة، ونقطة الضبط لإنذار الانحراف. والمخارج: عالٍ جدًا (HH)، وعالٍ (H)، ومنخفض (L)، ومنخفض جدًا (LL)، وانحراف (DEV)، ومعدل تغير (ROC).
- **الإعدادات:** قيمة كل حد، والتخلف (Deadband) لكل إنذار، وتأخير الظهور وتأخير الزوال، والأولوية، والإخماد (Suppression) المرتبط بحالة المعدّة.

- **مثال:** حرارة محمل بحد إنذار عالٍ 95 °C وتخلف 2 °C وتأخير 5 s. قراءة تتذبذب بين 94.5 و95.5 °C لا تولد إلا إنذارًا واحدًا على الأكثر: فهو لا يظهر إلا إذا بقيت القراءة فوق 95 °C خمس ثوانٍ متصلة، وإذا ظهر لا يزول إلا تحت 93 °C.
- **في الدائرة:** إنذار التباعد في الشكل 20-11 كتلة إنذار على مخرج التباعد (DEV) من كتلة الوسيط، تنبه حين تبتعد قراءة أحد المرسلات عن الوسيط أكثر من 3% من المدى. وهذا غير إنذار انحراف القيمة عن نقطة الضبط.
- **الخطأ الشائع:** إنذار بلا تخلف ولا تأخير، فيظهر ويزول عشرات المرات في الساعة ويُغرق المشغل. والإنذار ليس فصلًا: لا يُستعمل مخرج كتلة إنذار في DCS بديلًا عن وظيفة فصل في نظام السلامة. وإدارة الإنذارات بمجملها في ISA-18.2 وEEMUA 191 (22.3).

20.15 مثالان متكاملان

الشكل 20-10: *منطق تشغيل المضخة P-101 بالكتل: AND للسماح، وAND للبدء المسموح، وOR لأسباب الإيقاف، وممسك بأولوية الإيقاف (RS)، ثم مؤقت يراقب تأكيد التشغيل.*

المثال الأول: تشغيل المضخة P-101 (الشكل 20-10)

- **المعطيات:** أربعة شروط سماح: مستوى السحب فوق الحد المنخفض LSL-101، وصمام السحب مفتوح (ZSO)، ولا إيقاف طارئ، والمضخة متاحة في مركز المحركات (MCC). وأمر بدء وأمر إيقاف نبضيان من المشغل. وفصل بالمستوى المنخفض جدًا LSLL-101 ممسوك. وتأكيد التشغيل (RUN_FB) من مركز المحركات.
- **البناء:**
  - ① AND السماح تجمع الشروط الأربعة.
  - ② AND الثانية تمرر أمر البدء فقط إن كان السماح قائمًا.
  - ③ OR تجمع أسباب الإيقاف: أمر المشغل، والتعشيق (إيقاف طارئ أو المضخة غير متاحة)، والفصل الممسوك.

- ④ الممسك RS بأولوية الإيقاف: إن جاء البدء والإيقاف معًا، يغلب الإيقاف.
- ⑤ AND مع نفي تأكيد التشغيل، ثم TON بعشر ثوانٍ: إن بقي الأمر قائمًا عشر ثوانٍ دون تأكيد، يُرفع إنذار «فشل البدء». ويمكن أن يُضاف هذا الإنذار إلى أسباب الإيقاف، فيسقط الأمر بدل أن يبقى معلقًا.

- **تتبع السلوك:**
  - أُغلق صمام السحب والمضخة تعمل، فيسقط السماح، ولا تتوقف المضخة لأن «صمام السحب مفتوح» في هذا التصميم شرط سماحية لا تعشيق (20.12)، والذي يحميها هنا LSLL. وفي كثير من التصاميم يُجعل إغلاق صمام السحب أثناء التشغيل تعشيقًا أيضًا، والقرار في الوصف الوظيفي (وفي الشكل 19-5 وُضع هذا الشرط على التوالي مع الإمساك فصار تعشيقًا).
  - ضُغط زر البدء والسماح غير قائم، فلا يحدث شيء. والشاشة الجيدة تعرض أي شرط ناقص.
  - عادت التغذية بعد انقطاع، فيبدأ الممسك صفرًا (20.13، القاعدة 8)، ولا تعمل المضخة حتى يُعطى أمر بدء جديد.
- **المعنى ميدانيًا:** حين يسأل المشغل «لماذا لا تبدأ المضخة؟»، فالجواب في ثلاث كتل: هل مخرج AND السماح 1؟ هل وصلت نبضة البدء؟ هل مدخل الإيقاف في الممسك 1؟ وهذا الترتيب أسرع من أي تخمين (39.10).

الشكل 20-11: *حلقة ضغط بثلاثة مرسلات: فحص جودة لكل مرسل، ثم الوسيط، ثم PID ومحطة يدوي/آلي وحاصر إلى الصمام PV-302، وإنذار تباعد. وتحتها مسار فصل مستقل: ثلاث قنوات PSLL في نظام السلامة، وتصويت 2 من 3، وممسك بأولوية الضبط، وفصل الضاغط K-301. ومخرج الممسك يُنفى إلى مخرج ممغنط في الوضع السليم (قطع التغذية للفصل، 20.13).*

المثال الثاني: حلقة ضغط بمرسلات ثلاثية ومسار فصل مستقل (الشكل 20-11)

- **المعطيات:** ثلاثة مرسلات ضغط PT-302A وB وC بمدى 0–10 bar، ونقطة الضبط 6.0 bar، وإنذار تباعد عند 3% من المدى (0.3 bar). والفصل بالضغط المنخفض جدًا بثلاث قنوات أخرى (مفاتيح أو مرسلات) في نظام السلامة، مستقلة عن مرسلات هذه الحلقة.
- **الحالة ①، كل المرسلات سليمة:** القراءات 6.02 و5.98 و6.05 bar. الوسيط 6.02 bar، وأكبر ابتعاد عنه 0.04 bar، فلا إنذار.

- **الحالة ②، انجراف مرسل:** المرسل C ينجرف تدريجيًا إلى 6.50 bar. الوسيط يبقى على القراءة الوسطى (6.02)، والحلقة لا تتأثر. وتباعد C عن الوسيط 0.48 bar، أكبر من 0.3، فيُرفع إنذار تباعد يوجّه الفني إلى C.
- **الحالة ③، انقطاع سلك:** المرسل B يعطي 1.8 mA. كتلة الجودة تعلّمه فاسدًا، والوسيط يعمل على القراءتين الباقيتين بحسب إعداده (المتوسط مثلًا)، ويُرفع إنذار «مرسل فاسد». والحلقة تستمر.
- **الحالة ④، فساد مرسلين:** يبقى مرسل واحد صالح. والسلوك يُحدد في الوصف الوظيفي: الاستمرار على المرسل الوحيد مع إنذار بأولوية عالية، أو تحويل المتحكم إلى اليدوي. ولا يُترك لما تفعله الكتلة افتراضيًا.
- **مسار الفصل:** ضغط سحب منخفض جدًا تراه قناتان من ثلاث يضبط الممسك، فيفصل الضاغط. وقناة واحدة ترفع إنذار عدم اتفاق فقط.
- **لماذا لم يُبنَ الفصل هنا على مخرج الوسيط؟** أسلوب الوسيط ثم المقارنة شائع (الشكل 20-13)، لكن في وظيفة سلامة تُفضَّل المقارنة لكل قناة ثم التصويت، للأسباب المشروحة في الخطأ الشائع بالقسم 20.8 (انظر القسم 20.8)، ولسبب إضافي: أي خطأ في كتلة الوسيط أو إعدادها يعطل الحماية والتحكم معًا. والفصل بطبقة مستقلة يجب ألا يعتمد على المتحكم الذي قد يكون عطله سبب الحالة الخطرة (29.2). وهذا هو التصميم المحسّن لهذا النوع من الوظائف: قارنه بوظيفة 1oo1 على المرسل PZT-104 في المثال المحلول للقسم 39.15، وبالوظيفة المبنية على الوسيط في الشكل 20-13.

20.16 مثال تعليمي مركّب: فصل كاذب من اختيار الأعلى

- **ما حدث:** توربين غازي فصل بإشارة «حرارة العادم عالية جدًا» والحمل ثابت. والقراءات قبل الفصل بثانية: 548 و552 و200 °C,1 على ثلاث مزدوجات من دائرة المزدوجات.

- **المنطق كما وُجد:** مزدوجات العادم الثلاث تدخل كتلة اختيار الأعلى، ثم مقارن بحد الفصل 620 °C، ثم ممسك الفصل. والفكرة عند التصميم: «نحمي من أسوأ قراءة».
- **التحليل:**
  - ① القراءة 1,200 °C غير ممكنة مع قراءتين متقاربتين حول 550 °C.
  - ② فحص المزدوجة الثالثة: مقاومة الدائرة لانهائية، فالسلك منقطع (احتراق عند الوصلة الساخنة).
  - ③ بطاقة المدخل مضبوطة على كشف الاحتراق باتجاه أعلى المدى (Upscale Burnout)، فحين تنقطع المزدوجة تقرأ أعلى المدى.
  - ④ كتلة الجودة كانت تعلّم القناة فاسدة، لكن كتلة اختيار الأعلى في هذه المنصة لا تستبعد المدخل الفاسد، فمررت القيمة إلى المقارن.
- **السبب الجذري:** قرار تصميم لم يراجَع مع أنماط العطل: اختيار الأعلى يجعل **أي** مزدوجة معطوبة نحو الأعلى سببًا للفصل. أي أن الوظيفة 1oo3 من حيث الفصل الكاذب، وكأنها ثلاث فرص للفصل بلا سبب.
- **الإجراءات:**
  - **مباشر:** تبديل المزدوجة وفحص الحلقة من الوصلة إلى البطاقة.
  - **في المنطق:** مقارنة لكل قناة على حدة، ثم تصويت 2 من 3، مع معاملة القناة الفاسدة بحسب SRS (20.8 و20.13). والعرض والتحكم على الوسيط.
  - **في المراجعة:** قائمة فحص لكل كتلة اختيار في مسار فصل: ماذا يحدث حين يفسد مدخل نحو الأعلى، ونحو الأسفل، ويتجمد؟
- **الدرس:** اتجاه كشف الاحتراق في البطاقة، وسلوك الكتلة مع الجودة، واختيار الكتلة نفسها، ثلاثة قرارات منفصلة تبدو صغيرة. ولا تظهر نتيجتها إلا حين تُقرأ معًا (39.14).

20.17 اختبار منطق الكتل

منطق لم يُختبر في كل حالاته لم يُتحقق منه. والاختبار يجري على مراحل:

1. **مراجعة البرنامج مقابل الوصف الوظيفي (Control Narrative) ومصفوفة السبب والنتيجة (Cause & Effect) (17.10.1).** كل شرط في المستند له كتلة، وكل كتلة لها سبب في المستند.
2. **جدول اختبار لكل وظيفة:** المداخل، والنتيجة المتوقعة، والنتيجة الفعلية. ويشمل الحالات الحدية: الإشارتان معًا في الممسك، والقيمة عند الحد تمامًا، والإشارة الفاسدة، وعودة التغذية.
3. **المحاكاة (Simulation):** بيئة محاكاة المتحكم أو نموذج العملية، قبل النزول إلى الموقع.
4. **اختبار القبول في المصنع (FAT) ثم في الموقع (SAT):** بإشارات حقيقية من معاير أو محاكي أسلاك.
5. **اختبار الحلقة كاملة (Loop Check):** من الجهاز في الميدان إلى الشاشة والمخرج (القسم 14.13).

جدول: مثال على جدول اختبار ممسك الفصل بأولوية الضبط

الخطوة	الضبط (شرط الفصل)	الإعادة (أمر المشغل)	المخرج المتوقع	ما تتحقق منه
1	0	0	0	الحالة الابتدائية سليمة
2	1	0	1	الفصل يعمل
3	0	0	1	الفصل ممسوك بعد زوال الشرط
4	1	1	1	الإعادة لا تعمل والشرط قائم

الخطوة	الضبط (شرط الفصل)	الإعادة (أمر المشغل)	المخرج المتوقع	ما تتحقق منه
5	0	1	0	الإعادة تعمل بعد زوال الشرط
6	فقد التغذية ثم عودتها	0	يُحدد بالتصميم	حالة ما بعد عودة التغذية مطابقة للوصف

الفرض والمحاكاة أثناء الاختبار: فرض (Force) مدخل أو مخرج يتجاوز الميدان. فيُسجل كل فرض في سجل، ويظهر على الشاشة إنذار دائم ما دام قائمًا، ويُزال قبل الإغلاق (39.16). والفرض في نظام السلامة يخضع لإجراءات التجاوز (29).

20.18 الكتل الوظيفية الشائعة في برمجيات أنظمة التحكم

هذا القسم مرجع سريع يجمع في جداول ما شُرح مفصلًا في الأقسام 20.1 إلى 20.14، ليرجع إليه المهندس حين يفتح برنامج PLC أو تهيئة DCS أو تطبيق تحكم توربين في Mark VIe أو Woodward GAP (34.9.2)؛ فالكتل نفسها تتكرر بأسماء مختلفة قليلًا. ولكل كتلة هنا: ماذا تفعل، وأين تُستعمل، وما الخطأ الشائع فيها. والأسماء بين القوسين هي الشائعة في IEC 61131-3 أو في مكتبات المصنّعين (R77 وR76). ويضيف القسم كتلًا لم تُشرح قبله، مثل التقدم والتأخير، والتأخير الصافي، والمتكامل، وكشف القيم غير العددية.

(أ) الكتل المنطقية

الكتلة	ماذا تفعل	الاستعمال النموذجي	الخطأ الشائع
AND	المخرج 1 إذا كانت كل المداخل 1	شروط السماح بالتشغيل	نسيان أن مدخلًا غير موصول قد يُعد 0 أو 1 بحسب المنصة

الكتلة	ماذا تفعل	الاستعمال النموذجي	الخطأ الشائع
OR	المخرج 1 إذا كان أي مدخل 1	أي سبب من أسباب الفصل	جمع أسباب الفصل دون إنذار يحدد أيها وقع أولًا
NOT	يعكس المدخل	تحويل «مفتوح» إلى «غير مفتوح»، وعكس تلامس مغلق طبيعيًا (NC)	عكس مزدوج يخفي أثر انقطاع السلك (20.13)
XOR	المخرج 1 إذا اختلف المدخلان	مع مفتاحي نهاية الصمام يعطي 1 في الوضع السليم، ونفيه (XNOR) مع تأخير بزمن الشوط يكشف التعارض	استعماله حيث المطلوب «أحدهما على الأقل»
الممسك SR و RS (LATCH)	يثبت المخرج بعد نبضة ضبط حتى نبضة إعادة	إمساك الفصل حتى إعادة الضبط اليدوية	اختيار أولوية خاطئة حين يأتي الضبط والإعادة معًا
كشف الحافة (R_TRIG و F_TRIG)	نبضة لدورة واحدة عند التغير	عدّ الأحداث، وأوامر البدء النبضية	استعماله لإشارة تتذبذب فيولد نبضات كثيرة
التصويت (VOTE)	المخرج 1 إذا تحقق عدد محدد من المداخل، مثل 2 من 3	الحمايات بحساسات مكررة (34.9.1)	عدم التعامل مع مدخل معطوب: هل يُعد صوتًا للفصل أم يُستبعد؟

> **قاعدة أولوية الممسك:** ممسك الفصل بأولوية الضبط، وممسك تشغيل المحرك بأولوية الإيقاف (التفصيل في 20.5).

(ب) كتل الزمن والعد

الكتلة	ماذا تفعل	الاستعمال النموذجي	الخطأ الشائع
تأخير التشغيل (TON)	يرفع المخرج بعد بقاء المدخل 1 مدة محددة	تجاهل النبضات القصيرة قبل الفصل، وتأكيد الحالة	تأخير أطول من زمن سلامة العملية
تأخير الإطفاء (TOF)	يبقي المخرج 1 مدة بعد زوال المدخل	تشغيل مروحة تبريد بعد إيقاف المحرك	استعماله لإشارة فصل فيطيل الفصل بعد زوال السبب
النبضة (TP)	نبضة ثابتة الطول عند كل حافة	أوامر بطول محدد لقاطع أو ملف	إعادة القدح أثناء النبضة تختلف بين المنصات
المرشح المنطقي (BFILT)	تأخير للتشغيل وآخر للإطفاء معًا	مفاتيح مستوى أو تدفق ترتجف	تأخير كبير يخفي عطلًا حقيقيًا
المؤقت المتراكم (RTO)	يجمع الزمن ولا يُصفّر بزوال المدخل	ساعات تشغيل المعدة	نسيان إعادة ضبطه بعد الصيانة
العداد (CTU و CTD)	يعد النبضات صعودًا أو نزولًا	عدد مرات البدء، وعدادات الدفعات	مدخل مستمر لا نبضي، فلا يعد إلا مرة واحدة (يُستعمل كشف الحافة)

كيف أختار؟ اسأل ماذا تريد من الزمن: تأكيد أن الحالة استمرت قبل التصرف فهو TON؛ إبقاء أثر بعد زوال الحالة (مروحة بعد إيقاف محرك) فهو TOF؛ أمر بطول ثابت مهما طال الضغط على الزر فهو TP؛ وجمع زمن متقطع (ساعات تشغيل) فهو المؤقت المتراكم؛ وكل ما يُعدّ يمر بكشف حافة أولًا. ولا يبين الجدول أن زمن كل مؤقت في مسار حماية يُجمع مع مرشحات القياس وتأخير الإنذار ويُقارن بزمن سلامة العملية، ولا أن دقة المؤقت محكومة بدورة المهمة التي يعمل فيها. والخطأ الأكثر كلفة TOF على إشارة «سليم» في مسار فصل يؤخر الفصل مدة الضبط كاملة، أو TON طويل وُضع «لتهدئة الإنذار» فابتلع الحدث الذي وُضع الإنذار من أجله.

والمخططات الزمنية للمؤقتات الثلاثة الأساسية في الشكل 19-4.

(ج) كتل المقارنة والاختيار

الكتلة	ماذا تفعل	الاستعمال النموذجي	الخطأ الشائع
المقارن (COMPARE: GT و GE وLT وLE وEQ)	يقارن قيمتين ويعطي 1 أو 0	الحدود والإنذارات والسماح	مقارنة المساواة بين عددين حقيقيين، وهي نادرًا ما تتحقق
المقارن بتخلف (COMPHYS)	حد للتشغيل وحد مختلف للعودة	الإنذارات وبدء المضخات وإيقافها	تخلف صفري فيرتجف المخرج قرب الحد
اختيار الأعلى (HIGH SELECT أو MAX)	يمرر أكبر المداخل	حماية تعتمد أعلى درجات الحرارة، والتحكم الانتقائي (Override)	حساس معطوب يعطي قيمة عالية فيسيطر على المخرج
اختيار الأدنى (LOW SELECT أو MIN)	يمرر أصغر المداخل	طلب الوقود في التوربين: أصغر طلب بين السرعة والحرارة والتسارع (34.3)	حساس معطوب يعطي صفرًا فيسيطر
الوسيط (MEDIAN أو MID)	يمرر القيمة الوسطى من ثلاث	المرسلات الثلاثية للتحكم والحماية	استعماله مع مرسلين فقط
المبدّل (SELECT أو SWITCH)	يمرر أحد مدخلين بحسب إشارة منطقية	التحويل بين مرسل رئيسي واحتياطي، والوضع اليدوي	قفزة في المخرج عند التبديل
المجمّع المتعدد (MUX)	يمرر مدخلًا برقمه	اختيار نقطة ضبط بحسب الوضع	رقم خارج المدى يترك المخرج على آخر قيمة
كشف الحدود (HI_LO_MON أو LIMIT DETECT)	يعطي إنذارات عالٍ ومنخفض وعالٍ جدًا ومنخفض جدًا	الإنذارات القياسية لكل قياس	حدود بلا تخلف ولا تأخير فتنهمر الإنذارات

الشكل 20-12: *(أ) ثلاث قراءات لضغط واحد، ومخرج اختيار الأعلى والأدنى والوسيط حين ينهار أحد المرسلات: اختيار الأدنى يتبع المرسل المعطوب، والوسيط يبقى على إحدى القراءتين السليمتين. (ب) المقارن بلا تخلف يرتجف قرب الحد، والمقارن بتخلف 3 bar يعطي انتقالًا واحدًا في كل اتجاه.*

لماذا الوسيط؟ اختيار الأعلى أو الأدنى يحمي من خطأ في اتجاه واحد فقط، أما الوسيط فيتجاهل قيمة شاذة واحدة في أي اتجاه (الشكل 20-12 أ، والشرح في 20.7). لذلك يُستعمل مع ثلاثة مرسلات، ويُرفق بكشف للتباعد يطلق إنذار صيانة (40.1 و40.2). وللفرق بين الوسيط والتصويت 2 من 3 في مسارات الفصل انظر 20.7 و20.8.

(د) الكتل الرياضية ومعالجة الإشارة

الكتلة	ماذا تفعل	الاستعمال النموذجي	الخطأ الشائع
الجمع والطرح والضرب والقسمة	الحساب الأساسي	الموازين والنسب	قسمة على قياس قد يصبح صفرًا فتنتج قيمة غير عددية
الكسب والإزاحة (GAIN_BIAS أو SCALE)	ضرب في معامل وإضافة ثابت	التحجيم ومعايرة الإشارة	تحجيم مكرر في البطاقة والكتلة (19.6)
الحد (LIMIT أو CLAMP)	يحصر القيمة بين حدين	حدود نقطة الضبط والخرج	حدود تمنع الصمام من الوصول إلى وضعه الآمن

الكتلة	ماذا تفعل	الاستعمال النموذجي	الخطأ الشائع
المنحدر (RAMP) ومحدد المعدل (RATE LIMIT)	يغير المخرج بمعدل لا يتجاوز حدًا	رفع الحمل، وتغيير نقطة الضبط بسلاسة	معدل أبطأ من المطلوب في الطوارئ
مرشح التأخير (LAG)	استجابة من الرتبة الأولى بثابت زمني	تنعيم قياس مضطرب	ثابت زمني كبير يؤخر الحلقة والحماية
التقدم والتأخير (LEAD_LAG)	يسبق الإشارة أو يؤخرها ديناميكيًا	التغذية الأمامية (الفصل 41)	ضبط دون فهم ديناميكية العملية
التأخير الصافي (DEADTIME أو UNIT_DELAY)	يؤخر الإشارة زمنًا ثابتًا	نمذجة زمن النقل	ذاكرة كبيرة وتأخير غير مقصود
مولد الدالة (FUNGEN أو INTERP أو CURVE)	منحنى بنقاط يُستوفى بينها خطيًا	منحنى حد العادم، وخصائص الصمام، وتصحيح الحساسات	نقاط غير مرتبة أو مدخل خارج المدى
المتكامل والمشتق	تراكم الإشارة أو معدل تغيرها	العدادات والتدفق الكلي وكشف التسارع	المشتق يضخم الضوضاء
المتوسط (AVRG)	متوسط عدة مداخل	متوسط مزدوجات العادم	إدخال مزدوجة معطوبة في المتوسط (40.2)
كشف القيم غير العددية (NAN_CHECK)	يكشف القيم الناتجة عن خطأ حسابي	حماية الحسابات من الانتشار	إغفاله بعد كل قسمة

(هـ) كتل التحكم

الكتلة	ماذا تفعل	ملاحظة
PID	المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي	صيغته ووحداته تختلف بين المنصات (18.5)

الكتلة	ماذا تفعل	ملاحظة
محطة يدوي/آلي (A/M Station)	اختيار الوضع ونقل بلا قفزة	الانتقال السلس شرط في كل حلقة (18.9)
النسبة والإزاحة (RATIO وBIAS)	نسبة تدفق إلى آخر	الهواء إلى الوقود، والكيماويات إلى الماء
تقسيم المدى (SPLIT RANGE)	خرج واحد يحرك صمامين على أجزاء من المدى	يلزم تحديد منطقة التداخل أو الفجوة
الاختيار الانتقائي (OVERRIDE)	اختيار الأدنى أو الأعلى بين خرجي متحكمين	يحتاج إشارة إرجاع خارجي لمنع تراكم التكامل في المتحكم غير المختار (18.3)
الإنذار (ALARM)	يمسك الإنذار وينتظر الإقرار ويقود البوق والمصباح	الإقرار يسكت البوق ولا يمحو الإنذار ما دام السبب قائمًا

مثال محلول (ثلاث كتل في حلقة واحدة):

- **المعطيات:** قياس ضغط مضطرب يُنعّم بمرشح تأخير ثابته الزمني $\tau = 2$ s، ثم يُقارن بحد فصل. وهبط الضغط الحقيقي فجأة من 20 إلى 10 bar، وحد الفصل بالضغط المنخفض 12 bar.
- **الافتراضات:** المرشح من الرتبة الأولى، والمقارنة بلا تأخير إضافي.
- **الحل:** استجابة مرشح الرتبة الأولى لقفزة من القيمة الأولى إلى القيمة النهائية:
  - مخرج المرشح بعد زمن t = القيمة النهائية + (القيمة الأولى − القيمة النهائية) × e^(−t/τ) = 10 + (20 − 10) × e^(−t/2).
  - يبلغ حد الفصل 12 bar حين e^(−t/2) = 0.2، أي $t = 2 \times \ln 5 \approx 3.2$ s.
  - فالمرشح وحده أخّر الفصل 3.2 s.

- ولو أُضيف مؤقت TON بمدة 2 s بعد المقارن: التأخير الكلي ≈ 3.2 s + 2 = 5.2 s.

- **المعنى ميدانيًا:** المرشح أداة للتحكم والعرض، لا للحماية. فالحماية تأخذ القياس الخام أو بمرشح صغير جدًا، وتُعالج الارتجاف بالتخلف والتأخير المحسوب، ويُقارن مجموع التأخيرات بزمن سلامة العملية في دراسة SIL (الفصل 29).

مثال محلول (مولد الدالة): منحنى حد حرارة العادم معرف بنقطتين: عند ضغط تصريف 8 bar يكون الحد 600 °C، وعند 12 bar يكون 540 °C. وعند 10.5 bar يعطي الاستيفاء الخطي بين النقطتين:

الحد = الحد الأول + (الضغط − الضغط الأول) × (الحد الثاني − الحد الأول) ÷ (الضغط الثاني − الضغط الأول)

$$= 600 + (10.5 - 8) \times (540 - 600) \div (12 - 8)$$

$$= 600 - 37.5 = \mathbf{562.5\ °C}$$ (الشكل 34-15)

والتحقق الميداني: أدخل ثلاث قيم معروفة في المدخل، وقارن المخرج بالحساب اليدوي، واختبر ما يحدث خارج نقطتي الطرفين: هل يُمدد المنحنى أم يثبت على آخر قيمة؟

سلسلة حماية من ست كتل. يجمع الشكل 20-13 أكثر الكتل شيوعًا في منطق حماية نموذجي: ثلاثة مرسلات إلى كتلة وسيط مع إنذار تباعد، ثم مقارن بتخلف، ثم تأخير تشغيل قصير، ثم بوابة AND مع شرط «الوحدة تعمل»، ثم ممسك بأولوية الضبط يُعاد يدويًا، ثم أمر الفصل. وكل كتلة فيها قرار تصميمي يُكتب في وصف التحكم ويُختبر في FAT: قيمة الحد، والتخلف، والتأخير، وشرط السماح، وطريقة إعادة الضبط.

الشكل 20-13: *سلسلة حماية نموذجية لضغط الشفط المنخفض جدًا للضاغط K-301: ثلاث قراءات إلى كتلة الوسيط مع إنذار تباعد، ثم مقارن بحد 2.0 bar وتخلف 0.2 bar، ثم تأخير 2 s، ثم AND مع شرط التشغيل، ثم ممسك يُعاد يدويًا، ثم أمر الفصل.*

قراءة منطق كتل غريب: خمس خطوات. (1) ابدأ من المخرج الذي يهمك (أمر الفصل أو الصمام) وارجع إلى الخلف. (2) لكل كتلة: ما نوعها؟ وما معاملاتها الفعلية لا الافتراضية؟ (3) لاحظ مجموعة التنفيذ أو المهمة لكل كتلة (4) .(34.9.2) ابحث عن المداخل المفروضة والقيم القابلة للضبط. (5) قارن ما وجدت بوصف التحكم ومصفوفة السبب والنتيجة (17.10.1)، فكل اختلاف إما خطأ في البرنامج أو في الوثيقة.

دور المهندس ودور الفني:

المهندس يقرر: نوع كل كتلة في مسار الحماية (وسيط أم تصويت، واختيار الأعلى أم مقارنة لكل قناة)، وأولوية كل ممسك، وسلوك الكتل عند الإشارة الفاسدة كما تحدده SRS، وقيم الحدود والتخلف والتأخيرات ومجموعها مقابل زمن سلامة العملية. ويكتب جدول الاختبار لكل وظيفة (20.17).

الفني ينفذ ويقيس: يقرأ القيم الفعلية للمعاملات في المتحكم لا في الوثيقة، ويحقن الإشارات من الميدان أو بالمعاير لينفذ جدول الاختبار خطوة خطوة، بما فيه الحالات الحدية: الإشارتان معًا، والقيمة عند الحد تمامًا، والسلك المقطوع، وعودة التغذية. ويسجل

كل فرض ويزيله قبل الإغلاق، ويبلّغ عن أي اختلاف بين سلوك الكتلة والوصف الوظيفي بدل أن يعدّل الكتلة بنفسه.

20.19 الأخطاء الشائعة

- استعمال OR بدل اختيار الأعلى أو العكس: الأولى للحالات المنطقية، والثانية للقيم.
- بناء فصل على مخرج الوسيط، أو على اختيار الأعلى، دون دراسة أنماط عطل الحساسات.
- ممسك تشغيل محرك بأولوية الضبط، فيغلب البدء الإيقاف.
- تأخير إطفاء (TOF) أو مرشح كبير أو محدد معدل في مسار فصل، دون حساب زمنه.
- مقارنة قيمتين حقيقيتين بالتساوي التام.
- مقارن بلا تخلف قرب حد تتذبذب حوله القراءة.
- حاصر بعد PID دون تتبع، فيتشبع التكامل.
- متحكمان في تحكم انتقائي بلا تغذية راجعة خارجية للتكامل.
- جذر تربيعي مرتين، في المرسل وفي النظام.
- قسمة بلا حماية للمقام، ومتوسط لا يستبعد القراءة الفاسدة.
- كشف حافة في مهمة وعدّه في مهمة أبطأ.
- مدخل كتلة غير موصول يُفترض قيمته.
- قناة في التجاوز أو فرض منسي بعد الاختبار.
- الاعتماد على اسم الكتلة دون قراءة سلوكها في دليل المنصة.

20.20 ملخص

- برامج أنظمة التحكم تُبنى من نحو ثلاثين كتلة، والأسماء تختلف بين المنصات أكثر من السلوك. والمهم معرفة السلوك في الحالات الحدية.
- الكتل نوعان: دوال بلا ذاكرة (المنطق، والمقارنة، والحساب، والاختيار)، وكتل بذاكرة لها نسخة (المؤقتات، والممسكات، والعدادات، والمرشحات، وPID).
- اختيار الأعلى ليس OR، والوسيط ليس تصويت 2 من 3: فاختيار الأعلى والوسيط يعملان على القيم، وOR والتصويت يعملان على الحالات.
- المؤقتات والممسكات تحدد الزمن والأولوية. فممسك الفصل بأولوية الضبط، وممسك تشغيل المحرك بأولوية الإيقاف.
- كتل معالجة الإشارة تضيف زمنًا أو تشوه القيمة، فيُحسب أثرها في الحماية والتحكم.
- كتل التحكم تحتاج التتبع والحدود والتغذية الراجعة، وإلا تشبع التكامل أو قفز الصمام.
- السماحية والتعشيق والفصل والتسلسل وأول سبب وظائف تُبنى من الكتل، ولكل منها سلوك مختلف عند سقوط الشرط.
- المنطق الآمن عند الفشل قواعد تصميم: قطع التغذية للفصل، والمداخل المغلقة في الوضع السليم، ومعاملة الإشارة الفاسدة بحسب SRS، وحالة آمنة لكل مخرج.
- المنطق لا يُعدّ صحيحًا حتى يُختبر في حالاته الحدية بجدول اختبار موثق.

وفي الفصل التالي: الفصل 21 «نظام التحكم الموزع (DCS) وSCADA وأنظمة التحكم الصناعية (ICS)»، لأن هذه الكتل تعمل داخل متحكمات موزعة تربطها شبكات ومحطات تشغيل وخوادم، فننتقل من منطق الكتلة إلى بنية النظام الذي يحملها.

20.21 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق بين الدالة والكتلة الوظيفية في IEC 61131-3؟ ولماذا تحتاج الثانية اسم نسخة؟
2. مقارن بتخلف: حد التشغيل 8.0 bar والتخلف 0.3 bar. القراءة تتدرج: 7.9 ثم 8.1 ثم 7.8 ثم 7.6. ما حالة المخرج بعد كل قراءة؟
3. مؤقت تأخير تشغيل TON بزمن 5 s. المدخل 1 لمدة 3 s، ثم 0 لمدة ثانية، ثم 1 لمدة 6 s. متى يرتفع المخرج؟ وكيف يختلف الجواب لو كان المؤقت متراكمًا (RTO)؟
4. ثلاث قراءات 512 و515 و830 °C. ما مخرج كل من اختيار الأعلى، واختيار الأدنى، والوسيط؟ وأيها يناسب التحكم؟ ولماذا؟
5. اشرح بمثال لماذا لا يساوي الوسيط تصويت 2 من 3.
6. بطاقة تمثل 4–20 mA بالقيم 0–27648، ومرسل مداه 0–250 °C. ما القيمة الهندسية للقيمة الخام 20736؟ وما التيار المقابل؟
7. عنصر فرق ضغط مداه 0–100 kPa يقابل تدفقًا 0–400 m^3/h. ما التدفق عند فرق ضغط 36 kPa؟ ولماذا يُضبط قطع للتدفق المنخفض؟
8. طلب يقفز من 30% إلى 75%، ومحدد المعدل 3 %/s. متى يبلغ المخرج 75%؟
9. في حلقة تحكم انتقائي بمتحكمين إلى اختيار الأدنى، ماذا يحدث للمتحكم غير المختار إن لم تُغذَّ مداخل التكامل بمخرج الاختيار؟ وما الحل؟
10. صمم بالكتل منطق فصل لمضخة بالمستوى المنخفض جدًا بثلاثة مفاتيح، مع إعادة ضبط يدوية لا تعمل ما دام الشرط قائمًا، وحدد ما يحدث حين يفسد مفتاح واحد.

مراجع الفصل: R77 (مكتبات الكتل في Mark VIe: المكتبة القياسية ومكتبة DCS ومكتبة SIL، وإرشادات إضافة كتلة منطقية، استُعملت للفهم دون نقل نصوص)؛ R76 (مواد تدريبية على الواجهات والرسوم في منصة Mark VIe)؛ R69 (مذكرات المؤلف المجمعة من مصادر منشورة: المنطق الآمن عند الفشل وأعطال صمامات التحكم في حلقات DCS)؛ وخبرة المؤلف الميدانية (R18). المواصفات: IEC 61131-3 (لغات البرمجة والكتل القياسية)، وIEC 60617-12 (رموز العناصر المنطقية)، وISA-5.2 (مخططات المنطق الثنائي)، وIEC 61511-1 (أنظمة السلامة الآلية)، وNAMUR NE43 (مستويات إشارة العطل)، وISA-18.2 (إدارة الإنذارات).

الفصل 21: نظام التحكم الموزع (DCS) و SCADA وأنظمة التحكم الصناعية (ICS)

> **لمن هذا الفصل:** المهندس الذي ينضم إلى فريق نظام تحكم في محطة أو مصفاة ويرى أمامه خزائن ومحطات وخوادم وشبكات، ولا يعرف ما وظيفة كل صندوق وما الذي يتوقف إذا تعطل. ومهندس المشروع الذي يراجع عرض مورد DCS ويريد أن يحكم على سعة المتحكمات والشبكات والتكرار والاحتياطي؛ ومهندس الصيانة المسؤول عن نظام يعمل منذ سنوات ويريد أن يعرف ما يُفحص يوميًا وما يُختبر سنويًا. ويفيد مهندس الأمن السيبراني ومهندس الكهرباء اللذين يتعاملان مع حدود هذا النظام.
>
> **الفكرة الأساسية:** نظام التحكم الصناعي (Industrial Control System – ICS) اسم جامع لكل ما يقيس ويقرر ويحرك في منشأة، وأشهر صوره ثلاث: PLC للمنطق والآلات والحزم (الفصل 19)، وDCS للتحكم المستمر في منشأة كاملة من غرفة تحكم واحدة، وSCADA للإشراف على مواقع متباعدة (القسم 21.5.1). وDCS ليس «حاسوبًا كبيرًا»، بل متحكمات موزعة يعمل كل منها وحده، تربطها شبكة مكررة بمحطات التشغيل والهندسة والخوادم. ولهذا يبقى المصنع يعمل حين تتجمد الشاشات، ويتوقف جزء منه حين يفشل متحكم وشريكه الاحتياطي معًا. ومعرفة أين يقع التحكم فعلًا، وأين يقع العرض فقط، هي مفتاح التصميم والتشخيص والأمن.

21.1 نظام التحكم الصناعي ومكوناته وفق NIST SP 800-82

تعرّف الوثيقة NIST SP 800-82 (المراجعة الثالثة 2023، وعنوانها «دليل أمن التقنيات التشغيلية») مكونات أنظمة التحكم الصناعية بلغة محايدة تصلح لكل المنصات. ونلخصها

هنا بما يحتاجه مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم، مع أمثلة من منشأة نفط وغاز:

جدول: مكونات ICS ووظائفها

المكوّن	الوظيفة	أين يوجد عادة	ماذا يحدث إذا تعطل
الحساسات والمشغلات (Sensors and Actuators)	القياس والتحريك في العملية	الميدان	تفقد الحلقة قياسها أو قدرتها على الفعل، ويتصرف المتحكم حسب فلسفة العطل (الفصل 40)
المتحكم (Controller): PLC أو متحكم DCS أو RTU	تنفيذ الحلقات والمنطق والتسلسلات	غرفة الأجهزة أو الموقع البعيد	تتوقف حلقاته أو تنتقل مخارجه إلى وضعها الآمن، ما لم يتسلم الشريك الاحتياطي
واجهة الإنسان والآلة (HMI) ومحطة التشغيل	العرض والإنذار وأوامر المشغل	غرفة التحكم	يفقد المشغل الرؤية، ويستمر التحكم في المتحكمات
محطة الهندسة (Engineering Workstation)	تهيئة المتحكمات وتعديل البرامج وتحميلها	غرفة الهندسة	لا أثر في التشغيل، لكنها أخطر نقطة أمنية لأنها تملك صلاحية الكتابة
خادم التحكم أو خادم SCADA (Control/SCADA Server)	إدارة قاعدة البيانات والاتصال بالمتحكمات أو الوحدات البعيدة	غرفة الخوادم	في DCS يتسلم الخادم الاحتياطي عمله؛ وفي SCADA يفقد المركز الرؤية
خادم الإدخال والإخراج (I/O Server)	جمع البيانات من أنظمة أخرى بالبروتوكولات وتقديمها للنظام	غرفة الخوادم	تختفي بيانات الحزم المربوطة تسلسليًا

المكوّن	الوظيفة	أين يوجد عادة	ماذا يحدث إذا تعطل
المؤرخ (Data Historian)	تخزين القيم والأحداث لسنوات	غرفة الخوادم أو المنطقة المنزوعة السلاح	لا أثر في التحكم، وتضيع بيانات التحليل ما لم يكن هناك تخزين مؤقت
الأجهزة الإلكترونية الذكية (IED)	مرحلات الحماية ومحللات القدرة ومحركات السرعة المتغيرة	المحطة الكهربائية الفرعية ومراكز المحركات	تُفقد مراقبة المعدة الكهربائية أو حمايتها المحلية
مكونات الشبكة	المبدلات والموجهات والجدران النارية ونقاط الوصول البعيد	في كل المستويات	حسب موقعها: من فقد شاشة واحدة إلى فقد الرؤية كلها

والدرس الأول من الجدول: **ميّز بين مسار التحكم ومسار العرض.** الحلقة تُغلق بين الحساس والمتحكم والمشغل، وكل ما فوق المتحكم عرض وإشراف وتسجيل. وهذا التمييز يوجّه التكرار (المتحكم وإدخاله وإخراجه أولى بالتكرار من شاشة إضافية)، والتشخيص (توقف الشاشات لا يعني توقف المصنع)، والأمن (من يستطيع الكتابة إلى المتحكم أخطر ممن يقرأ منه).

21.2 مستويات التشغيل: المؤسسة والتحكم والميدان

تُقسَّم الأنظمة إلى مستويات وفق نموذج ISA-95 ونموذج بيردو (Purdue) (القسمان 3.4 و24.3): **المستوى 0** العملية والحساسات والمشغلات، و**المستوى 1** المتحكمات والإدخال والإخراج وأنظمة السلامة، و**المستوى 2** محطات التشغيل والهندسة وخوادم التحكم، و**المستوى 3** أنظمة التشغيل على مستوى الموقع (المؤرخ الرئيسي، وإدارة الإنتاج، وإدارة الأصول)، و**المستوى 4** أنظمة المؤسسة (ERP والبريد). وبين المستويين 3 و4 **منطقة منزوعة السلاح (Demilitarized Zone – DMZ)** لا يمر عبرها اتصال مباشر من المؤسسة إلى التحكم.

ولمهندس الأجهزة ثلاث قواعد عملية من هذا التقسيم:

1. **كل حلقة تُغلق في المستوى 1**، ولا حلقة تعتمد على خادم أو شبكة في المستوى 2 أو فوقه.
2. **كل اتصال يعبر مستويين يمر عبر نقطة معرّفة** (خادم أو بوابة أو جدار ناري) مسجلة في مخطط الشبكة، لا عبر حاسوب مورد وُصل «مؤقتًا».
3. **وظائف السلامة لا تعتمد على أي مستوى فوق المستوى 1**، ونظام السلامة مستقل في متحكمه وشبكته (الفصل 29).

21.3 بنية DCS: المتحكمات والشبكات ومحطات التشغيل والهندسة

يبين الشكل 21-1 معمارية نموذجية لنظام DCS في منشأة متوسطة، تتكرر عناصرها بأسماء مختلفة عند كل الموردين:

الشكل 21-1: *معمارية DCS نموذجية: متحكمات مكررة في غرف أجهزة ميدانية، كل منها مع إدخال وإخراج محلي وبعيد؛ شبكة تحكم مكررة (A وB) تصل المتحكمات بمحطات التشغيل والهندسة والخوادم؛ ومؤرخ في منطقة منزوعة السلاح يقرأ منه مستوى المؤسسة دون أن يصل إلى شبكة التحكم.*

جدول: عناصر DCS وما يُفحص في كل منها

العنصر	الوظيفة	التكرار المعتاد	ما يفحصه المهندس في عرض المورد وفي التشغيل
المتحكم (Controller)	تنفيذ الحلقات والمنطق والتسلسلات	زوج بتبديل آلي (أساسي واحتياطي متزامنان)	حمل المعالج والذاكرة، زمن التبديل، هل الاحتياطي متزامن فعلًا
وحدات الإدخال والإخراج (I/O Modules)	تحويل الإشارات الميدانية	حسب أهمية الحلقة: مفردة، أو مكررة للحلقات الحرجة	عدد القنوات والاحتياطي، العزل بين القنوات، التشخيص على مستوى القناة
الإدخال والإخراج البعيد (Remote I/O)	تقريب البطاقات من الميدان وتقليل الكابلات	وصلات اتصال مكررة	زمن تحديث الشبكة، ومصدر التغذية في الموقع البعيد
خزائن التجميع (Marshalling)	ترتيب الكابلات الميدانية قبل البطاقات	لا ينطبق	الفصل بين إشارات الأمان الجوهري وغيرها (الفصل 26)
شبكة التحكم (Control Network)	ربط المتحكمات بالمحطات والخوادم	شبكتان مستقلتان A و B بمبدلات مستقلة	الحمل، والعزل عن الشبكات الأخرى، ومبدلات مُدارة ومقفلة المنافذ
محطات التشغيل (Operator Stations)	الشاشات والإنذارات والأوامر	عدد يكفي لتعطل محطة دون فقد أي منطقة	كل منطقة تشغيلية مرئية من محطتين على الأقل
محطة الهندسة (Engineering Station)	التهيئة والتعديل والتحميل	واحدة أو اثنتان	صلاحيات الدخول، وسجل التعديلات، وعزلها عن الإنترنت

العنصر	الوظيفة	التكرار المعتاد	ما يفحصه المهندس في عرض المورد وفي التشغيل
الخوادم (Servers)	قاعدة البيانات، الإنذارات، الاتصال بالأنظمة الأخرى، المصادقة	أزواج مكررة	زمن الانتقال إلى الاحتياطي، والنسخ الاحتياطية المختبرة
خادم الوقت (Time Server)	توحيد الطوابع الزمنية للأحداث	مصدران	دقة التزامن المطلوبة لتسلسل الأحداث (الفصل 74)

مثال محلول (حمل المتحكم): يعطي المورد في وثائقه زمن تنفيذ كل نوع كتلة، ونحسب منه نسبة حمل المعالج. الأرقام الآتية نموذجية للتعليم؛ القيم الفعلية من وثائق المنصة المعروضة.

- **المعطيات:** متحكم يحمل 180 حلقة PID تنفذ كل 500 ms (0.25 ms لكل تنفيذ)، و600 وحدة تحكم منفصلة (محركات وصمامات تشغيل/إيقاف) تنفذ كل 1 s (0.08 ms لكل تنفيذ)، و40 تسلسلًا تنفذ كل 250 ms (0.5 ms لكل تنفيذ). ويستهلك الاتصال والتشخيص نحو 15% من زمن المعالج. والمواصفة تشترط ألا يزيد الحمل عند التسليم على 50%.
- **الحل:** زمن المعالج في الثانية الواحدة:

$$180 \times 2 \times 0.25 = 90 \text{ ms}$$
$$600 \times 1 \times 0.08 = 48 \text{ ms}$$
$$40 \times 4 \times 0.5 = 80 \text{ ms}$$

المجموع 218 ms في كل ثانية، أي 21.8%، ومع الاتصال والتشخيص يصير الحمل نحو **36.8%**.

- **المعنى ميدانيًا:** المتحكم مقبول بهامش؛ لكن لو طُلب تسريع الحلقات الـ180 إلى 250 ms لتضاعف نصيبها إلى 180 ms، ولصار الحمل نحو 45.8%، قريبًا من

الحد، ولبقي هامش التوسعة ضئيلًا. لذلك تُختار سرعة التنفيذ لكل حلقة حسب ديناميكا العملية (حلقة حرارة ثابتها الزمني دقائق لا تحتاج 250 ms)، لا بسرعة واحدة للجميع، ويُسجَّل الحمل المقيس بعد التحميل الكامل في شهادة FAT.

21.3.1 داخل وحدة التحكم المحلية

وحدة التحكم في DCS رفٌّ أو مجموعة وحدات تضم (الشكل 21-2):

- **مصدرا تغذية** مستقلان، لكل منهما مغذٍّ من لوحة توزيع مختلفة ومن UPS مختلف ما أمكن (الفصل 70)، مع مراقبة لكل مصدر؛ فعطل مصدر واحد يجب أن يظهر إنذارًا لا أن يُكتشف يوم يتعطل الثاني.
- **معالجان** أساسي واحتياطي، بينهما وصلة تزامن تنقل حالة الذاكرة (المؤقتات والممسكات ومخارج PID) في كل دورة، فيتسلم الاحتياطي **دون قفزة (Bumpless)** في المخارج.
- **ذاكرة** للبرنامج والبيانات، وبطارية أو ذاكرة غير متطايرة تحفظ البرنامج عند انقطاع التغذية.
- **وحدات اتصال** بشبكة التحكم وشبكات الإدخال والإخراج والحقلية (الفصل 23).
- **رفوف توسعة** أو وحدات إدخال وإخراج بعيدة موصولة بحلقة أو بخطين.

الشكل 21-2: *وحدة تحكم مكررة: مصدرا تغذية من مغذيين مستقلين، ومعالج أساسي واحتياطي بينهما وصلة تزامن، ووحدتا اتصال بشبكتي التحكم A وB، ووصلتان مكررتان إلى رفوف الإدخال والإخراج؛ وفي الأسفل دورة التنفيذ: قراءة الإدخال، ثم تنفيذ الكتل حسب فتراتها، ثم الإخراج، ثم التزامن مع الاحتياطي.*

اختبار التكرار ليس ترفًا: معالج احتياطي «موجود» ولم يُختبر تسلمه منذ سنوات قد يكون بنسخة برنامج ثابت (Firmware) مختلفة، أو غير متزامن منذ آخر تحميل، أو بوحدة اتصال معطلة. ويُختبر التبديل في FAT، ثم في كل توقف رئيسي، بإجراء مكتوب يسجل: زمن التبديل، وهل تحرك أي مخرج، وهل ظهر الإنذار الصحيح (القسم 40.5).

21.4 بنية SCADA: المحطة الرئيسية والوحدات الطرفية والاتصالات

في SCADA تنتقل المسافة من مئات الأمتار إلى مئات الكيلومترات، ويتغير كل شيء معها (الشكل 21-3):

- **المحطة الرئيسية (Master Terminal Unit – MTU)** أو خادم SCADA في مركز التحكم: قاعدة الوسوم، والإنذارات، والشاشات، والمؤرخ.
- **الوحدات الطرفية البعيدة (Remote Terminal Unit – RTU)** أو PLC في كل موقع: تجمع البيانات وتنفذ المنطق المحلي وتحفظ البيانات أثناء انقطاع الرابط.
- **وسائط الاتصال:** ألياف ضوئية، أو راديو، أو شبكة خلوية، أو قمر صناعي، ولكل منها زمن وتكلفة وموثوقية (الفصل 86).
- **البروتوكولات:** Modbus للتطبيقات البسيطة، وDNP3 وIEC 60870-5-104 للمرافق والأنابيب، لأنهما يدعمان الطوابع الزمنية عند المصدر والإبلاغ بالاستثناء.

الشكل 21-3: *نظام SCADA لخط أنابيب: مركز تحكم بخادمين مكررين، ووحدات طرفية في محطات الضخ والصمامات على رابط راديو وألياف، وتحت المخطط دورة الاستطلاع: كل وحدة تُسأل بالدور، فيطول زمن الدورة بعدد الوحدات وبطء الرابط.*

مثال محلول (زمن دورة الاستطلاع):

- **المعطيات:** اثنتا عشرة وحدة طرفية على رابط راديو مشترك، وكل تبادل (طلب ورد) يستغرق 450 ms منها زمن تشغيل المرسل الراديوي، ويُضاف 150 ms فاصل أمان بين الوحدات.
- **الحل:**
  - زمن الدورة = عدد الوحدات × (زمن التبادل + فاصل الأمان) = 12 × (450 + 150) = 7200 ms، أي **7.2 s**.
  - فالتغير الذي يحدث بعد استطلاع وحدته مباشرة يصل إلى المركز بعد 7.2 s في الأسوأ.
- **المعنى ميدانيًا:** هذا مقبول لمراقبة ضغط خط ومستوى خزان، وغير مقبول لحماية أو لإغلاق حلقة عبر الرابط. فالحماية والحلقات تبقى في الوحدة الطرفية نفسها، وإنذار الحدث المهم يُرسل بـ**الإبلاغ غير المطلوب (Unsolicited Reporting)** في DNP3 فور وقوعه دون انتظار دوره، ومعه طابع زمني من الموقع نفسه.

21.5 PLC وDCS وSCADA: متى يُختار كل منها

الحدود بين الثلاثة تضيق: الموردون يضيفون إلى PLC شاشات ومكتبات حلقات، وإلى DCS ربطًا بعيدًا، وإلى SCADA تحكمًا محليًا متقدمًا. لكن القرار في المشروع ما زال يُبنى على أسئلة محددة (الشكل 21-4). ويعطي الجدول في القسم 25.6.3 مقارنة PLC وDCS وSCADA وأنظمة السلامة من منظور وثيقة أساس التصميم، ويعطي القسم 21.5.1 مقارنة SCADA وDCS بعشرة معايير؛ ونضيف هنا جدول القرار العملي:

الشكل 21-4: *شجرة قرار مبسطة لاختيار نوع النظام: المسافة وجودة الرابط أولًا، ثم نسبة التحكم المستمر إلى المنطق المنفصل، ثم حجم المنشأة ومن يشغّلها، ثم التكامل مع باقي الموقع.*

جدول قرار: أي نظام لأي تطبيق؟

التطبيق	الاختيار الغالب	السبب	ما يجب الانتباه له
حزمة ضاغط أو مولد أو وحدة معالجة مياه	PLC ضمن الحزمة	منطق تسلسلي كثيف، ويختبره المورد مع معدته	وثيقة الواجهة مع DCS: ما يمر سلكيًا وما يمر تسلسليًا (القسم 25.7)
مصفاة أو محطة توليد أو مصنع كيماويات	DCS	مئات الحلقات المستمرة، وغرفة تحكم واحدة، وقاعدة بيانات موحدة	سعة المتحكمات والاحتياطي، وتكامل الحزم

التطبيق	الاختيار الغالب	السبب	ما يجب الانتباه له
خط أنابيب أو حقل آبار متباعدة	SCADA مع RTU أو PLC في كل موقع	المسافة والرابط غير المضمون	الاستقلال المحلي عند انقطاع الرابط، والطوابع الزمنية عند المصدر
محطة ضخ صغيرة مستقلة	PLC وشاشة محلية	صغر الحجم وقلة الحلقات	الربط اللاحق بنظام SCADA الخاص بالمرفق
منشأة عملية دفعية (أغذية، أدوية)	DCS بإدارة دفعات أو PLC بطبقة دفعات	الوصفات وسجلات الدفعة وفق ISA-88	المتطلبات التنظيمية للسجلات والتحقق
وظائف السلامة الآلية	نظام سلامة مصنف مستقل	متطلبات IEC 61511	لا يُقبل «DCS بوحدة إضافية» بديلًا عن نظام مستقل مصنف

كيف أختار؟ ابدأ من السؤالين اللذين يفتح بهما الشكل 21-4: هل تتباعد المواقع ورابطها غير مضمون (فالنمط SCADA ومنطق محلي في كل موقع)؟ وهل يغلب التحكم المستمر المترابط في موقع واحد على المنطق المنفصل (فـ DCS)؟ وما كان حزمة أو آلة بمنطق تسلسلي كثيف يبقى في PLC الحزمة ويُربط بوثيقة واجهة. ولا يبين الجدول من سيشغل النظام ويصونه عشرين سنة، ولا ما يفرضه توحيد المنصة مع بقية الموقع، وهذان قد يقلبان الاختيار في منشأة صغيرة داخل مجمع كبير. والخطأ الأكثر كلفة كتابة المواصفة بالاسم التجاري («نريد DCS») بدل المتطلبات: أين يبقى المنطق عند فقد الاتصال، وما زمن الاستجابة لكل وظيفة، وما التوافر المطلوب، ومن يملك الهندسة طوال العمر.

جدول مقارنة: PLC وDCS

المعيار	PLC	DCS
التطبيق الغالب	آلة أو حزمة أو خط تصنيع منفصل (تعبئة، وتجميع، وحزمة ضاغط)	عملية مستمرة على مستوى المصنع (مصفاة، ومحطة توليد، ومصنع كيماويات)

المعيار	PLC	DCS
النطاق	آلة واحدة أو جزء صغير من العملية	آلاف المداخل والمخارج ومتحكمات كثيرة في منشأة كاملة
البنية	وحدة مستقلة غالبًا، والمراقبة بشاشة محلية أو SCADA منفصل	منظومة متكاملة: متحكمات ومحطات تشغيل وهندسة ومؤرخ من مورد واحد
قاعدة البيانات	لكل PLC وسومه، والربط بين الأنظمة يُهندس يدويًا	قاعدة وسوم وإنذارات موحدة للمصنع كله
سرعة التنفيذ	دورة مسح بالملي ثانية تناسب المنطق السريع	دورات تنفيذ نموذجية بين 100 ms وثانية تناسب الحلقات المستمرة
البرمجة	لغات IEC 61131-3، وأشهرها مخطط السلّم	تهيئة بكتل وظيفية جاهزة ومخططات تسلسلية، بمكتبات حلقات قياسية
التكرار	اختياري ويُصمم لكل حالة	أساس في المتحكمات والشبكات والتغذية
الكلفة الأولية	أقل للأنظمة الصغيرة	أعلى، لكنها أوفر في المنشآت الكبيرة لتوحيد الهندسة والتشغيل

والسؤال الحقيقي في المشروع إذن ليس «أيهما أحدث؟»، بل ما يعرضه الشكل 21-4 وجدول القرار السابق: حجم المنشأة، ونسبة التحكم المستمر إلى المنطق المنفصل، ومن سيشغل النظام ويصونه.

21.5.1 *SCADA* و*DCS*: نظامان لمشكلتين مختلفتين

الاسمان يتكرران معًا حتى يُظن أنهما مترادفان أو أن أحدهما أحدث من الآخر، وليس الأمر كذلك: **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition — التحكم الإشرافي وتجميع البيانات)** وُلد لمشكلة المسافة، و**DCS (Distributed Control System — نظام التحكم الموزع)** وُلد لمشكلة عدد الحلقات المستمرة في موقع واحد. ومن هذا الأصل تتفرع كل الفروق العملية بينهما.

جدول مقارنة: SCADA وDCS

المعيار	SCADA	DCS
النشأة والغرض	مراقبة مواقع متباعدة وتجميع بياناتها وإصدار أوامر إشرافية إليها من مركز واحد	استبدال لوحات التحكم التناظرية المركزية بمتحكمات موزعة في موقع واحد لتشغيل مئات الحلقات المستمرة
الامتداد الجغرافي	عشرات إلى آلاف الكيلومترات: محطات ضخ، آبار، خزانات، محطات فرعية، شبكات مياه	داخل المنشأة: غرف أجهزة ميدانية وغرفة تحكم مركزية، مئات الأمتار إلى بضعة كيلومترات
الاتصال وزمن الاستجابة المعتاد	رابط بعيد قد يكون راديو أو خلوي أو قمر صناعي أو ألياف؛ استطلاع دوري بثوانٍ إلى دقائق، وقد يكون بالاستثناء (Report by Exception)	شبكة تحكم محلية مكررة وسريعة؛ تحديث القيم والحلقات بأجزاء من الثانية
أين يقع المنطق	في الوحدة الطرفية البعيدة – RTU (Remote Terminal Unit) أو في PLC محلي في الموقع البعيد؛ المركز يشرف ولا يغلق الحلقات عبر الرابط	في متحكمات موزعة داخل المنشأة على شبكة واحدة، وقاعدة بيانات وهندسة موحدة تجمعها
طبيعة التحكم	مراقبة وتجميع وأوامر إشرافية ونقاط ضبط بعيدة؛ التنظيم المستمر يبقى محليًا	تحكم تنظيمي مستمر هو مهمته الأساسية: PID والتحكم التعاقبي (Cascade) والتتابعي (Sequential) والدفعات (Batch) والتحكم المتقدم
التكرار والتوافرية	تكرار في المركز والرابط غالبًا؛ والموقع البعيد يُصمم ليعمل وحده لأن الرابط غير مضمون	تكرار قياسي في المعالجات والشبكات والتغذية، والتوافرية مطلب تصميمي لأن فقد التحكم يعني إيقاف وحدة

المعيار	SCADA	DCS
قاعدة البيانات والوسوم والهندسة	قاعدة وسوم في المركز، وتهيئة نقاط وخرائط عناوين لكل موقع وبروتوكول (DNP3، Modbus، IEC 60870)؛ عبء التكامل في الخرائط	قاعدة بيانات واحدة شاملة: الوسم يُعرَّف مرة فيظهر في الشاشات والإنذارات والاتجاهات والتقارير
عند انقطاع الاتصال	الموقع يواصل عمله محليًا، والمركز يفقد الرؤية؛ وتُخزَّن البيانات محليًا ثم تُرسَل عند العودة (Store and Forward) بطوابعها الزمنية	حدث غير طبيعي يُعالَج بالتكرار؛ والمتحكم يستمر منفذًا للحلقات، وتفقد محطات التشغيل الرؤية فقط
أمثلة قطاعات	خطوط الأنابيب، حقول الإنتاج، شبكات الكهرباء والمياه والصرف، الغاز المدني، الري	المصافي والبتروكيماويات ومحطات الطاقة ومصانع الكيماويات والورق والإسمنت والأغذية
التقارب اليوم	يضيف تحكمًا محليًا متقدمًا وشاشات وإنذارات ومؤرخًا بمستوى DCS	يضيف ربط مواقع بعيدة وبوابات ومؤرخًا موحدًا ووظائف إشرافية بمستوى SCADA

متى تختار أيًّا منهما؟ المعيار الأول هو المسافة وجودة الرابط. فإذا توزعت العملية على مواقع لا يُضمن الاتصال بها لحظة بلحظة، فالتصميم الصحيح أن يكتفي كل موقع بمنطقه المحلي وأن يكون المركز إشرافيًا، وهذا نمط SCADA أيًّا كان اسم المنتج. وإذا كانت العملية مترابطة كيميائيًا وحراريًا في موقع واحد، بمئات الحلقات التي يؤثر بعضها في بعض، وتحتاج إلى قاعدة بيانات وشاشات وإنذارات موحدة وتوافر عالٍ، فالنمط الصحيح DCS. ولأن المنصات الحديثة تُبنى من المكونات نفسها (متحكمات قياسية، وEthernet صناعي، وOPC UA، ومؤرخ مشترك)، ويقدم المورد الواحد النمطين من منصة واحدة، فلا تُكتب المواصفة بالاسم التجاري («نريد SCADA» أو «نريد DCS») بل بالمتطلبات: أين يبقى المنطق عند فقد الاتصال، وما زمن الاستجابة لكل وظيفة، وما التوافر المطلوب، وكم وسمًا، ومن يملك هندسة النظام طوال عمره (الفصل 25). وتبقى قاعدة واحدة ثابتة:

وظائف الحماية لا تُنفَّذ عبر رابط اتصال بعيد، بل محليًا في نظام سلامة مستقل، ويُرسَل خبرها إلى المركز للعرض فقط (الفصلان 29 و24).

◆ ◆ ◆

21.6 خوادم الإدخال والإخراج والمؤرخ والبوابات والأجهزة الذكية

(أ) خوادم الإدخال والإخراج والبوابات. كل حزمة بـ PLC وكل مرحّل حماية وكل محلل حديث يريد أن يرسل بياناته إلى DCS. وتمر هذه البيانات عبر **بوابة (Gateway)** أو **خادم إدخال وإخراج** يتحدث بروتوكول الحزمة (Modbus TCP أو PROFINET أو IEC 61850 أو OPC UA) من جهة، ولغة DCS من الجهة الأخرى. وقاعدة التصميم: البيانات التسلسلية **للعرض والإشراف**، والأوامر والتعشيقات الحرجة **سلكية**، لأن الرابط التسلسلي يمكن أن ينقطع أو يتجمد دون أن يكتشفه أحد فورًا. ولكل رابط تسلسلي **نبض حياة (Heartbeat)**: عداد يزيد في جهة ويراقبه الطرف الآخر، فإذا توقف عن التغير بضع ثوانٍ أُعلن الرابط معطلًا ووُسمت بياناته بأنها «قديمة» بدل أن تبقى على الشاشة آخر قيمة وكأنها حية.

(ب) المؤرخ (Historian). يسجل قيم الوسوم وأحداثها لسنوات، وهو أداة التشخيص الأولى (الفصل 39) وقاعدة تحسين الأداء (الفصل 112). ولا يسجّل كل قيمة في كل عيّنة، بل يستعمل طريقتين:

1. **الإبلاغ بالاستثناء (Exception Reporting):** لا تُرسل القيمة من المتحكم إلا إذا تغيرت عن آخر قيمة مرسلة بأكثر من المنطقة الميتة المحددة لها.
2. **الضغط (Compression):** من القيم الواصلة لا يُخزن إلا ما يلزم لإعادة رسم المنحنى ضمن سماحية؛ وأشهر الخوارزميات «الباب الدوّار» (Swinging Door) التي تحذف النقاط الواقعة على خط مستقيم تقريبًا بين نقطتين محفوظتين (الشكل 21-5).

الشكل 21-5: *الضغط في المؤرخ: القيم الخام كل ثانية (رمادي)، والنقاط المحفوظة بسماحية 0.5% (أزرق) تعيد رسم المنحنى بفرق لا يتجاوز السماحية؛ وفي الأسفل الخطأ نفسه بسماحية 5%: قمة قصيرة مهمة تختفي من السجل.*

والخطأ الشائع ضبط منطقة ميتة كبيرة «لتوفير المساحة»، فيضيع ما يبحث عنه المهندس بعد الحادثة: قمة ضغط قصيرة أو تذبذب صغير يسبق عطل صمام. والقاعدة: سماحية الضغط لا تزيد على دقة القياس نفسها (نحو 0.1% إلى 0.5% من المدى للمرسلات الجيدة)، والإشارات السريعة المهمة (الاهتزاز، والسرعة، وحلقات منع الانفصال الهوائي (Surge)) تُسجل بمعدل أعلى أو في نظام مخصص.

مثال محلول (سعة المؤرخ):

- **المعطيات:** 5000 وسم، وكل وسم يُسجل في المتوسط قيمة كل 10 s قبل الضغط، وكل قيمة مخزنة تشغل نحو 12 بايت (bytes) مع طابعها الزمني وحالتها، ونسبة الضغط المتوقعة 10:1.
- **الحل:**
  - عدد القيم في اليوم = عدد الوسوم × عدد العيّنات في اليوم = $5000 \times 8640 = 43.2$ مليون قيمة.
  - الحجم اليومي قبل الضغط = $43.2 \times 10^6 \times 12 \approx$ **518 MB/day**.
  - الحجم السنوي قبل الضغط ≈ $518 \times 365 \approx$ **189 GB**.
  - وبعد الضغط بنسبة 10:1 نحو **19 GB** في السنة.
- **المعنى ميدانيًا:** السعة ليست المشكلة؛ فالقرص الحديث يحفظ عشر سنوات من هذا المؤرخ. المشكلة هي ضبط الضغط لكل وسم، والتخزين المؤقت في المتحكمات أو الخوادم حتى لا تضيع البيانات حين ينقطع الاتصال بالمؤرخ، والنسخ الاحتياطي.

(ج) الأجهزة الإلكترونية الذكية (IED). مرحلات حماية المولدات والمحولات، ومحللات جودة القدرة، ومحركات السرعة المتغيرة، وأجهزة إدارة المحركات الذكية. ويُربط أغلبها اليوم بـ IEC 61850 في المحطات الفرعية أو Modbus TCP في مراكز المحركات. وحدود مسؤولية مهندس التحكم فيها واضحة: يقرأ حالتها وقياساتها ويرسل الأوامر المسموحة عبر الواجهة المتفق عليها، ولا يعدّل إعدادات الحماية فيها، فهي مسؤولية مهندس الحماية الكهربائية (الفصل 92).

21.7 غرف التحكم وغرف الأجهزة

جدول: الغرف في منشأة نموذجية ومتطلبات كل منها

الغرفة	ما فيها	متطلبات أساسية	ملاحظة ميدانية
غرفة التحكم المركزية (Central Control Room – CCR)	محطات التشغيل، ولوحة الإيقاف الطارئ، وشاشات العرض الكبيرة، وغرفة المشرف	تصميم مريح للمشغل وفق ISO 11064، ومقاومة الانفجار حسب دراسة موقع المبنى (API RP 752)، وإضاءة وضجيج مناسبان	تُبعد عن مناطق الخطر بدراسة، ولا يوضع فيها ما لا يلزم المشغل
غرفة الأجهزة الميدانية (Local Equipment Room أو Remote Instrument Enclosure)	متحكمات DCS وSIS وF&G، وخزائن التجميع، وتوزيع التغذية	تكييف بضغط موجب، وكشف غاز على مدخل الهواء يغلق المخمدات، وكشف حريق وإطفاء نظيف	قريبة من الوحدة لتقصير الكابلات، ومحمية من الانفجار أو بعيدة بما يكفي
غرفة الخوادم والشبكات	الخوادم، والمبدلات، والجدران النارية	تحكم بالدخول، وتغذية مكررة، وتبريد مستقل	فصلها عن غرفة التحكم يحد من الدخول غير المصرح به
غرفة المحطة الكهربائية الفرعية	مراكز المحركات، ولوحات الجهد المتوسط، وIED	حسب المواصفات الكهربائية	الواجهة مع DCS عبر خزائن واجهة مخصصة
غرفة الهندسة	محطات الهندسة ومحطة التدريب	تحكم بالدخول، وعزل شبكي عن المكاتب	أخطر نقطة أمنية بعد الوصول البعيد (الفصل 24)

الشكل 21-6: *توزيع الغرف في وحدة نموذجية: غرفة أجهزة ميدانية قرب الوحدة تستقبل الكابلات الميدانية وتحوي المتحكمات، وألياف ضوئية مكررة بمسارين مختلفين إلى غرفة التحكم المركزية في مبنى بعيد عن الخطر، ومدخل هواء الغرفة الميدانية بكاشفات غاز تغلق المخمدات.*

بيئة الغرفة تحدد عمر العتاد. الإلكترونيات في غرفة يدخلها هواء فيه كبريتيد الهيدروجين أو أملاح بحرية تتآكل وصلاتها النحاسية والفضية، فتظهر أعطال متقطعة بعد سنوات قليلة. وتصنف المواصفة ISA-71.04 شدة البيئة من G1 (خفيفة) إلى GX (شديدة جدًا) بقياس معدل التآكل على قسائم نحاس وفضة، والهدف لغرف التحكم G1. والعلاج: تكييف بضغط موجب وترشيح كيميائي لمدخل الهواء، وسد مداخل الكابلات، ومراقبة دورية بالقسائم.

أما ما يُعرض على شاشات غرفة التحكم، وكيف تُبنى هرميتها وملاحتها وإنذاراتها، فموضوع الفصل 22.

21.8 التكرار والتوافر في DCS

التكرار يُصرف حيث يمنع أكبر خسارة، لا بالتساوي على كل شيء. والترتيب المعتاد للأولوية: التغذية، ثم المتحكمات، ثم شبكة التحكم، ثم الإدخال والإخراج للحلقات الحرجة، ثم الخوادم، ثم محطات التشغيل.

جدول مقارنة: مستويات التكرار في DCS

العنصر	بلا تكرار	تكرار نموذجي	ما يحميه التكرار	ما لا يحميه
التغذية	مصدر واحد	مصدران من مغذيين و UPS مختلفين	عطل مصدر أو مغذٍّ	عطل مشترك في لوحة التوزيع الواحدة
المتحكم	معالج واحد	أساسي واحتياطي متزامنان	عطل معالج أو ذاكرة	خطأ في البرنامج (ينتقل إلى الاحتياطي معه)
شبكة التحكم	شبكة واحدة	شبكتان A وB بمبدلات ومسارات مستقلة	عطل مبدل أو كابل	عاصفة بث تصل إلى الشبكتين معًا (21.12)
الإدخال والإخراج	بطاقة واحدة	بطاقتان للحلقات الحرجة، أو مرسلان على بطاقتين	عطل بطاقة	عطل المرسل الواحد إذا لم يُكرر
الخوادم	خادم واحد	زوج بتبديل آلي	عطل خادم	خطأ في قاعدة البيانات يُنسخ إلى الاثنين
محطات التشغيل	محطة لكل منطقة	محطتان تريان كل منطقة	عطل محطة	انقطاع شبكة التحكم

كيف أختار؟ اصرف التكرار بترتيب الخسارة التي يمنعها: التغذية ثم المتحكم ثم شبكة التحكم ثم الإدخال والإخراج للحلقات الحرجة، ثم الخوادم والمحطات؛ وكرر بطاقة الإدخال والإخراج حيث يوقف عطلها وحدة كاملة، لا لكل حلقة. ويقول عمود «ما لا يحميه» نصف الحقيقة فقط: الاحتياطي الذي لا يُراقب تزامنه ولا يُختبر تبديله فشلٌ

خامل يلغي أرقام التوافر كلها، والجدول لا يظهر ذلك. والخطأ الأكثر كلفة تكرار المتحكم والشبكة ثم تغذية الزوج من لوحة توزيع واحدة، أو وصل جهاز واحد بالشبكتين معًا، فيصير السبب المشترك أقوى من كل التكرار الذي دُفع ثمنه.

مثال محلول (أثر تكرار المتحكم في التوافر): متحكم متوسط الزمن بين أعطاله 150,000 h (MTBF)، ومتوسط زمن الإصلاح 8 h (MTTR).

- **بلا تكرار:**
  - التوافر = MTBF ÷ (MTBF + MTTR) = 150,000 ÷ 150,008 ≈ **0.999947**.
  - عدم التوافر ≈ 0.000053، أي توقف متوقع في السنة × 8760 h ≈ 0.47 h، نحو 28 دقيقة.
- **مع تكرار:** لا يتوقف التحكم إلا إذا فشل الثاني أثناء إصلاح الأول.
  - معدل الفشل λ = 1 ÷ MTBF = 1 ÷ 150,000 لكل ساعة.
  - التقريب المعتاد لعدم التوافر لنظام مكرر 1oo2 بفريق إصلاح واحد = 2 × (λ × MTTR)²، وبإصلاح مستقل لكل وحدة (λ × MTTR)².
  - عدم التوافر = 2 × (8 ÷ 150,000)² ≈ **5.7 × 10⁻⁹**، وهي أقل من ثانية في السنة.
- **المعنى ميدانيًا:** التحسن هائل على الورق، لكنه يفترض أن الاحتياطي سليم وقت الحاجة. والاحتياطي الذي لا يُراقب ولا يُختبر يصير «فشلًا خاملًا» يلغي هذه الأرقام، وأعطال السبب المشترك (برنامج، تغذية مشتركة، حرارة الغرفة) تبقى بلا حماية (الفصل 72).

21.9 دراسة معمارية DCS تجارية

تتشابه معماريات الموردين الكبار في جوهرها وتختلف في الأسماء. ونأخذ مثالًا لذلك المعمارية الشائعة في منظومات Siemens (SIMATIC PCS 7)، لأن مفاهيمها تتكرر عند غيرها:

- **محطات التشغيل (Operator Station – OS):** خوادم OS مكررة تحمل قاعدة بيانات العرض والإنذارات والأرشيف القصير، وعملاء OS هم الشاشات أمام المشغلين.
- **محطة الهندسة (Engineering Station – ES):** مشروع واحد تُهيأ منه المتحكمات والشاشات والشبكات.
- **أنظمة الأتمتة (Automation System – AS):** متحكمات قياسية، أو مكررة (H)، أو آمنة مصنفة للسلامة (F)، أو آمنة ومكررة معًا (FH).
- **الإدخال والإخراج الموزع** عبر PROFIBUS DP أو PROFINET إلى محطات بعيدة، و**روابط إلى PROFIBUS PA** للأجهزة الميدانية الرقمية المغذاة من الشبكة (الفصل 23).

جدول مقارنة: المفاهيم نفسها عند موردي DCS الشائعين

المفهوم	Siemens PCS 7	Emerson DeltaV	Honeywell Experion PKS
المتحكم	AS (مثل AS 410)	Controller (MQ، MX، PK)	C300
أداة الهندسة	SIMATIC Manager مع CFC وSFC	DeltaV Explorer و Control Studio	Control Builder
وحدة التحكم الأساسية	مخطط CFC	Control Module	Control Module

المفهوم	Siemens PCS 7	Emerson DeltaV	Honeywell Experion PKS
مجال الاستخدام الغالب	العمليات والتصنيع	العمليات والأدوية	المصافي والبتروكيماويات

جدول مقارنة: المفاهيم نفسها عند موردي DCS الشائعين (تابع)

المفهوم	Yokogawa CENTUM VP	ABB 800xA	Emerson Ovation
المتحكم	FCS (Field Control Station)	AC 800M	Ovation Controller
أداة الهندسة	System View والبنّاءات	Control Builder M	Developer Studio
وحدة التحكم الأساسية	Function Block في Drawing	Control Module أو Function Diagram	Control Sheet
مجال الاستخدام الغالب	المصافي والكيماويات والغاز	العمليات والطاقة والتعدين	محطات التوليد والمياه

ملاحظة: الأسماء والطرازات تتغير بين الإصدارات؛ الجدول لتسهيل الانتقال بين المنصات، والمرجع دائمًا وثائق الإصدار المركب في الموقع.

21.10 التشغيل اليومي والصيانة

خطوات فحص يومي لنظام DCS (في جولة مهندس النظام):

1. شاشة تشخيص النظام: أي متحكم أو خادم أو محطة بإنذار؟ وهل كل الأزواج المكررة متزامنة؟
2. حمل المتحكمات وأطول دورة تنفيذ منذ أمس؛ أي قفزة تستحق سؤالًا: هل حُمّل تعديل؟
3. حالة الشبكتين A وB: أي منفذ معطل أو حمل غير عادي؟

4. الروابط التسلسلية ونبضات الحياة: أي رابط «قديم البيانات»؟
5. مصادر التغذية وUPS والبطاريات: أي مصدر مفرد يعمل وشريكه معطل؟
6. حرارة الغرف ورطوبتها ومرشحات الهواء.
7. سجل الفروض والتجاوزات القائمة (الفصل 83) وهل لها تصاريح سارية.
8. سجل الأحداث: تعديلات حُمّلت، وتسجيلات دخول غير معتادة.

الاستبدال أثناء التشغيل. أغلب وحدات DCS تُستبدل وهي تعمل (Hot Swap): بطاقة إدخال وإخراج، أو معالج احتياطي، أو مصدر تغذية مكرر. والشروط: ارتداء سوار التفريغ الكهروستاتيكي وتأريضه قبل لمس أي وحدة؛ والتأكد من أن الوحدة المستبدلة هي الاحتياطية لا العاملة (وأكثر أخطاء الصيانة كلفةً هو سحب المعالج العامل)؛ ومطابقة طراز الوحدة الجديدة ونسخة برنامجها الثابت؛ وإبلاغ المشغل بالحلقات المتأثرة ووضعها في الوضع اليدوي إن لزم.

انقطاع التغذية وعودتها. يُختبر في FAT ويُكتب في إجراء: ماذا يحدث للمخارج عند فقد تغذية المتحكمين، وفي أي ترتيب تعود الأنظمة، وهل تعود الحلقات في الوضع اليدوي (الأصح غالبًا) أم في آخر وضع، وهل تحتاج التسلسلات إعادة ضبط. وأخطر ما يُكتشف متأخرًا نظام يعيد تشغيل المعدات وحده بعد عودة التغذية (الحالة في القسم 19.12).

النسخ الاحتياطي وإدارة التغيير. نسخة كاملة من قاعدة بيانات المشروع وبرامج المتحكمات بعد كل تعديل معتمد، ونسخة دورية تُحفظ خارج الموقع، واختبار استعادة سنوي على نظام اختبار؛ فالنسخة التي لم تُجرَّب استعادتها قط ليست نسخة (القسم 24.6). وكل تعديل على المتحكمات يمر بإدارة التغيير ويُسجل (الفصل 85).

21.11 مشروع الكتاب المتصل: نظام التحكم لوحدة ضغط الغاز

في الوحدة التي تتبعها أمثلة الكتاب (وعاء الشفط V-101، والضاغط K-201، والمبرد الهوائي E-102، ومضختا التصريف P-101 وP-102) يتوزع التحكم على أربعة أنظمة (الشكل 21-7):

جدول: توزيع الإشارات على الأنظمة

النظام	ما ينفذه	إشارات نموذجية	الربط بـ DCS
DCS (متحكم مكرر في غرفة الأجهزة الميدانية)	حلقات LIC-101 وPIC-102 والتحكم بأداء الضاغط، والإنذارات، والعرض	46 مدخلًا تناظريًا، و18 مخرجًا تناظريًا، و64 مدخلًا منفصلًا، و32 مخرجًا منفصلًا	—
حزمة PLC الضاغط (مع حماية الآلة API 670)	تسلسل البدء والإيقاف، وأنظمة الزيت والسدادات، ومنع الانفصال الهوائي (Surge)، ومنطق المضختين (19.11)	نحو 180 نقطة داخل الحزمة	Modbus TCP مكرر للعرض والحالة؛ وأوامر البدء والإيقاف والإيقاف العام سلكية
SIS	الفصل LZT-103 وPZT-104، وعزل الوحدة ESD-2	12 مدخلًا، و8 مخارج إلى SDV وBDV	قراءة فقط عبر بوابة؛ لا كتابة من DCS إلا ما تسمح به فلسفة السلامة صراحةً (كطلب إعادة الضبط)
F&G	كاشفات الغاز واللهب ومصفوفة القسم 30.13	16 كاشفًا، و10 مخارج	قراءة فقط؛ الأوامر إلى ESD سلكية

مثال محلول (عدد القنوات والاحتياطي): مداخل DCS التناظرية 46، والبطاقة 16 قناة، والمواصفة تطلب 20% احتياطيًا مركبًا (القسم 25.12.2).

- **الحل:** القنوات المطلوبة = المستعمل × 1.2، وعدد البطاقات = المطلوب ÷ قنوات البطاقة مقربًا إلى الأعلى:
  - المداخل التناظرية: 46 × 1.2 = 55.2، أي 56 قناة.
  - 56 ÷ 16 = 3.5، فتُركب **4 بطاقات** (64 قناة).
  - الاحتياطي الفعلي = 64 − 46 = 18 قناة، أي 39% من المستعمل.
  - المخارج التناظرية: 18 × 1.2 = 21.6، أي 22 قناة على بطاقات 8 قنوات، فتُركب **3 بطاقات** (24 قناة).
  - ويبقى فراغ في الخزانة لبطاقتين إضافيتين من كل نوع وفق فلسفة الفراغ الاحتياطي (القسم 25.12.3).
- **المعنى ميدانيًا:** الاحتياطي يُحسب لكل نوع إشارة ولكل منطقة أمان جوهري على حدة، لا على المجموع؛ فبطاقة احتياطية من نوع خاطئ لا تفيد يوم تُضاف إشارة.

الشكل 21-7: *معمارية التحكم لوحدة ضغط الغاز: DCS للحلقات والعرض، وPLC الحزمة للضاغط ومضختيه برابط تسلسلي مكرر للعرض وأسلاك مباشرة للأوامر الحرجة، وSIS وF&G مستقلان يرسلان حالتهما للعرض فقط، والإيقاف الطارئ سلكي من SIS إلى كل الأنظمة.*

21.12 حالة ميدانية: الشاشات تجمدت والمصنع يعمل

مثال تعليمي مركّب.

- **العَرَض:** في وحدة معالجة غاز، تجمدت كل شاشات غرفة التحكم فجأة: القيم ثابتة، والإنذارات لا تظهر، والأوامر لا تُنفذ. بعد نحو ثلاث دقائق عادت الشاشات وحدها، ثم تكرر الأمر مرتين خلال ساعة. لم تتوقف الوحدة، والمنحنيات في المؤرخ بعد العودة أظهرت أن الحلقات بقيت تعمل طوال الفترة.
- **الفرضيات:** (1) عطل في خادم العرض؛ (2) فيروس أو هجوم على الشبكة؛ (3) عطل في مبدل الشبكة؛ (4) حمل زائد على شبكة التحكم.
- **الفحوص:** الخادمان المكرران كلاهما «يعمل» لكن اتصالهما بالمتحكمات منقطع أثناء الحدث (وهذا يستبعد الفرضية 1 سببًا وحيدًا). مؤشرات

المبدلات في الشبكتين A وB تومض بسرعة غير عادية في الوقت نفسه، ومعدل الحزم على منافذها قفز إلى أضعاف المعتاد، وأغلبها حزم بث (Broadcast). لا برمجية غريبة على المحطات.

- **الدليل الحاسم:** حاسوب محمول لمهندس مورد حزمة وُصل صباحًا في غرفة الأجهزة لتشخيص PLC الحزمة، وفيه منفذا شبكة: واحد وُصل بالشبكة A وآخر بالشبكة B «ليرى الاثنتين»، وخاصية الجسر (Bridging) بين المنفذين مفعلة في نظام تشغيله. ولأن الشبكتين في هذه المعمارية تلتقيان أصلًا عند المبدلات العلوية، صار الجسر مسارًا ثانيًا يغلق حلقة، فتدور حزم البث فيها وتتكاثر حتى تُشبع الشبكتين معًا. (وفي معمارية تكون فيها الشبكتان منفصلتين تمامًا يدمجهما الجسر في مجال بث واحد، فتظهر حزم مكررة وتضطرب جداول المبدلات، والنتيجة قريبة.) وكلما أُعيد تشغيل الحاسوب أو فُصل أحد كابليه هدأت الشبكة.
- **السبب الجذري:** غياب ضبط منافذ المبدلات (منافذ غير مستعملة مفعلة، ولا تحديد لعناوين الأجهزة المسموح بها، ولا حماية من العواصف)، وغياب إجراء لتوصيل أجهزة الموردين، ووصل جهاز واحد بالشبكتين المكررتين معًا فأصبح مصدر عطل مشترك لما صُمم ليكون مستقلًا.
- **الإجراء والدرس:** إقفال المنافذ غير المستعملة، وتفعيل حماية العواصف ومنع الحلقات في المبدلات، ومنافذ صيانة مخصصة في منطقة معزولة لأجهزة الموردين بعد فحصها (الفصل 24)، ومنع وصل أي جهاز بالشبكتين معًا. والدرس المزدوج: معمارية DCS أنقذت الوحدة لأن الحلقات مغلقة في المتحكمات لا في الشاشات، والتكرار لا يحمي من سبب مشترك يصيب الفرعين معًا.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويفحص
المعمارية والعرض	نوع النظام، ومستوى التكرار لكل عنصر، وحمل المتحكمات، والاحتياطي المركب لكل نوع إشارة	يطابق البطاقات والقنوات المركبة مع قائمة الإدخال والإخراج، ويسجل الاحتياطي الفعلي
الربط بالحزم والأنظمة	ما يمر سلكيًا وما يمر تسلسليًا، ونبض الحياة وسلوك فقد الرابط	يفصل الرابط في الاختبار ويتحقق من ظهور حالة «بيانات قديمة» والإنذار
التكرار	إجراء اختبار التبديل ومعايير قبوله	ينفذ التبديل في FAT وفي التوقفات، ويسجل زمنه وحركة المخارج
الصيانة اليومية	قائمة الفحص اليومي، وحدود الحمل والحرارة	يجري الجولة، ويستبدل الوحدة الاحتياطية وهي تعمل بعد التحقق من المؤشرات وارتداء سوار التفريغ
المؤرخ والنسخ	سماحية الضغط لكل وسم، وسياسة النسخ الاحتياطي	يأخذ النسخة بعد كل تعديل معتمد، ويشارك في اختبار الاستعادة السنوي

21.13 الأخطاء الشائعة

- اعتبار الشاشة جزءًا من الحلقة: إغلاق حلقة عبر خادم أو محطة تشغيل أو رابط SCADA بطيء.
- تنفيذ الأوامر والتعشيقات الحرجة بين الحزم وDCS عبر الرابط التسلسلي وحده، دون نبض حياة ودون سلك مباشر.
- تسريع كل الحلقات إلى أعلى معدل «احتياطًا» فيمتلئ المتحكم دون فائدة.
- ترك المعالج الاحتياطي بلا مراقبة لتزامنه وبلا اختبار دوري للتبديل.

- وصل جهاز واحد بالشبكتين المكررتين معًا، أو ترك منافذ المبدلات مفتوحة لأي جهاز.
- ضبط منطقة ميتة كبيرة للمؤرخ فتضيع القمم القصيرة التي يحتاجها تحليل الحوادث.
- حساب الاحتياطي على مجموع الإشارات لا لكل نوع ولكل منطقة أمان جوهري.
- تشغيل غرفة أجهزة بلا ضغط موجب ولا ترشيح في بيئة كبريتية أو بحرية، ثم مطاردة أعطال متقطعة لسنوات.
- الاعتماد على DCS «بوحدة إضافية» لتنفيذ وظائف سلامة مصنفة بدل نظام مستقل.
- تعديل إعدادات أجهزة الحماية الكهربائية الذكية من DCS لأن الواجهة تسمح بذلك تقنيًا.
- سحب المعالج العامل بدل الاحتياطي أثناء الصيانة لعدم التحقق من المؤشرات.
- نسخ احتياطية لم تُختبر استعادتها قط.

21.14 ملخص

أنظمة التحكم الصناعية مكونات بعضها في مسار التحكم (الحساس، والمتحكم، والمشغل) وبعضها في مسار العرض والإشراف (الشاشات، والخوادم، والمؤرخ)، والحلقة تُغلق في المتحكم لا في الشاشة. وDCS متحكمات موزعة مكررة على شبكة مكررة مع محطات تشغيل وهندسة وخوادم وقاعدة بيانات موحدة، ويُحكم على عرض المورد بحمل المتحكمات والاحتياطي المركب لكل نوع إشارة والتكرار المختبر. وSCADA يشرف عبر المسافة، ويُبقي الحماية والحلقات في الوحدة الطرفية، ويعتمد على الإبلاغ بالاستثناء والطوابع الزمنية عند المصدر. والاختيار بين PLC وDCS وSCADA تحكمه المسافة ونوع التحكم وحجم المنشأة، ووظائف السلامة دائمًا في نظام مستقل. والمؤرخ يُضبط ضغطه بسماحية لا تزيد على دقة القياس، والروابط التسلسلية تحتاج نبض حياة، والغرف تحتاج

بيئة نظيفة. والتكرار يحمي من الأعطال المستقلة فقط، فيبقى الانضباط في الشبكة والصيانة وإدارة التغيير هو ما يحمي من السبب المشترك.

وفي الفصل التالي: الفصل 22 «واجهات التشغيل وإدارة الإنذارات»، لأن كل ما في هذه المعمارية يصل إلى المشغّل عبر الشاشات والإنذارات، وجودة هذا الحدّ هي ما يقرر هل يرى المشغّل الانحراف في وقته.

21.15 أسئلة التقييم الذاتي

1. عدّد ستة من مكونات ICS وفق NIST SP 800-82، وصنف كلًّا منها في مسار التحكم أو مسار العرض والإشراف.
2. متحكم يحمل 120 حلقة PID تنفذ كل 1 s (0.3 ms للتنفيذ)، و400 وحدة منفصلة كل 500 ms (0.1 ms)، والاتصال يستهلك 12%. ما الحمل؟ وماذا يصير لو نُقلت الحلقات كلها إلى 250 ms؟
3. لماذا يتسلم المعالج الاحتياطي دون قفزة في المخارج؟ وما الذي يجعل هذا التسلم يفشل في الواقع؟ اذكر ثلاثة أسباب.
4. ثماني عشرة وحدة طرفية على رابط مشترك، وكل تبادل 300 ms مع 100 ms فاصل. احسب زمن دورة الاستطلاع، واقترح طريقتين لجعل إنذار حدث مهم يصل أسرع.
5. قارن بين PLC وDCS وSCADA لتطبيقين: محطة ضخ مياه في مدينة، وحقل من أربعين بئرًا متباعدة.
6. ما نبض الحياة في الرابط التسلسلي؟ وماذا يحدث على الشاشة إذا غاب وتجمد الرابط؟
7. مؤرخ بـ 8000 وسم، وقيمة كل 5 s، و12 بايت (bytes) لكل قيمة، وضغط 8:1. احسب السعة السنوية قبل الضغط وبعده.

8. لماذا لا تُضبط سماحية ضغط المؤرخ على 5% من المدى لحلقة ضغط ضاغط؟ أعط مثالًا لما قد يضيع.

9. متحكم متوسط الزمن بين أعطاله 200,000 h (MTBF) ومتوسط زمن إصلاحه 12 h (MTTR). احسب عدم التوافر بلا تكرار ومع تكرار (بالتقريب في 21.8)، وبيّن ما لا يحميه التكرار.

10. في الحالة الميدانية 21.12، لماذا بقيت الوحدة تعمل؟ ولماذا لم يحمها وجود شبكتين مكررتين من فقد الرؤية؟

مراجع الفصل: R5 (عرض أنظمة التحكم الصناعية: مكونات ICS ومناطق التشغيل وPLC و SCADA وDCS)؛ R21 (Maher، ندوة DCS وESD: معمارية PCS 7 والتكرار والإدخال والإخراج الموزع)؛ R22 (عرض نظام تحكم موزع لمحطات الطاقة: المفاهيم العامة فقط)؛ R23 (El Ahrache، أساسيات DCS: وحدة التحكم المحلية ودورة المسح والصيانة اليومية)؛ R13 (Shardt: هرم الأتمتة)؛ R1؛ وخبرة المؤلف في أنظمة Ovation وMark VIe ومحطات الدورة المركبة والمنصات البحرية (R18). المواصفات والوثائق: NIST SP 800-82 Rev. 3 (2023)، وANSI/ISA-95، وIEC 62443 (الفصل 24)، وEEMUA 191 (أنظمة الإنذار)، وISO 11064 (تصميم غرف التحكم)، وAPI RP 752 (موقع المباني في المنشآت)، وANSI/ISA-71.04 (بيئة المعدات الإلكترونية)، وIEC 61850 وIEEE DNP3 (1815 وIEC 60870-5-104 (الاتصالات)؛ وISA-101 وEEMUA 201 وR74 (تصميم شاشات التشغيل، 22.2)؛ وR69 (مقارنة PLC وDCS).

الفصل 22: واجهات التشغيل وإدارة الإنذارات

> **لمن هذا الفصل:** لمهندس التحكم الذي يصمم شاشات التشغيل أو يراجعها في مشروع، ولمهندس التشغيل الذي يكتب فلسفة الإنذار أو يرشّد إنذارات وحدة قائمة، ولكل من يقف أمام شاشة تمتلئ بالإنذارات في لحظة اضطراب.
>
> **الفكرة الأساسية:** الواجهة والإنذار وجهان لموضوع واحد: كيف يعرف المشغّل ما يحدث، وماذا يُطلب منه أن يفعل، وفي أي زمن. فالشاشة الجيدة تُظهر الانحراف قبل أن يصير إنذارًا، والإنذار الجيد يطلب فعلًا محددًا لا مجرد انتباه. ويجمع هذا الفصل ما يلزم لذلك: ما الواجهة وما صلاحياتها، وكيف تُصمم الشاشات وهرميتها وملاحتها، وكيف تُدار الإنذارات وتُقاس جودتها.

22.1 واجهة الإنسان والآلة (HMI): ما يراه المشغّل وبأي صلاحية

واجهة الإنسان والآلة (Human–Machine Interface — HMI): واجهة رسومية تمكّن المشغّل من مراقبة العملية الصناعية والتفاعل مع نظام التحكم. وتُسمى في الميدان أيضًا **واجهة المشغّل**، وفي الوثائق القديمة MMI (Man–Machine Interface).

وسبب التسمية أنها ليست «شاشة» بل **حدّ (Interface)** بين طرفين: كل ما يعبر من الآلة إلى الإنسان (قيمة، حالة، إنذار، اتجاه) وكل ما يعبر من الإنسان إلى الآلة (أمر، نقطة ضبط، تبديل وضع، إقرار إنذار) يمر عبر هذا الحدّ. ولذلك تُقاس جودتها بما تنقله في اللحظة الحرجة لا بجمالها: إن احتاج المشغّل ثلاثين ثانية ليعرف أي وحدة هي المضطربة، فالواجهة فاشلة مهما كانت أنيقة. وموقعها في هرم القسم 3.4 هو المستوى 2؛ أما المنطق

نفسه فيبقى في المستوى 1، ولهذا تستمر الوحدة في العمل إذا تجمدت الشاشة أو انطفأت (الحالة الميدانية في القسم 21.12).

وللواجهة شكلان لا يُخلط بينهما:

جدول مقارنة: اللوحة المحلية (Panel HMI) ومحطة المشغّل (Operator Workstation)

المعيار	لوحة محلية على المعدة	محطة المشغّل في غرفة التحكم
المكان	على اللوحة أو الحزمة أو قرب الآلة، غالبًا في منطقة تشغيل	منصة في غرفة تحكم مركزية أو محلية
النطاق	معدة واحدة أو حزمة واحدة	الوحدة كاملة أو عدة وحدات، بمئات إلى آلاف النقاط
من يستخدمها	مشغّل ميداني أو فني صيانة أثناء البدء والاختبار	مشغّل غرفة التحكم على مدار الورديات
الشاشات	شاشة لمس واحدة 7 إلى 15 بوصة، صفحات قليلة	عدة شاشات لكل منصة، تدرّج صفحات كامل
الاتجاهات والأرشفة	ساعات قليلة في ذاكرة محلية، وقد لا توجد	من المؤرخ: شهور وسنوات
ما يُسمح منها	تشغيل المعدة وأوضاعها محليًا، وإقرار إنذاراتها	التشغيل الكامل ونقاط الضبط والأوضاع لكل الوحدة
ما يجب ألا يكون فيها	منطق مستقل يخالف ما في غرفة التحكم، ولا تحجيم مختلف للقيمة نفسها	أوامر تتجاوز مفتاح «محلي/بعيد» على المعدة
نقطة الضعف الشائعة	البيئة: حرارة وغبار واهتزاز وشمس مباشرة على الشاشة	بُعد المشغّل عن المعدة؛ لا يرى ولا يسمع ولا يشمّ

كيف أختار؟ ضع على اللوحة المحلية ما يحتاجه من يقف عند المعدة أثناء البدء والاختبار والصيانة: حالاتها وأوضاعها وإنذاراتها وأوامرها المحلية، وليس أكثر؛ واجعل كل ما يخص

الوحدة ككل ونقاط الضبط والاتجاهات الطويلة في محطة المشغّل. ولا يبين الجدول مصدر القيمة المعروضة في المكانين: يجب أن تأتي من الوسم نفسه بالتحجيم نفسه، وإلا تجادل فريق الميدان وفريق الغرفة في رقم. والخطأ الأكثر كلفة تحويل اللوحة المحلية إلى غرفة تحكم صغيرة تملك أوامر تؤثر في الوحدة كلها، فيبدأ المشغّل الميداني مضخة دون أن يرى الوعاء الذي تصب فيه ولا الإنذارات التي تراها الغرفة.

والقاعدة الحاكمة بينهما هي **مفتاح الاختيار محلي/بعيد (Local/Remote)**: مكان واحد فقط يملك الأمر في اللحظة الواحدة، وحالة المفتاح تظهر على الشاشتين معًا، وإلا حدث ما يتكرر في كل مشروع: مشغّل في الميدان يبدّل وضع مضخة ومشغّل في غرفة التحكم يبدّله عكسيًا في الدقيقة نفسها.

ما يعرضه المشغّل فعلًا. ستة أنواع من المحتوى، وكلها مطلوبة معًا لا يغني بعضها عن بعض:

- **المخطط النسقي (Mimic / Graphic):** رسم مبسّط للوحدة بخطوطها ومعداتها، عليه القيم الحية وحالات المعدات. وهو رسم وظيفي لا رسم هندسي: يتبع منطق التشغيل لا مقياس الرسم ولا موقع المعدة على الأرض.
- **قيم القياس وحالات المعدات:** الرقم مع وحدته، والحالة (يعمل / متوقف / جاهز / معطّل / في الصيانة)، وموضع الصمام من التغذية الراجعة لا من الأمر، وحالة جودة القيمة (القسم 3.5) ظاهرة بعلامة لا بلون وحده.
- **الاتجاهات (Trends):** منحنى القيمة مع الزمن. وهي ما يحوّل الرقم إلى معنى: 92 °C ثابتة منذ ساعتين شيء، و92 °C صاعدة بدرجتين في الدقيقة شيء آخر تمامًا. ويجب أن تُفتح الاتجاهات من الشاشة نفسها بنقرة على القيمة، لا بالانتقال إلى برنامج آخر.
- **قائمة الإنذارات:** الإنذارات القائمة مرتبة بالأولوية ثم بالزمن، مع حالة كل منها (جديد، مُقرّ، عاد إلى الطبيعي، معلّق/مثبّط).

- **سجل الأحداث:** كل ما جرى بترتيبه الزمني: إنذارات، وتغيّر حالات، وأوامر المشغّل، وأحداث النظام. وهو أول ما يُقرأ بعد أي فصل، ولا قيمة له بلا مزامنة ساعات بين الأنظمة (الفصلان 25 و23).
- **صفحة الحلقة (Faceplate):** النافذة القياسية لحلقة واحدة، وتضم: القيمة المقاسة (PV) ونقطة الضبط (SP) وخرج المتحكم (OP) بالنِّسَب أو بالوحدات الهندسية، ووضع الحلقة (يدوي / آلي / تعاقبي (Cascade) / بعيد)، وحدود الخرج، ومنحنى مصغّر لآخر فترة، وحدود الإنذار، ومعاملات الضبط (تُعرض للجميع وتُعدَّل بصلاحية هندسة فقط). وقراءة هذه النافذة الواحدة هي أول مهارة يتعلمها المهندس الجديد في غرفة التحكم: فكون الوضع يدويًا والخرج ثابتًا عند 100% منذ ثلاثة أيام معلومةٌ أهم من كل الأرقام حولها.

الشكل 22-1: *صفحة الحلقة (Faceplate) وعناصرها: القيمة المقاسة (PV) ونقطة الضبط (SP) وخرج المتحكم (OP)، ووضع الحلقة، وحدود الإنذار والخرج، والمنحنى المصغّر (Sparkline)، وعلامة جودة القيمة، ومعاملات الضبط المقفلة؛ في مثال حلقة متروكة في الوضع اليدوي وخرجها مشبع عند 100% منذ ثلاثة أيام (الوسم توضيحي).*

الصلاحيات ومستويات الدخول. واجهة التشغيل من الواجهات القليلة في المنشأة التي يستخدمها أشخاص بمهام مختلفة على الجهاز نفسه، فتُقسَّم الصلاحية ثلاثة مستويات على الأقل:

المستوى	من	ما يستطيع	ما لا يستطيع
مشاهدة (View)	زائر، مهندس عمليات، إدارة، شاشة عرض في مكتب	فتح كل الشاشات والاتجاهات والسجلات	أي أمر أو تغيير، ولو إقرار إنذار
تشغيل (Operate)	مشغّل غرفة التحكم في ورديته	نقاط الضبط داخل مدى مسموح، وأوضاع الحلقات، وأوامر التشغيل والإيقاف، وإقرار الإنذارات	حدود الإنذار، ومعاملات الضبط، والمديات، والتحجيم، وأي منطق
هندسة (Engineer)	مهندس التحكم المخوَّل، وبإجراء إدارة تغيير	معاملات الضبط، وحدود الإنذار، والتحجيم، والشاشات، والمنطق	تجاوز ما تمنعه إدارة التغيير أو فلسفة السلامة؛ والعمل بحساب مشترك

وثلاث قواعد تجعل هذا التقسيم حقيقيًا لا اسمًا في وثيقة:

1. **قفل المعاملات الحرجة (Parameter Locking):** كل معامل يغيّر معنى القياس أو حدوده يُقفل على مستوى الهندسة: مدى المرسل وتحجيمه، وزمن المرشح، وحدود الإنذار، وحدود الخرج، وثوابت الحساب (الكثافة، معامل الفتحة، معامل التحويل). فتغيير مدى مرسل من محطة المشغّل يجعل كل الأرقام والإنذارات والاتجاهات السابقة في الوحدة غير قابلة للمقارنة، ولا يظهر أثره فورًا.
2. **سجل التغيير (Audit Trail):** من غيّر، وماذا غيّر، ومتى، والقيمة قبل وبعد، ومن أي محطة. بحساب مسمّى لكل شخص لا حساب مشترك للوردية (الفصل 24)، وبطابع زمني من الساعة المزامنة، ويُحفظ مع سجل الأحداث للمدة التي تحددها المنشأة. وأول سؤال في تحقيق أي حادثة تشغيل هو: ما الذي تغيّر في الأربع والعشرين ساعة الماضية؟ ومن دون هذا السجل لا جواب.
3. **لماذا لا يُغيَّر ضبط الحماية من شاشة المشغّل:** لأن نقطة ضبط الفصل ليست رقم تشغيل بل نتيجة دراسة: جاءت من HAZOP وLOPA وحساب SIL وزمن سلامة العملية (الفصلان 28 و29)، وأي تغيير فيها يُبطل الحساب الذي أُثبتت به

الدرجة. ثم إن استقلال طبقة الحماية عن طبقة التحكم يسقط إن كان المشغّل يستطيع تعديل الاثنتين من المنصة نفسها بالصلاحية نفسها. وهناك سبب ميداني ثالث أثقل: نقطة الفصل تُرفع دائمًا للسبب نفسه، وهو أن الفصل يتكرر ويزعج؛ ورفعها يزيل الحماية بدل أن يعالج سببها. فتبقى نقاط ضبط الحماية داخل حلّال المنطق، تُغيَّر من محطة الهندسة مع مفتاح الوضع، وضمن إدارة التغيير، وتُوثَّق وتُختبر بعد التغيير قبل العودة إلى الخدمة.

مبادئ تصميم الشاشات كما استقرت عليها الصناعة. جاءت هذه المبادئ من تحقيقات حوادث كان فيها كل شيء معروضًا على الشاشة، ولم يره أحد:

1. **تدرّج الشاشات من العام إلى الحلقة:** أربعة مستويات، أعلاها نظرة عامة على الوحدة تُقرأ من مسافة وتجيب عن سؤال «هل كل شيء طبيعي؟»، وأدناها شاشات التشخيص والقيم الخام (التفصيل في جدول الهرمية بالقسم 22.2). والانتقال من أي مستوى إلى ما تحته بنقرة أو نقرتين، ومن أي شاشة إلى النظرة العامة بنقرة واحدة ثابتة الموضع.
2. **الرمادي أساسًا:** خلفية رمادية فاتحة إلى متوسطة، وخطوط عملية ومعدات بدرجات رمادية داكنة، وأرقام سوداء. وهذا ليس ذوقًا: الخلفية المحايدة تجعل أي لون يظهر عليها استثناءً يُرى فورًا.
3. **اللون للاستثناء لا للزينة:** الألوان القوية محجوزة لأولويات الإنذار كما تحددها فلسفة الإنذار في المشروع (القسم 22.3). فإذا لُوّنت الأنابيب والمضخات والخزانات بألوان زاهية «لتبدو الشاشة حيّة» استُهلك اللون، وفقد الأحمر معناه، فلا يعود إنذار الطبقة الحرجة يختلف بصريًا عن خط بخار.
4. **لا معلومة باللون وحده:** مع كل لون شكل أو رمز أو نص. فنحو 8% من الذكور لديهم ضعف في تمييز الأحمر والأخضر، والشاشة تُطبع أحيانًا بالأبيض والأسود وتُرفق بتقرير، والإضاءة في غرفة التحكم ليلًا غيرها نهارًا. واختبار بسيط: اطبع

الشاشة بالطباعة الرمادية؛ إن اختفى معنى شيء فيها فهو مبني على اللون وحده.

5. **مؤشرات الاتجاه:** بجوار القيم المهمة شريط انحراف صغير يبيّن موضع القيمة بين حدودها ونقطة ضبطها، ومنحنى مصغّر (Sparkline) لآخر ساعة أو ساعتين. فالمشغّل يحتاج أن يعرف **إلى أين تتجه** القيمة قبل أن تصل إلى حدّ الإنذار، لا أن يُخبَر بعد وصولها.

6. **تجنّب الرسوم ثلاثية الأبعاد والزينة:** لا أنابيب أسطوانية بظلال وتدرجات، ولا مضخات بصور واقعية، ولا خلفيات وشعارات ورسوم متحركة دائمة. كل عنصر رسومي لا يحمل معلومة يسرق انتباهًا محدودًا، والرسم ثلاثي الأبعاد يضيف حوافّ وظلالًا تتنافس مع علامات الإنذار الحقيقية.

7. **ثبات الموضع والصياغة:** الشيء نفسه في المكان نفسه في كل شاشة (شريط التنقل، شريط الإنذارات، اسم الوحدة والتاريخ والوقت)، والرمز نفسه للمعدة نفسها، والوسم كما هو في P&ID حرفًا بحرف (الفصل 5). والاختلاف بين شاشة وأخرى يُكلف المشغّل زمن تردد في اللحظة التي لا يملك فيها زمنًا.

8. **الأرقام بمعناها:** وحدة مكتوبة بجانب كل قيمة، وعدد خانات عشرية يطابق تمييز القياس لا قدرة الحاسوب (مستوى بخانتين عشريتين ادعاء دقة غير موجودة، الفصل 4)، وحدود الإنذار ونقطة الضبط معروضة مع القيمة لا في صفحة أخرى.

9. **كثافة مدروسة:** شاشة النظرة العامة تُظهر صحة الوحدة كلها دون تنقل، والشاشات التفصيلية لا تُحشى بكل ما يستطيع النظام عرضه. وقاعدة عملية: كل عنصر على الشاشة يجب أن يُجاب عنه بسؤال «ما القرار الذي يساعد فيه؟».

10. **اختبار القبول البصري:** قف على بعد مترين من شاشة النظرة العامة؛ إن لم تستطع خلال ثلاث ثوانٍ أن تقول إن هناك شيئًا غير طبيعي وأين هو تقريبًا، فالشاشة تحتاج إلى إعادة تصميم لا تدريبًا إضافيًا.

وملاحظة تقنية تُنسى: **زمن تحديث الشاشة ليس زمن مسح المتحكم** (القسم 3.6 والقسم 3.9). فشاشة تُحدَّث كل ثانية على متحكم يمسح كل 200 ms تُظهر قيمة واحدة من كل خمس، ولذلك لا يُحكم على تذبذب حلقة من الشاشة بل من المؤرخ بدقته الكاملة؛ وفي المقابل لا فائدة من طلب تحديث كل 100 ms لقيمة حرارة في غمد ثابته الزمني عشرات الثواني: يزيد حمل الشبكة ولا يضيف معلومة.

HMI في أنظمة السلامة. نظام السلامة يُرى من شاشة التشغيل ولا يُدار منها، والاستثناء الوحيد إعادة الضبط، وهي تمر في مسار أوامر مستقل مقيّد لا في مسار العرض:

- **شاشة منفصلة أو منطقة منفصلة ومميّزة بصريًا** ضمن شاشات التشغيل، لا يختلط عرضها بعرض التحكم الأساسي، ويعرف المشغّل من نظرة أنه ينظر إلى طبقة الحماية.
- **القراءة فقط (Read-Only):** حالة كل وظيفة سلامة (سليمة / مطلوبة / مفصولة / متجاوزة / في الاختبار)، وقيم مرسلاتها ونتيجة التصويت لكل قناة، وأول سبب للفصل (First-Out، القسم 19.4)، وزمن الحدث. وهذا المسار — من حلّال المنطق إلى نظام التحكم الأساسي — مسار عرض في اتجاه واحد لا قناة أوامر (القسم 25.6.3): لا يكتب نظام التحكم عبره في حلّال المنطق شيئًا.
- **إعادة الضبط (Reset) بإذن:** لا تمر في مسار العرض السابق، بل في مسار أوامر مستقل معتمد ومقيّد، بإحدى ثلاث صور تحددها فلسفة السلامة: زر إعادة ضبط سلكي على لوحة السلامة في غرفة التحكم؛ أو واجهة نظام السلامة نفسه (محطة موصولة بحلّال المنطق مباشرة لا عبر نظام التحكم)؛ أو عدد محدود من إشارات «طلب إعادة الضبط» يكتبها نظام التحكم في منطقة كتابة مخصصة، فيتحقق منها منطق السلامة ويقبلها أو يرفضها — أي أن نظام التحكم يطلب وحلّال المنطق يقرر. وفي الصور الثلاث شرطان معًا: زوال سبب الفصل، وصلاحية معرَّفة تُسجَّل في سجل الأحداث (IEC 61511-1، البند 11.7). وكثير

من الفصول لا يُعاد ضبطها إلا محليًا عند المعدة بعد التحقيق، وهذا مقصود لا نقص في التصميم (الفصل 31).

- **ما يُمنع تمامًا من شاشة المشغّل:** تغيير نقاط ضبط الفصل أو زمن التأخير أو منطق التصويت؛ وفرض (Force) مدخل أو مخرج؛ وتفعيل تجاوز أو تثبيط بلا تصريح مسجَّل ومحدود المدة وإنذار ظاهر طوال مدته؛ وتعطيل الإنذار الصوتي بصفة دائمة؛ وتحميل أي تعديل برمجي. والإيقاف الطارئ اليدوي يبقى زرًا سلكيًا ماديًا، ولا يُستبدل بأيقونة على الشاشة مهما بدا ذلك عمليًا (القسم 25.6.8).

الشكل 22-2: *نظام السلامة في واجهة التشغيل: مسار عرض في اتجاه واحد من حلّال منطق السلامة إلى نظام التحكم الأساسي (BPCS)، وإعادة الضبط بإحدى ثلاث صور مقيّدة بشرطين، وما يُمنع من شاشة المشغّل؛ ويبقى زر الإيقاف الطارئ اليدوي سلكيًا ماديًا.*

أخطاء ميدانية في الواجهة والصلاحيات.

- حساب مشترك مفتوح دائمًا على مستوى «هندسة» في محطة غرفة التحكم، فتصبح كل الصلاحيات واحدة ويصير سجل التغيير بلا معنى.
- شاشة بصور واقعية وتأثيرات ثلاثية الأبعاد تُخفي الأرقام؛ ومشروع يُقيّم شاشاته في مرحلة التصميم بأنها «جميلة» لا بأنها «تُقرأ».
- ألوان مستهلكة في الزينة، ثم إضافة وميض للإنذارات المهمة لتعويض ما ضاع.
- قيم بلا وحدات، أو بخانات عشرية تدّعي دقة لا يعطيها الجهاز.
- عرض حالة الصمام من الأمر لا من مفتاح الموضع أو مرسل الموضع، فتقول الشاشة «مغلق» والصمام مفتوح (القسم 15.10 والفصل 92).
- إهمال حالة الجودة، فتظهر قيمة مجمّدة بعد فقد الاتصال كأنها قراءة حية؛ وهذا بالضبط ما يجب أن تجيب عنه مراجعة التصميم: كيف يكتشف المشغّل شاشة متوقفة عن التحديث؟ (القسمان 3.5 و21.6).
- حلقة في الوضع اليدوي منذ أسابيع دون أن يظهر ذلك في شاشة النظرة العامة، فلا أحد يعلم أن التحكم متوقف فعليًا.
- ساعة محطة المشغّل غير مزامنة مع المتحكم ومع نظام السلامة، فيختلط ترتيب الأحداث في أول تحقيق يحتاجها.
- لوحة محلية تعرض القيمة نفسها بتحجيم أو بمصدر مختلف عن غرفة التحكم، فيتجادل الفريقان في رقم بدل أن يعالجا المشكلة.
- شاشات جديدة تُسلَّم مع النظام بلا تدريب المشغّلين عليها قبل التشغيل، فيُدار المصنع بذاكرة الشاشات القديمة.
- إلغاء «الشاشة الاحتياطية»: محطة واحدة لكل وردية بلا بديل، فيصبح فقدها فقدًا للرؤية على وحدة كاملة.

قائمة تحقق لمراجعة شاشات مشروع جديد.

1. تأكد من وجود **دليل أسلوب (Style Guide)** معتمد للمشروع قبل رسم أول شاشة: الألوان ومعانيها، والرموز، والخطوط ومقاساتها، وقواعد التنقل، وصيغة الوسوم.
2. اطلب **قائمة الشاشات** ومطابقتها لتدرّج المستويات الأربعة، وتحقق من أن لكل وحدة شاشة نظرة عامة واحدة لا ثلاثًا.
3. طابق وسوم الشاشات مع P&ID المعتمد وقائمة الإدخال والإخراج وسجل الوسوم: وسمًا وسمًا، بلا استثناء.
4. تحقق من أن كل قيمة معروضة لها **وحدة** ومدى صحيح وعدد خانات عشرية يطابق تمييز الجهاز.
5. تحقق من أن حالات المعدات تأتي من **تغذية راجعة** لا من الأوامر، ومن عرض حالة مفتاح محلي/بعيد.
6. تحقق من عرض **حالة الجودة** لكل قيمة، ومن سلوك الشاشة عند فقد الاتصال (لا قيم مجمّدة بلا علامة).
7. راجع **صفحات الحلقات**: هل تعرض PV وSP وOP والوضع وحدود الخرج معًا؟ وهل تُفتح بنقرة من الشاشة النسقية؟
8. راجع **الألوان**: اطبع ثلاث شاشات بالطباعة الرمادية واقرأها؛ وافحصها بمحاكي عمى الألوان إن توفر.
9. طبّق **اختبار المترين والثلاث ثوانٍ** على شاشة النظرة العامة لكل وحدة.
10. تحقق من أن ألوان الإنذار ونغماته مطابقة لفلسفة الإنذار المعتمدة، ومن أنها غير مستعملة في أي غرض آخر على الشاشة.
11. تحقق من **الاتجاهات**: اتجاهات جاهزة للمتغيرات الرئيسية، وإمكانية بناء اتجاه مؤقت من الشاشة، ومصدر البيانات (المؤرخ) ودقته وفترة حفظه.
12. راجع **مستويات الدخول** فعليًا على النظام: ادخل بحساب مشغّل وحاول تغيير حدّ إنذار ومعامل ضبط ومدى مرسل؛ ويجب أن يُرفض الثلاثة.

13. تحقق من **سجل التغيير**: نفّذ تغييرًا تجريبيًا وتأكد من ظهوره باسم المستخدم والزمن والقيمة قبل وبعد، ومن مزامنة الساعة.
14. راجع **منطقة نظام السلامة**: منفصلة، قراءة فقط، تعرض التجاوزات والتثبيطات القائمة وأول سبب، ولا تحمل أي زر يغيّر ضبط حماية.
15. تحقق من **التنقل**: الانتقال من كل مستوى إلى ما تحته بنقرة أو نقرتين، والعودة إلى النظرة العامة بنقرة واحدة، ولا شاشة «يتيمة» لا يصل إليها رابط.
16. اختبر **زمن الاستجابة**: زمن استدعاء الشاشة، وزمن تحديث القيم، وسلوك المنصة عند رشقة إنذارات.
17. اختبر **فقد محطة**: أطفئ محطة تشغيل وتأكد من أن الأخرى تكفي، ومن أن المتحكم استمر يعمل، ومن توثيق زمن الاستعادة.
18. أدرج مراجعة الشاشات في **FAT** و**SAT** بسيناريوهات مكتوبة، وسجّل الملاحظات كبنود تُغلق، ودرّب المشغّلين على الشاشات قبل التشغيل لا بعده.

مثال محلول (هل عبء الإنذارات على المشغّل مقبول؟): يبدأ المثال من سجل الأحداث الذي تحفظه الواجهة، ويقارن نتيجته بالقيم المرجعية المشروحة في القسم 22.3.

- **المعطيات:** منصة تشغيل واحدة يخدمها مشغّل واحد في الوردية. سجل الأحداث لأسبوع تشغيل مستقر (7 أيام × 24 ساعة = 168 ساعة) يبيّن 2016 إنذارًا ظهرت على هذه المنصة. وعند ترتيب الإنذارات بتكرار الوسم تبيّن أن ثلاثة وسوم فقط أنتجت 1180 إنذارًا (مرسل مستوى متذبذب، ومفتاح تدفق قرب عتبته، وإنذار «انحراف» على حلقة متروكة في الوضع اليدوي).
- **الافتراضات:** الأسبوع خالٍ من البدء والإيقاف ومن أي اضطراب كبير (تشغيل مستقر)؛ ويحتاج المشغّل في المتوسط دقيقتين لكل إنذار (قراءته، والتحقق منه على الشاشة النسقية، والتصرف، والإقرار)؛ والوردية 12

ساعة.

- **الحل بالوحدات:**
  - معدل الإنذارات في الساعة = عدد الإنذارات ÷ عدد الساعات = 2016 ÷ 168 = **12 إنذارًا في الساعة** لكل مشغّل.
  - المعدل لكل عشر دقائق = (10/60) × 12 = **2 لكل عشر دقائق**.
  - الإنذارات في الوردية = 12 إنذارًا في الساعة × 12 ساعة = 144 إنذارًا في الوردية الواحدة.
  - القيمة المرجعية المقبولة في التشغيل المستقر إنذار واحد لكل عشر دقائق (القسم 22.3)، أي 6 في الساعة: فالحمل الحالي **ضعف** الحد المقبول.
  - نصيب الإنذارات من وقت المشغّل = المعدل × زمن الإنذار الواحد = 12 × 2 = 24 دقيقة في الساعة.
  - أي 60 ÷ 24 = **40%** من وقته قبل الجولات والتصاريح والتسليم والمكالمات.
  - بعد معالجة الوسوم الثلاثة وحدها: الإنذارات المتبقية = 2016 − 1180 = 836 إنذارًا.
  - المعدل الجديد = 836 ÷ 168 = **5 ≈ 4.98 إنذارات في الساعة**، أي 0.83 لكل عشر دقائق (ضمن المرجع).
  - نصيبها من الوقت ≈ 5 × 2 = 10 دقائق في الساعة (17%).
- **معنى النتيجة:** الرقم يقول إن المنصة خارج الحد، لكن ترتيب الوسوم يقول أين العلاج: ثلاثة وسوم من مئات هي 59% من الحمل، ومعالجتها (إصلاح تركيب المرسل وتخميده، ونقل عتبة مفتاح التدفق أو إضافة زمن تأخير، وإعادة الحلقة المتروكة إلى الخدمة) تُعيد المنصة إلى المرجع من دون تعديل شاشة واحدة ومن دون حذف إنذار واحد له إجراء. والدرس العملي:

> عبء الإنذار يكاد يكون دائمًا حصيلة قلة قليلة من الوسوم، فتبدأ المراجعة من قائمة التكرار لا من إعادة تصميم الشاشات. والأخطر أن المنصة التي تعمل أصلًا عند ضعف الحد في التشغيل المستقر لن تحتمل رشقة الاضطراب، وهو بالضبط الوقت الذي يجب أن يكون فيه المشغّل قادرًا على القراءة والتصرف. ويُدرج هذا المؤشر في تقارير أداء الوحدة مع بقية مؤشرات التشغيل (القسم 40.6).

الشكل 22-3: *عبء الإنذار في المثال المحلول: 12 إنذارًا في الساعة لكل مشغّل مقابل المرجع 6، وثلاثة وسوم تنتج 1180 من 2016 إنذارًا في الأسبوع (59%)؛ وبمعالجتها وحدها ينخفض المعدل إلى نحو 5 في الساعة ونصيب الإنذارات من وقت المشغّل من 40% إلى 17%.*

22.2 تصميم شاشات التشغيل (HMI): الهرمية والملاحة والتوحيد

عرض القسم 22.1 مبادئ الشاشة الجيدة كما يحتاجها المشغّل؛ ويعرض هذا القسم كيف تتحول هذه المبادئ إلى معيار مكتوب يلتزم به المشروع كله. فالشاشة التي تُصمم في كل مشروع بذوق مصممها تجعل المشغل يتعلم نظامًا جديدًا في كل وحدة، وتخفي الانحراف

بين عشرات الألوان. لذلك تضع الشركات «معيار شاشات» أو دليل أسلوب (Style Guide) يوحد كل شيء: الهرمية، والملاحة، والألوان، والخطوط، وشكل كل عنصر. والمرجع الدولي الحديث ISA-101 (دورة حياة واجهة الإنسان والآلة)، مع ISO 11064 لتصميم غرف التحكم، وISA-18.2 للإنذارات.

هرمية الشاشات. تقسم ISA-101 الشاشات إلى أربعة مستويات (الشكل 22-4 أ):

المستوى	المحتوى	من يستعمله ومتى
1: نظرة عامة	المنطقة كلها بمؤشرات أداء وانحرافات كبرى، بلا تحكم تقريبًا	المشغل ومشرف المناوبة، نظرة مستمرة
2: التحكم بالوحدة	وحدة أو معدة رئيسة بحلقاتها ومؤشراتها واتجاهاتها	العمل اليومي للمشغل
3: التفاصيل	معدة واحدة، ولوحات الحلقات، والتسلسلات	التعديل والمهام غير الروتينية
4: التشخيص والدعم	التشخيص والإجراءات والمعلومات المساعدة	استكشاف الأعطال والصيانة (39.10)

الشكل 22-4: *(أ) هرمية الشاشات في أربعة مستويات وفق ISA-101، من النظرة العامة إلى التشخيص. (ب) تخطيط شاشة من المستوى 2 بأسلوب الأداء العالي: خلفية رمادية، والقيم الحرجة في الشريط العلوي، والملاحة الثابتة إلى اليمين، ومؤشرات تناظرية بنطاقها الطبيعي، واتجاه مدمج، وشريط آخر إنذار. واللون الأحمر يظهر فقط حيث الانحراف.*

مثال من معيار فعلي: شاشات التوربينات. معيار شاشات التوربينات لمورد رئيس (R74) يوضح كيف تُترجم هذه المبادئ إلى قواعد محددة:

- **الملاحة بأربعة مستويات:** مستوى صفري للنظرة العامة والإنذارات والأدوات، ومستوى أول لاختيار الوحدة، ومستوى ثانٍ لاختيار المجموعة الوظيفية (تحكم، ومراقبة، ومساعدات، واختبارات)، ومستوى ثالث للإطار المحدد. والمستوى الثاني يتذكر آخر شاشة زارها المشغل في كل مجموعة، فيتنقل بلمسة واحدة بين شاشة تحكم وشاشة مراقبة.
- **ملف واحد لكل الوحدات:** كل نقاط الشاشة تبدأ بمتغير يحمل رمز الوحدة، فالملف نفسه يعرض الوحدة الأولى أو الثالثة بحسب الاختيار. وهذا يبسط إدارة النسخ في المحطات متعددة الوحدات.
- **القيم الحرجة في كل شاشة:** زاوية أدلة المدخل، وضغط تصريف الضاغط، وحرارة العادم، والسرعة، والقدرة. فالمشغل لا يفقد صورة الآلة وهو في أي شاشة.

- **شاشات «الحالة القصوى»:** يضم المعيار كل الشاشات الممكنة (الوقود المزدوج، وحقن الماء، وحقن البخار)، ويحذف مهندس المشروع ما لا ينطبق بدل تصميم شاشات جديدة.
- **مقاسات للمس:** أزرار لا يقل ارتفاعها عن 24 نقطة وعرضها عن 30 نقطة. ويُتجنَّب استعمال الاختصارات ما أمكن.
- **تسمية منهجية:** أسماء ملفات وإجراءات ومتغيرات بادئات تدل على وظيفتها (الملاحة بمستواها، والإنذار، والتحكم، والمحركات). ونافذة منبثقة واحدة فقط في كل مرة. وزر يبدل بين الوصف النصي للإشارة ورمزها في المتحكم.
- **عناصر موحدة:** مربعات بيانات متراصة، والأرقام بخط ثابت العرض ومحاذاة إلى اليمين، ووحدة القياس بجانب كل قيمة، ومجموعات تحكم بعنوان وأزرار، ومجموعة تحكم للمحركات بأزرار الرئيسي والاحتياطي يتغير لونها عند التفعيل، وأعمدة بيانية للقياسات المتعددة (حرارة المحامل، ومزدوجات العادم، والاهتزاز) مع أزرار للاتجاهات بفترات من دقيقة إلى 24 ساعة.
- **ألوان حالات الإنذار:** إنذار غير مقرّ به: نص أبيض على أحمر. وعودة إلى الطبيعي غير مقرّ بها: أسود على أبيض. وإنذار مقرّ به: أحمر على أبيض. وعودة إلى الطبيعي مقرّ بها: يختفي تلقائيًا.

الشكل 22-5: *دورة حياة الإنذار وحالاته مع ألوان العرض في معيار الشاشات المذكور: طبيعي، ثم إنذار غير مقرّ به (نص أبيض على أحمر)، ثم مقرّ به (أحمر على أبيض)، أو عودة إلى الطبيعي قبل الإقرار (أسود على أبيض)؛ والتعليق أو التثبيط (Shelved/Suppressed) مسار جانبي بصلاحية ومدة محدودة. الوسم توضيحي.*

من الشاشات التقليدية إلى شاشات الأداء العالي. المعيار السابق صدر أواخر التسعينيات، وفيه ما صار اليوم يُعد عادة يُفضل تركها: ألوان مميزة لكل وحدة، وتدرجات وظلال ثلاثية الأبعاد. أما أسلوب «الأداء العالي» (High-Performance HMI) الذي تتبناه ISA-101 وأدلة مثل EEMUA 201 فيقوم على أن اللون إشارة لا زينة:

المعيار	الشاشة التقليدية	شاشة الأداء العالي
الخلفية	ملونة أو سوداء	رمادية محايدة
اللون	في كل عنصر: المعدات والخطوط والوحدات	محجوز للانحراف والإنذار
القيم	أرقام فقط	أرقام مع مؤشر تناظري يُظهر النطاق الطبيعي
الاتجاهات	في شاشات منفصلة	مدمجة في شاشة التحكم
المعدات	رسوم مفصلة ثلاثية الأبعاد	أشكال بسيطة مسطحة

المعيار	الشاشة التقليدية	شاشة الأداء العالي
الإنذار	لون فقط	لون مع شكل ورقم الأولوية، مراعاةً لمن لديه ضعف في تمييز الألوان
النتيجة	الانحراف يضيع بين الألوان	الانحراف يلفت العين فورًا

كيف أختار؟ في مشروع جديد لا خيار: أسلوب الأداء العالي بدليل أسلوب مكتوب قبل رسم أول شاشة. وفي وحدة قائمة بشاشات تقليدية يُبدأ بشاشة النظرة العامة لكل وحدة ثم صفحات الحلقات، لأنهما ما يُقرأ في الاضطراب، وتُترك شاشات التفاصيل إلى فرصة توقف. ولا يبين الجدول كلفة الانتقال على المشغّلين: من عمل عشر سنين على شاشة ملونة يحتاج تدريبًا ومحاكاة قبل التشغيل لا إعلانًا بالتغيير. والخطأ الأكثر كلفة الخلط في الوحدة الواحدة: شاشات جديدة رمادية إلى جانب شاشات قديمة يُستعمل فيها الأحمر للمضخة العاملة، فيفقد اللون معناه في الاثنتين معًا.

قائمة تحقق لمعيار الشاشات في مشروع (هذه القائمة لمعيار المشروع نفسه، وقائمة مراجعة الشاشات في القسم 22.1 لشاشاته المنفذة):

1. هرمية مكتوبة: ما الذي في كل مستوى، وكم شاشة تقريبًا.
2. ملاحة ثابتة المكان في كل الشاشات، ووصول إلى أي شاشة تشغيل بعدد قليل من اللمسات.
3. القيم الحرجة للوحدة ظاهرة في كل شاشة.
4. لوحة ألوان مكتوبة، وأحمر وأصفر محجوزان للإنذارات بأولوياتها.
5. عرض حالة جودة القيمة: قيمة سيئة أو مفروضة أو محاكاة أو قديمة تُميز بعلامة لا تُخطئها العين (3.5 و39.12).
6. مكتبة عناصر موحدة (رموز المعدات ولوحات الحلقات)، تُبنى مرة وتُستعمل في كل الشاشات.
7. أحجام أزرار وخطوط مناسبة لمسافة الجلوس ولشاشات اللمس.

8. أسماء ملفات ونقاط وإجراءات تتبع قاعدة مكتوبة.
9. مراجعة الشاشات مع المشغلين قبل FAT، واختبارها مع المحاكاة.
10. إدارة تغيير للشاشات كما للمنطق، ونسخة احتياطية مع برامج المتحكمات.

تشخيص الشاشة نفسها. حين تعرض الشاشة قيمًا مجمدة أو «###» أو نقاطًا بلا قيم، فالمشكلة غالبًا في عدم تطابق قواعد البيانات بين المتحكم وخادم الشاشات، أو في الاتصال، لا في الميدان. ويُعالج ذلك في 34.9.2 و39.10.

22.3 إدارة الإنذارات ومعايير EEMUA 191

انتقل الفصل من الواجهة إلى الشاشة، وبقي ما يطلب انتباه المشغّل فورًا: الإنذار. والمبدأ الحاكم «لا إنذار بلا فعل» (No action, no alarm): لكل إنذار إجراء تشغيل محدد (SOP) يتخذه المشغّل من غرفة التحكم أو في الميدان، وإلا فهو معلومة تُسجَّل لا إنذار يُطلق. ويُفضَّل أن تُوجَّه الإنذارات إلى المتغيرات غير المتحكم بها أو إلى الحلقات المفتوحة (في الوضع اليدوي)، لأن انحرافها لا يصححه إلا المشغّل. وتُراجَع ملخصات الإنذار دوريًا لكشف المتكرر والمزعج منها، وتُميَّز الأولويات من 1 إلى 4 بألوان ونغمات مختلفة. وتنقل المواصفة الهندية OISD-STD-152 (الفصل 31) عن دليل EEMUA 191 القيم المرجعية الآتية لأداء نظام الإنذار، ويبين الشكل 22-6 معناها العملي:

المؤشر	القيمة المرجعية
متوسط معدل الإنذارات (كل 10 دقائق)	1
الإنذارات بعد اضطراب الوحدة (كل 10 دقائق)	10
متوسط الإنذارات القائمة (Standing)	10
متوسط الإنذارات المعلقة (Shelved)	30
توزيع الأولويات المهيأة: حرجة / عالية / متوسطة / منخفضة	أقل من 80% / 15% / 5% / 1%

الشكل 22-6: *معايير EEMUA 191 لأداء نظام الإنذار: معدل الإنذار في التشغيل المستقر والاضطراب، والإنذارات القائمة والمعلقة، وتوزيع الأولويات المستهدف (هرم مقلوب: 80% منخفضة وأقل من 1% حرجة).*

وتربط هذه القيم بمعيار ISA-18.2/IEC 62682 (يُفصَّل في الفصل 73 من الجزء القادم) الذي يعطي المنهجية الكاملة (فلسفة الإنذار، الترشيد، التصميم، المراقبة)؛ فالمواصفة الهندية تعتمد المعايير الرقمية نفسها.

من المؤشرات إلى المنهجية: تعطي القيم السابقة الهدف، ويعطي ISA-18.2 الطريق إليه في دورة حياة مغلقة. تبدأ بفلسفة إنذار مكتوبة تحدد التعريفات والأولويات والألوان وحدود الأداء. ثم تُحدد الإنذارات المرشحة من HAZOP ووصف التحكم ومتطلبات الصانع. ثم يأتي **الترشيد (Rationalization)**، وفيه يُسأل عن كل إنذار: ما سببه؟ وما نتيجته إن لم يُستجب له؟ وما فعل المشغّل؟ وكم من الزمن يملك؟ فإن لم يكن له فعل حُذف أو صار حدثًا في السجل. ثم التصميم التفصيلي: الحد، والتخلف، وتأخير الظهور والزوال، والإخماد المرتبط بحالة المعدة. ثم التنفيذ والتشغيل، ومنه **التعليق (Shelving)** بصلاحية ومدة محدودة. ثم الصيانة والمراقبة والتقييم بالمؤشرات السابقة، مع إدارة التغيير لكل تعديل وتدقيق دوري للدورة كلها.

تحديد الأولوية: تُشتق الأولوية من شدة النتيجة لو لم يتصرف المشغّل، ومن الزمن المتاح له قبل وقوعها. فالنتيجة الشديدة مع زمن قصير تعطي أولوية عالية، والنتيجة المحدودة مع زمن طويل تعطي أولوية منخفضة. ولهذا يكون التوزيع السليم هرمًا مقلوبًا كما في الجدول: إذا صار كل إنذار «حرجًا» فقدت الأولوية معناها.

جدول: الإنذارات المزعجة وعلاجها

النوع	كيف يظهر	العلاج المعتاد
المتذبذب (Chattering)	يظهر ويزول مرات متتالية خلال دقيقة قرب الحد	تخلف مناسب، وتأخير ظهور أو زوال (20.14)
العابر (Fleeting)	يظهر ثواني ثم يزول قبل أن يتصرف أحد	تأخير ظهور، أو مراجعة الحاجة إليه
القائم (Standing)	يبقى قائمًا ساعات أو أيامًا	إصلاح السبب، أو إخماد مرتبط بحالة المعدة المتوقفة
الطوفان (Alarm Flood)	عشرات الإنذارات في دقائق بعد اضطراب أو فصل	إخماد منطقي للنتائج المتوقعة، وشاشة أول سبب (19.4)، وترشيد الإنذارات المكررة
المكرر	إنذاران أو أكثر للحدث نفسه من مصدرين	إبقاء الأوضح للمشغّل، وتحويل الباقي إلى حدث في السجل

كيف أختار؟ ابدأ من قائمة أكثر الوسوم تكرارًا في سجل الأحداث لا من الشاشات: الوسم المتذبذب يُعالج بالتخلف والتأخير، والقائم بإصلاح سببه أو إخماده مع حالة المعدة المتوقفة، والطوفان بالإخماد المنطقي لنتائج الفصل المتوقعة، والمكرر بإبقاء واحد وتحويل الباقي إلى أحداث. ولا يبين الجدول الإنذارات التي لا فعل لها أصلًا، وهذه لا تُعالج بل تُحذف أو تصير أحداثًا في السجل بعد الترشيد. والخطأ الأكثر كلفة تهدئة الإنذار برفع حده أو بتأخير طويل حتى يسكت، فيسكت معه الحدث الحقيقي الذي وُضع الإنذار من أجله، ولا يُكتشف ذلك إلا في التحقيق.

والمثال المحلول في القسم 22.1 تطبيق لهذه المنهجية: قائمة التكرار كشفت أن ثلاثة وسوم تنتج 59% من الحمل، وعلاجها ميداني وتصميمي لا تجميلي.

حالة ميدانية (مثال تعليمي مركّب):

- **العَرَض:** بعد فصل ضاغط في وحدة معالجة غاز ظهر على منصة المشغّل نحو 240 إنذارًا في عشر دقائق. وفي منتصف هذا الطوفان ظهر إنذار «مستوى وعاء الشفط عالٍ» فلم ينتبه إليه المشغّل في وقته، وارتفع المستوى حتى فصلت الحماية المستقلة الوحدة كلها.
- **الفحص:** بيّن سجل الأحداث المرتب زمنيًا أن الإنذار الأول كان سبب الفصل، وأن نحو 200 إنذار بعده كانت نتائج متوقعة للفصل نفسه (ضغوط منخفضة، ومضخات مساعدة متوقفة، وتدفقات صفرية)، وأن إنذار المستوى كان بأولوية «متوسطة» مثل عشرات غيره.
- **السبب:** لا إخماد مرتبط بحالة المعدة، فكل ما يتوقف مع الضاغط يُنذر؛ وأولويات لم تُرشَّد، فإنذار نتيجته شديدة وزمن الاستجابة له قصير يتساوى مع إنذار صيانة.
- **الإجراء والدرس:** إخماد منطقي لنتائج الفصل المتوقعة مع إبقائها في السجل، ورفع أولوية إنذار المستوى بعد ترشيده، وإضافة شاشة أول سبب. وفي فصل مماثل بعد التعديل ظهرت 9 إنذارات في الدقائق العشر الأولى. والدرس أن الطوفان لا يُعالج بتدريب المشغّل على القراءة الأسرع، بل بتصميم يقلل ما يُعرض عليه في اللحظة الحرجة.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني والمشغّل ينفذان ويقيسان
الشاشات	معيار الشاشات والهرمية والألوان، ومراجعة الشاشات مقابل P&ID	يطابق الوسم والوحدة على الشاشة مع الجهاز في الميدان، ويبلّغ عن قيمة مجمدة أو حالة صمام تخالف الواقع
الصلاحيات	مستويات الدخول، وقفل المعاملات الحرجة، وسجل التغيير	يعمل بحسابه المسمى، ولا يشارك كلمة المرور، ويطلب التغيير بإجراء لا من الشاشة
الإنذارات	فلسفة الإنذار، والترشيد، والأولوية، والتخلف والتأخير لكل إنذار	يبلّغ عن الإنذارات المزعجة بأسمائها، ويصلح أسبابها الميدانية (مرسل متذبذب، أو مفتاح قرب عتبته)
الأداء	مؤشرات EEMUA 191 شهريًا، وقائمة أكثر الوسوم تكرارًا	يستخرج تقارير التكرار من سجل الأحداث، ويتابع إغلاق البنود
نظام السلامة على الشاشة	ما يُعرض للقراءة فقط، وصورة إعادة الضبط المعتمدة	ينفذ إعادة الضبط بالصورة المعتمدة بعد زوال السبب، ويسجل كل تجاوز أو تعليق بتصريح

22.4 الأخطاء الشائعة

- شاشة تنقل مخطط الأنابيب والأجهزة بكل تفاصيله وألوانه، فيضيع الانحراف بين الألوان.
- استعمال الأحمر لحالة عادية مثل «مضخة تعمل»، فلا يبقى للإنذار لون يميزه.
- إنذار بلا إجراء مكتوب للمشغّل، أو إنذاران لحدث واحد.
- حدود إنذار بلا تخلف ولا تأخير، فتتكرر الإنذارات المزعجة (20.14).
- صلاحيات مفتوحة تسمح بتغيير حدود الفصل أو تجاوز الحمايات من شاشة التشغيل.

- تأجيل ترشيد الإنذارات إلى ما بعد التشغيل، فيتعوّد المشغّلون على تجاهلها.

22.5 ملخص

- الواجهة حدٌّ يعبر منه كل ما يراه المشغّل وكل ما يأمر به؛ وتُقاس جودتها بما تنقله في اللحظة الحرجة، لا بجمالها.
- الشاشات تُبنى بهرمية واضحة وملاحة ثابتة، وخلفية هادئة يُحفظ فيها اللون للانحراف والإنذار.
- كل إنذار يطلب فعلًا محددًا، ويُقاس نظام الإنذار كله بمعدلات مرجعية ويُراجَع دوريًا.
- الصلاحيات جزء من التصميم: من يرى، ومن يأمر، ومن يغيّر الحدود، ومن يتجاوز الحماية.
- نظام السلامة يُرى من الشاشة ولا يُدار منها، وإعادة ضبطه تمر في مسار أوامر مستقل مقيد.
- الطوفان والإنذارات المزعجة تُعالج بالتصميم: الترشيد، والتخلف والتأخير، والإخماد المرتبط بحالة المعدة.

وفي الفصل التالي: الفصل 23 «نقل الإشارات والشبكات والبروتوكولات الصناعية»، لأن كل قيمة على الشاشة وكل إنذار قطع طريقًا من الحساس عبر الكابلات والشبكات، وفهم هذا الطريق هو ما يفسر القيمة المجمدة والإنذار الذي لم يصل.

22.6 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق بين اللوحة المحلية ومحطة المشغّل في النطاق والصلاحيات؟
2. لماذا تستمر الوحدة في العمل إذا تجمدت شاشة التشغيل؟ وما الذي يفقده المشغّل عندها؟

3. اشرح مستويات هرمية الشاشات، ومثّل لكل مستوى بشاشة من وحدة ضغط الغاز.

4. لماذا تُستعمل خلفية رمادية هادئة في شاشات الأداء العالي، ويُحفظ اللون للانحراف والإنذار؟

5. ما معنى «لا إنذار بلا فعل»؟ وكيف تطبّقه عند مراجعة قائمة إنذارات موروثة؟

6. وحدة تولّد 4 إنذارات كل 10 دقائق في التشغيل المستقر. ما تقييمها وفق المعايير المرجعية لأداء نظام الإنذار؟ وما أول خطوة لتحسينها؟

7. ما التوزيع المستهدف لأولويات الإنذار؟ ولماذا يدل ارتفاع نسبة الإنذارات الحرجة على سوء التصميم؟

8. من يملك صلاحية تغيير حد إنذار، ومن يملك تغيير حد فصل؟ ولماذا يختلفان؟

9. في المثال المحلول بالقسم 22.1 أنتجت ثلاثة وسوم 1180 إنذارًا من 2016 في أسبوع. احسب معدل الإنذارات في الساعة قبل معالجتها وبعدها، وقارن كلًّا منهما بالقيمة المرجعية.

10. لماذا لا تمر إعادة ضبط نظام السلامة في مسار العرض من حلّال المنطق إلى نظام التحكم؟ اذكر الصور الثلاث المقبولة لإعادة الضبط وشرطيها.

مراجع الفصل: ANSI/ISA-101.01 (واجهات الإنسان والآلة في أتمتة العمليات)؛ ANSI/ISA-18.2 وIEC 62682 (إدارة أنظمة الإنذار)؛ EEMUA 191 (أنظمة الإنذار) و EEMUA 201 (واجهات المشغّل)؛ ISO 11064 (تصميم غرف التحكم)؛ IEC 61511-1 (البند 11.7، واجهات نظام السلامة)؛ OISD-STD-152 (R50) للقيم المرجعية لأداء الإنذار؛ R74 (معيار شاشات التوربينات لمورد رئيس)؛ وخبرة المؤلف الميدانية (R18).

الفصل 23: نقل الإشارات والشبكات والبروتوكولات الصناعية

> **لمن هذا الفصل:** مهندس التحكم والأجهزة الذي يوصل مرسلًا بنظام تحكم، أو يربط وحدة PLC لحزمة مورَّدة بنظام DCS، أو يتعقب قراءة «متجمدة» على الشاشة لا يعرف أين ضاعت في طريقها. ويفيد مهندس المشاريع الذي يختار بين الحلقات التقليدية والشبكات الحقلية، والفني الذي يفتح صندوق توصيل ويجد زوجًا مجدولًا لا يعرف كيف يفحصه.
>
> **الفكرة الأساسية:** القيمة المقاسة تقطع طريقًا طويلًا من الحساس إلى الشاشة: تيار في زوج كابل، ثم رقم في بطاقة إدخال، ثم رسالة في شبكة، ثم قيمة في قاعدة بيانات. وكل مرحلة لها فيزياؤها وقواعدها وأعطالها. من يفهم هذه الطبقات يستطيع أن يصمم وصلة تعمل سنوات بلا انقطاع، وأن يحدد في دقائق ما إذا كان العطل في الكابل أو في العنوان أو في الإعدادات.

23.1 نقل الإشارة التناظرية: حلقة 4–20 mA

قبل الشبكات كانت الإشارة، وما زالت، تيارًا في حلقة. اختير التيار لا الجهد لأن التيار واحد في كل نقطة من الحلقة مهما طال الكابل، ولأن الصفر «الحي» عند 4 mA يميز بين قراءة صفر وكابل مقطوع، ولأن مقاومة الكابل لا تغيره ما دام المصدر قادرًا على دفعه.

أنواع الحلقات:

النوع	التغذية	الأسلاك	أين نجده
ثنائي الأسلاك (Loop Powered)	من الحلقة نفسها، ويأخذ المرسل قدرته من التيار الذي لا يقل عن 4 mA	زوج واحد	أغلب مرسلات الضغط والحرارة والمستوى
رباعي الأسلاك	تغذية مستقلة، والحلقة للإشارة فقط	زوجان	المحللات، والعدادات الكهرومغناطيسية، والأجهزة التي تحتاج قدرة أكبر
مصدر ومصرف (Source وSink)	يحدد أي طرف يغذي الحلقة	زوج	الربط بين بطاقات الأنظمة المختلفة، ويجب مطابقة النوعين

موازنة الجهد: المصدر 24 V يوزع جهده على مقاومة بطاقة الإدخال (250 Ω غالبًا)، ومقاومة الكابل ذهابًا وإيابًا، ومقاومات الحواجز وأجهزة العزل إن وجدت، وما يبقى يجب أن يكفي المرسل، وهو غالبًا 10.5 إلى 12 V حسب دليل الجهاز. ويُحسب أسوأ حال عند أعلى تيار (20 mA، أو 21 mA إن أُريد أن يستطيع المرسل إعلان عطله وفق NAMUR NE43، كما في القسم 26.6.1) وعند أدنى جهد للمصدر.

الشكل 23-1: *في الأعلى رحلة الإشارة من المرسل إلى محطة التشغيل: جزؤها الأول تناظري بزوج كابل لكل حلقة، وجزؤها الثاني شبكة رقمية. وفي الأسفل موازنة الجهد في حلقة ثنائية الأسلاك.*

مثال محلول (أطول كابل مسموح): مرسل يحتاج 11 V حدًّا أدنى، ومصدر 24 V قد ينخفض إلى 23 V، ومقاومة الإدخال 250 Ω، وحاجز سلامة جوهرية مقاومته 300 Ω، وكابل 1.5 mm² مقاومته 12.1 Ω لكل كيلومتر للموصل الواحد.

- الجهد المتاح للكابل عند 20 mA = 23 − 11 − 0.020 × (250 + 300) = 23 − 11 − 11 = 1.0 V.
- مقاومة الكابل القصوى = 1.0 ÷ 0.020 = 50 Ω للموصلين معًا، أي 25 Ω لكل موصل.
- الطول الأقصى = مقاومة الموصل القصوى ÷ مقاومة الكيلومتر = 25 ÷ 12.1 ≈ 2.07 km.
- وهذا يُظهر كيف يلتهم الحاجز أغلب الهامش، ولماذا تُراجع الحسابات عند

> إضافة عازل أو مؤشر محلي في الحلقة.

HART فوق التيار: يضيف بروتوكول HART إشارة رقمية صغيرة بتردد 1200 Hz و 2200 Hz فوق التيار نفسه، ولا يغير متوسطه، فتبقى بطاقة الإدخال تقرأ 4–20 mA بينما يتبادل جهاز الاتصال أو نظام إدارة الأصول معلومات التهيئة والتشخيص. ويشترط مقاومة حلقة لا تقل عن 230 Ω تقريبًا ليظهر جهد الإشارة، ولا يعمل عبر بعض العوازل والمؤشرات القديمة التي ترشح الترددات. وفي نمط الشبكة المتعددة (Multidrop) يثبت التيار عند 4 mA وتُنقل القيم رقميًا فقط، وهو نادر في التحكم لبطئه. وتفاصيل البروتوكول في القسم 23.7.

الإشارات الأخرى: 1–5 V و0–10 V في المسافات القصيرة داخل اللوحات، والنبضات من عدادات التوربينات ومشفرات المحاور، والمزدوجات الحرارية وRTD التي تصل إلى بطاقات مخصصة أو إلى مرسلات حرارة قريبة من الحساس. وقاعدة الكابلات لهذه كلها: زوج مجدول مع حماية تؤرض من طرف واحد، وفصل عن كابلات القدرة، والتفاصيل في القسم 25.11.

23.2 لماذا الشبكات؟ ومتى تبقى الحلقة التقليدية؟

الشبكة الرقمية تنقل على زوج كابل واحد أو ليف واحد قيمًا كثيرة، مع حالة الجهاز وتشخيصه ووحداته ووسمه، وتتيح التهيئة عن بعد. وفي المقابل تحتاج مهارات جديدة، وأدوات فحص مختلفة، وتضيف نقاط فشل مشتركة: عطل في الخط الرئيسي يقطع الاتصال بكل ما عليه.

ولذلك ما زالت الحلقات التقليدية تسود في أنظمة السلامة وفي القياسات الحرجة، وتسود الشبكات في وحدات الإدخال والإخراج البعيدة والحزم الموردة والمعدات الدوارة والمراقبة. والقرار الهندسي عادة: حلقات مباشرة لما يدخل في الحماية والتحكم الحرج، وشبكة لما عداه، مع مراجعة كل حالة في أساس التصميم (الفصل 25).

23.3 النموذج المرجعي OSI وكيف نستخدمه عمليًا

يقسم النموذج المرجعي OSI الاتصال إلى سبع طبقات، من الكابل في الأسفل إلى معنى البيانات في الأعلى. ولا يحتاج مهندس التحكم إلى حفظها بقدر ما يحتاج إلى استخدامها في التشخيص: عطل الطبقة المادية كابل مقطوع أو قطبية معكوسة، وعطل طبقة الربط عنوان مكرر أو سرعة مختلفة، وعطل طبقة الشبكة عنوان IP خاطئ أو قناع شبكة غير مناسب، وعطل طبقة التطبيق سجل خاطئ أو ترتيب بايتات مختلف. وكل بروتوكول صناعي يستخدم بعض الطبقات ويترك ما لا يحتاجه.

الشكل 23-2: *طبقات النموذج المرجعي OSI السبع، وكيف يستخدم كل من Modbus RTU و Modbus TCP و PROFINET و Foundation Fieldbus H1 بعضها ويترك بعضها.*

23.4 طبولوجيا الشبكات

- **الخطية (Bus):** كابل واحد تتصل به الأجهزة تباعًا، مع مقاومتي إنهاء في طرفيه. رخيصة وبسيطة، لكن قطع الكابل في الوسط يعزل ما بعده، وكل فرع طويل يشوه الإشارة. مثالها RS-485 وPROFIBUS DP.

- **النجمية (Star):** كل جهاز بكابل مستقل إلى مبدل (Switch). عطل فرع لا يؤثر في البقية، والمبدل نقطة فشل مشتركة. وهي طبولوجيا Ethernet.
- **الحلقية (Ring):** كل عقدة تصل إلى جارتيها، فلكل رسالة مساران. ومع بروتوكولات الاستعادة مثل MRP يتعافى الاتصال خلال أجزاء من الثانية عند قطع كابل واحد.
- **الشجرية (Tree):** خط رئيسي تتفرع منه فروع قصيرة عبر صناديق توصيل، وهي طبولوجيا Foundation Fieldbus وPROFIBUS PA.

الشكل 23-3: *طبولوجيا الشبكات الصناعية الأربع: الخطية بمقاومات الإنهاء، والنجمية حول مبدل، والحلقية بمسارين لكل عقدة، والشجرية بخط رئيسي وفروع.*

23.5 الاتصال التسلسلي: RS-232 وRS-485

RS-232: وصلة بين جهازين فقط، بجهد يُقاس بالنسبة للأرضي المشترك (نحو ±12 V)، ولمسافة لا تزيد عمليًا على 15 m. ما زالت في منافذ التهيئة والطابعات وبعض المحللات، وتحتاج مطابقة أطراف الإرسال والاستقبال (TX وRX) وربما كابلًا متقاطعًا.

RS-485: الأكثر انتشارًا في الصناعة. تُنقل الإشارة فرقًا في الجهد بين سلكين A وB، فيُلغى التشويش الذي يصيب السلكين معًا، وتصل المسافة إلى 1200 m، ويتصل بالخط حتى 32 جهازًا قياسيًا، وأكثر مع مستقبلات منخفضة الحمل. وقواعده العملية:

1. زوج واحد مجدول مع حماية، وتوصيل A بـ A وB بـ B في كل الأجهزة، والحذر من اختلاف تسمية الطرفين بين الشركات.

2. سلسلة متتابعة (Daisy Chain) من جهاز إلى الذي يليه، لا فروع طويلة ولا توصيل نجمي.
3. مقاومتا إنهاء 120 Ω في طرفي الخط فقط، وكثير من الأجهزة فيها مقاومة داخلية تُفعَّل بمفتاح أو قفزة، فلا تُفعَّل إلا في جهازي الطرفين.
4. مقاومات انحياز (Bias) في مكان واحد، عادة عند السيد، لتثبيت الخط في حالة الصمت.
5. تأريض الحماية من طرف واحد، وسلك أرضي إشارة ثالث حين تختلف مراجع الجهد بين الأجهزة، أو عازل ضوئي للمسافات الطويلة وبين المباني.

الشكل 23-4: *توصيل خط RS-485 ثنائي الأسلاك: سيد وثلاثة توابع في سلسلة متتابعة، ومقاومتا إنهاء في الطرفين، وحماية مؤرضة من طرف واحد.*

معاملات المنفذ التسلسلي: يجب أن تتطابق في كل الأجهزة على الخط: السرعة (9600 أو 19 200 bps مثلًا)، وعدد بتات البيانات (8)، والتكافؤ (Parity) (لا شيء، أو زوجي، أو فردي)، وبتات التوقف (1 أو 2). والصيغة الشائعة 9600-8-1-N. واختلاف واحد منها يعطي أخطاء CRC متكررة أو صمتًا تامًا.

23.6 بروتوكول Modbus بالتفصيل

Modbus أقدم البروتوكولات الصناعية التي ما زالت مستعملة وأكثرها انتشارًا لبساطته وانفتاحه. ونموذجه سيد وتابع: السيد وحده يبدأ الحوار، ويرد التابع المعنون. وله ثلاثة أشكال:

الشكل	الوسط	الترميز	كشف الأخطاء	ملاحظات
Modbus RTU	RS-485 أو RS-232	ثنائي، بايت لكل 8 بتات	CRC-16	الأكثر شيوعًا في الأجهزة الميدانية، والإطار يُفصل بصمت 3.5 حرف
Modbus ASCII	تسلسلي	كل بايت يُرسل حرفين ست عشريين	LRC	يبدأ الإطار بالنقطتين وينتهي بسطر جديد، أبطأ وأسهل قراءة، نادر اليوم
Modbus TCP	Ethernet	ثنائي داخل رزم TCP على المنفذ 502	يتكفل به TCP	يضاف رأس MBAP بمعرّف المعاملة والطول ومعرّف الوحدة، ويسمح بعدة سادة

كيف أختار؟ ما يدعمه الجهاز أصلًا يحسم: الأجهزة الميدانية والعدادات ومرحّلات الحماية على RS-485 تأخذ RTU، وما له منفذ Ethernet يأخذ TCP لأنه يسمح بعدة سادة وبمسافات أطول عبر المبدلات والألياف، وASCII لا يُختار في مشروع جديد. ولا يبين الجدول ما يقرر نجاح الربط فعلًا: خريطة السجلات ونوع البيانات وترتيب الكلمتين والتحجيم، وهي واحدة في الأشكال الثلاثة وتُوثق في جدول الربط قبل التنفيذ. والخطأ الأكثر كلفة الظن أن TCP «أسرع» فيُستعمل في حلقة تحكم أو تعشيق حرج، بينما لا يضمن أي شكل من الثلاثة زمن الوصول، فيبقى Modbus للمراقبة والأوامر غير الحرجة والتعشيق الحرج سلكيًا.

نموذج البيانات: أربعة جداول: الملفات (Coils) بتات تُقرأ وتُكتب، والمداخل المنفصلة بتات تُقرأ فقط، وسجلات الإدخال كلمات 16 بت تُقرأ فقط، وسجلات الاحتفاظ (Holding Registers) كلمات تُقرأ وتُكتب. وفي الوثائق تُرقم الجداول تقليديًا من 1 و10001 و 30001 و40001، بينما يُرسل في الرسالة العنوان ناقصًا واحدًا ودون البادئة: فالسجل 40001 يُرسل بالعنوان 0. وهذا الفرق بين «الرقم» و«العنوان» أول ما يُفحص عند قراءة قيم في المكان الخطأ.

رموز الوظائف الشائعة: 01 قراءة الملفات، 02 قراءة المداخل المنفصلة، 03 قراءة سجلات الاحتفاظ، 04 قراءة سجلات الإدخال، 05 كتابة ملف واحد، 06 كتابة سجل واحد، 15 و16 كتابة عدة ملفات أو سجلات. وإذا رفض التابع الطلب رد برمز الوظيفة مضافًا إليه 128 مع رمز استثناء: 01 وظيفة غير مدعومة، 02 عنوان غير موجود، 03 قيمة غير مقبولة.

الشكل 23-5: *بنية إطار Modbus RTU، ومثال كامل لطلب قراءة سجلين من التابع رقم 3 والرد عليه بالبايتات الست عشرية.*

مثال محلول (قراءة وتفسير): في الشكل 23-5 طلب السيد سجلين من العنوان 0 (أي 40001 و40002) في التابع 3. جاء الرد بأربعة بايتات: 0BB8H و01F4H.

- 0BB8H = 11 × 256 + 184 = 3000، و01F4H = 500.
- يقول دليل الجهاز إن السجل 40001 هو الضغط بوحدة 0.01 bar، والسجل 40002 هو الفتح بوحدة 0.1%. فالقراءتان 30.00 bar و 50.0%.
- لو كانت القيمة عددًا بفاصلة عائمة (32 بت) لاحتلت سجلين، ولاختلف ترتيب الكلمتين بين الشركات (Word Swap)، فتُقرأ قيمة غريبة جدًا حتى يُعكس الترتيب في إعدادات السيد.
- الأعداد السالبة تُرسل بالمتمم الثنائي: فالقيمة FFF6H في سجل موقّع تعني

> 10−، وفي سجل غير موقّع 65 526.

حساب زمن الاستطلاع: كما حُسب في الفصل 44، تستغرق قراءة عشرة سجلات بسرعة 9600 bps نحو 50 ms مع فترات الصمت. فإذا كان على الخط 15 جهازًا، وكل منها يحتاج ثلاثة طلبات، صار زمن دورة الاستطلاع التقديري نحو

$$2.3\ \text{s}\ (15 \times 3 \times 50\ \text{ms} = 2.25\ \text{s})$$

وفق الافتراضات التالية: زمن الطلب 50 ms يشمل إرسال الطلب والرد وفاصلي الصمت وزمن معالجة الجهاز، ولا يشمل التأخير الذي يضيفه بعض السادة بين الطلبات ولا إعادة المحاولة عند فقد رد (كل مهلة انتظار (Timeout) تُضيف عادة 0.5 إلى 1 s للدورة كلها). ولذلك يُقاس زمن الدورة الفعلي بعد التشغيل بمراقبة طابع زمن تحديث سجل معروف، وقد وُجد في تطبيق مماثل نحو 3.6 s بسبب تأخير 30 ms يضيفه السيد بين الطلبات (45 × 30 ms = 1.35 s). ويُقصّر برفع السرعة إلى 38 400 bps، أو بتجميع السجلات المتجاورة في طلب واحد، أو بتقسيم الأجهزة على عدة منافذ.

23.7 الشبكات الحقلية: Foundation Fieldbus وPROFIBUS وHART و AS-i وCAN

Foundation Fieldbus H1: شبكة رقمية للأجهزة الميدانية بسرعة 31.25 kbit/s على زوج كابل يحمل التغذية والإشارة معًا. وتميزها القدرة على تنفيذ كتل الوظائف، مثل PID، داخل الأجهزة نفسها، فيمكن أن تعمل حلقة تحكم بين مرسل وصمام ولو توقف نظام التحكم، بشرط وجود جهاز ميداني احتياطي لجدولة الوصلة (Backup LAS). وتُبنى القطعة (Segment) من بطاقة H1، ومكيف تغذية، وخط رئيسي، وصناديق توصيل بفروع لا تزيد عادة على 120 m، ومنهيين في طرفي الخط، وحتى 16 جهازًا لكل قطعة وفق إرشادات المضيف (الحد الفيزيائي في المواصفة 32)، وعمليًا 8 إلى 12 مع مراعاة ميزانية التيار وزمن التنفيذ الكلي (Macrocycle). وفي المناطق الخطرة يُستخدم مفهوم FISCO أو الحواجز الحقلية للفروع.

PROFIBUS: له نسختان: PROFIBUS DP بسرعات حتى 12 Mbit/s على RS-485 لوحدات الإدخال والإخراج والمغيرات، وPROFIBUS PA بالفيزياء نفسها التي في H1 للأجهزة الميدانية، مع مقرن (Coupler أو Link) بينهما. وفيه عناوين حتى 126، وملفات وصف الأجهزة GSD.

HART: شرحناه في 23.1، ويُعامل شبكة حين تُجمع إشاراته عبر بطاقات إدخال تدعمه (HART-enabled I/O) أو مضاعفات (Multiplexers) إلى نظام إدارة الأصول.

AS-i: شبكة بسيطة للحساسات والمشغلات المنفصلة، بكابل مسطح أصفر يُثقب بموصلات دون قطع، حتى 62 جهازًا و100 m لكل قطعة، ودورة أقل من 10 ms. شائعة في المصانع والتعبئة والمناولة.

CAN وCANopen وDeviceNet: ناقل تفاضلي متين نشأ في السيارات، بآلية أولويات تمنع التصادم. تُبنى عليه شبكة DeviceNet في المصانع وCANopen في الآلات المتحركة والمولدات ورافعات المنصات.

الشكل 23-6: *إلى اليمين قطعة Foundation Fieldbus H1 بمكيف التغذية والخط الرئيسي وصناديق التوصيل والفروع والمنهي. وإلى اليسار شبكة Ethernet صناعية بمبدلات رئيسية وحقلية في حلقة متكررة.*

الشكل 23-7: *منظر ثلاثي الأبعاد لقطعة شبكة حقلية: الخط الرئيسي على حامل الكابلات من خزانة التحكم، وصناديق توصيل تتفرع منها فروع قصيرة إلى المرسلات، والمنهي في آخر الخط.*

مثال محلول (ميزانية تيار قطعة H1): مكيف تغذية يعطي 24 V و360 mA، وأجهزة يستهلك كل منها 18 mA، والخط الرئيسي 600 m بمقاومة 44 Ω لكل كيلومتر للموصل (قيمة محافظة لكابل رفيع؛ فكابل Type A القياسي وفق IEC 61158-2 مقاومته نحو 44 Ω/km للحلقة كلها، أي نحو 22 Ω/km للموصل، فيكون الهبوط نصف ما يلي)، وأدنى جهد مسموح على الجهاز 9 V.

- عدد الأجهزة الذي يسمح به التيار = 360 ÷ 18 = 20، وتحدده إرشادات المضيف بـ 16 جهازًا (والحد الفيزيائي في المواصفة 32)، ويحدده الزمن عمليًا بأقل.
- لعشرة أجهزة في آخر الخط:
  - التيار = 10 × 18 = 180 mA.
  - مقاومة الموصلين = 2 × الطول × مقاومة الكيلومتر = 2 × 0.6 × 44 = 52.8 Ω.
  - هبوط الجهد = التيار × المقاومة = 0.18 × 52.8 ≈ 9.5 V.
  - الجهد عند الأجهزة = 24 − 9.5 = 14.5 V، وهو أكبر من الحد الأدنى 9 V.
- لو زاد الطول إلى 1500 m لهبط الجهد نحو 23.8 V ولم يبق شيء، فيُقسم الخط قطعتين أو يُقلل عدد الأجهزة.

الشكل 23-8: *إشارة HART مركبة فوق تيار الحلقة: موجة FSK بسعة ±0.5 mA متوسطها صفر فلا تغير القيمة التناظرية؛ تردد 1200 Hz يمثل الواحد و2200 Hz يمثل الصفر بمعدل 1200 bit/s، ويلزم ألا تقل مقاومة الحلقة عن 230 Ω ليرى المودم الإشارة.*

جدول مقارنة: وسائل الربط الحقلي الشائعة

المعيار	4–20 mA + HART	Foundation Fieldbus H1	PROFIBUS PA
الوسط	زوج مجدول لكل جهاز	زوج واحد لقطعة (31.25 kbit/s)	كذلك (31.25 kbit/s)
التغذية على الناقل	نعم	نعم	نعم
أجهزة لكل قطعة/منفذ	1	حتى 16 وفق المضيف، وعمليًا 8 إلى 12 (6 إلى 8 في IS)	كذلك
التحكم في الحقل	لا	نعم (كتل PID في الجهاز)	لا
المناطق الخطرة	Ex i سهل	Ex i بقطعة محدودة، FISCO	كذلك
التشخيص	عبر HART بطيئًا	كامل ومتزامن	كامل

المعيار	4–20 mA + HART	Foundation Fieldbus H1	PROFIBUS PA
أين يُفضَّل	الحلقات الحرجة والسلامة والتحديثات	وحدات جديدة كثيفة الأجهزة (تقل اليوم)	مصانع PROFIBUS القائمة

جدول مقارنة: وسائل الربط الحقلي الشائعة (تابع)

المعيار	Modbus RTU (RS-485)	WirelessHART	Ethernet-APL
الوسط	زوج واحد متعدد النقاط	راديو 2.4 GHz شبكي	زوج واحد 10 Mbit/s
التغذية على الناقل	لا (تغذية منفصلة)	بطارية أو طاقة موقعية	نعم (حتى 500 mW)
أجهزة لكل قطعة/منفذ	حتى 32	مئات في الشبكة	1 لكل منفذ مبدّل
التحكم في الحقل	لا	لا	لا (لكن حلقات أسرع)
المناطق الخطرة	Ex e/d للأجهزة	Ex i/d حسب الجهاز	Ex i بمنفذ (2-WISE)
التشخيص	ما يبرمجه المورد	كامل مع تأخير	كامل وسريع
أين يُفضَّل	حزم وأجهزة تحليل ومولدات	نقاط المراقبة البعيدة	المشاريع الجديدة من 2023 فصاعدًا

كيف أختار؟ الحلقات التي تدخل في الحماية والتحكم الحرج، وما يُستبدل في وحدة قائمة، تبقى 4–20 mA مع HART؛ والمشروع الجديد كثيف الأجهزة يُقارن فيه Ethernet-APL بالشبكات الحقلية التقليدية على أساس ما يدعمه المضيف وما يتوفر من أجهزة في السوق؛ والحزم والمحللات تأتي بـ Modbus RTU لأن موردیها يوردونها كذلك؛ والنقاط البعيدة التي لا تستحق كابلًا تُقاس لاسلكيًا. ولا يبين الجدول كلفة المهارات والأدوات: قطعة H1 تحتاج محلل شبكة حقلية وفنيًا يعرف ميزانية التيار، وإلا صارت

مزاياها أعطالًا متقطعة. والخطأ الأكثر كلفة وضع وظيفة سلامة أو حلقة سريعة على وسط زمن تحديثه بالثواني أو له نقطة فشل مشتركة، أو خلط أوساط كثيرة في وحدة واحدة فيصير كل عطل درسًا جديدًا لفريق الصيانة.

23.8 Ethernet الصناعي: Modbus TCP وPROFINET وEtherNet/IP

Ethernet المكتبي لا يضمن زمن وصول الرسالة، لأن الرزم تتنافس على الوسط. والنسخ الصناعية تعالج ذلك بطرق مختلفة:

البروتوكول	الأساس	الزمن الحقيقي	أين يشيع
Modbus TCP	Modbus داخل TCP/IP	لا ضمان، ويكفي للمراقبة والحزم	ربط الحزم والمولدات والعدادات بأنظمة التحكم
EtherNet/IP	بروتوكول CIP على TCP و UDP	رسائل ضمنية دورية، ومع CIP Sync للتزامن	مصانع أمريكا الشمالية، ومنتجات Rockwell
PROFINET	إطارات Ethernet مباشرة للزمن الحقيقي، وTCP/IP للتهيئة	RT بدورات من رتبة الملي ثانية، وIRT للحركة الدقيقة	مصانع أوروبا، ومنتجات Siemens
EtherCAT	إطار واحد يمر بكل الأجهزة ويُعالج أثناء مروره	دون 100 µs	الآلات والحركة السريعة
Foundation Fieldbus HSE	Ethernet سريع للربط بين قطع H1	متوسط	أنظمة التحكم بالعمليات

كيف أختار؟ البروتوكول يتبع المنصة لا العكس: منتجات Rockwell تأتي بـ EtherNet/IP، وSiemens بـ PROFINET، وما بينهما وبين الأطراف الأخرى (الحزم والمولدات والعدادات) يُربط بـ Modbus TCP للمراقبة، وEtherCAT حين تكون المسألة حركة سريعة في آلة. ولا يبين الجدول أن «الزمن الحقيقي» لا يصمد إلا على مبدلات

مدارة مهيأة له، وشبكة معزولة عن حركة المكاتب والفيديو، وعناوين مخططة في جدول موثق. والخطأ الأكثر كلفة استعمال بروتوكول لا يضمن زمن الوصول في حلقة تحكم سريعة أو تعشيق، كما حدث مع تردد المولد في المثال الميداني آخر هذا القسم، والحل حينها إشارة 4–20 mA مباشرة لا مبدل أسرع.

عناصر الشبكة:

- **المبدلات المدارة (Managed Switches):** تسمح بتقسيم الشبكة إلى شبكات افتراضية (VLAN)، وبمراقبة المنافذ، وبروتوكولات الحلقة، وتحديد أولوية الرزم. والمبدلات غير المدارة رخيصة لكنها عمياء، ولا تصلح إلا لأصغر الشبكات.
- **الكابلات:** Cat 5e أو Cat 6 مدرع للمسافات حتى 100 m، والليف البصري بين المباني وفي البيئات المشوشة ولإلغاء فروق جهد الأرضي. ولا يُمد كابل Ethernet نحاسي بين مبنيين.
- **التكرار:** حلقة MRP تتعافى خلال أقل من 200 ms، وPRP تعمل بشبكتين ماديتين متوازيتين، وHSR بحلقة واحدة تُرسل فيها نسختان من الإطار في اتجاهين متعاكسين، فلا يُفقد شيء عند قطع أي كابل، وهما شائعتان في أنظمة الطاقة والتوربينات.
- **العنونة:** لكل جهاز عنوان IP وقناع شبكة، وتُخطط العناوين في جدول موثق قبل التنفيذ. والعنوان المكرر من أكثر الأعطال إرباكًا: يعمل الجهازان بالتناوب وتتقطع القراءات.

> **مثال ميداني (زمن الاستجابة عبر Modbus TCP):** ربطت مولدات طوارئ بنظام DCS عبر Modbus TCP، فأعطت القراءات تحديثًا كل ثانية تقريبًا، وهو كافٍ للمراقبة. لكن حين طُلب استخدام قيمة تردد المولد في حلقة تحكم سريعة تبين أن التأخر والتفاوت غير مقبولين، فأُضيفت إشارة 4–20 mA مباشرة للتردد. والدرس: بروتوكول المراقبة ليس بالضرورة بروتوكول تحكم.

23.8.1 وسط النقل: كابل *Ethernet* النحاسي والألياف الضوئية

تحمل شبكة Ethernet إشاراتها على وسطين رئيسين: كابل نحاسي من أزواج مجدولة، وكابل ألياف ضوئية. والبروتوكول واحد على الوسطين، لكن المسافة والمناعة من التداخل وطريقة التركيب والفحص تختلف كثيرًا (الشكل 23-9).

الكابل النحاسي (Twisted Pair). أربعة أزواج مجدولة، ويحمل الإشارة كهربائيًا. وأقصى طول للقناة 100 m (90 m وصلة دائمة و10 m كابلات توصيل)، مهما كانت الفئة. وتختلف الفئات في السرعة: Cat 5e تكفي لسرعة 1 Gb/s، وCat 6A تحمل 10 Gb/s على 100 m. ويرمز الحجب بحرفين: الأول للحجب الشامل والثاني لحجب كل زوج، مثل U/UTP (بلا حجب) وF/UTP (رقاقة شاملة) وS/FTP (ضفيرة شاملة ورقاقة لكل زوج). وفي الصناعة تُستعمل موصلات M12 المحكمة بدل RJ45 في الأجهزة الميدانية: النوع D-coded بأربعة أسلاك حتى 100 Mb/s، والنوع X-coded بثمانية أسلاك حتى 10 Gb/s. ويستطيع الكابل النحاسي أن يغذي الجهاز بالكهرباء عبر الأسلاك نفسها (Power over Ethernet – PoE).

الألياف الضوئية (Fiber Optic). تحمل الإشارة ضوءًا في قلب زجاجي بالانعكاس الكلي الداخلي. ونوعاها:

- **متعدد الأنماط (Multimode):** قلب قطره 50 أو 62.5 ميكرومتر، ويعمل غالبًا بطول موجة 850 nm. وفئاته OM1 إلى OM5، وكلما ارتفعت الفئة زادت المسافة عند السرعات العالية. ومصادره الضوئية أرخص، ويناسب المسافات داخل المنشأة حتى بضع مئات من الأمتار عند السرعات العالية، ونحو 2 km عند 100 Mb/s.
- **أحادي النمط (Single-Mode):** قلب قطره نحو 9 ميكرومتر، بطول موجة 1310 أو 1550 nm، وفئتاه OS1 وOS2. يصل إلى عشرات الكيلومترات، ويُستعمل بين المواقع وفي خطوط الأنابيب وحلقات الشبكة الرئيسة.

والموصلات الشائعة LC (الأصغر والأشيع اليوم)، وSC، وST (الأقدم). والوصلة الضوئية زوج من الألياف: ليف للإرسال وآخر للاستقبال.

الشكل 23-9: *(أ) مقطع كابل نحاسي بأربعة أزواج مجدولة وحجب شامل، ومقطع ليف بصري بقلبه وغلافه. (ب) أقصى مسافة نموذجية للوصلة بحسب الوسط والسرعة: النحاس محدود بمئة متر، والألياف متعددة الأنماط بمئات الأمتار إلى كيلومترين، والأحادية بعشرات الكيلومترات.*

جدول مقارنة: كابل Ethernet النحاسي والألياف الضوئية

المعيار	النحاس (Cat 5e إلى Cat 6A)	الألياف متعددة الأنماط	الألياف أحادية النمط
أقصى مسافة	100 m	مئات الأمتار عند 1 وG 10 b/s، ونحو 2 km عند 100 Mb/s	من 5 km إلى عشرات الكيلومترات
المناعة من التداخل الكهرومغناطيسي	محدودة، تتحسن بالحجب	كاملة	كاملة
العزل الكهربائي بين الطرفين	لا؛ فروق جهد الأرض والصواعق تنتقل	كامل	كامل

المعيار	النحاس (Cat 5e إلى Cat 6A)	الألياف متعددة الأنماط	الألياف أحادية النمط
تغذية الجهاز بالكهرباء (PoE)	ممكنة	غير ممكنة	غير ممكنة
التركيب والإنهاء	سهل بأدوات بسيطة	يحتاج لحامًا أو موصلات جاهزة ونظافة	مثله وبدقة أعلى
الحساسية الميكانيكية	متينة نسبيًا	حساسة لنصف قطر الانحناء والشد	مثلها
الكلفة	الأقل للمسافات القصيرة	متوسطة	أعلى في الوحدات الضوئية، وأوفر للمسافات الطويلة
الاستعمال النموذجي	داخل الخزانة وغرفة التحكم وحتى الأجهزة القريبة	بين الخزانات والمباني داخل المنشأة	بين المواقع وعلى طول الخطوط

> **القاعدة العملية للاختيار:** النحاس داخل الخزانة والغرفة والمبنى حين تقل المسافة عن 100 m ولا يوجد مصدر تداخل قوي. والألياف في أربع حالات: مسافة أكبر من 100 m، أو ربط بين مبنيين أو منطقتين لكل منهما أرضي مختلف، أو مسار بجوار محركات سرعة متغيرة أو محطة جهد عالٍ، أو العمود الفقري للشبكة وحلقاتها المكررة. والألياف لا تنقل تيارًا ولا تسبب شرارة. ومع ذلك فإن الإشعاع الضوئي عالي القدرة قد يكون مصدر اشتعال، ولذلك تعالجه المواصفة IEC 60079-28 في المناطق الخطرة.

ميزانية فقد الوصلة الضوئية. كل وصلة ضوئية لها ميزانية فقد (Loss Budget) من ورقة بيانات الوحدتين الضوئيتين: الفرق بين أدنى قدرة إرسال وحساسية الاستقبال (أدنى قدرة يلتقطها المستقبل). ويجب أن يقل الفقد الفعلي عنها بهامش.

مثال محلول (هل تعمل الوصلة؟):

- **المعطيات:** وصلة ألياف متعددة الأنماط بطول 1.2 km بين غرفة التحكم ومحطة الضواغط، بسرعة 100 Mb/s وطول موجة 1300 nm. فيها زوجا موصلات (طرف في كل جهة) ولحامان. وميزانية الوحدتين من ورقة البيانات 11 dB (قيمة نموذجية).
- **الافتراضات:** فقد الليف 1.5 dB/km عند 1300 nm، و0.75 dB لكل زوج موصلات (الحد الأقصى المعتاد في مواصفات التمديد)، و0.3 dB لكل لحام. وهي قيم تصميم محافظة، والفعلي يُقاس.
- **الحل:**
  - فقد الليف = الطول × الفقد لكل كيلومتر = 1.2 × 1.5 = 1.8 dB.
  - فقد الموصلات = 2 × 0.75 = 1.5 dB.
  - فقد اللحامات = 2 × 0.3 = 0.6 dB.
  - الفقد الكلي = 1.8 + 1.5 + 0.6 = 3.9 dB.
  - الهامش = الميزانية − الفقد الكلي = 11 − 3.9 = 7.1 dB.
- **المعنى ميدانيًا:** الوصلة تعمل بهامش كبير. أما رفع السرعة إلى 1 Gb/s على الليف نفسه فمحدود بالمسافة لا بالفقد: الألياف متعددة الأنماط لا تدعم هذه السرعة لمسافة 1.2 km، فيلزم ليف أحادي النمط. والدرس: عند تصميم وصلة ضوئية تُفحص الميزانية والمسافة القصوى للسرعة معًا.

الفحص والاختبار: يُفحص الكابل النحاسي بجهاز اعتماد الكابلات (Cable Certifier)، الذي يقيس ترتيب الأسلاك والطول والتداخل بين الأزواج وفقد الانعكاس، لا بمختبر استمرارية بسيط فقط. وتُفحص الألياف بمصدر ضوئي ومقياس قدرة لقياس الفقد الكلي، وبجهاز OTDR لتحديد موضع كل لحام أو موصل أو كسر وفقده، ويُفحص وجه كل موصل بمجهر قبل توصيله.

جدول تشخيص: أعطال الوسط المادي

العَرَض	الوسط	السبب المرجح	الفحص
لا اتصال (مؤشر المنفذ مطفأ)	نحاس	زوج مقطوع أو ترتيب أسلاك خاطئ في الموصل	جهاز اعتماد أو مختبر ترتيب الأسلاك
اتصال يعمل ببطء وأخطاء إطارات متزايدة	نحاس	تداخل، أو طول يتجاوز 100 m، أو موصل رديء، أو عدم توافق الإرسال المزدوج (Duplex)	عدادات أخطاء المنفذ في المبدل، والطول، ومسار الكابل
لا اتصال	ألياف	الإرسال والاستقبال معكوسان	بدّل الليفين في طرف واحد
لا اتصال مع قدرة واصلة	ألياف	نوع ليف أو طول موجة لا يطابق الوحدة الضوئية	ورقة بيانات الوحدتين ونوع الليف
فقد عالٍ أو اتصال متقطع	ألياف	موصل متسخ، أو انحناء حاد، أو لحام رديء	مجهر الموصلات، وOTDR، وتنظيف الموصلات
أعطال بعد عاصفة رعدية	نحاس بين مبنيين	فرق جهد وتيارات صاعقة عبر الكابل	استبدال الوصلة بألياف

والقاعدة الذهبية في الألياف: **نظّف ثم افحص ثم وصّل.** فأغلب أعطال الوصلات الضوئية سببها موصل متسخ، لا ليف مكسور.

23.8.2 خريطة البروتوكولات المتصلة بأنظمة *DCS*

يتصل نظام DCS الحديث بعشرات الأنظمة: أجهزة ميدانية ذكية، وحزم PLC، ومرحّلات حماية، ومحطات فرعية، ومواقع بعيدة، وأنظمة المؤسسة. ولكل اتصال بروتوكول، وبعضها يحتاج بطاقة اتصال أو بوابة (Gateway) خاصة. والجداول الثلاثة التالية خريطة مرجعية لها، مرتبة من الميدان إلى المؤسسة. والقاعدة الأولى قبل أي ربط: **التوافق يتحدد بالواجهة كاملة لا بالكابل أو الموصل.** فيجب أن يدعم الطرفان

البروتوكول نفسه، وإعداداته (السرعة، والعنوان، وترتيب البايتات، والمهلة)، وتعريف البيانات نفسه (أي سجل يحمل أي قيمة، وبأي وحدة وتحجيم). وتُوثق هذه كلها في وثيقة الواجهة (Interface Document) قبل التنفيذ.

(أ) مستوى الأجهزة الميدانية والحزم

البروتوكول أو التقنية	النوع والوسط	الاستعمال النموذجي مع DCS
إشارة 4–20 mA والتلامسات	إشارات سلكية تقليدية، **ليست بروتوكول اتصال**	القياسات التناظرية والحالات والأوامر والتعشيقات عبر قناة لكل إشارة
HART	اتصال رقمي فوق حلقة 4–20 mA	قراءة المرسلات والموضّعات الذكية وتهيئتها وتشخيصها (23.7 و39.6)
WirelessHART	شبكة لاسلكية متشابكة عبر بوابة	أجهزة قياس لاسلكية للقياس والمراقبة (23.10)
Foundation Fieldbus H1	ناقل ميداني رقمي ثنائي السلك	المرسلات وصمامات التحكم، مع إمكان تنفيذ كتل التحكم في الأجهزة نفسها
Foundation Fieldbus HSE	Ethernet عالي السرعة	ربط أجهزة الوصل بين قطع H1 وبقية معدات الأتمتة
PROFIBUS PA	ناقل ميداني ثنائي السلك للعمليات	أجهزة القياس، بما في ذلك المنشآت المصممة للمناطق الخطرة
PROFIBUS DP	غالبًا على RS-485	وحدات الإدخال والإخراج البعيدة، ومحركات السرعة، ومراكز المحركات، والحزم
PROFINET	Ethernet صناعي	تبادل بيانات التحكم والتشخيص مع الوحدات البعيدة وPLC والمحركات والأجهزة

البروتوكول أو التقنية	النوع والوسط	الاستعمال النموذجي مع DCS
EtherNet/IP	بروتوكول CIP فوق Ethernet، يستعمل TCP وUDP لخدمات مختلفة	PLC والمحركات والوحدات البعيدة والحزم
Modbus RTU	تسلسلي ثنائي، غالبًا على RS-485	العدادات والمحللات ومرحّلات الحماية ومصادر UPS وحزم PLC
Modbus ASCII	تسلسلي بترميز نصي	المعدات القديمة أو الخاصة
Modbus TCP	Modbus فوق TCP/IP، غالبًا على Ethernet	تبادل السجلات وبتات الحالة والأوامر مع معدات الأطراف الأخرى
CAN وCANopen	ناقل رسائل، وفوقه بروتوكول أعلى	محركات الاحتراق والآلات والأنظمة المدمجة، والمحركات الكهربائية والحساسات والوحدات البعيدة
SAE J1939	بروتوكول أعلى فوق CAN	سرعة محركات الديزل وحرارتها وضغوطها وتشخيصها مع متحكمات المولدات
DeviceNet	بروتوكول CIP فوق CAN	مشغلات المحركات والحساسات والمشغلات في المنشآت الأقدم
IO-Link	اتصال رقمي نقطة إلى نقطة عبر وحدة رئيسة	الحساسات والمشغلات الذكية، والرئيسة تتصل بشبكة التحكم
AS-Interface	شبكة ثنائية السلك للحساسات والمشغلات	المفاتيح والحساسات البسيطة ومجموعات الصمامات عبر بوابة
شبكات DCS الخاصة بالمورد	بروتوكولات وتصاميم يحددها المصنّع	الاتصال الداخلي بين المتحكمات والإدخال والإخراج والشاشات والتكرار والتزامن

(ب) الطبقات الأساسية والوسط المادي

التقنية	النوع	دورها
Ethernet	تقنية الطبقتين المادية وربط البيانات	تربط المتحكمات والمبدلات والخوادم والشاشات، وتحمل بروتوكولات صناعية مختلفة (23.8.1)
TCP/IP	مجموعة بروتوكولات الشبكات	الأساس لبروتوكولات مثل Modbus TCP: يتولى IP العنونة والتوجيه، ويتولى TCP التسليم الموثوق المرتب
UDP	بروتوكول نقل فوق IP	يرسل رزمًا دون ضمانات TCP، ويُستعمل في تبادل الإدخال والإخراج الدوري في EtherNet/IP وفي تزامن الوقت
RS-232	واجهة كهربائية تسلسلية	اتصال نقطة إلى نقطة بالأجهزة والمودمات والمعدات القديمة؛ لا تحدد بروتوكول التطبيق
RS-485	واجهة تسلسلية تفاضلية	شبكات متعددة الأجهزة على زوج واحد، يستعملها Modbus RTU وPROFIBUS DP (23.5)

(ج) الأنظمة الأخرى والمواقع البعيدة والوقت

البروتوكول	النوع	الاستعمال النموذجي مع DCS
OPC DA و A&E وHDA	واجهات OPC الكلاسيكية على COM/DCOM في Windows	تبادل البيانات الحية (DA) والإنذارات والأحداث (A&E) والبيانات التاريخية (HDA) مع التطبيقات الخارجية
OPC UA	إطار اتصال صناعي مستقل عن المنصة	تبادل البيانات المهيكلة والإنذارات والتاريخ بين DCS وSCADA والمؤرخات والتطبيقات (23.9)
IEC 61850	سلسلة مواصفات أتمتة الأنظمة الكهربائية، غالبًا على Ethernet	المحطات الفرعية ومرحّلات الحماية والأجهزة الإلكترونية الذكية، بخدمات مثل MMS و GOOSE
IEC 60870-5-101	بروتوكول تحكم عن بعد تسلسلي	المحطات البعيدة ومعدات المرافق الكهربائية

البروتوكول	النوع	الاستعمال النموذجي مع DCS
IEC 60870-5-104	تحكم عن بعد فوق TCP/IP	الاتصال الشبكي بالأنظمة الكهربائية ومرافق الخدمات البعيدة
DNP3	تحكم عن بعد، تسلسلي أو فوق IP	الوحدات الطرفية البعيدة (RTU) في المرافق وخطوط الأنابيب وأنظمة المياه
MQTT	رسائل بنمط النشر والاشتراك، غالبًا فوق TCP/IP	إرسال بيانات المصنع عبر البوابات إلى منصات المراقبة وتطبيقات إنترنت الأشياء الصناعي
BACnet	بروتوكول أتمتة المباني، على IP أو تسلسلي (MS/TP)	أنظمة التكييف والتهوية وإدارة المباني
GSM وGPRS	تقنية خلوية، وGPRS لنقل البيانات بالرزم	القياس عن بعد والمودمات والإنذارات؛ تعطي الاتصال ولا تعرّف البيانات الصناعية
4G LTE و5G	شبكات خلوية	ربط PLC وRTU وأنظمة المراقبة البعيدة عبر موجهات صناعية
NTP وSNTP	بروتوكولا وقت شبكي، غالبًا على UDP	مزامنة ساعات المتحكمات والخوادم والشاشات ومعدات الشبكة
PTP (IEEE 1588)	بروتوكول الوقت الدقيق	مزامنة دقيقة للساعات حيث تدعمها الأجهزة ومعدات الشبكة

ثلاث ملاحظات عملية:

1. **الواجهة الكهربائية ليست بروتوكولًا.** RS-485 تحدد الإشارة على السلكين، أما معنى البايتات فيحدده بروتوكول مثل Modbus RTU أو PROFIBUS DP. فجهازان «RS-485» لا يتفاهمان بالضرورة.
2. **الطابع الزمني يحتاج وقتًا موحدًا.** تسلسل الأحداث عبر أنظمة مختلفة لا يُقرأ إلا إذا تزامنت ساعاتها بـ NTP أو PTP. وهذا شرط لتحليل الفصل والسبب الجذري (39.11 و39.14).

3. **كل بروتوكول يعبر حدًا أمنيًا يمر بجدار ناري بقواعد محددة** (24.6.1)، والبروتوكولات القديمة بلا تحقق ولا تشفير (Modbus وDNP3 التقليدي وOPC DA) تُحصر داخل منطقتها أو تمر عبر بوابة آمنة.

23.9 OPC: لغة التبادل بين الأنظمة

OPC Classic (DA وHDA وA&E): معيار قديم مبني على تقنية COM في نظام Windows، يتيح لتطبيق أن يقرأ قيم نظام تحكم عبر «خادم OPC» يوفره صانع النظام. ومشكلته الاعتماد على Windows وصعوبة عبوره الجدران النارية بسبب DCOM.

OPC UA: المعيار الحديث المستقل عن نظام التشغيل، بأمن مدمج (شهادات وتشفير وتوقيع)، ونموذج معلومات يصف الجهاز لا القيم فقط. يعمل خادمًا في PLC أو بوابة أو حتى في مرسل، وعميلًا في المؤرخ ونظام التنفيذ والحوسبة السحابية. ونمط النشر والاشتراك (PubSub) فيه يجعله جسرًا نحو إنترنت الأشياء الصناعي. وفي مشاريع الربط بين الأنظمة صار OPC UA الخيار الافتراضي، ويُوضع خادمه في المنطقة المنزوعة السلاح لا في شبكة التحكم مباشرة (الفصل 24).

23.10 الشبكات اللاسلكية الصناعية

WirelessHART (IEC 62591) وISA100.11a: شبكات متشابكة (Mesh) في نطاق 2.4 GHz، كل جهاز فيها يستقبل ويعيد إرسال رسائل جيرانه، وللرسالة أكثر من مسار إلى البوابة، مع قفز ترددي وتشفير. وتصلح للمراقبة والقياسات غير الحرجة: حرارة أسطح الخزانات، وضغوط في مواقع بعيدة، ومؤشرات مواضع الصمامات اليدوية، ومراقبة مصائد البخار. ولا تُستخدم في حلقات التحكم السريعة ولا في السلامة إلا بتقييم خاص، بسبب زمن التحديث الذي يُقاس بالثواني والاعتماد على البطارية.

الشكل 23-10: *شبكة WirelessHART متشابكة: سبعة أجهزة وبوابة، ولكل جهاز أكثر من جار، فإذا انقطع مسار وجدت الرسالة مسارًا بديلًا.*

قواعد التصميم: لكل جهاز ثلاثة جيران على الأقل في مدى الرؤية وفق إرشادات التصميم الشائعة لدى الموردين، وأقرب الأجهزة إلى البوابة تحمل عبء التمرير فتُراعى بطاريتها، وتُحدد فترة التحديث بأطول ما تسمح به العملية لإطالة عمر البطارية (إطالة الفترة من 2 s إلى 8 s تطيل عمر البطارية كثيرًا، وتختلف النسبة بين الأجهزة وبعبء التمرير فيُرجع إلى حاسبة المصنّع)، وتُوضع البوابة في مكان مرتفع ومركزي، ويُراجع مسح الترددات إن كانت هناك شبكات Wi-Fi كثيفة.

الوصلات الأخرى: الراديو الرقمي والشبكات الخلوية والأقمار الصناعية لأنظمة SCADA البعيدة، وشبكات LPWAN مثل LoRaWAN للقياسات النادرة منخفضة الطاقة.

23.11 الربط بين الأنظمة والبوابات

في كل منشأة أنظمة من صانعين مختلفين: DCS رئيسي، وPLC للحزم، ونظام مراقبة الآلات، ومرحلات حماية كهربائية، وعدادات تجارية. وربطها هو عمل مهندس التحكم اليومي:

1. **تحديد الحاجة:** أي القيم تُنقل، وبأي اتجاه، وبأي معدل، وهل هي للمراقبة أم للتحكم أم للسلامة.
2. **اختيار البروتوكول:** ما يدعمه الطرفان أصلًا أفضل من إضافة بوابة (Gateway) تحول بين بروتوكولين، لأن كل تحويل يضيف تأخرًا ونقطة فشل ومكانًا لالتباس الترتيب والوحدات.
3. **جدول الربط (Interface List):** وثيقة تحدد لكل قيمة اسمها في الطرفين، وعنوان السجل أو الوسم، ونوع البيانات، والوحدة، والمدى، والاتجاه، وسلوك العطل. وهي أهم وثيقة في مشاريع الربط، وتُختبر بندًا بندًا في اختبار القبول.
4. **مراقبة الحالة:** كلمة حياة (Heartbeat)، وتسمى أيضًا نبض الحياة (21.6)، يزيدها أحد الطرفين دوريًا ويراقبها الآخر، فإذا تجمدت أُعلن انقطاع الاتصال وحُوّلت القيم إلى حالة آمنة معلنة، لا إلى آخر قيمة صامتة.

23.12 تشخيص مشكلات الاتصال

أغلب أعطال الشبكات في الطبقتين الأوليين، أي الكابل والإعدادات، وتُشخص بترتيب من الأسفل إلى الأعلى:

1. **الطبقة المادية:** القطبية، والاستمرارية، ومقاومة العزل، والحماية المؤرضة من طرف واحد، والإنهاء في الطرفين فقط، والطول الكلي وأطوال الفروع، وجهد التغذية في آخر الخط. وراسم الذبذبات على طرفي A وB يكشف الرنين وضعف الإشارة (الشكل 23-11). وفي Ethernet مؤشرات المنفذ (Link وActivity) وفاحص الكابلات.
2. **إعدادات المنفذ:** السرعة والتكافؤ وبتات التوقف والعنوان، ولا يُغيَّر أكثر من إعداد في المرة.
3. **الطبقة الشبكية:** أمر (ping) للوصول، وتحقق من القناع والبوابة، وبحث عن العنوان المكرر.

4. **البروتوكول:** محلل بروتوكول أو برنامج مراقبة المنفذ يعرض الطلب والرد بالبايتات: هل يرد الجهاز؟ وبأي استثناء؟ وهل يطابق ما نتوقعه؟ وفي Ethernet يفيد Wireshark.
5. **المعنى:** ترتيب الكلمات، والقيمة الموقعة وغير الموقعة، والتدريج، والوحدة، والفرق بين رقم السجل وعنوانه.

الشكل 23-11: *إشارة RS-485 على راسم الذبذبات في ثلاث حالات: سليمة بحواف حادة، ورنين عند غياب الإنهاء أو وجود فرع طويل، وضعيفة مشوشة بسبب طول الكابل أو تحميل زائد أو أرضي سيئ.*

أدوات مهندس الشبكات الصناعية: جهاز قياس متعدد، وراسم ذبذبات محمول، ومحول USB إلى RS-485 مع برنامج سيد Modbus تجريبي، وفاحص كابلات Ethernet، وحاسوب فيه Wireshark وأدوات الصانع، ومحلل قطعة الشبكة الحقلية (Fieldbus) يقيس جهد الإشارة والضجيج والتغذية لكل جهاز.

23.13 الأمن في تصميم الشبكة

كل ما سبق يفتح أبوابًا: منفذ Modbus TCP لا يطلب كلمة مرور، وOPC Classic يحتاج فتح منافذ كثيرة، والشبكة اللاسلكية تصل إلى خارج السور. ولذلك يُصمم الاتصال منذ

البداية بمناطق وقنوات: شبكة التحكم معزولة عن شبكة المؤسسة بجدار ناري ومنطقة منزوعة السلاح، والبوابات تسمح بالقراءة لا بالكتابة إلا حيث يلزم، والوصول للتهيئة عبر حسابات مسماة، والمنافذ غير المستخدمة معطلة. وتفاصيل ذلك كلها في الفصل 24.

23.14 دراسة حالة: قراءات متقطعة من حزمة ضواغط الهواء

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في محطة توليد رُبطت وحدة PLC لحزمة ضواغط هواء الأجهزة بنظام DCS عبر Modbus RTU على RS-485 بطول نحو 400 m. عملت الوصلة أسابيع، ثم بدأت القراءات تتجمد دقائق وتعود، وتزداد الأعطال في النهار الحار وعند تشغيل ضاغط احتياطي.

التشخيص: أظهر سجل الاتصال في DCS أخطاء CRC متكررة لا انقطاعًا تامًا؛ وأخطاء CRC وحدها لا تحسم (فاختلاف إعدادات المنفذ قد ينتجها أيضًا كما في 23.5)، لذلك جرى التحقق أولًا من تطابق السرعة وبتات البيانات والتكافؤ والتوقف في كل الأجهزة فوُجدت مطابقة، ثم فُحصت الإشارة براسم الذبذبات على طرفي الخط، فظهر رنين واضح عند حواف البتات. وعند تتبع الكابل وُجد أن فنيًا أضاف فرعًا طوله نحو 40 m إلى شاشة محلية في غرفة الضواغط، ووصله نجميًا من صندوق توصيل في منتصف الخط، وأن مقاومة الإنهاء مركبة في DCS وفي الشاشة الجديدة وفي PLC، أي ثلاث مقاومات. وزاد على ذلك أن حماية الكابل مؤرضة من الطرفين، فسرى فيها تيار عند تشغيل الضاغط.

الإصلاح: أُلغي الفرع النجمي وأُعيد توصيل الشاشة في السلسلة، وأُبقيت مقاومتا إنهاء في الطرفين فقط، وفُصل تأريض الحماية عند طرف PLC، وخُفضت السرعة من 38 400 إلى 19 200 bps. واختفت أخطاء CRC تمامًا.

الدروس:

- سجلات الاتصال توجّه التشخيص: الصمت التام أو الاستثناء يشير إلى العنوان أو الوظيفة، وأخطاء CRC تشير إلى الإشارة أو إعدادات المنفذ؛ ويُحسم بين الأخيرين بالتحقق من الإعدادات ثم برؤية شكل الإشارة، لا بعدّاد الأخطاء وحده.
- كل تعديل على شبكة تسلسلية، ولو إضافة شاشة، تعديل هندسي يُراجع فيه الإنهاء والطبولوجيا.
- الأرضي من طرفين يصنع حلقة أرضية تظهر أعطالها مع تشغيل الأحمال الكبيرة.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
حلقات 4–20 mA	موازنة الجهد، وأطول كابل، ومكان الحواجز والعوازل	يقيس الجهد على طرفي المرسل عند 20 mA، ومقاومة العزل والاستمرارية
خطوط RS-485	الطبولوجيا، ومكان مقاومتي الإنهاء والانحياز، ونقطة تأريض الحماية	يتحقق من السلسلة المتتابعة، ويقيس نحو 60 Ω بين A وB والأجهزة مطفأة (مقاومتا إنهاء فقط)، ويرى شكل الإشارة براسم الذبذبات
Modbus والبوابات	جدول الربط: السجلات والأنواع والتحجيم وترتيب الكلمات وسلوك العطل	يختبر كل بند ببرنامج سيد Modbus تجريبي، ويتحقق من كلمة الحياة بفصل الرابط
الشبكات الحقلية	ميزانية التيار والطول وعدد الأجهزة لكل قطعة	يقيس جهد التغذية والإشارة والضجيج على كل قطعة بمحلل الشبكة الحقلية
Ethernet والألياف	خطة العناوين والشبكات الافتراضية والتكرار، وميزانية فقد الوصلات	يعتمد الكابلات بجهاز الاعتماد، وينظف الموصلات ويفحصها بالمجهر، ويقيس الفقد بمقياس القدرة أو OTDR

23.15 الأخطاء الشائعة

- إهمال موازنة الجهد في الحلقة، ثم اكتشاف أن المرسل «يعمل» في الورشة ولا يصل إلى 20 mA في الموقع.
- توصيل RS-485 نجميًا، أو ترك فروع طويلة، أو تركيب مقاومات الإنهاء في كل جهاز.
- عكس A وB في جهاز واحد، أو الخلط بين تسميات الشركات المختلفة للطرفين.
- تأريض حماية الكابل من الطرفين.
- الخلط بين رقم السجل وعنوانه في Modbus، أو بين الكلمة الموقعة وغير الموقعة، أو ترتيب كلمتي القيمة العائمة.
- استخدام بروتوكول مراقبة في حلقة تحكم سريعة أو في وظيفة سلامة.
- عناوين IP مكررة، أو مبدلات غير مدارة في شبكات تحكم متوسطة أو كبيرة.
- تجاوز عدد الأجهزة أو ميزانية التيار أو أطوال الفروع في قطعة الشبكة الحقلية.
- تصميم شبكة لاسلكية بجار واحد لكل جهاز أو بفترة تحديث أقصر من الحاجة.
- بوابة تحويل دون كلمة حياة، فتتجمد القيم صامتة عند انقطاع الاتصال.

23.16 ملخص

الإشارة التناظرية تيار 4–20 mA تُحسب حلقته بموازنة الجهد، وHART يركب فوقه. والشبكات الرقمية تنقل قيمًا كثيرة مع التشخيص، وتُفهم بطبقات OSI وتُشخص من الأسفل إلى الأعلى. وRS-485 خط تفاضلي في سلسلة متتابعة بمقاومتي إنهاء، و Modbus بروتوكول سيد وتابع بسجلات ووظائف ورموز استثناء، وModbus TCP نسخته على Ethernet. وFoundation Fieldbus وPROFIBUS PA شبكتان حقليتان بقطع لها ميزانية تيار وطول، وEthernet الصناعي بمبدلات مدارة وتكرار حلقي، وOPC

UA لغة التبادل الآمنة بين الأنظمة، والشبكات اللاسلكية المتشابكة للمراقبة. وجدول الربط وكلمة الحياة أساس أي ربط بين نظامين، والأمن يُصمم مع الشبكة لا بعدها.

وفي الفصل التالي: الفصل 24 «الأمن السيبراني لأنظمة التحكم الصناعية OT»، لأن كل وصلة وبوابة وبروتوكول عرضناه هنا باب محتمل إلى المتحكم، وقد أشار القسم 23.13 إلى المناطق والقنوات دون تفصيل.

23.17 أسئلة التقييم الذاتي

1. لماذا تُنقل الإشارة التناظرية تيارًا لا جهدًا؟ وما فائدة الصفر الحي عند 4 mA؟
2. حلقة بمصدر 24 V ومقاومة إدخال 250 Ω وعازل 150 Ω وكابل مقاومته الكلية 40 Ω، ومرسل يحتاج 12 V. هل تعمل عند 20 mA؟ وما أقصى مقاومة إضافية يمكن إضافتها؟
3. ما الفرق بين RS-232 وRS-485 من حيث الجهد والمسافة وعدد الأجهزة؟
4. اذكر خمس قواعد لتوصيل خط RS-485 سليم.
5. جهاز Modbus وثيقته تقول إن الحرارة في السجل 30012. ما رمز الوظيفة والعنوان اللذان يُرسلان؟ وماذا يعني الرد بالرمز 84H والاستثناء 02؟
6. قيمة عائمة 32 بت تُقرأ 2.7×10^{23} بدل 25.3. ما السبب المحتمل وكيف تصلحه؟
7. خط H1 طوله 900 m يحمل 12 جهازًا يستهلك كل منها 20 mA، بمقاومة موصل 44 Ω/km (الموصلان معًا 88 Ω/km)، ومكيف تغذية 24 V، وأدنى جهد للجهاز 9 V. (أ) احسب الجهد عند آخر جهاز بافتراض تمركز الأجهزة كلها عند نهاية الخط (الحساب المحافظ). (ب) أعد الحساب مقطعًا مقطعًا بافتراض توزيعها بالتساوي جهازًا كل 75 m، حيث ينقص التيار في كل مقطع بمقدار جهاز. (ج) قارن النتيجتين وبيّن أيهما يُستخدم في تصميم القطعة ولماذا، وما الحل إن لم يكفِ الجهد.

8. ما الفرق بين المبدل المدار وغير المدار؟ ومتى يلزم الليف البصري؟
9. لماذا لا تُستخدم WirelessHART في حلقة تحكم سريعة؟ وما شرط تصميم شبكتها المتشابكة؟
10. في الحالة 23.14، ما الدليل الذي فرق بين مشكلة الإشارة ومشكلة الإعدادات؟ وما التعديلات الأربعة التي أعادت الوصلة إلى العمل؟

مراجع الفصل: Modbus Organization، مواصفة بروتوكول Modbus ومواصفة Modbus over Serial Line؛ TIA/EIA-485؛ IEC 61158 وIEC 61784 للشبكات الحقلية؛ Fieldbus Foundation، دليل هندسة نظام H1؛ IEC 62591 (WirelessHART)؛ HART Application Guide (HCF) (R27)؛ DCS Fundamentals (R23) لبنية رسائل Modbus وأوضاع ASCII وRTU؛ Manesis وNikolakopoulos (R12) وShardt (R13) للشبكات الصناعية؛ كتالوج كابلات الأجهزة (R15)؛ OPC Foundation، مواصفة OPC UA؛ خبرة المؤلف في ربط الحزم وأنظمة التوربينات بأنظمة التحكم؛ وTIA-568 وISO/IEC 11801 (التمديدات النحاسية والضوئية)، وIEEE 802.3 (Ethernet)، وIEC 60079-28 (الإشعاع الضوئي في المناطق الخطرة)، وIEC 61850 وIEC 60870-5 وDNP3 وMQTT وIEEE 1588؛ وR69 (23.8.1 و23.8.2).

الفصل 24: الأمن السيبراني لأنظمة التحكم الصناعية OT

> **لمن هذا الفصل:** مهندس التحكم الذي يُسأل فجأة: «هل نظامنا آمن؟» حين يطلب الصانع وصولًا بعيدًا، أو حين يصل تعميم من الإدارة عن ثغرة جديدة، أو حين يجد منفذ USB في محطة التشغيل يستخدمه الجميع. وهو ليس فصلًا لمتخصصي أمن المعلومات، بل لمن يعرف نظام التحكم من الداخل ويحتاج إلى أن يفهم لغة الأمن وأدواته ليكون طرفًا في حمايته، لا متفرجًا.
>
> **الفكرة الأساسية:** كان نظام التحكم محميًا بعزلته، ولم يعد كذلك. فالمراقبة عن بعد، وجمع البيانات، والدعم الفني، وتحديث البرمجيات، كلها فتحت أبوابًا نحو المتحكم الذي يحرك الصمامات ويطلق الحمايات. والحماية لا تأتي من جهاز واحد ولا من قسم تقنية المعلومات وحده، بل من تقسيم الشبكة إلى مناطق محكومة، وطبقات دفاع متتابعة، وممارسات يومية يلتزم بها كل من يلمس النظام. ومهندس التحكم هو من يعرف أي وصلة ضرورية وأيها ترف، وأي توقف مقبول وأيّ توقف خطر، فلا يُصمم الأمن دونه.

24.1 لماذا تغير الوضع؟

لعقود كانت أنظمة التحكم، من DCS في المصافي إلى وحدات التحكم بالتوربينات، معزولة فيزيائيًا: لا إنترنت، ولا اتصال بشبكة الشركة. وكان هذا العزل (Air Gap) خط الدفاع الوحيد تقريبًا، ولم يكن يحتاج إلى أحد ليديره. أما اليوم فالنظام متصل لأسباب مشروعة تمامًا: مؤرخ البيانات يغذي تقارير الإنتاج، والصيانة التنبؤية تحتاج بيانات

الاهتزاز والحرارة، والصانع يقدم الدعم عن بعد، والبرمجيات تُحدَّث، وأنظمة الإدارة تريد أن ترى الأداء لحظيًا. وكل وصلة من هذه باب لم يكن موجودًا.

وما يجعل الأمر مختلفًا عن اختراق بريد إلكتروني أن الهجوم هنا يصل إلى العالم الفيزيائي: تعطيل الإنتاج، أو تلاعب بقيمة قياس تخدع المشغل، أو في أسوأ الحالات تعديل منطق الحماية نفسه. وقد أظهرت حوادث موثقة أن ذلك ممكن: برمجية استهدفت المتحكمات التي تدير أجهزة الطرد المركزي وغيرت سرعاتها مع عرض قيم طبيعية للمشغل، وأخرى استهدفت وحدات التحكم بشبكات الكهرباء وفصلت مغذيات، وثالثة استهدفت نظام سلامة SIS في منشأة بتروكيماوية وتسببت في فصل المنشأة إلى الحالة الآمنة. والدرس المشترك: المهاجم درس النظام الصناعي بدقة، ودخل من الطبقات العليا ثم نزل إلى الأسفل.

24.2 الفرق بين أمن تقنية المعلومات وأمن التقنيات التشغيلية

أنظمة تقنية المعلومات (IT) وأنظمة التحكم الصناعي (OT) تشتركان في التقنيات الأساسية، وتختلفان في الأولويات اختلافًا جذريًا:

- **في IT** الأولوية عادة لسرية البيانات (Confidentiality)، ثم سلامتها من التلاعب (Integrity)، ثم إتاحتها (Availability). فتسريب قاعدة بيانات العملاء أسوأ من توقف الخادم ساعة.
- **في OT** الأولوية القصوى لسلامة الناس والمعدات (Safety) واستمرارية التشغيل، ثم سلامة البيانات من التلاعب، ثم السرية. فنظام التحكم يجب أن يعمل بشكل مستمر وموثوق، وأي تعطيل غير مخطط قد يعني إيقاف وحدة أو خطرًا فعليًا.

ويترتب على ذلك فروق عملية: عمر جهاز IT ثلاث إلى خمس سنوات، وعمر نظام التحكم خمس عشرة إلى خمس وعشرين سنة، فتجد في الموقع أنظمة تشغيل لم تعد مدعومة. والتحديث الفوري وإعادة التشغيل، وهما إجراءان قياسيان في IT، قد يعنيان في OT

إيقاف توربين. ومضاد الفيروسات قد يعطل برنامج التحكم إذا لم يعتمده صانعه. ولذلك يحتاج أمن OT إلى نهج خاص يوازن بين الحماية واستمرارية التشغيل، ويحتاج إلى فريق مشترك: تقنية المعلومات تجلب أدوات الأمن وخبرته، ومهندس التحكم يجلب معرفة النظام وحدود ما يحتمله.

الشكل 24-1: *إلى اليسار اختلاف الأولويات بين أمن تقنية المعلومات وأمن التقنيات التشغيلية مع فروق عملية بينهما. وإلى اليمين نموذج بيردو (Purdue) بمستوياته من العملية إلى المؤسسة، والمنطقة المنزوعة السلاح التي يمر عبرها كل تبادل.*

جدول مقارنة: أمن تقنية المعلومات مقابل أمن التقنيات التشغيلية

المعيار	IT (المكاتب والخوادم)	OT (أنظمة التحكم)
أولوية الحماية	السرية ثم سلامة البيانات ثم الإتاحة	الإتاحة والسلامة الفيزيائية أولًا، ثم سلامة البيانات، ثم السرية
عمر الأنظمة	3 إلى 5 سنوات	15 إلى 25 سنة
التحديثات والترقيع	شهرية آلية	مجدولة في الإيقافات بعد اختبار المورد
إعادة التشغيل	مقبولة	قد تعني إيقاف وحدة

المعيار	IT (المكاتب والخوادم)	OT (أنظمة التحكم)
البروتوكولات	مشفرة وموثقة (TLS)	غالبًا بلا تشفير ولا توثيق (Modbus، PROFINET)
أدوات الفحص	مسح نشط للشبكة	المسح النشط قد يُسقط متحكمًا: مراقبة سلبية
الأثر عند الاختراق	تسريب بيانات ومال	انفجار، إصابة، تلوث، توقف إنتاج
من يديره	إدارة تقنية المعلومات	مهندسو التحكم بالتعاون مع IT (IEC 62443)

كيف أختار؟ القاعدة أن يُحكم كل أصل بمنطقته لا باسمه: ما يقع في المستويات 0 إلى 3 من نموذج بيردو (المتحكمات، ومحطات التشغيل والهندسة، والمؤرخ) يُعامل بقواعد العمود الأيسر، أي لا تحديث ولا إعادة تشغيل ولا مسح نشط إلا بقرار مجدول واعتماد المورد، وما في المنطقة المنزوعة السلاح وما فوقها يُعامل بقواعد تقنية المعلومات. وحدّ هذه المقارنة أنها لا تُظهر الأصول الوسيطة كخادم القفز ونسخة المؤرخ، فهذه تأخذ الأشد من الجانبين. والخطأ الأكثر كلفة تطبيق سياسة تقنية المعلومات حرفيًا على شبكة التحكم: تحديث تلقائي أو مسح نشط يُسقط متحكمًا في منتصف التشغيل، أو عكسه: إعفاء كل ما يحمل اسم OT من أي تحديث بحجة الحساسية، فتبقى ثغرة معروفة مفتوحة سنوات.

24.3 نموذج بيردو والمنطقة المنزوعة السلاح

النموذج الأكثر شيوعًا لفهم شبكات التحكم وتصميمها هو نموذج بيردو، الذي يقسم الشبكة إلى مستويات هرمية:

المستوى	ما فيه	أمثلة
0 العملية	المعدات الفيزيائية	الحساسات والمشغلات والصمامات والمواضع (Positioners)

المستوى	ما فيه	أمثلة
1 التحكم الأساسي	ما ينفذ منطق التحكم مباشرة	PLC وDCS ووحدات التحكم بالتوربين ومنطق SIS
2 الإشراف	ما يرى منه المشغل ويتحكم	محطات HMI ومحطات الهندسة وخوادم SCADA وسجلات الإنذارات
3 عمليات الموقع	إدارة الإنتاج والصيانة على مستوى الموقع	المؤرخ ونظام إدارة الأصول وإدارة الدفعات
3.5 المنطقة المنزوعة السلاح DMZ	طبقة حاجزة بين OT وIT	خوادم وسيطة: نسخة من المؤرخ، وخادم التحديثات، وبوابة OPC، وخادم القفز
4 و5 المؤسسة	شبكة الشركة والإنترنت	ERP والبريد وأنظمة الأعمال

والفكرة العملية الأساسية من النموذج هي **التقسيم (Segmentation)**: بدل شبكة مسطحة يستطيع أي جهاز مخترق فيها الوصول إلى أي جهاز آخر، تُقسم الشبكة إلى مناطق، ويمر كل انتقال بين منطقة وأخرى عبر نقطة تفتيش محكومة: جدار ناري مضبوط بقواعد صارمة، أو في الحالات الأكثر حساسية **صمام بيانات (Data Diode)** يسمح بمرور البيانات في اتجاه واحد فقط، من نظام التحكم إلى الخارج، فحتى لو اختُرقت شبكة الشركة بالكامل لا يوجد مسار شبكي للرجوع إلى نظام التحكم.

> **قاعدة المنطقة المنزوعة السلاح:** لا اتصال مباشر بين المستويين 3 و4. فمن يريد بيانات المؤرخ يقرأها من نسخة في DMZ لا من المؤرخ نفسه، ومن يريد الوصول إلى محطة هندسة يمر بخادم قفز في DMZ، والتحديثات تُنزَّل إلى خادم في DMZ ثم تُفحص ثم تُنقل. وكل قاعدة في الجدار الناري تُكتب بصيغة «المصدر والوجهة والمنفذ والاتجاه والسبب»، وما لم يُذكر ممنوع.

24.4 سلسلة IEC 62443: المناطق والقنوات ومستويات الأمن

المعيار المرجعي لأمن أنظمة الأتمتة والتحكم الصناعية هو سلسلة IEC 62443، وهي مجموعة وثائق موزعة على أربع فئات: عامة، وسياسات وإجراءات لمالك المنشأة، ومتطلبات النظام، ومتطلبات المكونات. وأهم مفاهيمها لمهندس التحكم:

- **المنطقة (Zone):** مجموعة أصول تشترك في متطلبات الأمن، مثل منطقة التحكم الأساسي، أو منطقة SIS، أو منطقة الوصول البعيد.
- **القناة (Conduit):** مسار الاتصال المحكوم بين منطقتين، وما يحميه من جدار ناري أو صمام بيانات أو تشفير.
- **مستوى الأمن (Security Level, SL):** من 1 إلى 4، يصف قدرة المهاجم الذي تصمد المنطقة أمامه: SL 1 ضد الخطأ العرضي، وSL 2 ضد مهاجم بموارد بسيطة، وSL 3 ضد مهاجم محترف بموارد متوسطة، وSL 4 ضد جهات بموارد كبيرة. ولكل منطقة مستوى مستهدف (SL-T) يُحدد بتقييم المخاطر، ومستوى محقق (SL-A) يُقاس بعد التنفيذ، ومستوى قدرة (SL-C) لمكوناتها.
- **المتطلبات الأساسية السبعة:** التحكم بالتعريف والمصادقة، والتحكم بالاستخدام، وسلامة النظام، وسرية البيانات، وتقييد تدفق البيانات، والاستجابة في الوقت المناسب للأحداث، وتوفر الموارد.
- **دورة الحياة:** تقييم المخاطر، ثم التصميم بالمناطق والقنوات، ثم التنفيذ والتحقق، ثم التشغيل والصيانة والمراقبة، ثم الإخراج من الخدمة. وهي موازية تمامًا لدورة حياة السلامة الوظيفية في IEC 61511، وكثير من المنشآت تدمج التقييمين.

الشكل 24-2: *مثال لتقسيم منشأة إلى مناطق وقنوات وفق IEC 62443: منطقة المؤسسة، والمنطقة المنزوعة السلاح، ومنطقة الوصول البعيد، ومنطقة التحكم الأساسي، ومنطقة السلامة بأعلى مستوى أمن، ولا يدخل أي منطقة إلا قناة محكومة.*

نظام السلامة منطقة مستقلة: يوضع SIS في منطقة خاصة بمستوى أمن أعلى، لأن العبث به يعني فقد آخر طبقة حماية. ويُفصل عن نظام التحكم الأساسي بجدار ناري صناعي أو يُربط بقناة قراءة فقط، وتُحمى كتابة منطقه بمفتاح مادي لتمكين الكتابة لا يُترك في وضع التمكين، وتُوثق كل جلسة هندسة عليه. وتنص IEC 61511 في طبعتها الثانية على تقييم المخاطر الأمنية لنظام السلامة صراحة.

24.5 التهديدات وكيف تدخل

أغلب الحوادث في أنظمة التحكم لا تبدأ باختراق متقن للجدار الناري، بل بخطوات بسيطة:

1. **التصيد (Phishing):** بريد بمرفق أو رابط يفتحه موظف في شبكة المؤسسة، فيحصل المهاجم على موطئ قدم وكلمات مرور.

2. **الوصول البعيد الضعيف:** VPN بكلمة مرور فقط، أو حساب مورد لم يُغلق بعد انتهاء عقده، أو مودم منسي في لوحة.
3. **الوسائط المحمولة:** ذاكرة USB تنقل ملفًا من حاسوب مكتبي إلى محطة التشغيل دون فحص، وهي أشهر طريق عبرت به البرمجيات الخبيثة العزل الفيزيائي.
4. **حاسوب الفني:** حاسوب محمول شخصي أو من المورد يوصل بمنفذ شبكة التحكم «لسحب نسخة من البرنامج فقط».
5. **الشبكات المسطحة:** إذا وصل المهاجم إلى أي جهاز في شبكة غير مقسمة وصل إلى الجميع.
6. **الإعدادات الافتراضية:** كلمات مرور المصنع في المبدلات والمتحكمات وبوابات الشبكة، وخدمات مفعلة لا يستخدمها أحد.
7. **سلسلة التوريد:** برنامج ثابت أو تحديث من مصدر غير موثوق، أو جهاز مستعمل جاء ببرمجيات مجهولة.

الشكل 24-3: *مسار هجوم نموذجي من بريد تصيد في شبكة المؤسسة إلى PLC والصمامات، وطبقات الدفاع في العمق التي تعترضه عند كل خطوة.*

من واقع الميدان: أكثر نقطة ضعف تُرى في المواقع ليست في تصميم الشبكة، بل في ممارسات يومية تكسر التقسيم دون قصد: فني يوصل حاسوبًا شخصيًا بمنفذ شبكة التحكم، أو ذاكرة USB تتنقل بين المكاتب ومحطات التشغيل، أو مفتاح تمكين الكتابة في نظام السلامة متروك في وضع التمكين لأن «أحدهم قد يحتاجه». وهذه أبواب جانبية تلتف حول كل الطبقات المصممة بعناية، ولهذا لا يقل الوعي والالتزام بالإجراءات أهمية عن تصميم الشبكة نفسه.

24.6 الدفاع في العمق: الضوابط الأساسية

لا يكفي خط دفاع واحد. وفلسفة «الدفاع في العمق» نفسها التي نعرفها في السلامة، طبقات حماية مستقلة متتابعة، تنطبق هنا:

1. **جرد الأصول:** لا يمكن حماية ما لا نعرفه. قائمة بكل جهاز في شبكة التحكم: النوع، والعنوان، ونسخة البرنامج الثابت ونظام التشغيل، والمنطقة، والمسؤول. وتُحدَّث مع كل تغيير، وتُقارن دوريًا بما تكشفه أدوات مسح الشبكة السلبي.

2. **التقسيم والجدران النارية:** كما في 24.3 و24.4. ويُفضل في حدود مناطق التحكم جدار ناري صناعي يفهم بروتوكولات Modbus وS7 وDNP3 ويستطيع بالفحص العميق للحزم (Deep Packet Inspection) أن يسمح بأوامر القراءة ويمنع أوامر الكتابة.

3. **تقوية الأجهزة (Hardening):** تعطيل الخدمات والمنافذ غير المستخدمة في المبدلات والخوادم والمتحكمات، وتغيير كلمات المرور الافتراضية، وتعطيل منافذ USB غير اللازمة، وإغلاق منافذ الشبكة الفارغة في المبدلات، وتفعيل الحماية المادية من الكتابة في المتحكمات حيث توجد.

4. **التحكم بالوصول:** حساب مسمى لكل شخص لا حساب مشترك للمشغلين كلهم، وصلاحيات بقدر الحاجة (المشغل لا يعدل المنطق، ومهندس الحزمة لا يرى نظام السلامة)، وتحقق ثنائي للوصول البعيد ومحطات الهندسة، وإلغاء الحسابات عند انتهاء العقود وتنقل الموظفين.

5. قائمة التطبيقات المسموحة (Application Whitelisting): في محطات التشغيل والهندسة لا يُسمح إلا بتشغيل برامج معروفة، بدل مطاردة كل برمجية خبيثة جديدة. وهي أنسب من مضاد الفيروسات التقليدي لأنظمة لا تتغير برامجها إلا نادرًا، ويعتمدها معظم صانعي أنظمة التحكم.

6. إدارة الوسائط المحمولة: ذواكر USB مخصصة للمصنع لا تخرج منه، وجهاز فحص (Kiosk) تُفحص فيه كل وسيطة قبل دخول شبكة التحكم، ومنع حواسيب الزوار والموردين من الاتصال المباشر.

7. النسخ الاحتياطية: نسخ من برامج المتحكمات وإعداداتها وصور محطات التشغيل والهندسة، مختبرة الاستعادة، ومخزنة في مكان معزول عن الشبكة، لأن هجمات الفدية تبحث عن النسخ الاحتياطية أولًا.

مثال (نسخة مختبرة؛ مثال تعليمي مركّب):

- **ما حُفظ:** برامج المتحكمات (ملفات المشروع مع أرقام الإصدار)، وقاعدة بيانات الوسوم والرسومات، وصور أقراص محطات التشغيل والهندسة، وإعدادات الجدار الناري والمبدلات.
- **أين اختُبر:** على محطة هندسية احتياطية معزولة ومتحكم احتياطي في ورشة الأجهزة، لا على الأنظمة الحية.
- **كيف تُحقق من التطابق:** بمقارنة بصمة الملفات (Checksum) ورقم الإصدار مع السجل المعتمد، وبمقارنة ملف المشروع المستعاد بالبرنامج العامل في المتحكم عبر أداة المقارنة في بيئة الهندسة (بلا فروق).
- **الزمن:** 45 دقيقة لاستعادة محطة التشغيل و20 دقيقة للمتحكم.
- **معيار النجاح:** تشغيل المتحكم الاحتياطي بالبرنامج المستعاد مع محاكاة الإدخال والإخراج واجتياز اختبار وظيفي مختصر، وفتح الرسومات كلها على المحطة المستعادة دون وسوم مفقودة.

- **التكرار:** بعد كل تغيير كبير وسنويًا على الأقل.

8. المراقبة والكشف: مراقبة سلبية لحركة الشبكة تتعلم الوضع الطبيعي وتنبه إلى الجديد: جهاز جديد، أو اتصال بين منطقتين لم يكن، أو أمر كتابة إلى PLC من مصدر غير محطة الهندسة، أو تنزيل منطق خارج نافذة الصيانة. وتُجمع سجلات الأجهزة في مكان مركزي وتُراجع.

9. التوعية والإجراءات: تدريب دوري لكل من يدخل غرفة التحكم أو يلمس النظام، وإجراءات مكتوبة للوصول البعيد والوسائط والتغيير، وثقافة تجعل الإبلاغ عن ذاكرة USB مجهولة أمرًا عاديًا لا اتهامًا.

24.6.1 الجدار الناري في شبكات التحكم: الأنواع والمواضع والقواعد والتشغيل

الجدار الناري (Firewall) جهاز أو برنامج يقف على حدود منطقتين، ويقرر لكل اتصال يعبرها: هل يُسمح به أم يُمنع؟ وهو التطبيق العملي لفكرة «القناة» في IEC 62443 (24.4)، ويقابل المتطلب SR 5.2 «حماية حدود المنطقة» في IEC 62443-3-3. لكن الجدار الناري ليس حماية بذاته. فهو لا يحمي أكثر مما تحميه قواعده، والجدار الذي فيه قاعدة «اسمح بكل شيء» مجرد جهاز توجيه باهظ الثمن.

أنواع الجدران النارية

النوع	ماذا يفحص	الميزة	الحدود	موضعه المعتاد في المنشأة
مرشح الحزم (Packet Filter)	عنوان المصدر والوجهة والمنفذ والبروتوكول لكل حزمة منفردة	بسيط وسريع	لا يتتبع الجلسات، ويسمح بأي محتوى على المنفذ المسموح	قوائم الوصول في المبدلات والموجهات

النوع	ماذا يفحص	الميزة	الحدود	موضعه المعتاد في المنشأة
الفحص ذو الحالة (Stateful Inspection)	الحزمة ضمن جلسة معروفة: لا رد دون طلب	الأساس في أغلب الجدران	لا يفهم محتوى البروتوكول الصناعي	بين المؤسسة والمنطقة المنزوعة السلاح
الجيل التالي (NGFW)	التطبيق والمستخدم، مع منع التسلل وفحص البرمجيات الخبيثة	رؤية واسعة وتحديثات تهديدات	معقد، ويحتاج تحديثًا مستمرًا وقد يضيف تأخيرًا	حدود المؤسسة والمنطقة المنزوعة السلاح
الجدار الصناعي بالفحص العميق (Industrial DPI)	محتوى البروتوكول الصناعي: رمز الوظيفة والعنوان والقيمة	يسمح بالقراءة ويمنع الكتابة، ويحدد السجلات المسموحة	يجب أن يدعم البروتوكول المستعمل بعينه	أمام المتحكمات وحزم PLC وأمام SIS
الجدار على الجهاز نفسه (Host-based)	الاتصالات الداخلة والخارجة من حاسوب واحد	طبقة إضافية على محطات التشغيل والهندسة	يُدار جهازًا جهازًا	محطات Windows في المستويين 2 و 3
البوابة أحادية الاتجاه (صمام البيانات Data Diode)	ليس جدارًا ناريًا: عتاد يمنع فيزيائيًا أي مرور عكسي	أقوى عزل ممكن	لا أوامر ولا ردود؛ يحتاج برامج نسخ خاصة	إرسال بيانات المؤرخ من التحكم إلى المؤسسة

كيف أختار؟ يُختار النوع بما يجب أن يعبر الحد لا بسعر الجهاز: إن كان المطلوب بيانات تخرج ولا يعود شيء فصمام البيانات؛ وإن كانت جلسات ببروتوكول صناعي إلى متحكم أو نظام سلامة فجدار صناعي بالفحص العميق يفرّق بين القراءة والكتابة؛ وعند حد المؤسسة والمنطقة المنزوعة السلاح يكفي الفحص ذو الحالة أو الجيل التالي؛ والجدار

على الجهاز طبقة إضافية لا بديل. وحدّ هذا الجدول أنه يصف الأنواع لا القواعد، والجدار بقاعدة «اسمح بكل شيء» لا يساوي شيئًا مهما كان نوعه، كما أنه لا يذكر مواضع لا يُوضع فيها الجدار أصلًا كحلقات الإدخال والإخراج البعيدة. والخطأ الأكثر كلفة وضع جدار من الجيل التالي أمام المتحكمات لأنه «الأقوى»، وهو لا يرى من Modbus إلا المنفذ 502 فيسمح بالكتابة مع القراءة، ثم يصطدم بأول تأخير في حلقة زمنية حرجة.

رموز الوظائف: مثال على الفحص العميق. في بروتوكول Modbus TCP تحدد الحزمة نوع العملية برمز الوظيفة (Function Code): الرمزان 3 و4 لقراءة السجلات، والرموز 5 و6 و15 و16 للكتابة إلى الملفات (Coils) والسجلات، والرمزان 1 و2 لقراءة الملفات والمداخل المنفصلة. والجدار العادي لا يرى إلا المنفذ 502، فيسمح بالقراءة والكتابة معًا. أما الجدار الصناعي فيستطيع أن يسمح لمحطة التشغيل بالرمزين 3 و4 فقط، ويسمح بالكتابة من محطة الهندسة وحدها، بل ويحصرها في نطاق سجلات محدد.

أين توضع الجدران النارية؟ على كل حد بين منطقتين (الشكل 24-4):

1. بين شبكة المؤسسة والمنطقة المنزوعة السلاح. ولا يمر أي اتصال مباشر من المؤسسة إلى التحكم (24.3).
2. بين المنطقة المنزوعة السلاح ومنطقة التشغيل والهندسة.
3. أمام المتحكمات وحزم PLC المرتبطة بالنظام، ويُفضل هنا جدار صناعي بالفحص العميق.
4. أمام نظام السلامة الآلي، بقواعد تسمح لنظام التحكم بقراءة حالته فقط.
5. على محطات التشغيل والهندسة نفسها، ويكون الجدار المدمج في الجهاز طبقةً إضافية.

الشكل 24-4: *مواضع الجدران النارية بين مناطق نموذج بيردو: جدار بين المؤسسة والمنطقة المنزوعة السلاح، وآخر بينها وبين التشغيل، وجدار صناعي بالفحص العميق أمام المتحكمات، وجدار للقراءة فقط أمام SIS؛ والقاعدة الأخيرة في كل جدار «امنع الباقي وسجّله».*

> **تنبيه تصميمي:** لا يوضع جدار ناري داخل حلقة تحكم زمنية حرجة، مثل الاتصال بين المتحكم وبطاقات الإدخال والإخراج البعيدة، أو بين متحكمين مكررين. فالتأخير أو عطل الجدار يصبح عطلًا في التحكم. والجدار الذي يحمي مسارًا مهمًا يكون مكررًا (زوج عالي التوافر)، ويُحدد مسبقًا سلوكه عند عطله: يمنع المرور (Fail-Closed) كما هو الأصل، مع تقييم أثر ذلك على التشغيل.

قواعد كتابة القواعد:

1. **الأصل المنع (Default Deny):** القاعدة الأخيرة في كل جدار «امنع كل شيء وسجّله». وكل ما قبلها استثناء مبرر.
2. **أقل صلاحية:** كل قاعدة تحدد المصدر والوجهة والمنفذ والبروتوكول بعينها. لا «أي» (Any) في أي حقل إلا بمبرر مكتوب.

3. **لكل قاعدة مبرر ومالك:** لماذا وُجدت، ومن طلبها، ومتى تُراجع. والقاعدة المؤقتة لها تاريخ انتهاء.
4. **الترتيب مهم:** القاعدة الأدق قبل الأعم، لأن الجدار يطبق أول قاعدة تنطبق.
5. **التسجيل:** سجّل الممنوع، وأرسل السجلات إلى منظومة المراقبة المركزية بوقت متزامن (24.6، البند 8).
6. **الإدارة معزولة:** واجهة إدارة الجدار لا تُتاح من شبكة المؤسسة، وتُحمى بتحقق ثنائي.
7. **التغيير عبر إدارة التغيير:** لا تُعدل قاعدة إلا بطلب موثق ومراجعة واختبار، وتُحفظ نسخة من الإعدادات قبل التعديل وبعده.

مثال محلول (مجموعة قواعد لوحدة ضغط الغاز):

- **المعطيات:** وحدة ضغط الغاز في مشروع الكتاب: DCS، وPLC لحزمة الضاغط K-201، ونظام SIS، ومؤرخ في المستوى 3، ونسخة منه في المنطقة المنزوعة السلاح، وخادم قفز للوصول البعيد.
- **الافتراضات:** المنافذ المذكورة هي المنافذ القياسية المعروفة. والمنافذ الخاصة بمورد النظام تؤخذ من وثائقه.
- **الحل:**

#	المصدر	الوجهة	الخدمة	الإجراء	المبرر
1	مستخدمو المؤسسة	نسخة المؤرخ في DMZ	HTTPS على 443	سماح	تقارير الإنتاج
2	المؤرخ في المستوى 3	نسخة المؤرخ في DMZ	منفذ النسخ من المورد	سماح باتجاه واحد	البيانات تصعد ولا تنزل

#	المصدر	الوجهة	الخدمة	الإجراء	المبرر
3	خادم القفز في DMZ	محطة الهندسة	RDP على 3389	سماح في نافذة صيانة معتمدة فقط	الوصول البعيد (24.7)
4	خادم التحديثات في DMZ	محطات التشغيل	منفذ خدمة التحديث	سماح	التحديثات المعتمدة (24.8)
5	المتحكمات والخوادم	خادم الوقت	NTP على UDP 123 (العميل هو من يبدأ الطلب، والرد يعود ضمن الجلسة نفسها)	سماح	تزامن الطوابع الزمنية
6	محطات التشغيل	PLC الضاغط K-201	Modbus TCP على 502، الرمزان 3 و4 (أوامر المشغل تصل إلى PLC عبر DCS لا من المحطة مباشرة)	سماح عبر الفحص العميق	قراءة فقط
7	محطة الهندسة	PLC الضاغط K-201	بروتوكول البرمجة الخاص بالمنصة	سماح	التعديل من محطة الهندسة وحدها
8	متحكمات DCS	SIS	Modbus TCP على 502، قراءة فقط	سماح عبر الفحص العميق	عرض حالة الحمايات
9	أي مصدر	أي وجهة	أي خدمة	منع وتسجيل	الأصل هو المنع

- **المعنى ميدانيًا:** تسع قواعد تكفي وحدة كاملة. وكل طلب جديد («المورد يريد الاتصال من مكتبه مباشرة») يُقارن بهذه المجموعة من القواعد، ويُرفض ما يخالفها ولو كان أسهل.

منافذ البروتوكولات الشائعة (للمراجعة عند كتابة القواعد وتشخيصها):

البروتوكول	المنفذ القياسي	ملاحظة
Modbus TCP	TCP 502	بلا تحقق ولا تشفير في صيغته التقليدية
EtherNet/IP	TCP 44818 وUDP 2222	الأول للرسائل الصريحة، والثاني لتبادل الإدخال والإخراج
S7 (Siemens)	TCP 102	يُستعمل للبرمجة والتبادل
DNP3	TCP 20000	شائع في SCADA للمرافق
IEC 60870-5-104	TCP 2404	شائع في شبكات الكهرباء
OPC UA	TCP 4840	يدعم التشفير والتحقق، ويسهل تمريره عبر الجدار
OPC الكلاسيكي (DCOM)	TCP 135 ثم منافذ متغيرة	صعب الحصر؛ يُستبدل بـ OPC UA أو بوسيط نفقي
HART-IP	TCP وUDP 5094	الوصول إلى الأجهزة الذكية عبر الشبكة
NTP	UDP 123	تزامن الوقت
RDP	TCP 3389	لا يُفتح إلا من خادم القفز

تشغيل الجدار وصيانته: مراجعة دورية للقواعد (سنويًا على الأقل، وبعد كل مشروع). وحذف القواعد التي لا يمر بها شيء، بعد التأكد من عداد الاستعمال. وتحديث البرنامج الثابت للجدار وفق سياسة التحديث (24.8). ونسخ احتياطي للإعدادات مع برامج المتحكمات. واختبار القواعد ضمن FAT و(24.10) SAT.

حين يكون الجدار هو «العطل»: جدول تشخيص

العَرَض	السبب المرجح	الفحص
الاتصال يعمل ثم ينقطع بعد فترة هدوء	الجدار ذو الحالة يُغلق الجلسة الخاملة بعد مهلة، والطرفان لا يعلمان	سجل الجدار وقت الانقطاع؛ رسائل إبقاء الاتصال (Keep-Alive) أو تعديل المهلة لهذه القاعدة
أمر (ping) لا يرد والخدمة تعمل	الجدار يمنع ICMP	اختبر المنفذ نفسه لا ping
OPC الكلاسيكي يتصل ولا يتبادل بيانات	منافذ DCOM المتغيرة ممنوعة	سجل المنع؛ الحل OPC UA أو وسيط، لا فتح نطاق واسع
القراءة تعمل والكتابة تُرفض	قاعدة الفحص العميق تسمح بالقراءة فقط	هل الكتابة مطلوبة فعلًا ومن هذا المصدر؟
الاتصال يعمل في اتجاه ويفشل في الآخر	توجيه غير متماثل، فالجدار لا يرى الطلب الأصلي	مسار الحزم في الاتجاهين
كل شيء توقف بعد تعديل	قاعدة جديدة في ترتيب خاطئ تحجب ما بعدها	قارن الإعدادات بالنسخة السابقة

وهذا الجدول يكمل تشخيص الاتصالات في 39.10 و23.12: قبل أن تتهم بطاقة الاتصال أو المتحكم، اسأل: هل بين الطرفين جدار ناري؟ وماذا يقول سجله في لحظة العطل؟

24.7 الوصول عن بعد الآمن

الوصول البعيد ضرورة: دعم الصانع لوحدة التحكم بالتوربين، ومهندس الحزمة الذي يشخص من مكتبه، والمراقبة المركزية للمنشآت البعيدة. والسؤال ليس هل نسمح به، بل كيف نجعله محكومًا:

1. **لا وصول مباشر أبدًا:** لا يصل الطرف البعيد إلى نظام التحكم، بل إلى خادم قفز (Jump Host) في المنطقة المنزوعة السلاح، ومنه إلى المحطة المقصودة عبر جدار ناري يفتح منفذًا واحدًا.
2. **تحقق ثنائي:** كلمة مرور ورمز من تطبيق أو جهاز، وحساب مسمى لكل شخص عند المورد لا حساب للشركة كلها.
3. **تفعيل من الموقع:** المشغل أو مهندس المناوبة يفعل الجلسة بمفتاح أو موافقة، ويعرف من يدخل ولماذا، ويستطيع إنهاءها في أي لحظة. وتنتهي الجلسة تلقائيًا بعد مدة محددة.
4. **التسجيل:** تُسجل الجلسة بالفيديو أو بسجل الأوامر، ويُحفظ السجل للمراجعة.
5. **الصلاحيات:** حساب المورد يرى ما يخصه فقط، وبصلاحية قراءة ما لم يُطلب غير ذلك ضمن إجراء تغيير معتمد.
6. **الإغلاق:** الحسابات المؤقتة تُلغى بعد المهمة، وتُراجع قائمة الحسابات البعيدة شهريًا.

الشكل 24-5: *مسار الوصول البعيد الآمن: مهندس الصانع يدخل عبر بوابة VPN بتحقق ثنائي إلى خادم قفز في المنطقة المنزوعة السلاح، ثم عبر جدار ناري صناعي إلى محطة الهندسة، والجلسة تُفعَّل من الموقع وتُسجَّل وتنتهي بوقت.*

24.8 إدارة التحديثات والبرمجيات الخبيثة

التحديثات (Patching): في IT تُطبق فور صدورها. وفي OT يمر كل تحديث بقرار: هل يؤثر في نسختنا؟ وهل اعتمده صانع نظام التحكم؟ (فتحديث نظام التشغيل قد يعطل برمجيات نظام التحكم إن لم يُختبر معها). وهل يمكن تطبيقه دون إيقاف، بالتناوب على الخوادم المتكررة مثلًا، أم ينتظر التوقف المخطط؟ ثم يُختبر على نظام احتياطي أو محاكٍ، وتُؤخذ نسخة احتياطية، ويُطبق عبر إدارة التغيير مع خطة رجوع. وحين لا يمكن التحديث، كما في أنظمة تشغيل انتهى دعمها، يُعوَّض بضوابط تخفيف: عزل أشد، وقائمة تطبيقات مسموحة، ومراقبة أدق. وهذا ما يسميه المعيار «الإجراءات المضادة التعويضية (Compensating Countermeasures)».

الشكل 24-6: *إلى اليمين شجرة قرار التحديث في بيئة OT، وإلى اليسار دورة الاستجابة للحوادث بمراحلها الست.*

البرمجيات الخبيثة: مضاد الفيروسات في محطات التشغيل يجب أن يكون من النوع والإصدار الذي اعتمده صانع النظام، وأن تُحدَّث تعريفاته عبر خادم في DMZ لا من الإنترنت مباشرة، وأن يُضبط فلا يفحص ملفات النظام وقت التشغيل الحرج. وقائمة التطبيقات المسموحة أنسب للأنظمة الثابتة كما سبق. وفي المتحكمات نفسها لا مضاد فيروسات، فحمايتها بالتقسيم وتقييد الكتابة والتحقق من البرنامج الثابت (الفصل 44).

24.9 الاستجابة للحوادث والتعافي

الحادث السيبراني في المصنع يُدار كأي حالة طوارئ: بخطة مكتوبة ومتدرب عليها قبل وقوعه.

1. **الاستعداد:** خطة استجابة تحدد الأدوار وأرقام الاتصال بالصانع وفريق الأمن، وجرد الأصول، ونسخ احتياطية مختبرة، وإجراء للتحويل إلى التشغيل اليدوي أو الإيقاف الآمن إذا لزم.
2. **الكشف:** من المراقبة الشبكية، أو من ملاحظة المشغل: شاشة تتصرف بغرابة، أو قيم لا تتفق مع القياسات المحلية، أو نافذة تطلب فدية.
3. **الاحتواء:** عزل المنطقة المصابة بفصل قنواتها، مع الحفاظ على التشغيل الآمن؛ ولا تُطفأ الأجهزة عشوائيًا لأن ذلك قد يفقد الأدلة وقد يكون أخطر من الهجوم. والقرار بين استمرار التشغيل والإيقاف قرار تشغيلي يتخذه مدير المنشأة بمشورة مهندس التحكم، لا قرار تقني وحده.
4. **الاستئصال:** إزالة البرمجية الخبيثة، وإغلاق الثغرة التي دخلت منها، وتغيير كلمات المرور.
5. **التعافي:** الاستعادة من نسخ موثوقة سابقة للحادث، والتحقق من أن منطق المتحكمات مطابق للنسخة المعتمدة قبل إعادة التشغيل، وربما مقارنة المنطق سطرًا سطرًا.

6. **الدروس:** تحليل السبب الجذري، وتحديث الإجراءات والتدريب، والإبلاغ للجهات التنظيمية إن لزم.

الاختبار الدوري: تمرين على الطاولة (Tabletop) مرة في السنة على الأقل: سيناريو هجوم يُطرح على فريق التشغيل والتحكم والأمن، ويُناقش من يفعل ماذا، فتظهر الثغرات في الخطة قبل الحادث.

24.10 الأمن في المشاريع ودورة الحياة

الأمن بالتصميم (Security by Design) أرخص وأفضل من إضافته لاحقًا. ولذلك يدخل الأمن في كل مرحلة من مراحل المشروع:

- **أساس التصميم:** مستوى الأمن المستهدف لكل منطقة، وسياسة الوصول البعيد، ومتطلبات المورد.
- **المواصفات:** اشتراط أن تكون المكونات معتمدة وفق IEC 62443-4-2 حيث أمكن، وأن يوثق المورد المنافذ والخدمات التي يستخدمها نظامه، وأن يسلم النظام مقوًى (Hardened) لا بإعدادات المصنع.
- **اختبار القبول:** يُضاف إلى FAT وSAT بنود أمنية: فحص المنافذ المفتوحة، والتحقق من قواعد الجدار الناري، وتغيير كلمات المرور، وتعطيل الحسابات الافتراضية، واختبار النسخ الاحتياطي والاستعادة.
- **التسليم:** جرد الأصول، ونسخ احتياطية، وتوثيق الشبكة كاملة، وتدريب المشغلين.
- **التشغيل:** تقييم دوري للمخاطر، ومراجعة الحسابات والقواعد، ومراقبة مستمرة.
- **الأنظمة القديمة:** مشاريع التحديث فرصة لإدخال التقسيم والضوابط التي لم تكن ممكنة.

الأطر الأخرى: يقدم إطار NIST للأمن السيبراني (CSF) نهجًا عمليًا؛ وكان في الإصدار 1.1 بخمس وظائف: التعرف على الأصول والمخاطر، والحماية، والكشف، والاستجابة،

والتعافي؛ وأضاف الإصدار 2.0 (2024) وظيفة سادسة تحيط بها جميعًا هي الحوكمة (Govern): من يعتمد الوصول البعيد، ومن يقبل المخاطر المتبقية، ومن يملك صلاحية تأجيل تحديث أمني، وكيف تُدمج قرارات أمن OT في إدارة مخاطر المنشأة. ويصدر NIST الوثيقة SP 800-82 الخاصة بأمن أنظمة التحكم الصناعية، وهي مرجع مجاني ممتاز. وتُلزم الجهات التنظيمية في قطاعات الطاقة والمياه في دول كثيرة بضوابط محددة، فتُراجع متطلبات البلد والقطاع.

24.11 دور مهندس التحكم والأجهزة

- يعرف النظام من الداخل: أي وصلة ضرورية للتشغيل وأيها يمكن إلغاؤها، وأي أمر كتابة مشروع وأيّها شاذ. وهذه المعرفة هي ما يحتاجه فريق الأمن لضبط الجدران النارية والمراقبة دون تعطيل التشغيل.
- يقود جرد أصول التحكم، ويحدد المناطق، ويوثق قنوات الاتصال بين الأنظمة (جدول الربط، القسم 23.11).
- يراجع طلبات الوصول البعيد ويفعل جلساته ويغلقها.
- يدير البرنامج الثابت والنسخ الاحتياطية للمتحكمات، ويتحقق من سلامة المنطق بعد أي جلسة هندسة.
- يشارك في تقييم المخاطر الأمنية لنظام السلامة ويحمي مفتاح تمكين الكتابة.
- يبلغ عن الممارسات الخطرة ويصححها: كلمات المرور على الشاشة، والحسابات المشتركة، والمنافذ المفتوحة، والوسائط المجهولة.

24.12 مثال تطبيقي: تقييم أولي لشبكة تحكم قائمة

محطة توليد بوحدتي توربين غازي وDCS ونظام SIS، طُلب من مهندس التحكم تقييم أولي لأمنها. الخطوات:

1. **الجرد:** بجولة ميدانية ومراجعة المخططات وقراءة جداول عناوين المبدلات، وُجد 86 جهازًا على شبكة التحكم، منها ثلاثة لم تكن موثقة: حاسوب مورد قديم، وطابعة، وبوابة راديو لمراقبة خزان بعيد.
2. **الرسم:** رسمت الشبكة بمستويات بيردو، فظهر أن مؤرخ البيانات موصول مباشرة بشبكة الشركة عبر مبدل مشترك، وأن نظام SIS على المبدل نفسه مع DCS، وأن الوصول البعيد للصانع عبر مودم على خط هاتف.
3. **تحديد المناطق:** أربع مناطق: التحكم الأساسي، والسلامة، والوصول البعيد، والمؤرخ الذي تُنقل نسخة منه إلى DMZ جديدة.
4. **القنوات:** جدار ناري بين الشركة وDMZ، وآخر بين DMZ والتحكم، وجدار ناري صناعي أمام SIS يسمح بالقراءة فقط، وإلغاء المودم واستبداله بخادم قفز.
5. **الإجراءات السريعة (خلال شهر):** تغيير كلمات المرور الافتراضية، وإغلاق المنافذ الفارغة في المبدلات، وإزالة الأجهزة غير الموثقة، وإعادة مفتاح تمكين الكتابة في نظام السلامة إلى وضع المنع وحفظ مفتاحه لدى المسؤول، وحصر ذواكر USB.
6. **الخطة المتوسطة (في التوقف القادم):** فصل SIS على مبدل مستقل، وإنشاء DMZ، وتركيب المراقبة السلبية، وتحديث محطات التشغيل التي انتهى دعم نظام تشغيلها.
7. **التوثيق:** تقرير بمستوى الأمن المستهدف لكل منطقة، والفجوات، والأولويات، والتكلفة، يُعرض على الإدارة.

مثال محلول (زمن التعافي من النسخ الاحتياطية): وحدة فيها 12 متحكمًا و6 خوادم ومحطة هندسة. هدف التعافي في خطة الاستجابة 8 h من قرار الاستعادة. إعادة تحميل المتحكم الواحد من النسخة 25 min، ولا تُحمَّل المتحكمات إلا من محطة الهندسة واحدًا بعد الآخر. واستعادة صورة الخادم الواحد 90 min، ويمكن استعادة خادمين معًا، ومحطة الهندسة تُستعاد في الدفعة الأولى.

- **الحل:**
  - زمن الخوادم = (عدد الخوادم ÷ خوادم الدفعة الواحدة) × زمن الدفعة
  - (6 ÷ 2) دفعات × 90 min = 3 × 90 = 270 min = 4.5 h.
  - وإن شغلت محطة الهندسة إحدى خانتي الدفعة الأولى صارت الصور 7 والدفعات 4، أي 360 min.
  - زمن المتحكمات = زمن عودة محطة الهندسة + عدد المتحكمات × زمن المتحكم الواحد
  - $= 90 + 12 \times 25 = 390 \text{ min}$
  - الزمن الكلي = أكبر الزمنين = **390 min = 6.5 h**، أقل من الهدف 8 h بهامش 1.5 h.
  - التفسير: المتحكمات لا تُحمَّل إلا واحدًا بعد الآخر من محطة الهندسة، فهي المسار الحاكم لا الخوادم.
- **الافتراضات التي يجب اختبارها:** أن النسخ حديثة ومطابقة لما يعمل فعلًا، وأن وسائط الاستعادة ومفاتيح التراخيص متاحة في الموقع، وأن شخصين مدربين حاضران.
- **المعنى ميدانيًا:** لو كانت آخر نسخة للمتحكمات عمرها ثلاثة أشهر، لاستُعيد برنامج ينقصه كل تعديل بعدها، ولاحتاجت الوحدة إلى إعادة اختبار الحلقات المعدلة قبل التشغيل، وهذا قد يضاعف الزمن. لذلك يُقاس زمن

> التعافي فعليًا في تمرين سنوي على نظام اختبار، ويُسجل مع تاريخ آخر نسخة لكل متحكم (القسم 24.6).

24.13 دراسة حالة: حاسوب المورد والتوقف الذي لم يكن مقصودًا

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في منشأة معالجة غاز جاء مهندس من شركة الحزمة لتحديث برنامج PLC لضاغط، ووصل حاسوبه المحمول بمنفذ في مبدل غرفة التحكم لأن منفذ اللوحة كان بعيدًا. كان الحاسوب مصابًا ببرمجية تنتشر عبر الشبكة وتفحص الأجهزة بحثًا عن ثغرات. وخلال دقائق بدأت محطات التشغيل تتباطأ، وتوقف اتصال DCS مع ثلاث وحدات إدخال وإخراج بعيدة لأن معالجاتها القديمة لم تحتمل سيل حزم الفحص، فانتقلت مخارجها إلى الحالة الآمنة وتوقف جزء من الوحدة.

ما ساعد: كان نظام SIS على شبكة مستقلة ولم يتأثر، ولم يقع حادث سلامة. وكانت نسخ برامج المتحكمات محفوظة، فأُعيدت مطابقتها وتبين أنها لم تُمس.

ما فشل: الشبكة مسطحة، ومنفذ المبدل مفتوح دون تقييد بالعنوان المادي، ولا إجراء يمنع توصيل حاسوب خارجي، ولا مراقبة تنبه إلى فحص الشبكة.

الإصلاح: تقييد منافذ المبدلات بالعناوين المادية وإغلاق الفارغ منها، وحاسوب هندسة خاص بالمنشأة يُعار للموردين، وإجراء يشترط فحص أي جهاز قبل توصيله، وتقسيم الشبكة على مراحل، ومراقبة سلبية تنبه إلى أي جهاز جديد.

الدروس:

- الحادث لم يكن هجومًا مقصودًا، ومع ذلك أوقف الإنتاج. فوحدات الإدخال والإخراج القديمة تسقط تحت حركة شبكة عادية في IT.
- فصل SIS على شبكة مستقلة هو ما جعل الحادث توقفًا لا كارثة.

- الضابط الأرخص، منع توصيل الأجهزة الخارجية، كان يكفي لمنع الحادث كله.

> **دور المهندس ودور الفني:** فصّل القسم 24.11 دور المهندس: يعرف الوصلات الضرورية، ويحدد المناطق والقنوات، ويراجع الوصول البعيد، ويدير النسخ والبرنامج الثابت. أما الفني فهو من يلمس النظام كل يوم، ولذلك تقع عليه أكثر الضوابط اليومية: لا يوصل حاسوبًا ولا ذاكرة USB بشبكة التحكم إلا بعد فحصها في جهاز الفحص المعتمد، ولا يعمل بحساب مشترك، ويعيد مفتاح تمكين الكتابة في نظام السلامة إلى وضع المنع بعد كل جلسة ويسجلها، ويبلّغ عن أي جهاز غير معروف على المبدل أو منفذ مفتوح أو سلوك غريب في محطة التشغيل. المهندس يكتب القاعدة، والفني يجعلها حقيقة في الموقع، كما تبيّن هذه الحالة.

24.14 الأخطاء الشائعة

- الاعتقاد بأن النظام معزول بينما فيه وصلة مؤرخ أو مودم أو بوابة لاسلكية منسية.
- شبكة مسطحة يتقاسمها DCS وSIS والحزم والطابعات.
- وصل نظام السلامة بالشبكة نفسها دون قناة محكومة، أو ترك مفتاح تمكين الكتابة في وضع التمكين.
- حسابات مشتركة بكلمة مرور معلقة على الشاشة، وحسابات موردين لا تُغلق.
- وصول بعيد مباشر بكلمة مرور فقط، ودون تفعيل من الموقع ولا تسجيل.
- ذواكر USB تتنقل بين المكاتب ومحطات التشغيل.
- توصيل حواسيب خارجية بشبكة التحكم.
- تطبيق سياسة IT حرفيًا: تحديث تلقائي، وإعادة تشغيل، ومضاد فيروسات غير معتمد، فيتعطل النظام.
- نسخ احتياطية غير مختبرة أو على الشبكة نفسها.

- جرد أصول قديم، ومخططات شبكة لا تطابق الواقع.
- شراء جدار ناري والاكتفاء به دون قواعد مكتوبة ولا مراجعة.

24.15 ملخص

لم يعد العزل الفيزيائي حماية كافية، وصار الأمن السيبراني جزءًا من هندسة التحكم. وأولويات OT تختلف عن IT: السلامة والتوفر أولًا، والأجهزة تعيش عقودًا، والتحديث يحتاج قرارًا. ونموذج بيردو يقسم الشبكة إلى مستويات تفصل بينها منطقة منزوعة السلاح، وIEC 62443 يقدم لغة المناطق والقنوات ومستويات الأمن ودورة الحياة. والدفاع في العمق طبقات: جرد، وتقسيم، وتقوية، وتحكم بالوصول، وقائمة تطبيقات مسموحة، وإدارة للوسائط، ونسخ احتياطية، ومراقبة، وتوعية. والوصول البعيد يمر بخادم قفز وتحقق ثنائي ويُفعَّل من الموقع ويُسجَّل. ونظام السلامة منطقة مستقلة بأعلى مستوى. والاستجابة للحوادث خطة متدرب عليها، والأمن يُصمم مع المشروع لا بعده. ومهندس التحكم هو من يعرف النظام، فلا يُصمم أمنه دونه.

وفي الفصل التالي: الفصل 25 «أساس التصميم لأنظمة الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم (I&C Design Basis)»، وبه يبدأ باب التصميم والسلامة: فالقرارات التي مرت في هذا الباب، من نوع النظام والتكرار إلى الشبكات ومستوى الأمن لكل منطقة، تُجمع قبل التصميم التفصيلي في وثيقة واحدة يلتزم بها المشروع.

24.16 أسئلة التقييم الذاتي

1. لماذا لا يصلح نهج حماية الشبكات المكتبية كما هو لأنظمة التحكم؟ اذكر ثلاثة فروق عملية.
2. ما وظيفة المنطقة المنزوعة السلاح في نموذج بيردو؟ وما الذي يوضع فيها؟
3. عرّف المنطقة والقناة ومستوى الأمن في IEC 62443، وما الفرق بين SL-T وSL-A؟

4. لماذا يُوضع نظام السلامة في منطقة مستقلة؟ وما الضوابط الثلاثة الأساسية لحمايته؟
5. ما الفرق بين الجدار الناري التقليدي والجدار الناري الصناعي؟ ومتى يُستخدم صمام البيانات؟
6. صف مسار وصول بعيد آمن لمهندس صانع يريد تشخيص وحدة تحكم توربين.
7. صدر تحديث أمني لنظام تشغيل محطات التشغيل. ما الأسئلة التي تُطرح قبل تطبيقه؟ وماذا تفعل إن لم يعتمده صانع النظام؟
8. لماذا تُفضل قائمة التطبيقات المسموحة على مضاد الفيروسات في محطات التشغيل؟
9. وقع حادث سيبراني في نظام التحكم. ما الخطوات الست للاستجابة، ومن يتخذ قرار الإيقاف؟
10. في الحالة 24.13، ما الضابط الوحيد الذي كان يكفي لمنع الحادث؟ وما الذي حوّل الحادث من كارثة إلى توقف؟

مراجع الفصل: سلسلة IEC 62443 (خاصة الأجزاء 2-1 و3-2 و3-3 و4-2)؛ NIST SP 800-82، دليل أمن أنظمة التحكم الصناعية؛ إطار NIST للأمن السيبراني؛ IEC 61511-1 الطبعة الثانية لتقييم المخاطر الأمنية لنظام السلامة؛ نموذج Purdue المرجعي؛ كتاب المؤلف عن التوربينات الغازية، القسم 10.8 (R42)؛ عروض أنظمة التحكم الصناعية و SCADA (R5 وR24 وR25)؛ تقارير الحوادث المنشورة عن هجمات أنظمة التحكم؛ خبرة المؤلف في تقييم شبكات التحكم في المحطات؛ وR69 و NIST SP 800-82 Rev. 3 (الجدار الناري، 24.6.1).

الباب الخامس: التصميم والسلامة

هنا يتحول المهندس من مستخدم للأنظمة إلى مصمم لها. يبدأ الباب بوثيقة أساس التصميم ومتطلبات التركيب (الفصل 25)، ثم المناطق الخطرة وأجهزة Ex (الفصل 26)، واختيار الأجهزة وأوراق البيانات (الفصل 27). ثم يتدرج في السلامة: تحديد المخاطر بدراسات HAZID وHAZOP (الفصل 28)، فأنظمة السلامة الآلية ودرجة SIL (الفصل 29)، فأنظمة الحريق والغاز (الفصل 30)، فالحمايات النموذجية لمعدات صناعة الهيدروكربونات (الفصل 31).

الفصل 25: أساس التصميم لأنظمة الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم (I&C Design Basis)

> **لمن هذا الفصل:** لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في مكتب الهندسة (FEED والتصميم التفصيلي) الذي يُكلَّف بإعداد أو مراجعة وثيقة أساس التصميم، ولمهندس المالك الذي يعتمدها، ولمهندس الموقع الذي يحتاج إلى معرفة «من أين جاءت» القرارات التي يجدها في أوراق البيانات ومخططات الحلقات.
>
> **الفكرة الأساسية:** كل قرار تفصيلي في المشروع (وحدة قياس، جهد صمام ملفي، درجة حماية، نسبة احتياطي) يجب أن يرجع إلى بند صريح في وثيقة واحدة تُكتب أولًا وتُجمَّد مبكرًا؛ وما لا يُكتب فيها بالأرقام سيُفسَّر لاحقًا بأرخص تفسير، وسيظهر ثمنه في الموقع أثناء التشغيل التجريبي.

25.1 مقدمة: لماذا يبدأ كل مشروع بوثيقة «أساس التصميم»؟

وثيقة **أساس التصميم للأجهزة والتحكم (Instrumentation & Control Design Basis)** هي الوثيقة التي تحدد المتطلبات الفنية الخاصة بالمشروع. يلتزم بها فريق الهندسة طوال مرحلة التصميم الهندسي الأولي (**FEED – Front-End Engineering Design**) ومرحلة التصميم التفصيلي (**Detailed Engineering**) عند إعداد جميع المخرجات الهندسية (Engineering Deliverables).

يمكن تشبيه هذه الوثيقة بـ«دستور» تخصص الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في المشروع: كل ورقة بيانات (Datasheet)، وكل قائمة إشارات (I/O List)، وكل مخطط

حلقة (Loop Diagram)، وكل مواصفة شراء (Material Requisition) يجب أن تكون متسقة معها. وإذا غابت هذه الوثيقة أو كُتبت بشكل عام وغامض، تظهر النتائج لاحقًا في صورة:

- تناقض بين أوراق بيانات الأجهزة التي أعدها مهندسون مختلفون.
- أجهزة تصل إلى الموقع بدرجة حماية أو مادة غير مناسبة.
- خلافات تعاقدية مع الموردين ومقاولي الحزم (Package Vendors).
- إعادة عمل مكلفة أثناء التركيب والتشغيل التجريبي.

> **ملاحظة ميدانية:** كثير من المشكلات التي نواجهها في الموقع أثناء التشغيل التجريبي، مثل عدم توافق إشارات حزمة التوربين الغازي مع نظام DCS، أو اختلاف جهد تغذية الصمامات الملفية (Solenoid Valves)، يعود أصلها إلى بند غامض أو غائب في أساس التصميم.

25.2 المدخلات المطلوبة لإعداد الوثيقة

لا تُكتب وثيقة أساس التصميم من فراغ، بل تُبنى على مدخلات أهمها:

المدخل	الإنجليزية	ما يُستخرج منه
مواصفات وفلسفات المالك	(Client's Specifications / Philosophies)	الأنظمة المعتمدة، الموردون المفضلون، متطلبات السلامة، قطع الغيار
مخطط تصنيف المناطق الخطرة	(Electrical Hazardous Area Layout)	المناطق (Zones)، مجموعات الغاز، فئات الحرارة
بيانات التصميم الأساسية	(Basic Engineering Design Data – BEDD)	الظروف المناخية، الارتفاع، الرطوبة، مصادر الطاقة
أساس تصميم العمليات	(Process Design Basis)	ضغط هواء الأجهزة وجودته، وطبيعة الموائع (مثل وجود H_2S)

المدخل	الإنجليزية	ما يُستخرج منه
مخططات الأنابيب والأجهزة	P&IDs	عدد الحلقات ونوعها، ومستوى الأتمتة المطلوب
دراسات السلامة	(HAZOP / LOPA / SIL Assessment)	عدد وظائف السلامة ومستويات SIL المطلوبة
القوانين المحلية	(Local Regulations)	متطلبات الجهات الرسمية والدفاع المدني

25.3 الهيكل النموذجي للوثيقة

يجب أن تغطي وثيقة أساس التصميم البنود التالية على الأقل:

1. قائمة الأكواد والمواصفات القياسية والمتطلبات التنظيمية.
2. وحدات القياس.
3. فلسفة نظام التحكم.
4. فلسفة التحكم في الحزم (Package Control).
5. فلسفة التغذية الكهربائية وهواء الأجهزة.
6. متطلبات تصنيف المناطق الخطرة.
7. المتطلبات الأساسية لأجهزة الميدان والكابلات.
8. المتطلبات الأساسية للتركيب وما يتعلق به.
9. فلسفة قطع الغيار.

وفي المشاريع الكبيرة تُضاف عادة بنود أخرى، مثل: فلسفة الإنذارات (Alarm Philosophy)، وفلسفة الأمن السيبراني (Cyber Security)، وفلسفة التأريض (Earthing)، وفلسفة ترقيم الأجهزة (Tagging/Numbering)، ومتطلبات الاختبار (FAT/SAT). وسنتناول كل بند بالتفصيل في الأقسام التالية. ويوضح الشكل 25-1 موقع الوثيقة بين مدخلاتها ومخرجاتها.

الشكل 25-1: *وثيقة أساس التصميم بين مدخلاتها (مواصفات المالك، تصنيف المناطق الخطرة، بيانات التصميم الأساسية، أساس تصميم العمليات، P&ID، دراسات السلامة، القوانين) ومخرجاتها التي يجب أن تتسق معها (أوراق البيانات، قوائم الإشارات، مخططات الحلقات، مواصفات الشراء، مواصفات التركيب).*

25.4 الأكواد والمواصفات القياسية والمتطلبات التنظيمية

يرتب الشكل 25-2 وثائق المشروع الحاكمة في هرم أسبقية: القانون يحكم العقد، والعقد ووثائق المشروع الحاكمة تحكم مواصفات المالك، وهذه تحكم وثيقة أساس التصميم، وهي تحكم المواصفات الدولية، والجميع يحكم توصيات المصنّعين والمقاول. فعند التعارض يحكم الأعلى مرتبة، أما بين وثيقتين في المرتبة نفسها فيُطبّق الأشد اشتراطًا، ما لم يُوثّق انحراف معتمد.

الشكل 25-2: *هرم الوثائق وترتيب الأسبقية عند التعارض: من التشريعات في القمة إلى توصيات المصنّعين في القاعدة؛ الأعلى يحكم الأدنى، وكل تعارض يُسجّل في سجل الاستفسارات الفنية.*

25.4.1 التمييز بين المصطلحات

- **المواصفة القياسية (Standard):** مجموعة من التعريفات والإرشادات الفنية للمصممين والمصنعين، تضع المتطلبات اللازمة للمنتج أو الخدمة أو التشغيل. أمثلة: ISA، IEC، ISO، API، ASTM، ANSI.
- **الكود (Code):** إرشادات عامة معتمدة تُستخدم في تصميم المعدات وتصنيعها وإنشائها وتركيبها، وكثيرًا ما تتحول إلى متطلب إلزامي عندما تتبناها جهة رسمية. أمثلة: ASME Boiler & Pressure Vessel Code، وASME B31.3.
- **المتطلب التشريعي (Statutory Requirement):** قانون تصدره الدولة أو الحكومة المركزية.

- **المتطلب التنظيمي (Regulatory Requirement):** قاعدة تصدرها جهة تنظيمية عيّنتها الدولة، مثل هيئات الطاقة أو الدفاع المدني.

> **قاعدة الأسبقية:** ترتيب الأسبقية هو ما في الشكل 25-2 ومقدمة هذا القسم (انظر القسم 25.4). ويجب أن تنص الوثيقة صراحة على الترتيب المعتمد في المشروع، وإلا صار كل تعارض خلافًا تعاقديًا.

25.4.2 أهم المواصفات المرجعية لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم

المجال	المواصفة	الموضوع
الرموز والمخططات	ANSI/ISA-5.1	رموز الأجهزة وتعريفها على مخططات P&ID
	ISA-5.2 / ISA-5.3 / ISA-5.4	المخططات المنطقية الثنائية، رموز أنظمة التحكم الموزعة، مخططات الحلقات
أوراق البيانات	ISA-TR20.00.01	نماذج أوراق بيانات الأجهزة
أجهزة القياس	API RP 551	أجهزة قياس العمليات
	ISO 5167	قياس التدفق بعناصر الضغط التفاضلي
	API MPMS / AGA 3, 7, 8	القياس لأغراض البيع والتسليم (Custody Transfer)
	IEC 60584 / IEC 60751	المزدوجات الحرارية / مقاومات القياس الحراري
الصمامات	IEC 60534 / ISA-75	صمامات التحكم: تحديد الحجم والتصنيف
	FCI 70-2 / API 598	فئات التسريب واختبار الصمامات

المجال	المواصفة	الموضوع
التحكم والسلامة	IEC 61508 / IEC 61511	السلامة الوظيفية وأنظمة السلامة الآلية SIS
	NFPA 85 / NFPA 86	أنظمة إدارة الحارقات (BMS) والمراجل والأفران
	API 670	أنظمة حماية الآلات (الاهتزاز، الإزاحة المحورية، السرعة الزائدة)
	ISA-18.2 / IEC 62682	إدارة الإنذارات
	ISA-101 / ISO 11064	واجهات التشغيل وتصميم غرف التحكم
البرمجة والاتصالات	IEC 61131-3	لغات برمجة المتحكمات المنطقية
	IEC 61158 / IEC 61784	الشبكات الحقلية (Fieldbus)
	IEC 62443	الأمن السيبراني لأنظمة التحكم الصناعية
المناطق الخطرة	IEC 60079 (سلسلة)	معدات الأجواء القابلة للانفجار وتركيبها
الحماية من البيئة	IEC 60529	درجات الحماية IP
هواء الأجهزة	ANSI/ISA-7.0.01	جودة هواء الأجهزة
المواد	NACE MR0175 / ISO 15156	المواد في بيئات الخدمة الحامضية (Sour Service)
الأنابيب والشفاه	ASME B31.3 / B16.5 / B16.47	أنابيب العمليات والشفاه
الاختبار	IEC 62381 / IEC 62382	اختبارات FAT وSAT وSIT / فحص الحلقات
الكابلات	BS EN 50288-7 (حلّت محل BS 53 08) / IEC 60332 / IEC 60331	كابلات الأجهزة، مقاومة انتشار اللهب، مقاومة الحريق

25.5 وحدات القياس

يجب أن تحدد الوثيقة بوضوح نظام الوحدات المعتمد: **النظام المتري/الدولي (SI)** أو **النظام الإمبراطوري (Imperial)**، وفقًا لممارسة البلد الذي يُبنى فيه المصنع أو وفق متطلبات المالك. النظام المتري هو المفضل في معظم دول العالم، بينما يسود النظام الإمبراطوري في الولايات المتحدة، ولا تزال بعض الشركات النفطية تستخدم خليطًا من النظامين.

المتغير	وحدة نموذجية (متري)	وحدة بديلة شائعة	ملاحظات
الضغط	barg / kPa(g)	psig، kg/cm²(g)	يجب التمييز الواضح بين الضغط المقيس (g) والمطلق (a)
الضغط التفاضلي	mbar / kPa	inH_2O	
الفراغ	mbar(a)	mmHg	
درجة الحرارة	°C	°F	
تدفق السوائل	m^3/h	GPM، BPD	
تدفق الغاز	Nm^3/h أو Sm^3/h	MMSCFD	يجب تعريف الظروف المرجعية صراحة (Normal/Standard)
التدفق الكتلي	kg/h / t/h	lb/h	
المستوى	mm أو %	in	
الكثافة	kg/m^3	lb/ft^3، API°	
اللزوجة الديناميكية (μ)	mPa·s (= cP)	cP، P (بواز)	الماء عند 20 °C نحو 1 cP؛ تُذكر حرارة القياس دائمًا

المتغير	وحدة نموذجية (متري)	وحدة بديلة شائعة	ملاحظات
اللزوجة الحركية (ν)	mm²/s (= cSt)	SSU، درجات إنغلر (Engler)	التحويل بين النوعين: ν = μ ÷ ρ؛ يحتاج الكثافة عند الحرارة نفسها
الاهتزاز	µm pk-pk / mm/s RMS	mils، in/s	الإزاحة للمجسات القريبة، والسرعة لمجسات الغلاف

تحذير: الخلط بين Nm³/h (عند 0 °C و1.01325 bar) وSm³/h (عند 15 °C غالبًا) يسبب خطأ يقارب 5.5% في التدفق، وهو خطأ جسيم في أنظمة القياس وفي حسابات استهلاك وقود التوربينات الغازية.

25.6 فلسفة نظام التحكم (Control System Philosophy)

25.6.1 نمط تشغيل المصنع *(Mode of Plant Operation)*

- **تحكم مركزي (Centralized):** غرفة تحكم مركزية واحدة (CCR) لجميع وحدات العمليات، والمرافق الخارجية (Offsites)، والخدمات (Utilities).
- **تحكم مخصص (Dedicated):** غرفة تحكم مستقلة لكل وحدة عمليات، أو للمرافق الخارجية، أو للخدمات.
- **نمط هجين:** غرف أجهزة ميدانية (**Field Auxiliary Room / Satellite Rack Room – FAR/SRR**) تحتوي على خزائن النظام والتوصيل، مع تشغيل مركزي من غرفة تحكم رئيسية. وهذا هو النمط الأكثر شيوعًا في المشاريع الحديثة.

الشكل 25-3: *أنماط تشغيل المصنع الثلاثة في مخطط موقع مبسّط: تحكم مركزي من غرفة تحكم واحدة (CCR) تضم الخزائن، وتحكم مخصص بغرفة لكل وحدة، ونمط هجين بغرف أجهزة ميدانية (FAR/SRR) قرب الوحدات تحوي الخزائن مع تشغيل مركزي عبر ألياف ضوئية مزدوجة، وهو الأشيع.*

25.6.2 نوع المشروع *(Type of Plant)*

- **مشروع جديد كليًا (Grassroots/Greenfield):** حرية كاملة في اختيار المعمارية والمورد.
- **توسعة أو تجديد (Expansion/Revamp) – Brownfield):** يجب مراعاة التوافق مع النظام القائم، ووجود نوافذ توقف محدودة (Shutdown Windows) لتنفيذ الربط (Tie-ins).
- **تعديل (Modification):** يخضع لإجراءات إدارة التغيير (MOC – Management of Change).

25.6.3 أنظمة التحكم والمراقبة والسلامة

النظام	الوظيفة	ملاحظات تصميمية
DCS – نظام التحكم الموزع	التحكم المستمر في العمليات والتشغيل والمراقبة	العمود الفقري لغرفة التحكم
SIS / ESD – نظام السلامة الآلي / الإيقاف الطارئ	تنفيذ وظائف السلامة الآلية SIF	معتمد حتى SIL 3 وفق IEC 61508/6 1511 (وشهادات مثل TÜV)
FGS – نظام كشف الحريق والغاز	الكشف عن الحريق والغاز وتفعيل الإجراءات	يُصمم غالبًا وفق IEC 61511 وبمتطلبات SIL، مع تقييم فاعلية التغطية وفق ISA-TR84.00.07
BMS – نظام إدارة الحارقات	تسلسل إشعال الأفران والمراجل وحمايتها	وفق NFPA 85/86
MMS / MPS – نظام مراقبة/حماية الآلات	الاهتزاز والإزاحة المحورية وسرعة المعدات الدوارة	وفق API 670
PLC	التحكم في الحزم الميكانيكية والوحدات الصغيرة	غالبًا ضمن توريد مورد الحزمة
CCS / TCS – نظام التحكم في الضواغط/التوربينات	التحكم في السرعة والحمل وحماية الضواغط من الانفصال الهوائي (Surge)	مثل أنظمة Mark VIe أو أنظمة CCC وغيرها
PAS / IAMS	إدارة أصول الأجهزة وتشخيصها (HART/FF)	يدعم الصيانة التنبؤية
المؤرخ (Historian) / MES	أرشفة البيانات وربطها بأنظمة الإنتاج	يتطلب فصلًا شبكيًا آمنًا (DMZ)

جدول مقارنة: PLC مقابل DCS مقابل SIS مقابل RTU/SCADA

المعيار	PLC	DCS	SIS (Safety PLC)	RTU + SCADA
المهمة الأساسية	منطق تسلسلي سريع، آلات وحزم	تحكم مستمر موزع مع واجهة مشغل متكاملة	حماية فقط: كشف ← فصل	جمع بيانات وتحكم إشرافي عن بعد
زمن المسح	1 إلى 10 ms	100 إلى 500 ms للحلقات	10 إلى 100 ms مع تشخيص	ثوانٍ إلى دقائق (الاتصال)
التكرار	اختياري	معالجات وشبكات مكررة قياسيًا	1oo2D / TMR معتمد SIL	اختياري، اتصال مزدوج
البرمجة	IEC 61131-3 (المخطط السلّمي غالبًا)	كتل وظيفية وتهيئة أكثر من برمجة	مقيدة وموثقة (IEC 61511)	تهيئة نقاط وبروتوكولات (DNP3/Modbus)
الواجهة	HMI منفصلة	قاعدة بيانات وشاشات موحدة	تُعرض عبر DCS، ولا يُتحكم فيها منه	مركز تحكم بعيد
الفصل عن التحكم	—	يجب فصله عن SIS	مستقل فيزيائيًا ووظيفيًا	—
المثال	ضاغط هواء، محطة معالجة صغيرة	مصفاة، محطة كهرباء	ESD، F&G، BMS	خطوط أنابيب، آبار، شبكات مياه

كيف أختار؟ القاعدة من الجدول: الحلقات المستمرة الكثيرة التي يشغّلها فريق واحد من قاعدة بيانات واحدة إلى DCS؛ والمنطق التسلسلي السريع للآلة أو الحزمة إلى PLC؛ وكل ما يُوقف المعدة لحماية الناس أو الأصول إلى SIS مستقل مهما صغر؛ والمواقع المتباعدة التي يُقبل فيها اتصال متقطع إلى RTU مع SCADA. وحدّ هذه المقارنة أن المنصات الحديثة تطمس الفروق، فمتحكم DCS قد يمسح بسرعة PLC، وبعض العائلات تقدم حلّال

منطق سلامة من الصنف نفسه، والحاسم عندها قائمة الموردين المعتمدين لدى المالك وفلسفة قطع الغيار والتشغيل لا الجدول وحده. والخطأ الأكثر كلفة وضع وظيفة إيقاف في DCS أو في PLC الحزمة لأن فيه قنوات فارغة، أو ترك مورد الحزمة يقرر حدود ما يُنقل تسلسليًا وما يُربط سلكيًا، وهو ما دفعت ثمنه الحالة في القسم 25.13.

25.6.4 معمارية المتحكمات في أنظمة السلامة

تتنوع معماريات أنظمة السلامة من القناة الواحدة إلى التكرار الثنائي والثلاثي والرباعي:

المعمارية	الوصف	الاستخدام النموذجي
1oo1	قناة واحدة	وظائف منخفضة المتطلبات (SIL 1)
1oo2 / 1oo2D – التكرار الثنائي (DMR)	قناتان، وأي قناة تستطيع تنفيذ الإيقاف، مع تشخيص داخلي في النوع D	شائع جدًا ويحقق SIL 3 مع تشخيص عالٍ
2oo3 – التكرار الثلاثي (TMR)	ثلاث قنوات وتصويت بالأغلبية	مفضل في منشآت النفط والغاز الحرجة لتوازنه بين السلامة والإتاحة
2oo4D – التكرار الرباعي (QMR)	قناتان مزدوجتان مع تشخيص	يستخدمه بعض المصنعين، ويحقق سلامة وإتاحة عاليتين بتكلفة أعلى

> **ملاحظة مهمة:** البنية وحدها لا تحدد درجة SIL، والعمود الثالث في الجدول يصف الاستخدام النموذجي لا علاقة ثابتة. فالدرجة تُثبت بثلاثة شروط معًا (القسم 29.4): الحساب الكمي (PFDavg)، وقيود البنية (HFT وفق IEC 61511)، والقدرة المنهجية. ويُميَّز بين بنية حلّال المنطق وحده وبنية وظيفة السلامة كاملة (حساس + منطق + عنصر نهائي). ويُحسم اختيار المعمارية بالأرقام لا بالتفضيل: احتمال الفشل عند الطلب **(PFDavg)**، ومعدل الإيقاف الكاذب **(Spurious Trip Rate)**، ومتطلبات الإتاحة، وتكلفة التوقف. ففي محطة توليد بتوربينات غازية مثلًا، يكلف الإيقاف الكاذب الواحد خسارة إنتاج وإجهادًا حراريًا للمعدات، ولذلك تُعتمد معمارية TMR عادة في أنظمة حماية التوربين.

25.6.5 تكوين عتاد النظام *(Hardware Configuration)*

- **تكوين أحادي (Simplex):** معالج واحد، ومصدر تغذية واحد، وبطاقة إدخال/إخراج واحدة. يُقبل للوظائف غير الحرجة فقط.
- **تكوين متكرر (Redundant):** معالجات ومصادر تغذية وشبكات اتصال متكررة، مع بطاقات I/O متكررة للحلقات الحرجة. ويجب أن تحدد الوثيقة بدقة: هل التكرار مطلوب لكل البطاقات أم للحلقات الحرجة فقط؟

25.6.6 وحدات الإدخال/الإخراج البعيدة *(Remote I/O)*

تُفضل عادة لربط إشارات مراكز التحكم في المحركات **(MCC)** ومغيرات السرعة **(VFD)**، عندما تكون المسافة كبيرة بين المحطة الكهربائية الفرعية وغرفة الأجهزة، لأنها تقلل كمية الكابلات متعددة الأزواج وتكلفتها. وتُستخدم كذلك في الوحدات البعيدة والمنصات البحرية.

25.6.7 زمن المسح *(Scan Time)*

يُحدد وفق مواصفات المالك. وتضع بعض المواصفات لأنظمة السلامة حدًّا أعلى لزمن المسح قدره **250 مللي ثانية**، والقيم النموذجية أقل من ذلك كثيرًا (نحو 10 إلى 100 ms كما في جدول المقارنة في 25.6.3)؛ لكن المعيار الصحيح هو أن يكون **زمن الاستجابة الكلي** للوظيفة (الحساس + المنطق + العنصر النهائي) أقل بفارق مريح من **زمن سلامة العملية (Process Safety Time)**. أما في أنظمة حماية التوربينات من السرعة الزائدة، فزمن الاستجابة المطلوب يكون بعشرات المللي ثانية، ولذلك تُستخدم لها وحدات حماية مخصصة.

25.6.8 تصميم منصات التشغيل *(Consoles)*

- **منصات مريحة (Ergonomic):** مصممة وفق ISO 11064، مع مراعاة زوايا الرؤية والإضاءة وعدد الشاشات لكل مشغل.
- **منصات غير مريحة (Non-ergonomic):** طاولات تقليدية، ولم تعد مقبولة في المشاريع الحديثة.
- **المنصة المساعدة (Auxiliary Console):** تحتوي على أزرار الإيقاف الطارئ المربوطة سلكيًا (Hardwired ESD Pushbuttons)، ولوحة إنذارات الحريق والغاز، ومفاتيح التجاوز (Bypass) إن سُمح بها، وأحيانًا شاشات CCTV.

وبالعودة إلى معماريات حلّال المنطق في القسم 25.6.4، يقارن الشكل 25-4 المعماريات الشائعة التي تُذكر في فلسفة نظام التحكم: القناة الواحدة للتحكم غير الحرج، وقناتان بتشخيص أو ثلاث بتصويت لأنظمة السلامة، وأربع لأعلى إتاحة. المعمارية وحدها لا تعطي SIL، لكنها تحدد تحمّل الأعطال (HFT) ومعدل الإيقاف الكاذب، وهما ما تطلبه الفلسفة من المورد بالأرقام.

الشكل 25-4: *معماريات التكرار في حلّال المنطق: 1oo1 و1oo2D و2oo3 و2oo4D؛ الحرف D يعني تشخيصًا مدمجًا يحوّل الأعطال غير المكشوفة إلى مكشوفة ويعزل القناة المعطوبة.*

25.7 فلسفة التحكم في الحزم (Package Control System Philosophy)

الحزم (Packages) هي وحدات جاهزة يوردها مصنّع واحد مركّبة على قاعدة (Skid)، مثل: ضواغط الهواء، ووحدات حقن الكيماويات، ووحدات معالجة الغاز، ومولدات الديزل، والتوربينات الغازية.

25.7.1 جهة التحكم في الحزمة

- **التحكم من نظامي DCS وSIS الرئيسيين للمصنع:** يوحد التشغيل وقطع الغيار.
- **التحكم عبر PLC أو نظام خاص يورده مورد الحزمة:** شائع في المعدات المعقدة كالتوربينات والضواغط الكبيرة، حيث يمتلك المصنّع خبرة التحكم والحماية.

25.7.2 تكوين الحزمة

1. قاعدة (Skid) مع لوحة تحكم محلية مخصصة (**LCP – Local Control Panel**).
2. قاعدة مع صناديق توصيل (Junction Boxes)، دون لوحة تحكم محلية.
3. قاعدة دون صناديق توصيل ودون لوحة محلية (تُمد الكابلات مباشرة إلى الأجهزة).

25.7.3 طريقة الربط بين *DCS* ولوحة الحزمة

- **ربط سلكي مباشر (Hardwired):** إلزامي عادة لإشارات الإيقاف الطارئ، والسماحيات الحرجة (Permissives)، وأوامر البدء/الإيقاف، وإشارة «إيقاف عام» للحزمة.
- **ربط تسلسلي (Serial Link):** مثل Modbus RTU عبر RS-485/RS-232، أو Modbus TCP/IP، أو OPC UA. ويُستخدم للمراقبة ونقل البيانات الكثيرة غير الحرجة.

> **قاعدة ذهبية:** «ما يُوقف المعدة يجب أن يكون سلكيًا، وما يُعرض للمشغل يمكن أن يكون تسلسليًا». وفي مشاريع التوربينات الغازية، يُنقل عادة عدد كبير من الإشارات عبر Modbus أو شبكة Ethernet إلى DCS المحطة، بينما تبقى إشارات الإيقاف الطارئ وأوامر التزامن والحمل الحرجة سلكية أو عبر روابط متكررة معتمدة.

كما يجب أن تحدد الوثيقة: المسؤول عن **خريطة عناوين Modbus (Modbus Register Map)**، ومن يجري **اختبار التكامل (SIT)** مع مورد الحزمة، وتكرار الروابط التسلسلية، وأسلوب مزامنة الوقت (NTP/GPS) لتسجيل تسلسل الأحداث **SOE – Sequence of Events**.

الشكل 25-5: *قرار نوع الربط بين DCS ولوحة الحزمة: ما يُوقف المعدة سلكي مباشر (Hardwired)، وما يُعرض للمشغّل يمكن أن يكون تسلسليًا (Serial)؛ مع البنود التي يجب أن تحسمها وثيقة أساس التصميم، ومقابلها ما وقع في الحالة الميدانية في القسم 25.13.*

25.8 فلسفة التغذية الكهربائية وهواء الأجهزة

25.8.1 التغذية الكهربائية

المستهلك	التغذية النموذجية	المصدر
خزائن DCS/SIS/FGS	230 V AC أو 110 V AC، مزدوجة	UPS مزدوج (أو UPS + مصدر مستقل)
الأجهزة ثنائية الأسلاك	24 V DC عبر بطاقات النظام	مصادر تغذية متكررة داخل الخزائن
الأجهزة رباعية الأسلاك والمحللات	24 V DC أو 230 V AC	وفق متطلبات المصنّع

المستهلك	التغذية النموذجية	المصدر
الصمامات الملفية (SOV)	24 V DC (غالبًا)	من النظام أو عبر مرحلات
كاشفات الغاز واللهب	24 V DC	من نظام FGS
لوحات الحزم	230 V AC UPS	لوحة توزيع UPS
الإنارة والتدفئة داخل الخزائن	230 V AC عادي (Non-UPS)	لوحة توزيع عادية

وتحدد الوثيقة أيضًا مدة تشغيل البطاريات (**Autonomy Time**)، وتكون عادة بين 30 دقيقة وساعتين في محطات التوليد والمنشآت النفطية، أو أكثر وفق متطلبات المالك. كما تحدد تسلسل التوزيع (Power Distribution) وحماية الدوائر بقواطع أو مصاهر مع مراقبة حالتها.

الشكل 25-6: *توزيع التغذية الكهربائية لأنظمة الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم: مصدرا UPS مستقلان يغذيان خزائن DCS وSIS وFGS بتغذية مزدوجة عبر قواطع أو مصاهر مراقَبة، ومصدرا 24 V DC متكرران بديودات داخل كل خزانة، ولوحات الحزم من توزيع UPS، والإنارة والتدفئة من توزيع عادي (Non-UPS)؛ ومدة البطاريات 30 min إلى 2 h أو أكثر.*

25.8.2 هواء الأجهزة (Instrument Air)

- تُحدد متطلبات هواء الأجهزة عادة في «أساس تصميم العمليات»، وتصبح مرجعًا لمصنعي صمامات التحكم وصمامات الفتح والإغلاق، ولموردي الحزم، ولكل جهاز يعمل بالهواء.
- يتراوح الضغط النموذجي في المجمع الرئيسي بين **5** و**7 barg**. ويجب أن تُصمم جميع الأجهزة الهوائية لتعمل عند **أقل ضغط** محدد في أساس التصميم، لا عند الضغط الاسمي.

- يجب أن تكون جودة الهواء وفق **ANSI/ISA-7.0.01**، وأهم متطلباتها:
  - نقطة الندى (Dew Point) عند ضغط الخط أدنى من أدنى درجة حرارة محيطة متوقعة بـ10 °C على الأقل.
  - حجم الجسيمات الصلبة لا يتجاوز 40 ميكرومترًا (µm).
  - محتوى الزيت قريب من الصفر، ولا يتجاوز 1 ppm (وزنًا أو حجمًا).
  - خلوّه من الغازات الأكالة والقابلة للاشتعال.
- يجب تحديد **زمن الاحتفاظ (Hold-up Time)** لخزان الهواء، وهو الزمن الذي تستطيع خلاله الأجهزة العمل بعد توقف الضواغط، حتى تنتقل الصمامات إلى وضعها الآمن بشكل منظم. (مثال محلول لحجم الخزان في آخر القسم 25.12.)

25.8.3 غاز الأجهزة *(Instrument Gas)*: متى يُستعمل بدل الهواء وما يترتب عليه

في المواقع النائية — رؤوس الآبار البرية، ومحطات خطوط الأنابيب، والمنشآت البحرية غير المأهولة — قد لا يوجد ضاغط هواء ولا كهرباء تشغّله، بينما يوجد غاز عملية مضغوط وفير. فيُستعمل **الغاز الطبيعي المعالَج وسيطًا لتشغيل الأجهزة (Instrument Gas)** بدل الهواء. وهو قرار يُحسم في وثيقة أساس التصميم لأنه يمسّ اختيار كل نبيطة هوائية في الموقع، ويمسّ تصنيف المناطق، ويمسّ تصميم كل غلاف.

متى يُقبل: حين لا يتوفر هواء أجهزة موثوق، **و** يتوفر غاز قابل للترشيح والتجفيف بضغط مستقر، **و** يمكن تنفيس كل الأغلفة إلى الخارج بأمان، **و** يُقبل تصنيف البيئة الناتج. وإن انتفى أحد هذه الشروط، فبديلُه ضاغط هواء صغير يعمل بالطاقة الشمسية أو بمحرك غاز، لا استعمالُ غاز غير معالَج.

ما يترتب عليه — وهذا ما يُغفل:

1. **الترشيح والتجفيف إلزاميان.** فالمنافذ في مكوّنات أنظمة الإيقاف صغيرة جدًا، والسائل أو الجسيمات تسدّها. وتُستعمل في الميدان أنظمة بغاز غير مجفَّف، والثمن انسدادات متكررة وتكوّن هيدرات في الشتاء وإيقافات كاذبة.

2. **تنفيس كل غلاف.** أغلب المكوّنات تنفّس غازًا في الخدمة العادية، فيجب ألا يتراكم داخل غلاف أو خزانة فيتكوّن خليط قابل للاشتعال. والتنفيس يُمدّ إلى موضع آمن. **وإن مُدّ أنبوب التنفيس بعيدًا وجب التحقق من ألا يُدخل فقد ضغط كبيرًا في الدائرة، لأن ذلك يُطيل زمن الاستجابة مباشرة** — وهذه مقايضة بين سلامة الغلاف وسرعة الإيقاف تُحسم بالحساب لا بالتقدير.
3. **إعادة تصنيف المناطق حول اللوحات والأجهزة**، لأن التنفيس المستمر مصدر إطلاق دائم (الفصل 26).
4. **الانبعاثات والاستهلاك.** كثير من المواضع والمرحّلات والصمامات الطيارية يطلق غازًا باستمرار، ما لم تُختر أنواع منخفضة التنفيس أو عديمته. ويُحسب الاستهلاك الكلي ويُدرج في ميزان المنشأة وفي تقدير الانبعاثات، ويُقارن بكلفة ضاغط هواء صغير.
5. **المواد وحلقات الإحكام** تُختار لمقاومة مكوّنات الغاز؛ وفي الغاز الحامض تُطبَّق NACE MR0175/ISO 15156 على كل ما يلامسه (25.10.5).
6. **لا يُغذَّى بغاز العملية جهاز داخل مبنى مأهول** ولا خزانة داخل غرفة تحكم، مهما كان التنفيس.

◆ ◆ ◆

25.9 متطلبات تصنيف المناطق الخطرة

يجب أن تحدد الوثيقة طريقة الحماية المفضلة، مثل **الأمان الجوهري (Intrinsic Safety – Ex ia/ib)** أو **الغلاف المقاوم للانفجار (Flameproof – Ex d)**، وفق تصنيف المنطقة:

المنطقة (IEC)	التعريف	الطرق المقبولة عادة
Zone 0	الجو الانفجاري موجود باستمرار أو لفترات طويلة	Ex ia فقط (عمليًا)

المنطقة (IEC)	التعريف	الطرق المقبولة عادة
Zone 1	يُحتمل وجوده أثناء التشغيل العادي	Ex ia، Ex ib، Ex d، Ex e، Ex p، Ex m
Zone 2	غير متوقع، وإن حدث فلفترة قصيرة	كل ما سبق، إضافة إلى Ex nA/ec

ويُضاف إلى ذلك تحديد **مجموعة الغاز** (IIA، IIB، IIC والهيدروجين ضمن IIC) و**فئة درجة الحرارة** (T1 حتى T6)، إضافة إلى مستوى حماية المعدات (**EPL**: Ga، Gb، Gc). وتفصيل هذه المفاهيم وطرق الحماية في الفصل 26؛ والمطلوب هنا أن تُثبّت الوثيقة الاختيار المعتمد للمشروع لا أن تشرحه.

الممارسة الشائعة:

- الأجهزة ثنائية الأسلاك (المرسلات) في المناطق الخطرة: **أمان جوهري Ex ia** مع حواجز عزل (Isolators/Barriers) في خزائن التوصيل.
- الأجهزة رباعية الأسلاك والصمامات الملفية: **Ex d** غالبًا، أو Ex ia للصمامات منخفضة القدرة.
- صناديق التوصيل: **Ex e** لغير دوائر الأمان الجوهري، وصناديق مخصصة بلون مميز (أزرق عادة) لدوائر الأمان الجوهري.
- يُطبق في التركيب المعيار **IEC 60079-14**، ومنه مثلًا: الفصل بين كابلات دوائر الأمان الجوهري وغيرها، وحساب ملاءمة المعاملات (Entity Parameters) مثل Uo وIo وCo وLo مقابل Ui وIi وCi وLi للجهاز وسعة الكابل وحثيته.

25.10 المتطلبات الأساسية لأجهزة الميدان والكابلات

25.10.1 التمثيل والدقة

- يُمثل الجهاز على مخططات P&ID وفق **ANSI/ISA-5.1** والمواصفات المرتبطة بها.

- يجب تحديد **الدقة (Accuracy)** المطلوبة لكل فئة من أجهزة القياس صراحة، وفق مواصفات المالك أو وفق الممارسة الهندسية المعتادة إن لم يحددها المالك. مثال: ±0.075% من المدى للمرسلات الذكية، و±0.25% لعدادات القياس لأغراض البيع وفق متطلبات الجهة المختصة.

25.10.2 أنواع الإشارات

النوع	التفاصيل
تناظرية (Analog)	4–20 mA مع بروتوكول HART. ويُفضل اعتماد مستويات الأعطال وفق **NAMUR NE43** (3.6 mA أو أقل، أو 21 mA أو أكثر، تعني عطلًا)
إدخال رقمي (DI)	تلامس جاف (Potential-free Contact) أو مجسات قرب بتقنية NAMUR (EN 60947-5-6)
إخراج رقمي (DO)	تلامس جاف عبر مرحلات أو إخراج بجهد (24 V DC). وتُمرر تلامسات الإخراج الجافة دائمًا عبر مرحلات عازلة
نبضية/ترددية	لمراقبة السرعة وعدادات التوربين والتدفق
تسلسلية	Modbus RTU/TCP، وشبكات حقلية مثل Foundation Fieldbus H1 و PROFIBUS PA/DP، وشبكات Ethernet الصناعية مثل PROFINET و EtherNet/IP
مخصصة	إشارات مجسات الاهتزاز القريبة (Proximity Probes) عبر مكيف إشارة (Proximitor)، والمزدوجات الحرارية mV، والمقاومات الحرارية RTD

25.10.3 التغذية الكهربائية للأجهزة

- معظم الأجهزة الإلكترونية **ثنائية الأسلاك (2-wire)** تُغذى من الحلقة نفسها عبر نظام التحكم (Loop Powered).

- **الأجهزة رباعية الأسلاك (4-wire)** مثل بعض عدادات التدفق الكهرومغناطيسية والكوريوليس والمحللات تحتاج إلى تغذية منفصلة، وكذلك بعض الصمامات الملفية.
- **الأجهزة ثلاثية الأسلاك (3-wire)** تُستخدم في بعض التطبيقات، مثل كاشفات الغاز الهيدروكربوني وكاشفات H_2S.

25.10.4 درجة الحماية من الدخول *(Ingress Protection)*

- **للتركيب الخارجي:** الأجهزة وصناديق التوصيل واللوحات المحلية بدرجة **IP65** كحد أدنى وفق IEC 60529، وتُرفع عادة إلى **IP66/IP67** في المنصات البحرية والمناطق المعرضة للغسيل أو الأمطار الغزيرة.
- **للتركيب الداخلي:** خزائن النظام والتوصيل **IP23** كحد أدنى في الغرف المكيفة، وتُرفع إلى IP42 أو أكثر في الغرف الأقل نظافة.

25.10.5 مواد الأجزاء المبللة *(Wetted Parts)*

- تحدد مواصفات المالك عادة مادة موحدة، والحد الأدنى الشائع هو **الفولاذ المقاوم للصدأ SS316/316L.**
- تُذكر المتطلبات الخاصة صراحة، ومنها:
  - **NACE MR0175/ISO 15156** للخدمة الحامضية التي تحتوي H_2S.
  - مواد خاصة للخدمات الأكالة، مثل Hastelloy وMonel والتيتانيوم والتنتالوم (Tantalum)، والأغشية المطلية بالذهب لخدمة الهيدروجين.
  - متطلبات قوانين المراجل والبخار المحلية لأجهزة خطوط البخار، مثل IBR في الهند.

25.10.6 الطلاء والتغطية

يجب أن تتحمل الأجهزة الظروف البيئية المحددة للمشروع (حرارة، رطوبة، ملوحة، غبار). وتُحال متطلبات الطلاء عادة إلى وثيقة «مواصفة الطلاء والتغطية» التي يعدها فريق هندسة الأنابيب، مع ذكرها مرجعًا في أساس التصميم.

25.10.7 تصنيف الشفاه *(Flange Ratings)*

- تحدد مواصفات المالك الحد الأدنى لتصنيف شفاه الأجهزة المركبة على الخط (In-line/On-line).
- **شفاه ألواح الفتحة (Orifice Flanges):** الحد الأدنى **#300**، وما فوق ذلك يتبع مواصفة مواد الأنابيب (Piping Material Specification).
- **صمامات التحكم:** الحد الأدنى #300 للأقطار حتى 6 بوصات، وما فوقها يتبع مواصفة الأنابيب.
- الأصل دائمًا أن **تتبع شفاه الأجهزة فئة الأنابيب (Piping Class)** إذا كانت أعلى من الحد الأدنى.
- **وصلات الشفاه في الأجهزة المركبة على الخط:** بشفاه وفق ASME B16.5 و B16.47، ومتوافقة مع مواصفات الأنابيب.

25.10.8 نوع التوصيلة الكهربائية

- **سن متري:** مثل M20×1.5 وM25×1.5 (شائع في المشاريع الأوروبية والآسيوية).
- **سن NPT:** مثل ½" NPT و¾" NPT (شائع في المشاريع الأمريكية والخليجية).
- يجب توحيد نوع السن في المشروع قدر الإمكان، أو تحديد مهايئات (Adaptors) معتمدة للمناطق الخطرة عند الحاجة، لأن خلط الأنواع من أكثر مشكلات التركيب شيوعًا.

25.10.9 كابلات الأجهزة

تحدد الوثيقة أنواع الكابلات ومواصفاتها، ومن أبرز النقاط:

البند	الممارسة النموذجية
المواصفة	BS EN 50288-7 (حلّت محل BS 5308 Part 1 & 2) أو ما يعادلها
مقطع الموصل	0.75 أو 1.0 mm² للكابلات الفرعية، و0.5 إلى 1.0 mm² لأزواج الكابلات الرئيسية، و1.5 mm² أو أكثر لتغذية الصمامات الملفية والأحمال عند المسافات الطويلة (بعد حساب هبوط الجهد)
الحجب (Screen)	حجب فردي لكل زوج مع حجب إجمالي (IS & OS) للإشارات التناظرية، وحجب إجمالي فقط للإشارات الرقمية
التسليح (Armour)	تسليح بأسلاك فولاذية مجلفنة (SWA) أو جديلة (GSWB) للكابلات المدفونة أو في المناطق المعرضة للضرر الميكانيكي
الغلاف	PVC أو LSZH منخفض الدخان وخالٍ من الهالوجينات (مهم داخل المباني والمنصات البحرية)
مقاومة اللهب	IEC 60332-3 لمنع انتشار اللهب، وIEC 60331 لكابلات مقاومة الحريق (Fire Resistant) في دوائر FGS والإيقاف الطارئ التي يجب أن تعمل أثناء الحريق
لون الغلاف	أزرق فاتح لدوائر الأمان الجوهري، وأسود أو رمادي لغيرها (وفق مواصفات المشروع)
كابلات التعويض	للمزدوجات الحرارية، ويُراعى رمز الألوان حسب المواصفة (IEC 60584-3 أو ANSI MC96.1)
سعة الكابل	لا تتجاوز عادة 75–120 pF/m حسب نوع الحجب، وهي قيمة مهمة في حسابات دوائر الأمان الجوهري ولإشارات HART على المسافات الطويلة

25.11 المتطلبات الأساسية للتركيب

تحدد الوثيقة المتطلبات الفنية لتركيب الأجهزة وصناديق التوصيل واللوحات المحلية وحوامل الكابلات والكابلات، وفق مواصفات المالك وفلسفاته.

25.11.1 طريقة تركيب المرسلات

- **تركيب بعيد (Remote Mount):** على حامل أنبوبي بقطر 2 بوصة (2" Pipe Stand) مع خطوط النبض (Impulse Lines).
- **تركيب مباشر (Direct Mount):** على نقطة الربط بالعملية مباشرة.
- **تجميعة متقاربة (Close-Coupled Assembly):** تقلل طول خطوط النبض ومشكلاتها، مثل الانسداد والتجمد وتجمع الغازات أو السوائل.
- **المانيفولدات (Manifolds):** ثنائية الصمامات (2-valve) للضغط، وثلاثية (3-valve) أو خماسية (5-valve) للضغط التفاضلي، مع تحديد متطلبات صمامات التصريف والتنفيس.

25.11.2 الأنابيب الدقيقة *(Tubing)*

- **خطوط النبض:** أنابيب فولاذ مقاوم للصدأ، غالبًا بقطر خارجي ½" أو 12 mm، مع مراعاة سماكة الجدار وفق ضغط التصميم.
- **خطوط الهواء:** أنابيب فولاذ مقاوم للصدأ بقطر خارجي ¼" أو 6 mm للإشارات الهوائية وتغذية الأجهزة الصغيرة، و⅜" أو ½" لمشغلات صمامات التحكم وصمامات الفتح والإغلاق ذات السعة الكبيرة التي تتطلب زمن تشغيل قصيرًا.
- **الوصلات:** من نوع الحلقتين (Double Ferrule Compression Fittings)، مع توحيد المصنع قدر الإمكان، لأن خلط قطع الوصلات بين مصنّعين مختلفين يسبب التسريب.

25.11.2-أ الوصلات الضاغطة ذات الحلقتين: الأجزاء والأنواع وقواعد التركيب

أغلب تسريبات خطوط النبض وخطوط هواء الأجهزة لا تأتي من الأنبوب نفسه، بل من وصلاته. والوصلة الضاغطة ذات الحلقتين (Double Ferrule Compression Fitting) هي المعيار في الآلات الدقيقة، لأنها تُحكم بلا لحام ولا مادة إحكام، وتُفك وتُعاد. وتعمل بشرط واحد: أن تُركّب كما صمّمها صانعها (الشكل 25-7).

الشكل 25-7: *(أ) مقطع في الوصلة الضاغطة ذات الحلقتين: عند الشد باليد تكون الحلقتان حرتين على الأنبوب، وبعد الشد الكامل تدفع الصامولة الحلقة الخلفية فتدفع الأمامية إلى المخروط داخل الجسم؛ فتُحكم الأمامية على الجسم وعلى الأنبوب، وتقبض الخلفية على الأنبوب وتقاوم الاهتزاز والسحب. (ب) أشكال شائعة للوصلات: وصلة ذكر وأنثى إلى سن أنبوب، واتحاد، واتحاد مخفض، وكوع، وتيه، وتيه بفرع ذكر، واتحاد عبر لوحة.*

الأجزاء الأربعة:

- **الجسم (Body):** فيه مخروط داخلي تنزلق فيه الحلقة الأمامية، وكتف يتوقف عنده الأنبوب، وسن خارجي تُربط عليه الصامولة.
- **الحلقة الأمامية (Front Ferrule):** تُحكم على مخروط الجسم وعلى سطح الأنبوب، فهي حاجز التسريب.
- **الحلقة الخلفية (Back Ferrule):** تنحني وتقبض على الأنبوب، فتدفع الأمامية وتمسك الأنبوب ضد السحب والاهتزاز.
- **الصامولة (Nut):** تنقل عزم الشد إلى الحلقتين.

جدول: أشكال الوصلات واستعمالها

الشكل	يصل بين	الاستعمال النموذجي
وصلة ذكر (Male Connector)	أنبوب وسن أنثى	دخول الأنبوب إلى منفذ المرسل أو المانيفولد (NPT ½ أو NPT ¼)
وصلة أنثى (Female Connector)	أنبوب وسن ذكر	ربط الأنبوب بصمام جذر أو حلمة بسن ذكر
اتحاد (Union)	أنبوبين بالقطر نفسه	وصل أطوال الأنبوب أو إصلاح جزء منه
اتحاد مخفض (Reducing Union)	أنبوبين بقطرين مختلفين	الانتقال من ½ إلى ¼ بوصة، مثلًا في خط هواء
كوع (Union Elbow)	أنبوبين بزاوية 90°	تغيير الاتجاه حيث لا يتسع المكان لثني الأنبوب
تيه (Union Tee)	ثلاثة أنابيب	تفرع خط هواء التغذية إلى عدة أجهزة
تيه بفرع ذكر (Male Branch Tee)	أنبوبين وسن أنثى	تركيب مقياس ضغط محلي على خط نبض

الشكل	يصل بين	الاستعمال النموذجي
اتحاد عبر لوحة (Bulkhead Union)	أنبوبين عبر جدار أو لوحة	دخول الأنبوب إلى خزانة أو غلاف حماية
سدادة وغطاء (Plug / Cap)	إغلاق منفذ أو طرف أنبوب	منافذ الاختبار والتصريف غير المستعملة

كيف أختار؟ يُقرأ طرفا الوصلة أولًا: أنبوب أم سن، وذكر أم أنثى، ثم القطر الخارجي للأنبوب، ثم المادة نفسها مادة الأنبوب، ويُفضَّل المسار الذي يعطي أقل عدد من الوصلات لأن كل وصلة نقطة تسريب محتملة. وحدّ هذا الجدول أنه لا يحسم نوع السن (NPT أم BSPP) ولا تصنيف الضغط والحرارة، فهذان يؤخذان من جدول الصانع ومواصفة الأنابيب. والخطأ الأكثر كلفة خلط المقاسات البوصية بالمترية أو أجزاء صانعين مختلفين في وصلة واحدة، فتبدو محكمة عند الشد ثم تسرّب أو ينسحب أنبوبها تحت الضغط.

المقاسات: يُسمى الأنبوب بقطره الخارجي، لا الداخلي. والمقاسات البوصية الشائعة ¼ و⅜ و½ بوصة، والمترية 6 و8 و10 و12 mm. وأخطر ما في الميدان أن ½ بوصة (12.7 mm) و12 mm متقاربان في الشكل، وكذلك ¼ بوصة (6.35 mm) و6 mm. وتبدو الوصلة محكمة عند الشد ثم تسرّب أو يقفز منها الأنبوب تحت الضغط. لذلك يُعزل مخزون البوصي عن المتري، وتُعلَّم الوصلات المترية.

قواعد التركيب (المبدأ العام؛ ويُتبع دائمًا دليل الصانع وعدد لفاته):

1. **القطع:** يُقطع الأنبوب مستويًا بقاطع أنابيب، لا بمنشار يترك حافة مائلة. ثم تُزال النتوءات من الداخل والخارج، ويُتأكد من سلامة سطح الأنبوب من الخدوش في موضع الحلقتين.
2. **الإدخال:** يُدخل الأنبوب في الوصلة حتى يستقر على كتف الجسم، ثم تُشد الصامولة باليد. والأنبوب الذي لم يبلغ الكتف ينسحب لاحقًا.
3. **العلامة:** تُعلّم الصامولة عند موضع الساعة السادسة، ليُعرف مقدار اللف.

4. **الشد:** يُمسك الجسم بمفتاح ثانٍ، وتُلف الصامولة العدد الذي يحدده الصانع. وهو عند أشهر الصانعين لفة وربع (1¼) للمقاسات من ¼ إلى 1 بوصة، وثلاثة أرباع لفة للمقاسات الأصغر.
5. **الفحص:** يُستعمل مقياس الفجوة (Gap Inspection Gauge) إن وفّره الصانع: إن لم يدخل بين الصامولة والجسم فالشد كافٍ.
6. **إعادة التركيب:** عند فك وصلة وإعادتها تُعاد الصامولة إلى موضعها السابق، ثم تُشد شدًا خفيفًا إضافيًا فقط.
7. **المادة:** وصلات من الفولاذ المقاوم للصدأ 316 على أنابيب من المادة نفسها. ويكون الأنبوب ألين من الوصلة، ولا تُخلط أجزاء صانعين مختلفين.
8. **السن:** مادة الإحكام (شريط PTFE أو معجون) تُوضع على سن الأنبوب المسنن NPT الذكر فقط، مع ترك أول سن نظيفًا، ولا توضع على الأنبوب أو الحلقتين أبدًا. والسن المتوازي (BSPP) يُحكم بحلقة منفصلة لا بالشريط.

سماكة الجدار وضغط التشغيل: الأنبوب يُختار من جدول ضغط التشغيل عند الصانع حسب القطر والسماكة والمادة والحرارة. ومثال للتوضيح: أنبوب ½ بوصة من الفولاذ 316 بسماكة 0.049 بوصة يتحمل نحو 3,700 psi (≈ 255 bar) عند حرارة الغرفة في جداول أحد الصانعين المعروفين، وتقل القيمة مع ارتفاع الحرارة. فخط نبض على بخار عالي الضغط يُحسب ولا يُفترض.

جدول تشخيص: أعطال الوصلات الضاغطة

العَرَض	السبب الأرجح	الإجراء
تسريب عند الصامولة بعد التركيب مباشرة	شد ناقص، أو خدش على الأنبوب، أو أجزاء من صانعين	فحص الفجوة، وإكمال الشد، وتبديل الحلقتين والأنبوب المخدوش
انسحاب الأنبوب تحت الضغط	الأنبوب لم يبلغ الكتف، أو قطر متري في وصلة بوصية	إعادة التركيب بأنبوب وحلقتين جديدين بالمقاس الصحيح

العَرَض	السبب الأرجح	الإجراء
تسريب بعد فك وإعادة	لم تُعد الصامولة إلى موضعها، أو شُدت زيادة	تبديل الحلقتين إن تشوهتا
تسريب يظهر مع الاهتزاز	الأنبوب غير مسنود، أو الحلقة الخلفية لم تقبض	إضافة مساند (Clamps) على مسافات منتظمة، وإعادة الشد وفق الصانع
تلف السن عند الفك (Galling)	فولاذ مقاوم على فولاذ مقاوم بلا تزييت	استعمال المزلق الذي يوصي به الصانع، وتبديل الوصلة

دور المهندس ودور الفني: المهندس يحدد في مواصفة التركيب القطر والسماكة والمادة وجهة التصنيع المعتمدة، وضغط الاختبار وطريقته، ويمنع الخلط بين البوصي والمتري. والفني يقطع ويركب ويعلّم ويفحص بالمقياس، ويجري اختبار التسريب بالضغط أو بالمحلول الرغوي، ويسجل كل خط في سجل الاختبار قبل تشغيله.

25.11.3 فلسفة مسارات الكابلات

- **تحت الأرض:** قنوات (Ducts) أو خنادق (Trenches) مع حماية ميكانيكية وإشارات تحذيرية.
- **فوق الأرض:** حوامل مثقبة (Perforated Trays) أو سلمية (Ladder Trays) أو أنابيب حماية (Conduits).
- **الفصل بين الكابلات (Segregation):** مسافة نموذجية لا تقل عن **300 mm (12 بوصة)** بين كابلات إشارات الأجهزة وكابلات القوى، وتزداد المسافة مع ارتفاع الجهد والتيار، أو يُستخدم فاصل معدني مؤرض. كما تُفصل كابلات دوائر الأمان الجوهري عن غيرها، وتُفصل كابلات الأنظمة المتكررة في مسارات مختلفة عند الإمكان لتجنب الفشل المشترك (Common Cause Failure) في حالة الحريق.

الشكل 25-8: *الفصل بين الكابلات (Segregation). (أ) مسافة لا تقل عن 300 mm (12 in) بين كابلات القوى وإشارات الأجهزة أو فاصل معدني مؤرض، وفصل دوائر الأمان الجوهري (IS). (ب) مساران منفصلان للقناتين المتكررتين حتى لا يُسقطهما حريق واحد معًا (Common Cause Failure).*

25.11.4 مداخل الكابلات (Cable Entry)

- تُحدد جهة الدخول: من الأسفل (مفضلة لمنع دخول الماء)، أو من الجانب، ويُمنع الدخول من الأعلى في الخارج إلا عند الضرورة.
- تُحدد جلبات الكابلات (Cable Glands) حسب نوع الكابل (مسلح/غير مسلح) والمنطقة الخطرة (Ex d / Ex e) ودرجة الحماية المطلوبة، مع استخدام سدادات معتمدة (Stopping Plugs) للمداخل غير المستخدمة.

25.11.5 فلسفة التأريض والحجب

- **تأريض السلامة (Protective/Safety Earth):** لأغلفة الأجهزة والخزائن وحوامل الكابلات.
- **تأريض الأجهزة النظيف (Instrument Clean Earth):** لحجب الكابلات، ويُوصل بقضيب مخصص معزول داخل الخزائن.

- **تأريض دوائر الأمان الجوهري (IS Earth):** للحواجز من نوع زينر، بمقاومة منخفضة جدًا وفق المواصفة.
- **حجب الكابلات:** الممارسة الشائعة هي تأريض الحجب **من طرف واحد فقط**، وهو طرف غرفة التحكم أو الخزائن، مع عزله في الميدان لمنع الحلقات الأرضية (Ground Loops). أما التأريض من الطرفين، فلا يُطبق إلا في حالات خاصة ضمن تصميم مدروس للتوافق الكهرومغناطيسي (EMC) مع شبكة تساوي جهود (Equipotential Bonding) جيدة، أو عند توصية المصنّع، كما في بعض الشبكات الحقلية.

ويبين الشكل 25-9 المخطط النموذجي للتأريض والحجب من الجهاز إلى الخزانة. أما الحلقات الأرضية وطوبولوجيا التأريض وتشخيصها في الميدان فمفصلة في (الأقسام 32.8.2 إلى 32.8.6).

الشكل 25-9: *تأريض الحجب من طرف واحد: يُترك الحجب معزولًا (مقطوعًا ومغلفًا) عند الجهاز، ويُمرَّر في صندوق التوصيل على طرف خاص، ويُؤرَّض في خزانة التوصيل على قضيب التأريض النظيف؛ وقضيب تأريض السلامة وقضيب الأمان الجوهري منفصلان.*

قاعدة حاسمة تُكتب في أساس التصميم بلا تأويل: لا يكفي أن تُذكر «الممارسة الشائعة»، بل يُكتب النص الآمر ومعه استثناءاته ومرجع القرار، لأن ترك الأمر للتفسير هو ما يُنتج التعارض بين الوثائق أصلًا. والصيغة المعتمدة:

1. **الأصل:** حجب كابلات الإشارة التناظرية منخفضة المستوى (مجسات القرب ومقاييس التسارع، والمزدوجات الحرارية وRTD وإشارات mV، وحلقات 4–20 mA وHART) يُؤرَّض **من طرف واحد فقط عند جانب الخزانة أو نظام الحماية**، على قضيب تأريض الأجهزة النظيف، ويُقطع ويُعزل ويُغلَّف عند الجهاز الميداني، ويُمرَّر في كل صندوق توصيل وسيط على **طرف عبور مخصص** لا على هيكل الصندوق.
2. **التمييز الذي يُخلط فيه:** الحجب الفردي لكل زوج يبقى من طرف واحد دائمًا؛ أما **الحجب الإجمالي (Overall Screen)** للكابل متعدد الأزواج فيُؤرَّض عند جانب الخزانة، ويجوز تأريضه من الطرفين ضمن تصميم توافق كهرومغناطيسي موثق وشبكة تساوي جهود (Equipotential Bonding) جيدة. و**درع الكابل المسلح (Armour)** ليس حجبًا بل مسار أرضي وقائي، ويُربط من الطرفين دائمًا.
3. **الاستثناءات المصرّح بها فقط:** الشبكات الرقمية عالية التردد وفق مواصفة الشبكة وتوصية المصنّع؛ والتأريض الهجين (تأريض مباشر عند الخزانة ومكثف نحو 10 nF عند الطرف الآخر) حين تُطلب حماية من الترددات العالية على كابل تناظري. وما عدا ذلك يحتاج انحرافًا موثقًا.
4. **أسبقية الوثائق عند التعارض:** أساس التصميم هو الحاكم على مواصفة التركيب وعلى إجراء التشغيل التجريبي في مسألة التأريض والحجب (وفق ترتيب الأسبقية في القسم 25.4.1). وإذا نصّ إجراء تشغيل تجريبي على التأريض من الطرفين، يُصحَّح بانحراف موثق **قبل بدء التركيب**، لا أثناء فحص الحلقات ولا بعد ظهور الإنذارات الكاذبة.

5. **مكان تسجيل القرار:** تُثبَّت نقطة التأريض لكل حلقة في **مخطط الحلقة (Loop Diagram)** لا في الفلسفة وحدها؛ يُبيَّن فيها أين يُؤرَّض الحجب، وأين يُمرَّر على طرف عبور، وأين يُقطع ويُغلَّف. فما لا يظهر في مخطط الحلقة لا يصمد خمس سنوات.
6. **قرار سابق للشراء:** أسلوب إنهاء الحجب عند الحساس يقيّد اختيار الحساس نفسه، إذ لا تتيح كل المجسات والكابلات المجمّعة عزل الحجب عند طرفها. فيُحسم البند قبل إصدار مواصفة الشراء، وتُذكر متطلباته في ورقة البيانات.

وأثر المخالفة عمليًا ليس نظريًا: تيار دائم في الحجب، ومركّبة عند 50 أو 60 Hz وتوافقياتها في كل قراءة تناظرية على المسار، وإنذارات وفصل كاذب مرتبط بتشغيل الأحمال الكبيرة، وتآكل تدريجي عند طرف الحجب وجلبة الكابل، وسقوط شرط العزل في دوائر الأمان الجوهري. وتفصيل الظاهرة فيزيائيًا في القسم 32.8.2.

◆ ◆ ◆

25.12 فلسفة قطع الغيار (Spare Philosophy)

25.12.1 قطع الغيار المادية

النوع	الغرض	من يحدد الكمية	من يشتريه
قطع غيار التشغيل والصيانة لسنتين (2 Years O&M Spares)	تغطية أول سنتين من التشغيل	يوصي بها المورد	المالك غالبًا
قطع غيار البدء والتشغيل التجريبي (Start-up & Commissioning Spares)	استبدال القطع التالفة أثناء التركيب والتشغيل التجريبي منعًا لتأخير الأعمال	يوصي بها المورد	ضمن نطاق المقاول/المورد

النوع	الغرض	من يحدد الكمية	من يشتريه
المستهلكات (Consumables)	لفترة محددة مثل 6 أو 12 شهرًا (مصاهر، مرشحات، حشوات، أوراق تسجيل)	يوصي بها المورد	حسب العقد
قطع الغيار الإلزامية (Mandatory Spares)	قطع حرجة يحددها المالك بناء على خبرته السابقة	المالك أو المورد وفق سجل خبرته	تُشترى إلزاميًا
قطع الغيار الموصى بها (Recommended Spares)	قطع يوصي بها المورد	المورد وفق سجل خبرته	قد يشتريها المالك أو لا
قطع الغيار الاستراتيجية/التأمينية (Capital/Insurance Spares)	قطع مكلفة وطويلة التوريد، مثل بطاقات حماية التوربين وأجهزة التحليل	المالك	المالك

كيف أختار؟ تُصنَّف القطعة بسؤالين: ماذا يحدث إن لم تكن في المخزن، ومن يدفع ثمنها بحسب العقد. فما يوقف الوحدة وتوريده بالأشهر قطعة استراتيجية يشتريها المالك ولو لم يوصِ بها المورد؛ وما يُستهلك في السنتين الأوليين ضمن قائمة التشغيل والصيانة؛ وما يتلف في التركيب والتشغيل التجريبي في نطاق المقاول لا المالك. وحدّ هذا الجدول أنه لا يعطي الكميات، فقائمة المورد الموصى بها قائمة بيع تُراجع بمعدلات الأعطال ومدد التوريد، ولا يذكر الأثر التراكمي لقطع الغيار في فلسفة توحيد الموردين. والخطأ الأكثر كلفة اعتماد قائمة المورد كما هي، شراءً أو رفضًا، ثم اكتشاف عند أول عطل أن بطاقة الحماية الوحيدة غير متوفرة والوحدة متوقفة.

25.12.2 الاحتياطي المركب في أنظمة التحكم *(Installed Spares)*

البند	نسبة احتياطي نموذجية
خزائن النظام (System Cabinets): وحدات الإدخال/الإخراج، ومكيفات الإشارة، والمرحلات، والعوازل	10–20% من كل نوع

البند	نسبة احتياطي نموذجية
خزائن التوصيل (Marshalling Cabinets): الأطراف (Terminals)	20%
الكابلات متعددة الأزواج (Multipair Cables): الأزواج	10–20% من الأزواج
صناديق التوصيل (Junction Boxes): الأطراف	20%

25.12.3 الفراغ الاحتياطي *(Spare Space)*

فراغ داخل خزائن النظام والتوصيل لتركيب عتاد إضافي مستقبلًا، ويُحدد عادة بنسبة 20–30% من سعة الخزانة. كما يُحدد احتياطي في سعة المعالجات (Controller Load) وسعة الشبكة ومصادر التغذية، وتُذكر نسبة الاحتياط هذه عادة بحد أقصى لنسبة التحميل بعد اكتمال المشروع (مثل ألا يتجاوز تحميل المعالج 50–60%).

> **تنبيه:** تُكتب النسب في كثير من المواصفات بشكل «XX%» في المسودات الأولى، ويجب ألا تصدر الوثيقة للاعتماد وفيها أي نسبة غير محددة، لأن هذه النسب تدخل مباشرة في طلبات الشراء (Material Requisitions) وتؤثر في التكلفة.

مثال محلول (زمن الاحتفاظ وحجم خزان هواء الأجهزة): يطلب أساس التصميم أن تبقى الأجهزة الهوائية عاملة 10 min بعد توقف الضواغط، حتى تنتقل الصمامات إلى وضعها الآمن بشكل منظم. استهلاك الهواء الكلي للأجهزة 300 Nm^3/h، وضغط الخزان الطبيعي 8 barg، وأقل ضغط تعمل عنده الأجهزة وفق أساس التصميم 5 barg.

- **الافتراضات:** التمدد متساوي الحرارة، والضغط الجوي 1.013 bar، والاستهلاك ثابت أثناء الانخفاض، وتُهمل الفروق بين الظروف المرجعية للمتر المكعب النظامي (Nm^3) وحرارة الخزان، فالنتيجة تقريبية تغطيها زيادة الاختيار.
- **الحل:** حجم الهواء المطلوب في 10 min = 300 × 10 ÷ 60 = 50 Nm^3. وحجم الخزان:

$$V = t \times Q \times Patm \div (P1 - P2) = 50 \times 1.013 \div (8 - 5) \approx 16.9\ m^3$$

- **المعنى ميدانيًا:** يُختار خزان سعته 18 إلى 20 m^3 أو خزانان، ويُكتب في الوثيقة كل رقم دخل الحساب. فلو كُتب أقل ضغط للأجهزة 6 barg بدل 5، لصار الحجم المطلوب 1.013 × 50 ÷ 2 ≈ 25.3 m^3، أي بزيادة 50%. ولذلك يُثبت أقل ضغط تشغيل للمشغلات من أوراق بيانات الصمامات قبل تجميد حجم الخزان، لا بعد وصوله.

الشكل 25-10: *هبوط ضغط خزان هواء الأجهزة بعد توقف الضواغط في المثال المحلول: خزان 16.9 m^3 يهبط من 8 إلى 5 barg في 10 min، ولو كان أدنى ضغط للأجهزة 6 barg لبلغه الخزان نفسه بعد 6.7 min فقط، ولزم خزان 25.3 m^3.*

25.13 حالة ميدانية: بند غائب كلّف ثلاثة أسابيع من التشغيل التجريبي

الموقف: في مشروع محطة توليد بالدورة المركبة، وصلت حزمة التوربين الغازي بلوحة تحكم من المورد تُخرج حالات المعدة إلى DCS عبر رابط Modbus TCP، وتستقبل أوامر البدء والتزامن عبره أيضًا. لم تحدد وثيقة أساس التصميم أي الإشارات يجب أن تكون سلكية ولا من يملك خريطة عناوين Modbus ولا من يجري اختبار التكامل. عند فحص الحلقات اكتُشف أن إشارة الإيقاف الطارئ من غرفة التحكم إلى التوربين تمر عبر الرابط التسلسلي وحده، وأن العناوين في وثيقة المورد لا تطابق ما هُيّئ في DCS، وأن جهد الصمامات الملفية على قاعدة الحزمة 120 V AC بينما توزيع UPS في المحطة 230 V AC.

الحل: أُضيفت إشارات سلكية للإيقاف الطارئ والسماحية الحرجة بكابلات جديدة عبر صناديق توصيل الحزمة، وأُعيد بناء خريطة Modbus بجلسة مشتركة بين المورد ومهندس DCS، ورُكّب محول عزل لتغذية اللوحة. استغرق ذلك ثلاثة أسابيع من الجدول ووُثّق بأمر تغيير.

الدرس: الأسطر الثلاثة التي كان يمكن أن تُكتب في بند «فلسفة التحكم في الحزم» (ما يُوقف المعدة سلكي؛ خريطة Modbus مسؤولية المورد وتُعتمد قبل FAT؛ جهود لوحات الحزم تتبع توزيع المحطة) كانت أرخص بمراحل من أسابيع التشغيل التجريبي. (مثال تعليمي مركّب من خبرة المؤلف مع إخفاء بيانات المنشآت.) ويُراجع القسم 25.7 لفلسفة التحكم في الحزم، والقسم 30.12 لاختبارات القبول.

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ماذا يقرر المهندس	ماذا ينفذ الفني ويقيس
التغذية وهواء الأجهزة	الجهود ومدة البطاريات وأدنى ضغط للهواء وزمن الاحتفاظ، بالأرقام	يقيس الجهد عند الجهاز وضغط الهواء عند أبعد مستهلك، ويطابق جهد ملفات الصمامات الواصلة مع الوثيقة
الكابلات والتأريض	نوع الكابل والحجب ونقطة تأريض كل حلقة في مخطط الحلقة	ينفذ التأريض كما في مخطط الحلقة، ويقيس العزل والاستمرارية، ويبلّغ عن أي نص مخالف في الإجراءات
واجهات الحزم	ما يكون سلكيًا وما يكون تسلسليًا، ومن يملك خريطة Modbus	يتحقق في فحص الحلقات من أن إشارات الإيقاف سلكية فعلًا، ويختبر كل عنوان مع مهندس DCS
الأجهزة الواصلة	درجة IP والمواد ونوع السن وتصنيف الشفاه	يطابق اللوحة والمادة والسن عند الاستلام، ولا يركّب مهايئًا غير معتمد

25.14 الأخطاء الشائعة في إعداد أساس التصميم

1. **نسخ الوثيقة من مشروع سابق** دون مراجعة، فتبقى فيها مواصفات أو ظروف مناخية أو أنظمة لا تخص المشروع الحالي.
2. **عبارات مفتوحة** مثل «حسب الممارسة الهندسية الجيدة» دون تحديد رقمي، فيفسرها كل مورد حسب مصلحته.
3. **إغفال واجهات الحزم:** عدم تحديد نوع الربط ومسؤولية خريطة Modbus واختبار التكامل.
4. **عدم تحديد أدنى ضغط لهواء الأجهزة**، فتُصمم مشغلات الصمامات على الضغط الاسمي وتفشل عند انخفاضه.
5. **تعارض بين الوثائق:** مثلًا بين فلسفة التأريض في أساس التصميم ومواصفة التركيب أو إجراء التشغيل التجريبي.
6. **تجاهل متطلبات الأمن السيبراني والفصل الشبكي** حتى مرحلة متأخرة من المشروع.
7. **عدم ربط اختيار المعمارية بحسابات SIL** والإيقاف الكاذب.
8. **عدم تجميد الوثيقة (Freeze)** مبكرًا، فتتغير المتطلبات بعد إصدار طلبات الشراء.

25.15 قائمة تحقق لمراجعة وثيقة أساس التصميم

#	البند	دليل المطابقة (ما يثبت الإجابة)	الملاحظة أو الإجراء المطلوب
1	هل قائمة المواصفات محدثة بالإصدارات السارية، وهل حُدد ترتيب الأسبقية؟	جدول المواصفات مع سنة الإصدار؛ فقرة الأسبقية (القوانين والعقد ← مواصفات المالك ← أساس التصميم ← المواصفات الدولية ← الممارسة الجيدة)	
2	هل حُددت الوحدات، وخاصة الضغط المقيس والمطلق والظروف المرجعية للغاز؟	قسم الوحدات؛ ملاحظة barg/bara؛ الظروف المرجعية (0 °C أم 15 °C، 1.01325 bar)	
3	هل حُددت جميع الأنظمة (DCS/SIS/FGS/MMS/PLC) ومعمارياتها ونطاق التكرار فيها؟	مخطط المعمارية؛ جدول التكرار لكل نظام (وحدة المعالجة، الشبكة، التغذية، بطاقات I/O)	
4	هل حُدد نمط تشغيل المصنع وأماكن غرف التحكم والأجهزة؟	مخطط التموضع؛ فقرة نمط التشغيل (مأهول/غير مأهول، محلي/مركزي)	
5	هل حُددت فلسفة الحزم وطريقة الربط ومسؤولية الاختبارات؟	جدول الحزم (Packages) مع نوع الربط (Modbus/OPC/سلكي) والجهة المسؤولة عن FAT/SAT	
6	هل حُددت مصادر التغذية ومدة البطاريات وجهود الصمامات الملفية؟	قسم التغذية؛ مدة تشغيل بطاريات UPS بالدقائق؛ الجهد 24 V DC/110 V AC للملفات	
7	هل حُددت متطلبات هواء الأجهزة، بما فيها أدنى ضغط ونقطة الندى وزمن الاحتفاظ؟	قسم هواء الأجهزة: الضغط الأدنى عند أبعد مستهلك، نقطة الندى عند الضغط، سعة الخزان بالدقائق (ISA-7.0.01)	

#	البند	دليل المطابقة (ما يثبت الإجابة)	الملاحظة أو الإجراء المطلوب
8	هل حُددت المناطق الخطرة ومجموعات الغاز وفئات الحرارة وطرق الحماية المفضلة؟	مخطط تصنيف المناطق المعتمد؛ فقرة طرق الحماية (Ex d/Ex i/Ex e) لكل نوع جهاز	
9	هل حُددت أنواع الإشارات، ومستويات الأعطال NAMUR NE43، وبروتوكولات الاتصال؟	جدول أنواع الإشارات؛ اتجاه الفشل (3.6/21 mA)؛ قائمة البروتوكولات المسموح بها وإصداراتها	
10	هل حُددت درجات IP والمواد ومتطلبات NACE والطلاء؟	جدول المواد بحسب الخدمة؛ IP الأدنى؛ الإشارة إلى NACE MR0175/ISO 15156؛ مواصفة الطلاء	
11	هل حُدد الحد الأدنى لتصنيف الشفاه ونوع أسنان المداخل الكهربائية؟	فقرة التوصيلات: أدنى تصنيف (#150/#300)، نوع الأسنان (NPT/M20) وتحريم المهايئات غير المعتمدة	
12	هل حُددت أنواع الكابلات والحجب والتسليح وفلسفة التأريض بشكل لا يقبل التأويل؟	مواصفة الكابلات؛ مخطط التأريض المرجعي (حجب مؤرض من طرف واحد عند اللوحة)	
13	هل حُددت نسب الاحتياطي المركب والفراغ الاحتياطي بأرقام صريحة؟	أرقام صريحة: احتياطي مركب %، فراغ للتوسعة %، احتياطي أطراف الكابلات %	
14	هل روجعت الوثيقة من تخصصات العمليات والكهرباء والأنابيب والسلامة، واعتمدها المالك؟	صفحة التوقيعات وسجل المراجعات؛ سجل ملاحظات التخصصات الأخرى وإغلاقها	

يُملأ العمود الأخير أثناء المراجعة: «مطابق»، أو «ناقص: يضاف …»، أو «مؤجل إلى مرحلة التصميم التفصيلي»؛ ولا تُعتمد الوثيقة وفي العمود بند ناقص بلا إجراء.

25.16 ملخص

وثيقة أساس التصميم هي أول مخرج هندسي في تخصص الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم، وأكثرها تأثيرًا في جودة المشروع وتكلفته. فهي تحول مواصفات المالك العامة إلى قرارات هندسية محددة، مثل: الأنظمة ومعمارياتها، والإشارات، والتغذية، وهواء الأجهزة، والمناطق الخطرة، والمواد، والكابلات، والتركيب، وقطع الغيار. وكلما كانت الوثيقة أدق وأكثر تحديدًا بالأرقام، قلّت الخلافات مع الموردين والمقاولين، وقلّت المفاجآت في مرحلة التشغيل التجريبي.

وفي الفصل التالي: الفصل 26، «المناطق الخطرة وأجهزة Ex وأنواع الحماية من الانفجار»، يفصّل بندًا اكتفت الوثيقة فيه بتثبيت الاختيار: كيف تُصنَّف المناطق، وكيف تُقرأ شهادة الجهاز وتُطابق مع موقعه.

25.17 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق بين المواصفة القياسية والكود والمتطلب التشريعي والمتطلب التنظيمي، وما ترتيب الأسبقية عند التعارض؟
2. اذكر خمسة مدخلات لا تُكتب وثيقة أساس التصميم من دونها، وما الذي يُستخرج من كل منها.
3. لماذا يجب أن تنص الوثيقة على الظروف المرجعية لتدفق الغاز، وكم يبلغ الخطأ التقريبي بين Nm^3/h وSm^3/h؟
4. قارن بين معماريات 1oo2D و2oo3 و2oo4D من حيث السلامة والإتاحة، وما الذي يحسم الاختيار بينها؟

5. ما القاعدة الذهبية في الربط بين DCS ولوحة الحزمة، ومن يجب أن يملك خريطة عناوين Modbus؟
6. عند أي ضغط يجب أن تُصمم مشغلات الصمامات الهوائية، ولماذا يُحدد زمن الاحتفاظ لخزان الهواء؟
7. ما طرق الحماية المقبولة في Zone 0 وZone 1 وZone 2، وما الفرق بين مجموعة الغاز وفئة درجة الحرارة؟
8. لماذا يُؤرَّض حجب كابلات الأجهزة من طرف واحد، ومتى يجوز تأريضه من الطرفين؟
9. ما الفرق بين قطع غيار التشغيل لسنتين وقطع غيار البدء والقطع الاستراتيجية، ومن يشتري كلًّا منها عادة؟
10. راجع قائمة التحقق في 25.15: أي بنودها يرتبط مباشرة باختيار الأجهزة في الفصل 27 وأيها بالتركيب والكابلات في القسمين 25.10 و25.11؟

مراجع الفصل: R50 (OISD-STD-152) في فلسفة الحمايات، وR19 في وحدات القياس والإشارات، وISA-5.1 وISA-TR20، وIEC 61511 وIEC 60079-14 وISA-7.0.01، وBS EN 50288-7 وIEC 60332/60331 للكابلات، وNAMUR NE43، وخبرة المؤلف في مشاريع محطات التوليد ومنشآت النفط والغاز (R18)؛ وR64 (مبادئ الأجهزة: غاز الأجهزة، 25.8.3)؛ وR65 (قاعدة تأريض الحجب، 25.11.5)؛ وIEC 61000-5-2 (التأريض والتمديد لأغراض التوافق الكهرومغناطيسي).

الفصل 26: المناطق الخطرة وأجهزة Ex وأنواع الحماية من الانفجار

لمن هذا الفصل: مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم الذي يختار مرسلًا أو صمامًا ملفيًا أو صندوق توصيل لمنطقة خطرة، أو يراجع شهادة جهاز قبل تركيبه، أو يجد في جولة تفتيش غلافًا مفتوحًا وغدة كابل غير مناسبة ويريد أن يعرف مدى خطورة ذلك. ويفيد مهندسي التشغيل والسلامة والمشتريات الذين يقرؤون لوحة بيانات فيها «Ex» ويظنون أن الكلمة وحدها تكفي.

الفكرة الأساسية: هل كل جهاز يحمل علامة Ex «مقاوم للانفجار»؟ لا. العلامة تعني أن الجهاز معتمد للعمل في جو قابل للانفجار بطريقة حماية محددة: Ex d غلاف يحتوي الانفجار الداخلي، وEx i يحد الطاقة الكهربائية فلا تُشعل، وEx e يمنع الشرر والحرارة الزائدة أصلًا، وEx p غلاف مضغوط يمنع دخول الغاز، وEx t غلاف يمنع دخول الغبار القابل للاحتراق. و«مقاوم للانفجار» اسم لطريقة واحدة منها هي Ex d. فالعلامة «Ex d IIB T3» تصنيف لجهاز في ظروف محددة، لا شهادة بصلاحيته لكل مكان. والقاعدة العملية: قبل اختيار جهاز Ex طابِق شهادته مع أربعة أشياء: المنطقة، ومجموعة الغاز أو الغبار، وفئة الحرارة، ومستوى حماية المعدات.

لمحة قبل التفصيل — ثلاث طرق حماية يلتقي بها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس كل يوم:

العلامة	طريقة الحماية	الفكرة	الاستخدام المناسب	ما يجب الحذر منه
Ex d	غلاف مقاوم للهب (Flameproof)	يسمح بالانفجار داخل الغلاف ويمنع خروج اللهب عبر فجوات محسوبة	المحركات والصمامات الملفية والمرسلات والإنارة في المنطقتين 1 و2	الغطاء المفتوح أو البرغي الناقص أو الغدة غير المعتمدة يلغي الحماية كلها؛ لا يُفتح والجهاز مغذًّى بالكهرباء
Ex i	الأمان الجوهري (Intrinsic Safety)	يحد الطاقة الكهربائية في الدائرة كلها إلى ما دون حد الاشتعال	أجهزة القياس والمفاتيح ذات الطاقة المنخفضة؛ الأشيع بين المسموح بها في المنطقة 0 (Ex ia)؛ تسمح بالعمل والجهاز مغذًّى	الحماية للدائرة لا للجهاز وحده: الحاجز والكابل والمعاملات الكيانية جزء من الشهادة
Ex e	الأمان المتزايد (Increased Safety)	يمنع نشوء الشرر والحرارة الزائدة أصلًا بتصميم محكم للأطراف والمسافات والعزل	صناديق التوصيل والمحركات التي لا تولد شررًا في التشغيل العادي؛ المنطقتان 1 و2	لا يصلح لما يولد شررًا في التشغيل العادي (مرحلات، مفاتيح) إلا مع حماية مركبة؛ عدد الأطراف محدد بالشهادة

مثال عملي وتحذير مهني: لوحة مرسل تحمل Ex db IIC T4 Gb. تقرأ هكذا: **Ex** جهاز معتمد للأجواء القابلة للانفجار؛ **db** طريقة الحماية غلاف مقاوم للهب بمستوى حماية «b» (أي للمنطقة 1 وما دونها)؛ **IIC** مجموعة الغاز الأشد (هيدروجين، أسيتيلين) وتشمل IIA وIIB؛ **T4** أقصى حرارة سطح 135 °C فيصلح الجهاز لغازات حرارة اشتعالها الذاتي أعلى من ذلك؛ **Gb** مستوى حماية المعدات للغاز في المنطقة 1. التحذير: لا يجوز تركيب هذا الجهاز في المنطقة 0 مهما كان تصنيفه متينًا، ولا مع ثاني كبريتيد الكربون (فئة T6) مهما كانت مجموعته، ولا في حرارة محيطة خارج مدى Ta المكتوب على اللوحة. فاختيار الجهاز يعتمد دائمًا على ثلاثة أشياء معًا: المنطقة الخطرة، ونوع المادة، ودرجة الحرارة (فئة السطح والحرارة المحيطة). والقراءة الكاملة للوحة بكل حقولها في القسم 26.9.

26.1 مثلث الاشتعال والأجواء القابلة للانفجار

الانفجار في المنشآت الصناعية حريق سريع جدًا في خليط من وقود وهواء، ويحتاج إلى ثلاثة أضلاع: وقود (غاز أو بخار أو رذاذ أو غبار)، وأكسجين، ومصدر اشتعال. وتصنيف المناطق يصف الضلعين الأولين: أين يمكن أن يوجد خليط قابل للاشتعال، وكم من الوقت. وأجهزة Ex تتعامل مع الضلع الثالث: تمنع أن يكون الجهاز الكهربائي أو الميكانيكي مصدر اشتعال.

الحدود القابلة للاشتعال: لا يشتعل الخليط إلا إذا كانت نسبة الغاز في الهواء بين الحد الأدنى (LEL) والحد الأعلى (UEL). فالميثان يشتعل بين 5% و15% بالحجم، والبروبان بين 2.1% و9.5%، والهيدروجين بين 4% و75%، وهذا الاتساع من أسباب خطورته. وأجهزة كشف الغاز تقيس بنسبة من LEL (القسم 30.5)، فقراءة 20% LEL للميثان تعني 1% بالحجم.

مصادر الاشتعال التي تعنينا: الشرر الكهربائي عند فتح نقاط التلامس أو قطع دائرة حثية، والأسطح الساخنة كملفات المحركات والمصابيح والسخانات، والكهرباء الساكنة،

والاحتكاك الميكانيكي، والشرر الناتج عن الأدوات، والصواعق، والموجات الكهرومغناطيسية عالية القدرة.

الشكل 26-1: *مثلث الاشتعال: تصنيف المناطق يصف الوقود والأكسجين، وأجهزة Ex تمنع مصدر الاشتعال. وإلى اليمين المدى القابل للاشتعال لعدة غازات بين الحدين الأدنى والأعلى.*

خصائص مهمة لكل غاز: درجة الوميض (Flash Point) أدنى حرارة يعطي عندها السائل بخارًا كافيًا للاشتعال، وحرارة الاشتعال الذاتي (AIT) أدنى حرارة سطح يشتعل عندها الخليط دون شرارة، وأقل طاقة اشتعال (MIE) وهي للهيدروجين نحو 0.02 mJ مقابل نحو 0.3 mJ للميثان، والفجوة الآمنة التجريبية القصوى (MESG) وهي أكبر فجوة لا ينتقل عبرها اللهب من غلاف إلى الخارج. وهذه الخصائص هي أساس مجموعات الغازات وفئات الحرارة.

26.2 تصنيف المناطق

يقسم المعياران IEC 60079-10-1 للغازات وIEC 60079-10-2 للغبار الأماكن الخطرة إلى مناطق حسب احتمال وجود الجو المتفجر ومدته:

المنطقة	الوصف	التقدير الشائع للمدة	أمثلة
Zone 0 (غاز) و Zone 20 (غبار)	جو متفجر موجود باستمرار أو لفترات طويلة	أكثر من 1000 ساعة في السنة	داخل الخزانات فوق السائل، وداخل الأوعية والأنابيب، وداخل صوامع الغبار
Zone 1 وZone 21	محتمل حدوثه في التشغيل العادي	10 إلى 1000 ساعة	حول فتحات التنفيس ونقاط أخذ العينات ومضخات الختم الميكانيكي وأحواض التحميل
Zone 2 وZone 22	غير محتمل في التشغيل العادي، وإن حدث فلفترة قصيرة	أقل من 10 ساعات	حول الشفاه والصمامات والمعدات في الهواء الطلق في وحدات المعالجة
غير مصنفة	لا يُتوقع جو متفجر	—	غرف التحكم المضغوطة، والمناطق البعيدة

تصنيف أمريكا الشمالية: Class I للغازات والأبخرة، وClass II للغبار، وClass III للألياف، و Division 1 تقابل المنطقتين 0 و1، وDivision 2 تقابل المنطقة 2. والمجموعات بالحروف: A أسيتيلين، B هيدروجين، C إيثيلين، D بروبان. ويسمح NEC اليوم بنظام المناطق أيضًا، وكثير من المنشآت الدولية يجمع النظامين في وثائقها.

من يصنف؟ التصنيف دراسة هندسية توثق في رسومات تصنيف المناطق (Hazardous Area Classification Drawings) ووثيقة تُسمى غالبًا جدول مصادر التسرب، تحدد لكل مصدر درجة تسربه (مستمر، أو أساسي، أو ثانوي) ومدى المنطقة حوله حسب معدل التسرب والتهوية. وتقودها عادة هندسة العمليات والسلامة بمشاركة مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والكهرباء، وتُراجع مع كل تعديل في المنشأة. ويحتاج مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس إلى قراءة هذه الرسومات لكل جهاز يختاره، لأن الموقع نفسه قد يكون منطقة 1 عند منسوب ومنطقة 2 عند منسوب أعلى.

الشكل 26-2: *مثال لتصنيف المناطق حول خزان تخزين بتنفيس إلى الجو: المنطقة 0 داخله، والمنطقة 1 حول فتحة التنفيس، والمنطقة 2 حولها وحول الحوض. وإلى اليسار تعريف المناطق ومستويات حماية المعدات المقابلة.*

26.3 مجموعات الغازات والغبار وفئات الحرارة

مجموعات المعدات: المجموعة I لمعدات المناجم، والمجموعة II لأماكن الغاز السطحية، والمجموعة III للغبار. وتُقسم المجموعة II حسب خطورة الغاز:

المجموعة	الغازات النموذجية	MESG بالملم	نسبة MIC	ملاحظة
IIA	الميثان، البروبان، الغازولين (البنزين)، الأسيتون، الأمونيا	أكبر من 0.9	أكبر من 0.8	الأكثر شيوعًا في النفط والغاز
IIB	الإيثيلين، كبريتيد الهيدروجين، غاز المدن، الإيثر	0.5 إلى 0.9	0.45 إلى 0.8	البتروكيماويات

المجموعة	الغازات النموذجية	MESG بالملم	نسبة MIC	ملاحظة
IIC	الهيدروجين، الأسيتيلين، ثاني كبريتيد الكربون	أقل من 0.5	أقل من 0.45	الأخطر: أضيق فجوة وأقل طاقة

وجهاز IIC يصلح للمجموعات كلها، وجهاز IIB لـ IIB وIIA، وجهاز IIA لـ IIA فقط. وفي الغبار: IIIA للألياف القابلة للاحتراق، وIIIB للغبار غير الموصل، وIIIC للغبار الموصل مثل غبار المعادن.

فئات الحرارة: أقصى حرارة يصل إليها أي سطح في الجهاز، بما فيه الأسطح الداخلية التي قد يصل إليها الغاز، ويجب أن تكون أقل من حرارة الاشتعال الذاتي للغاز:

الفئة	أقصى حرارة سطح	تصلح لغازات حرارة اشتعالها أعلى من
T1	450 °C	450 °C (الهيدروجين 560، الميثان 537، البروبان 470؛ قيم NFPA 497، وتعطي IEC 60079-20-1 للميثان 600 °C، والفئة لا تتغير)
T2	300 °C	300 °C (البيوتان 365، الإيثانول 363)
T3	200 °C	200 °C (الهكسان 225، الغازولين 280، الديزل نحو 250)
T4	135 °C	135 °C (الأسيتالدهيد 140، الإيثر 160)
T5	100 °C	100 °C
T6	85 °C	85 °C (ثاني كبريتيد الكربون 95)

وجهاز T6 يصلح لكل الفئات، وT4 يغطي أغلب الاحتياجات في النفط والغاز، وT3 يغطي الكثير. وتُحدد الفئة عند أقصى حرارة محيطة مسموحة للجهاز، وهي غالبًا 40 °C ما لم تُذكر قيمة أخرى على اللوحة، فجهاز T4 عند 40 °C قد لا يبقى T4 في موقع حرارته 55 °C.

الشكل 26-3: *مجموعات الغازات من IIA إلى IIC بتصاعد الخطورة، وفئات الحرارة من T1 إلى T6 بأقصى حرارة سطح لكل منها مع أمثلة لحرارة الاشتعال الذاتي.*

مثال محلول (اختيار المجموعة والفئة): وحدة معالجة غاز فيها ميثان وكبريتيد الهيدروجين، ومصنف حولها منطقة 2، والحرارة المحيطة تصل صيفًا إلى 52 °C. مرسل ضغط معروض بعلامة Ex db IIB T4 Gb عند Ta حتى 60 °C.

- المجموعة: كبريتيد الهيدروجين IIB، فالجهاز IIB يكفي (والميثان IIA يدخل ضمنه).
- الفئة: حرارة الاشتعال الذاتي لكبريتيد الهيدروجين نحو 260 °C وللميثان 537 °C، فالفئة T3 (200 °C) تكفي، وT4 أفضل.
- الحرارة المحيطة: 52 °C ضمن مدى الجهاز حتى 60 °C، فالفئة T4 تبقى صالحة.
- المنطقة: Gb يصلح للمنطقتين 1 و2. فالجهاز مناسب. ولو كان الغاز هيدروجينًا لوجب IIC.

26.4 أنواع الحماية

تُعرَّف كل طريقة حماية في جزء من سلسلة IEC 60079، ولكل منها حرف في العلامة، ومبدأ مختلف تمامًا:

الرمز	الاسم	المبدأ	مستويات الحماية	يشيع في
Ex d	الغلاف المقاوم للهب (Flameproof)	يسمح بدخول الغاز واشتعاله بالداخل، ويتحمل الغلاف ضغط الانفجار، ويبرد اللهب في فجوات الشفاه والأسنان قبل أن يخرج	db, dc (و da لحالات خاصة محدودة)	المحركات، ومفاتيح التشغيل، ورؤوس المرسلات، والمصابيح، والصمامات الملفية
Ex e	الأمان المتزايد (Increased Safety)	لا يحتوي أجزاء تولد شررًا أو حرارة زائدة في التشغيل العادي، ويضيف مسافات عزل أكبر ومقاومة للاهتزاز ودرجة حماية عالية	eb, ec	صناديق التوصيل، وأطراف التوصيل، ومحركات القفص السنجابي
Ex i	الأمان الجوهري (Intrinsic Safety)	تُحد الطاقة الكهربائية في الدائرة، بجهد وتيار وسعة ومحاثة محدودة، بحيث لا تستطيع الشرارة ولا السطح الساخن إشعال الغاز حتى مع عطلين في المستوى ia	ia, ib, ic	المرسلات، والمفاتيح، والحساسات، وأجهزة الاتصال المحمولة
Ex p	الغلاف المضغوط (Pressurized)	يُملأ الغلاف بهواء نظيف أو غاز خامل بضغط أعلى من المحيط فلا يدخل الغاز، مع مراقبة الضغط وتطهير قبل التشغيل	pxb, pyb, pzc	المحللات، وخزائن التحكم الكبيرة، والمحركات الكبيرة

الرمز	الاسم	المبدأ	مستويات الحماية	يشيع في
Ex m	الطمر (Encapsulation)	تُطمر الأجزاء في راتنج فلا تلمس الغاز	ma, mb, mc	الملفات، والحساسات الصغيرة، وبطاقات الإلكترونيات
Ex o وEx q	الغمر بالزيت والملء بالمسحوق	تُغمر الأجزاء في زيت أو تُدفن في رمل ناعم	ob, qb	المحولات والمكثفات
Ex n	غير الشارر (Non-sparking)	لا ينتج شررًا في التشغيل العادي، للمنطقة 2 فقط	nA, nC, nR	المعدات في المنطقة 2
Ex t	الغلاف ضد الغبار (Dust-tight)	يمنع دخول الغبار ويحد حرارة السطح	ta, tb, tc	كل المعدات في مناطق الغبار
Ex op	الإشعاع البصري	يحد طاقة الضوء في الألياف البصرية	op is, op pr, op sh	الألياف البصرية
Ex h	المعدات غير الكهربائية	مبادئ ميكانيكية: أغلفة السوائل، والتحكم بمصادر الاشتعال، والأمان الإنشائي (ISO 80079-36 و37)	h	المضخات والمراوح والفرامل والمعدات الميكانيكية

كيف أختار؟ القاعدة من الجدول: ما طاقته صغيرة ويحتاج ضبطًا ومعايرة في الموقع فبالأمان الجوهري (Ex i)؛ وما يُشرّر أو يسخن في تشغيله العادي كالملفات والمحركات فبالغلاف المقاوم للهب (Ex d) أو الطمر (Ex m)؛ وصناديق التوصيل والأطراف بالأمان المتزايد (Ex e)؛ والخزائن الكبيرة كثيرة المكونات بالغلاف المضغوط (Ex p)؛ وما يقتصر على المنطقة 2 يقبل Ex n أو Ex ec. وحدّ هذا الجدول أنه يبين المبدأ ولا يبين الصلاحية، فالمنطقة ومجموعة الغاز وفئة الحرارة والحرارة المحيطة تُقرأ من العلامة الكاملة (القسم

26.9)، وكثير من الأجهزة مركّب الحماية مثل Ex db eb. والخطأ الأكثر كلفة اختيار Ex d لجهاز يحتاج فتحًا متكررًا فيصبح كل ضبط عملًا ساخنًا بتصريح وقياس غاز، أو اختيار Ex n أو Ex ec للمنطقة 2 ثم يتغير التصنيف فيُكتشف في التفتيش أن الوحدة كلها بأجهزة غير صالحة.

الحرف الصغير بعد الرمز يشير إلى مستوى الحماية: «a» حماية عالية جدًا تصلح للمنطقة 0، و«b» حماية عالية للمنطقة 1، و«c» حماية معززة للمنطقة 2. وفي الأمان الجوهري تحديدًا تعني هذه المستويات البقاء آمنًا مع عطلين (ia) أو مع عطل واحد (ib) أو في التشغيل العادي (ic)، أما بقية الطرق فلكل منها متطلباتها الخاصة لبلوغ المستوى. وبهذا صار الرمز يحمل المنطقة التي يصلح لها.

الشكل 26-4: *خمسة مبادئ مختلفة لمنع الاشتعال: الغلاف المقاوم للهب يحتوي الانفجار، والأمان الجوهري يحد الطاقة، والأمان المتزايد يمنع الشرر أصلًا، والغلاف المضغوط يمنع دخول الغاز، والغلاف ضد الغبار يمنع الغبار ويحد الحرارة. كلها تحمل علامة Ex وليست كلها «مقاومة للانفجار».*

لماذا لا تعني Ex مقاومة الانفجار؟ المصطلح «مقاوم للانفجار» (Explosion-proof) هو الاسم الأمريكي لما يقابل Ex d تقريبًا، وهو نوع واحد من أكثر من عشرة أنواع. فصندوق توصيل Ex e ليس مقاومًا للانفجار ولا يُقصد له أن يكون، وهو آمن لأنه لا يشعل أصلًا.

ومرسل Ex ia لا يحتوي انفجارًا، وهو آمن لأن طاقته لا تكفي للإشعال. ولذلك لا يُقال «هذا الجهاز مقاوم للانفجار فيمكن وضعه في أي مكان»، بل: «هذا الجهاز محمي بطريقة كذا، لمنطقة كذا، ومجموعة كذا، وفئة حرارة كذا، وحرارة محيطة كذا».

26.5 الغلاف المقاوم للهب Ex d بالتفصيل

الشكل 26-5: *مقطع ثلاثي الأبعاد في غلاف مقاوم للهب: جدران سميكة تتحمل ضغط الانفجار الداخلي، وشفة عريضة مصقولة تكوّن مسار اللهب، وغطاء تكون الفجوة بينه وبين الشفة أضيق من الفجوة الآمنة، ومسامير من درجة محددة، وغدة كابل معتمدة. مصدر الاشتعال بالداخل مسموح لأن الغلاف لا يسمح للهب بالخروج.*

- **المبدأ:** يُفترض أن الغاز قد يدخل الغلاف لأنه ليس محكمًا، ويشتعل من الشرر بالداخل. ويتحمل الغلاف الضغط الناتج (يُختبر عند 1.5 ضعف الضغط المرجعي

على الأقل)، ويخرج الغاز المحترق عبر الفجوات الطويلة الضيقة بين الشفاه أو الأسنان، فيبرد قبل أن يشعل الجو الخارجي.

- **مسار اللهب:** طوله وفجوته القصوى محددان في الشهادة والمعيار حسب المجموعة، فالفجوة لـ IIC أضيق كثيرًا من IIA. ولذلك لا يُخدش ولا يُطلى ولا يُوضع عليه مانع تسرب، ويُدهن بشحم خفيف مانع للتآكل فقط إن سمح الصانع، وتُشد المسامير كلها بدرجتها المحددة (حسب الشهادة واللوحة) ولا يُترك مسمار ناقصًا.
- **الغدد والسدادات:** غدة الكابل جزء من الغلاف، ويجب أن تكون معتمدة Ex d ومناسبة لنوع الكابل (مدرع أو غير مدرع) وللمجموعة، ويُسد كل مدخل غير مستخدم بسدادة معتمدة لا بشريط. وفي بعض التركيبات، خاصة الأمريكية بالمواسير، تلزم سدادات مانعة (Sealing Fittings) لمنع انتقال الانفجار عبر الماسورة.
- **الفتح:** لا يُفتح الغلاف والدائرة مغذاة إلا بتصريح عمل ساخن وقياس غاز، لأن الحماية تزول مع فتح الغطاء. ولهذا يُفضل Ex i في الأجهزة التي تحتاج ضبطًا متكررًا.
- **الحدود:** ثقيل ومرتفع الثمن، ويحتاج تفتيشًا دقيقًا، والتآكل في الشفاه يبطل الحماية.

26.6 الأمان الجوهري Ex i بالتفصيل

هو الطريقة المفضلة لأجهزة القياس والتحكم منخفضة القدرة، لأنها تسمح بالعمل على الجهاز والدائرة مغذاة، وبأجهزة أخف وأرخص، وبالمعايرة في الموقع دون تصريح عمل ساخن.

المبدأ: تُحد الطاقة في الدائرة كلها، في المنطقة الآمنة قبل دخولها المنطقة الخطرة، بجهاز يسمى الحاجز (Zener Barrier) أو العازل (Galvanic Isolator). فالحاجز يستخدم

ديودات زينر ومقاومة ومصهرًا ليمنع تجاوز جهد وتيار محددين حتى لو حدث عطل في الجهة الآمنة، ويحتاج أرضيًا عالي الجودة (أقل من 1 Ω). والعازل يفصل الجهتين مغناطيسيًا أو ضوئيًا ولا يحتاج هذا الأرضي، وهو الأكثر استخدامًا اليوم.

المعاملات الكيانية (Entity Parameters): لكل حاجز قيم خرجه القصوى Uo وIo وPo، وأقصى سعة ومحاثة يسمح بهما في الجهة الخطرة Co وLo. ولكل جهاز ميداني قيم يتحملها Ui وIi وPi، وسعته ومحاثته الداخليتان Ci وLi. والكابل له سعة ومحاثة لكل كيلومتر تُؤخذ من ورقة بياناته (نحو 100 nF/km و0.8 mH/km للكابلات الشائعة، مع تفاوت كبير). والتحقق:

$$U_o \le U_i،\ I_o \le I_i،\ P_o \le P_i،\ C_i + C_c \le C_o،\ L_i + L_c \le L_o$$

الشكل 26-6: *التحقق من حلقة أمان جوهري بالمعاملات الكيانية: خرج الحاجز مقابل ما يتحمله المرسل، وسعة الكابل ومحاثته تدخلان في الحساب.*

مثال محلول (طول الكابل الأقصى): الحاجز في الشكل 26-6: Co = 83 nF و= Lo 3.0 mH. المرسل Ci = 5 nF وLi = 0.2 mH. الكابل 100 nF/km و0.8 mH/km.

- لأن Ci وLi يتجاوز كلٌّ منهما 1% من Co وLo، يُؤخذ نصف Co وLo فقط وفق IEC 60079-14 (أثر اجتماع السعة والمحاثة المركّزتين).
- السعة المتاحة للكابل:
  - $\mathrm{Cc} = 0.5 \times \mathrm{Co} - \mathrm{Ci}$
  - $= 0.5 \times 83 - 5 = 36.5\ \mathrm{nF}$
  - الطول بحسب السعة = Cc ÷ سعة الكابل لكل كيلومتر = 36.5 ÷ 100 ≈ 0.365 km
- المحاثة المتاحة:
  - $\mathrm{Lc} = 0.5 \times \mathrm{Lo} - \mathrm{Li}$
  - $= 0.5 \times 3.0 - 0.2 = 1.3\ \mathrm{mH}$
  - الطول بحسب المحاثة = 1.3 ÷ 0.8 ≈ 1.6 km
- الأصغر يحكم: نحو 365 m (ولو أُغفلت قاعدة النصف لخرج 780 m، وهو خطأ شائع). وقيم Co وLo هنا من قيم المجموعة IIC، وهي أوسع كثيرًا في المجموعة IIB. ويُوثق الحساب في ورقة تُسمى وثيقة النظام (System Document) أو الوثيقة الوصفية للنظام، لكل حلقة، ويُحتفظ بها للتفتيش.

قواعد التركيب: كابلات الدوائر الجوهرية منفصلة عن غيرها، بغلاف أزرق فاتح تقليديًا، وأطراف توصيل زرقاء، ومسافة عزل 50 mm عن الأطراف غير الجوهرية في الصندوق نفسه أو حاجز فاصل، ولا تُوصل دائرتان جوهريتان في مسار واحد إلا بحساب مشترك، والأجهزة البسيطة (Simple Apparatus) كالمفاتيح والمزدوجات الحرارية وRTD تُستخدم دون شهادة إذا لم تولد أو تخزن أكثر من 1.5 V و100 mA و25 mW، وأجهزة القياس المحمولة في الدائرة (كجهاز الاتصال HART) يجب أن تكون معتمدة ومعاملاتها ضمن الحساب.

مستويات ia وib وic: معناها بعدد الأعطال المحتملة والمنطقة المقابلة لكل مستوى سبق في شرح الحرف الصغير (انظر القسم 26.4)؛ ويُضاف هنا أن ic أخف متطلبات، وهو ما كان يُسمى Ex nL.

نظام أرضي الأمان الجوهري في التنفيذ المادي: الجملة المختصرة «الحاجز يحتاج أرضيًا جيدًا» تُنفَّذ في الخزانة بأربعة تفاصيل مادية، وإهمال أي منها يُسقط الشرط دون أن يظهر ذلك في أي اختبار وظيفي:

1. **قضيب مستقل:** لدوائر الأمان الجوهري قضيب تأريض خاص بها، منفصل عن قضيب تأريض السلامة وعن قضيب تأريض الأجهزة النظيف، وهو نقطة المرجع لكل الأجهزة والكابلات ووحدات العزل الجوهرية في الخزانة.
2. **قضيب التركيب معزول:** تُركَّب حواجز زينر على قضيب تركيب (Mounting Bar) **معزول عن هيكل اللوحة**، ويُوصل هذا القضيب بقضيب أرضي الأمان الجوهري بموصل مخصص. فإذا لامس قضيب التركيب الهيكل — بمسمار واحد أو بحامل معدني — صار مسار تصريف الحاجز يمر بالأرضي الوقائي الملوث، وسقط شرط الأمان الجوهري.
3. **العزل عن كل ما عداه:** نظام أرضي الأمان الجوهري معزول عن الهيكل والمنشأة وعن الأنظمة الأخرى على طول مساره، ويُفحص هذا العزل بقياس المقاومة بين القضيب والهيكل بعد فصل التغذية.
4. **حدّ الممانعة:** تقل الممانعة بين الأرضي الرئيسي للمنشأة وأرضي الأمان الجوهري عن **1 Ω**، والالتقاء بينهما عند نقطة واحدة موثقة لا عند كل خزانة؛ فالنقطتان تصنعان حلقة تُفسد المرجع وتُدخل تيارًا في نظام يُفترض ألا يحمل تيارًا.

ولهذا كله صار **العازل الجلفاني** الخيار الافتراضي في التصميمات الحديثة: فهو لا يحتاج هذا النظام أصلًا، فيُسقط معه بندًا كاملًا من بنود التفتيش والصيانة ومصدرًا متكررًا للأعطال. ولا يُنسى أن دوائر الأمان الجوهري تخضع أيضًا لقاعدة تأريض الحجب من

طرف واحد (القسم 25.11.5)، وأن تأريض حجبها من الطرفين مخالفة سلامة لا مخالفة جودة إشارة.

26.6.1 حواجز الأمان الجوهري في خزانة التجميع: حاجز زينر والعازل الجلفاني

حين يُختار الأمان الجوهري طريقةً للحماية، لا يُربط الجهاز الميداني ببطاقة نظام التحكم مباشرة. بل تمر دائرته أولًا بحاجز أمان جوهري (Intrinsic Safety Barrier)، ويُسمى أيضًا حاجز السلامة الجوهرية. ويُركَّب الحاجز عادةً في خزانة تجميع التوصيلات (Marshalling Cabinet) في غرفة التحكم أو غرفة الأجهزة، أي في المنطقة الآمنة، على سكة DIN.

وظيفته: يحدّ الطاقة الكهربائية المتجهة إلى المنطقة الخطرة، فلا تستطيع شرارة الدائرة ولا حرارتها إشعال الجو القابل للانفجار، ضمن شروط اعتماد الدائرة، وحتى لو وقع عطل في الجهة الآمنة، كوصول 250 V إلى أطرافها. والحاجز في لغة المعايير **جهاز مرافق (Associated Apparatus)**. ولذلك تُكتب علامته بين قوسين مربعين، مثل [Ex ia Ga] IIC: أي أنه يُركَّب في المنطقة الآمنة، ويجوز أن تمتد دائرته الجوهرية إلى المنطقة 0.

النوعان الرئيسان (الشكل 26-7):

- **حاجز زينر (Zener Barrier)**، ويُسمى أيضًا حاجز الديود المتوازي (Shunt-Diode Barrier): مقاومة على التوالي تحدّ التيار، وديودات زينر على التوازي تحدّ الجهد، ومصهر يحمي الديودات. فإذا ارتفع الجهد في الجهة الآمنة، وصّلت الديودات التيار إلى أرضي الأمان الجوهري، وانصهر المصهر.
- **العازل الجلفاني (Galvanically Isolated IS Barrier):** يحدّ الطاقة أيضًا، ويفصل فوق ذلك دائرة الميدان عن دائرة التحكم فصلًا كهربائيًا كاملًا، بمحوّل أو بقارنة ضوئية، فلا يمر بينهما تيار مستمر.

الشكل 26-7: *(أ) حاجز زينر: المصهر F والمقاومة R على التوالي، وديودا زينر على التوازي إلى قضيب أرضي الأمان الجوهري. فعند عطل في الجهة الآمنة يقصر الزينر الجهد ثم ينصهر المصهر، ولا يصل إلى الميدان أكثر من Uo وIo. (ب) العازل الجلفاني: تغذية الحلقة والإشارة تعبران حاجز عزل، فلا يحتاج إلى أرضي أمان جوهري، ويقطع حلقات التأريض.*

جدول مقارنة: حاجز زينر والعازل الجلفاني

المقارنة	حاجز زينر (Zener Barrier)	العازل الجلفاني (Galvanic Isolator)
مبدأ العمل	ديودات زينر تحدّ الجهد، ومقاومة تحدّ التيار، ومصهر يحمي الديودات	يحدّ الطاقة، ويفصل دائرة الميدان عن دائرة التحكم كهربائيًا
العزل الجلفاني	لا يوفره	يوفره
التأريض	يحتاج إلى أرضي أمان جوهري عالي الاعتمادية، أقل من 1 Ω، وفق تعليمات التركيب	لا يعتمد على أرضي IS لتحديد الطاقة، وتبقى متطلبات التأريض الأخرى حسب التصميم
حلقات التأريض والتشويش	لا يفصلها	يمنعها ويقلل آثارها
جهد الحلقة المتاح للجهاز	ينقص بمقدار هبوط الجهد على مقاومة الحاجز، نحو 7 V عند 20 mA	يغذي الميدان من مصدره الخاص، فيبقى للجهاز جهد أعلى
الدقة	ديوداته تسرّب تيارًا صغيرًا يزيد قرب جهد العمل الأقصى	يضيف خطأ دقته المعلن (نحو ±0.1% عادة)
التخصص	حاجز عام بحسب القطبية والجهد	وحدة لكل وظيفة: دخل تناظري، أو خرج، أو دخل منفصل، أو خرج منفصل، أو حرارة
HART	يمرره عادةً	يمرره إن كان معتمدًا لذلك
عند العطل	انصهار المصهر الداخلي يعني تبديل الحاجز كله	تُبدَّل الوحدة، وكثير منها يُبدَّل والتغذية قائمة
التكلفة	أقل عادةً	أعلى عادةً، لكنه يُسقط كلفة نظام أرضي IS وصيانته
الاستعمال اليوم	المشاريع القديمة والتوسعات عليها	الخيار الافتراضي في التصاميم الحديثة

كيف أختار؟ في التصميم الجديد يُبدأ بالعازل الجلفاني، ولا يُختار حاجز زينر إلا حيث يوجد نظام أرضي أمان جوهري منفذ ومفحوص فعلًا، وتنجح ميزانية جهد الحلقة عند 21 mA لا عند 20 mA، ويكون تمرير HART معتمدًا. وحدّ هذه المقارنة أنها لا تُظهر حساب الميزانية نفسه ولا المعاملات الكيانية للجهاز الميداني، وهما ما يحسم الاختيار في النهاية مهما كان النوع. والخطأ الأكثر كلفة اختيار زينر توفيرًا في الثمن ثم تنفيذ أرضيه بالتفاصيل الناقصة التي وصفها القسم 26.6، فتبقى الحلقة بلا أمان جوهري حقيقي دون أن يكشف ذلك أي اختبار وظيفي.

تصحيح مهم للمصطلح: كلا النوعين حاجز أمان جوهري. أما **عازل الإشارة العادي (Signal Isolator)** الذي يُستعمل لقطع حلقات التأريض في المنطقة الآمنة، فليس حاجز أمان جوهري ولو تشابه الشكل، إلا إذا كان معتمدًا لهذه الوظيفة. والفرق يُعرف من لوحة الوحدة لا من شكلها: علامة الجهاز المرافق بين قوسين مربعين، ورقم شهادة (IECEx أو ATEX)، وقيم Uo وIo وPo وCo وLo. والوحدات المركّبة على سكة DIN لا يمكن الحكم على نوعها من صورتها. فلا بد من قراءة رقم الطراز وعلامات الاعتماد ومطابقتهما بشهادة الصانع.

جدول: وحدات العزل بحسب وظيفة الحلقة

نوع الحلقة	الوحدة المناسبة	ملاحظة
مرسل ثنائي الأسلاك 4–20 mA (دخل تناظري)	مغذي مرسل مكرر (Transmitter Power Supply / Repeater)	يغذي المرسل ويكرر تياره إلى البطاقة، ويمرر HART إن كان معتمدًا لذلك
موضّع أو محوّل I/P (خرج تناظري)	عازل خرج (Output Isolator / Current Driver)	يحمل أمر 4–20 mA من البطاقة إلى الميدان
حساس NAMUR أو تلامس (دخل منفصل)	مضخم مفتاح (Switch Amplifier)	يكشف انقطاع الخط وقصره (القسم 3.3.2)

نوع الحلقة	الوحدة المناسبة	ملاحظة
ملف صمام أو مؤشر (خرج منفصل)	مشغل صمام (Solenoid / Valve Driver)	يُطابَق مع ملف معتمد Ex i منخفض القدرة
مزدوج حراري أو RTD	محوّل حرارة معزول (Temperature Converter)	الحساس جهاز بسيط، والمحوّل هو الجهاز المرافق
شبكة حقلية (FF H1 / PROFIBUS PA)	مغذي شبكة معتمد (FISCO أو Entity)	التفصيل في القسم 23.7

مثال محلول (لماذا تفشل حلقة مع حاجز زينر وتنجح مع عازل):

- **المعطيات:**
  - بطاقة دخل في DCS تغذي الحلقة بجهد 24 V، ومقاومة دخلها 250 Ω.
  - حاجز زينر 300 Ω / 28 V، ومقاومته الكلية بين طرفيه نحو 340 Ω (من ورقة بياناته).
  - كابل طوله 1.5 km بموصلين من 0.75 mm²، فمقاومة الحلقة ذهابًا وإيابًا نحو 75 Ω.
  - مرسل مع HART يحتاج إلى 10.5 V على الأقل على طرفيه.
- **الحل:**
  - المقاومة الكلية = 250 + 340 + 75 = 665 Ω.
  - عند 20 mA:
    - الهبوط = I × R
    - $= 0.020 \times 665 = 13.3 \text{ V}$
    - جهد المرسل = 24 − 13.3 = **10.7 V**، وهي كافية بالكاد.

- عند 21 mA، وهو تيار إشارة العطل العالي وفق NE43 (القسم 3.3.1):
  - الهبوط = 0.021 × 665 = 13.97 V
  - جهد المرسل = 24 − 13.97 = **10.03 V**، وهي أقل من 10.5 V.
  - التفسير: لا يستطيع المرسل أن يعلن عطله، ويقف التيار دون 21 mA.
- مع عازل جلفاني يغذي الميدان بنحو 16 V عند 20 mA (قيمة نموذجية، وتؤخذ الفعلية من ورقة العازل):
  - جهد المرسل = جهد العازل − I × مقاومة الكابل
  - $= 16 - 0.021 \times 75 \approx \mathbf{14.4\ V}$
  - التفسير: مقاومة الحاجز خرجت من الحساب، وجهة البطاقة تُحسب وحدها.

- **معنى النتيجة:** مقاومة حاجز زينر تأكل نحو ربع ميزانية جهد الحلقة. لذلك يُحسب الجهد عند 21 mA، لا عند 20 mA وحدها، مع كل حاجز زينر. ويُضاف شرط ثانٍ: جهد تغذية الحاجز يجب أن يبقى دون جهد عمله الأقصى (نحو 26 V لحاجز 28 V). فإن تجاوزه، زاد تسرب الديودات فانحرفت القراءة، وقد ينصهر المصهر.

متى لا يلزم الحاجز أصلًا؟ وجود الجهاز في منطقة خطرة لا يعني تلقائيًا حاجته إلى حاجز. فالحاجز جزء من طريقة Ex i وحدها. والمرسل المعتمد بغلاف مقاوم للهب (Ex d) يُوصَّل بغدد كابل مناسبة وبلا حاجز. والجهاز الذي يحمل الاعتمادين معًا (Ex d وEx ia) يُختار له أسلوب واحد عند التركيب، ويُعلَّم على لوحته أيهما اعتُمد (القسم 26.11)، لأن الجهاز الذي رُكّب مرة بلا حاجز لا يعود صالحًا لدائرة جوهرية.

ترتيب الخزانة: تُفصل الجهة الجوهرية عن غير الجوهرية بمسافة 50 mm أو بحاجز فاصل. وتكون أطراف الدوائر الجوهرية وقنواتها زرقاء، وتدخل كابلات الميدان من جهة وتخرج كابلات النظام من الجهة الأخرى، ولا يتقاطع المساران (الشكل 26-8).

الشكل 26-8: *ترتيب نموذجي لخزانة التجميع: كابلات الميدان الجوهرية الزرقاء تدخل أطرافًا زرقاء في الجهة الجوهرية، ثم وحدات العزل على سكة DIN، ثم كابل النظام إلى بطاقات DCS. وتفصل الجهتين مسافة 50 mm أو حاجز. وفي الجهة غير الجوهرية أطراف بمصاهر ومؤشر احتراق، وتوزيع 24 V DC بقواطع. وقضيب أرضي IS لا يلزم إلا مع حواجز زينر.*

26.6.2 المصاهر (*Fuses*) في دوائر الآلات الدقيقة والتحكم

المصهر أصغر قطعة في الخزانة وأكثرها تبديلًا، وأكثرها تعرضًا للاستبدال الخاطئ. ووظيفته في دوائر الآلات الدقيقة ثلاث: أن يحمي الكابل والجهاز من التيار الزائد، وأن

يعزل الحلقة المعطوبة فلا يُسقط قصرٌ واحد بطاقةً كاملة أو مجموعة تغذية، وأن يكون نقطة فصل للصيانة حين يكون في طرف قابل للفصل.

أين توجد المصاهر في أنظمة الآلات الدقيقة؟

- **داخل حاجز زينر:** يحمي الديودات من التيار الكبير عند عطل في الجهة الآمنة. وهو مغلف مع الحاجز، فانصهاره يعني تبديل الحاجز كله. **والمصهر ليس هو ما يحقق الأمان الجوهري:** فهو أبطأ من أن يمنع شرارة، والذي يحدّ الجهد لحظيًا هو الزينر. ولا تُعتبر دائرة جوهرية لأن فيها مصهرًا.
- **في أطراف الخزانة (Fused Terminals):** طرف لكل حلقة فيه مصهر صغير ومؤشر ضوئي يضيء إذا انصهر. ويُختار تياره بحسب توصية صانع البطاقة، ولحلقات 4–20 mA يكون عادةً بعشرات الميلي أمبيرات.
- **في توزيع تغذية 24 V DC:** لكل فرع حماية بمصهر، أو بقاطع دارة مصغّر (MCB)، أو بقاطع إلكتروني (Electronic Circuit Breaker) يُضبط تياره ويعطي تلامس إنذار.
- **في بطاقات المخارج:** مصهر لكل قناة أو لكل مجموعة قنوات، بحسب تصميم البطاقة.

جدول: أنواع المصاهر الصغيرة وأين يُستعمل كل منها

النوع	الرمز أو الصفة	الاستعمال
سريع (Fast-Acting)	F	الحلقات الإلكترونية والإشارات ومداخل البطاقات
سريع جدًا (Super-Fast)	FF	حماية أشباه الموصلات
بطيء (Time-Lag)	T	الأحمال ذات تيار الاندفاع: الملفات والمرحلات ومداخل مصادر التغذية
زجاجي	منخفض قدرة القطع	الدوائر التي لا يكون فيها تيار قصر كبير

النوع	الرمز أو الصفة	الاستعمال
سيراميكي مملوء بالرمل	عالي قدرة القطع	الدوائر القريبة من مصادر قوية أو البطاريات

الشكل 26-9: *منحنى الزمن والتيار لمصهر سريع (F) ومصهر بطيء (T) بالتيار المقنن نفسه: عند تيار الاندفاع القصير في بدء تشغيل حمل، قد ينصهر السريع بلا عطل حقيقي، بينما يتحمله البطيء ويبقى قادرًا على فصل القصر المستمر. (منحنيات توضيحية؛ القيم الفعلية من ورقة الصانع.)*

قواعد اختيار المصهر:

1. **التيار المقنن:** أعلى من تيار التشغيل المستمر بهامش، ولا يعمل المصهر عادةً فوق نحو 75% من تياره المقنن مع مراعاة حرارة الخزانة، ويؤخذ الهامش الدقيق من ورقة الصانع. وفي الوقت نفسه لا يزيد على تحمّل الكابل وتحمّل قناة البطاقة التي يحميها.
2. **النوع:** بطيء للأحمال ذات الاندفاع، وسريع للإلكترونيات.

3. **الجهد وقدرة القطع:** جهد المصهر المقنن للتيار المستمر لا يقل عن جهد الدائرة، لأن قطع التيار المستمر أصعب من المتردد. وقدرة القطع لا تقل عن أكبر تيار قصر ممكن في موضعه.
4. **التمييز (Selectivity):** المصهر الأقرب إلى العطل ينصهر وحده، ويبقى مصهر المجموعة سليمًا. ويُتحقق من ذلك بمقارنة طاقة الانصهار (I^2t) في منحنيات الصانع، لا بنسبة التيارين وحدها.
5. **قدرة المصدر:** مصدر التغذية بالتبديل (Switched-Mode Power Supply) يحدّ تياره عند القصر، وقد لا يعطي ما يكفي لصهر المصهر أو فصل القاطع بسرعة. فتنخفض التغذية عن الأجهزة كلها بدل أن ينفصل الفرع المعطوب وحده. لذلك يُتحقق من أن المصدر يعطي تيارًا كافيًا لفصل أكبر مصهر فرع في الزمن المطلوب، أو تُستعمل قواطع إلكترونية مصممة لهذه المصادر.

مثال محلول (مصهر لمخرج يقود ملف صمام):

- **المعطيات:** ملف صمام 24 V DC بقدرة 8 W على قناة خرج منفصل تحملها الأقصى 0.5 A، وفرع التغذية محمي بمصهر مجموعة 4 A.
- **الحل:**
  - تيار الملف = 8 ÷ 24 = 0.33 A.
  - مصهر 0.5 A من النوع البطيء (T):
    - نسبة التحميل = تيار الملف ÷ التيار المقنن للمصهر
    - = 0.33 ÷ 0.5 = 67%، وهي دون 75%.
    - والمصهر لا يزيد على تحمل القناة (0.5 A).
  - التمييز: يُتحقق من منحنيي الصانع أن طاقة القطع الكلية (I^2t) لمصهر 0.5 A أقل من طاقة بدء الانصهار لمصهر المجموعة 4 A. فإن تحقق ذلك، أسقط القصر في ملف واحد صمامه وحده.

- **معنى النتيجة:** مصهر 1 A كان سيبدو «أكثر أمانًا من الانصهار الكاذب»، لكنه لا يحمي القناة التي تحمّلها 0.5 A. فالمصهر يُختار لحماية أضعف عنصر في دائرته.

المصاهر في المناطق الخطرة وفي أنظمة السلامة:

- **لا يُنزع مصهر ولا يُركّب والدائرة تحت الحمل في منطقة خطرة،** إلا إذا كانت الدائرة جوهرية أو كان حامل المصهر معتمدًا لذلك، لأن نزعه يولّد شرارة. والأطراف ذات المصاهر في صناديق Ex e تكون معتمدة لهذا الغرض.
- **في دوائر الفصل بانقطاع التغذية (De-energize to Trip):** انصهار المصهر يفصل المعدة. فهو فشل آمن، لكنه فصل كاذب يوقف الإنتاج، فيُسجل ويُحلل.
- **في دوائر الفصل بالتغذية (Energize to Trip)،** كصمامات الإطفاء في أنظمة الحريق والغاز: انصهار المصهر فشل خطر مخفي، لأن الدائرة لن تعمل حين يُطلب منها. لذلك تُراقَب هذه الدوائر بمراقبة الخط ومراقبة المصاهر (الفصلان 29 و 30).

جدول تشخيص: مصهر ينصهر

العَرَض	السبب الأرجح	الإجراء
ينصهر فور تبديله	قصر في الكابل أو الجهاز	افصل الكابل وقِس عزله ومقاومته قبل أي تبديل (الشكل 43-11)
ينصهر عند بدء تشغيل الحمل فقط	مصهر سريع على حمل ذي اندفاع	بدّله بالنوع البطيء بالتيار نفسه بعد التحقق من الحساب
ينصهر بعد أيام أو أسابيع	تحميل قريب من المقنن مع حرارة الخزانة، أو عزل يتدهور مع الرطوبة	قِس التيار الفعلي والحرارة، وافحص العزل
انصهر مصهر المجموعة لا مصهر الفرع	غياب التمييز بين المصهرين	راجع منحنيات I^2t واختيار الأحجام

العَرَض	السبب الأرجح	الإجراء
حاجز زينر انصهر مصهره	جهد زائد في الجهة الآمنة، أو توصيل خاطئ	بدّل الحاجز كله، وابحث عن مصدر الجهد الزائد

قواعد التبديل في الميدان:

1. لا يُبدَّل مصهر قبل معرفة سبب انصهاره.
2. البديل بالتيار نفسه والنوع نفسه والجهد وقدرة القطع نفسيهما، ولا يُكبَّر أبدًا، ولا يُجسَّر بسلك أو ورق معدني.
3. يُطبّق تصريح العمل والعزل (الفصل 13). وفي المنطقة الخطرة يُتأكد أن الدائرة جوهرية أو أن الجو خالٍ من الغاز.
4. يُسجَّل التبديل في سجل الصيانة. وتكرار الانصهار في الموضع نفسه يستحق تحليل السبب الجذري (الفصل 39).

> **دور المهندس ودور الفني:** المهندس يختار أسلوب الحماية لكل جهاز (Ex i أو Ex d أو غيره). ويختار نوع الحاجز ويتحقق من المعاملات الكيانية وميزانية جهد الحلقة عند 21 mA، ويحدد المصاهر وتمييزها وقدرة المصادر على فصلها، ويوثق ذلك في وثيقة النظام. والفني يقرأ علامات الاعتماد على كل وحدة قبل تركيبها، ويحافظ على الفصل بين الجهتين، ويقيس أرضي IS إن وُجدت حواجز زينر. ولا يبدّل مصهرًا ولا حاجزًا إلا بمثله وبعد معرفة السبب، ويسجل كل تبديل.

◆ ◆ ◆

26.7 الأمان المتزايد والغلاف المضغوط والطرق الأخرى

Ex e: الفكرة أن الجهاز لا يحتوي أجزاء تشرر أو تسخن فوق الفئة في التشغيل العادي، ثم تُزاد هوامش الأمان: مسافات تسرب وعزل أكبر، وأطراف توصيل لا تنفك بالاهتزاز، ودرجة حماية IP54 على الأقل، وحد للحرارة. ويشيع في صناديق التوصيل، وأطراف التوصيل،

ومحركات القفص السنجابي بشرط حساب زمن tE للحماية من الحمل الزائد، والمصابيح. ويُسمح بتركيب مكونات Ex d أو Ex i داخل غلاف Ex e، وهذا ما يجعل كثيرًا من الأجهزة مركبة الحماية مثل «Ex db eb». وأهم قواعد Ex e: لا يُملأ الصندوق بأطراف أكثر مما تسمح به شهادته، لأن الحرارة الناتجة تُحسب بدلالة عدد الأطراف والتيار.

Ex p: يُطهَّر الغلاف بحجم هواء يعادل خمسة أضعاف حجمه على الأقل قبل التغذية، ثم يُحافظ على ضغط زائد (نحو 50 Pa على الأقل)، ويراقب نظام التحكم بالضغط ذلك ويفصل التغذية عند فقده، فورًا في pxb للمنطقة 1، أو بإنذار في pzc للمنطقة 2. ويُستخدم للمعدات التي لا يمكن حمايتها بطريقة أخرى، كالمحللات والحواسيب والمحركات الكبيرة. ونظام التحكم بالضغط نفسه جهاز معتمد، والتهوية هنا جزء من الحماية لا ترفًا.

Ex n: للمنطقة 2 فقط، ومتطلباته أخف، وأرخص كثيرًا. لكن الخطأ الشائع نقل جهاز Ex nA من منطقة 2 إلى منطقة 1 عند تعديل التصنيف. ويُلاحظ أن الطبعة الخامسة من IEC 60079-15 (2017) نقلت مستوى Ex nA إلى Ex ec ضمن IEC 60079-7، فتحمل الأجهزة الحديثة الرمز Ex ec والقديمة Ex nA بالمعنى نفسه.

Ex m وEx o وEx q: طرق تكميلية للمكونات: الملفات المطمورة في الصمامات الملفية، والمحولات المغمورة بالزيت، والمكونات المدفونة في الرمل.

الغبار Ex t: الغبار أخطر مما يُظن: طبقة غبار على سطح ساخن تعزل الحرارة وتسخن حتى تشتعل، وسحابة غبار تنفجر انفجارًا أوليًا يثير الغبار المستقر فيتبعه انفجار ثانوي أكبر. وحماية Ex t غلاف محكم بدرجة IP6X للمستويين ta وtb، وIP5X مقبولة للمستوى tc مع الغبار غير الموصل وفق IEC 60079-31، مع حد لحرارة السطح يُذكر بالدرجة مباشرة (مثل T85 °C) لا بالفئة، ويُراعى أن طبقة الغبار المتراكمة ترفع حرارة السطح، فتُحدد الحرارة القصوى حسب سمك الطبقة المتوقع.

المعدات غير الكهربائية Ex h: المضخات والمراوح والفرامل والسيور والتروس قد تولد حرارة وشررًا بالاحتكاك، ومنذ ISO 80079-36 تُقيَّم وتُعلَّم أيضًا. ومهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس يقابلها في الصمامات ذات المشغلات ومضخات أخذ العينات.

26.8 مستويات حماية المعدات EPL

أُدخل مفهوم مستوى حماية المعدات (Equipment Protection Level) ليربط الجهاز بالمنطقة مباشرة بغض النظر عن نوع الحماية:

EPL	يصلح للمنطقة	المعنى	يقابل ATEX
Ga / Da / Ma	20 / 0 / المناجم (الفئة M1)	حماية عالية جدًا: يبقى آمنًا مع عطلين	الفئة 1
Gb / Db / Mb	1 / 21	حماية عالية: آمن مع عطل واحد	الفئة 2
Gc / Dc	2 / 22	حماية معززة: آمن في التشغيل العادي	الفئة 3

وبهذا يمكن استخدام جهاز Gb في المنطقة 1 أو 2، وجهاز Gc في المنطقة 2 فقط، وجهاز Ga في أي منطقة. واختيار جهاز بمستوى أعلى من المطلوب مقبول دائمًا، ويسمح المعيار أحيانًا بمستوى أدنى بناءً على تقييم مخاطر موثق، لكن الأصل المطابقة.

26.9 قراءة لوحة بيانات جهاز Ex

كل جهاز يحمل لوحة فيها سلسلة من الرموز، وقراءتها الصحيحة هي جوهر هذا الفصل:

الشكل 26-10: *قراءة علامة جهاز Ex نموذجية: العلامة، ونوع الحماية بمستواه، ومجموعة الغاز، وفئة الحرارة، ومستوى حماية المعدات، ودرجة الحماية، ومدى الحرارة المحيطة، وعلامة ATEX ورقم الشهادة.*

مثال: Ex db eb ib IIC T4 Gb، Ta = −40 °C إلى +65 °C، IECEx IP66، II 2 G، XYZ 19.0045X:

- Ex: للأجواء المتفجرة.
- db eb ib: ثلاث طرق حماية في الجهاز نفسه: الغلاف الرئيسي مقاوم للهب، وصندوق الأطراف بأمان متزايد، ودائرة الشاشة أو الاتصال بأمان جوهري، وكلها بمستوى b.
- IIC: يصلح لكل الغازات بما فيها الهيدروجين.
- T4: حرارة السطح لا تتجاوز 135 °C عند الحرارة المحيطة المذكورة.

- Gb: للمنطقتين 1 و2، ولا يصلح للمنطقة 0.
- Ta: مدى الحرارة المحيطة الذي تصح فيه الشهادة. وخارجه لا تسري الشهادة.
- IP66: محكم ضد الغبار ونفاثات الماء القوية.
- II 2 G: علامة ATEX: المجموعة II للصناعات السطحية، والفئة 2 للمنطقة 1، وG للغاز (وD للغبار).
- IECEx XYZ 19.0045X: رقم الشهادة، وجهة الاعتماد، وسنتها، والحرف X يعني وجود «شروط خاصة للاستخدام الآمن» في الشهادة يجب قراءتها: مثل مسامير من درجة معينة، أو حد لتيار ما، أو ضرورة حماية من الصدمات، أو تركيب بغدد محددة. والحرف U يعني «مكون» لا يُستخدم وحده بل داخل جهاز آخر معتمد.

ما يجب أن يتحقق منه مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس قبل التركيب: المنطقة في رسومات التصنيف، ومجموعة الغاز الموجود، وفئة الحرارة مقابل حرارة الاشتعال الذاتي، والحرارة المحيطة في الموقع مقابل Ta، والشهادة نفسها لا اللوحة فقط (كثير من الموردين يرسلون نسخة من الشهادة عند الطلب)، والشروط الخاصة إن وجد X، والغدد والسدادات وملحقاتها، وأن الشهادة تغطي التركيبة الكاملة لا الغلاف وحده.

26.10 الأطر التنظيمية: IECEx وATEX وأمريكا الشمالية

- **IEC 60079:** السلسلة الفنية الأساسية التي تعرف أنواع الحماية والتصنيف والتركيب والتفتيش والإصلاح.
- **IECEx:** نظام اعتماد دولي مبني على IEC 60079، يعطي شهادة معدات تُقبل في بلدان كثيرة، ويعتمد أيضًا مرافق الإصلاح والأشخاص (وحدات الكفاءة للفنيين والمهندسين).

- **ATEX:** توجيهان أوروبيان: 2014/34/EU للمعدات (التي تحمل علامة CE ورمز Ex السداسي والفئة)، و1999/92/EC لأصحاب العمل (تقييم المخاطر والتصنيف ووثيقة الحماية من الانفجار). وهما إلزاميان في الاتحاد الأوروبي، ويُقبلان في دول كثيرة.
- **أمريكا الشمالية:** NEC (NFPA 70) المادتان 500 و505، ومعايير UL وFM، وفي كندا CSA. ويُستعمل هنا مصطلح «مقاوم للانفجار» (Explosion-proof)، والمعدات تُعلَّم بالفئة والقسم والمجموعة الحرفية وفئة الحرارة.
- **الاعتمادات المحلية:** بعض الدول تشترط شهادة محلية أو تسجيلًا إضافيًا (كما في الصين والبرازيل وروسيا ودول الخليج التي تعتمد غالبًا IECEx وATEX). ويُحدد ذلك في المواصفات الفنية للمشروع (الفصل 25).

> **قاعدة عملية في المشاريع الدولية:** تُطلب شهادة IECEx أو ATEX لكل جهاز في منطقة مصنفة، وتُرفض المعدات بعلامات تسويقية مثل «مناسب للمناطق الخطرة» دون شهادة، وتُطابق نسخة الشهادة المرسلة مع اللوحة ومع ورقة بيانات الجهاز في مراجعة الوثائق.

26.11 التركيب والتفتيش والصيانة وفق IEC 60079-14 و17 و19

الشهادة تضمن الجهاز كما خرج من المصنع؛ وسلامته في الموقع تعتمد على التركيب والصيانة:

التركيب (IEC 60079-14): غدد مناسبة، وسدادات معتمدة، ومسامير كاملة بدرجتها، وتأريض وربط بين الأجزاء المعدنية، وفصل الدوائر الجوهرية، وحساب حلقات IS موثق، وعدم تعديل الأغلفة بثقوب إضافية، وحماية الكابلات من التلف الميكانيكي، ومسافات العزل في Ex e.

التفتيش (IEC 60079-17): ثلاث درجات:

الدرجة	ما يُفحص	كيف	متى
بصري (Visual)	العيوب الظاهرة: أغطية ناقصة، غدد مفكوكة، تآكل، تلف	بالعين دون أدوات ودون فتح	جولات دورية متكررة
قريب (Close)	ما يُرى بالوسائل البسيطة: شد المسامير، حالة الشفاه من الخارج، الملصقات	بسلم وأدوات يدوية دون فتح الغلاف	دوريًا، كل سنة إلى ثلاث سنوات حسب البيئة
مفصل (Detailed)	كل ما سبق مع فتح الغلاف: مسار اللهب، الأطراف، الحرارة، حسابات IS	بفتح الغلاف وأدوات قياس وتصريح	عند التركيب الأولي وبفترات أطول أو بالعينة

ويُجرى تفتيش أولي مفصل قبل التشغيل الأول، وتُحدد فترات التفتيش الدوري من تقييم للبيئة (التآكل، والاهتزاز، وخبرة الأعطال)، ويمكن الانتقال إلى تفتيش بالعينة موثق. وتُحفظ لكل جهاز بطاقة في سجل معدات Ex (Ex Register) فيها الوسم، والعلامة، ورقم الشهادة، والموقع والمنطقة، وتاريخ التفتيش ونتيجته.

التفتيش المفصل لغلاف *Ex d*: خطوات

يُنفَّذ بتصريح عمل، وبعد التأكد من خلو الجو من الغاز أو فصل التغذية عن الجهاز:

1. تحقق من مطابقة لوحة الوسم: العلامة Ex، ومجموعة الغاز (IIA/IIB/IIC)، وفئة الحرارة (T1–T6)، ورقم الشهادة، مقابل سجل الأجهزة وتصنيف المنطقة التي يقع فيها.
2. افحص الغلاف من الخارج: لا شقوق ولا تآكل ولا ثقوب غير معتمدة، والمسامير كاملة العدد ومن الدرجة المحددة (حسب الشهادة واللوحة، لأن المواصفة تشترط حد خضوع أدنى للمسامير) ومشدودة.
3. تحقق من الغدد والسدادات: كلها معتمدة Ex d، ومن الحجم الصحيح للكابل، والمداخل غير المستخدمة مسدودة بسدادات معتمدة لا بسدادات عادية.

4. افصل التغذية واقفل عليها، وتحقق من انعدام الجهد، ثم انتظر إن كان الغلاف يحمل تحذير تأخير الفتح (لتبريد الأسطح أو تفريغ المكثفات).
5. افتح الغطاء برفق دون أن تخدش شفاه اللهب (Flamepath)، وضع الغطاء على سطح نظيف بحيث لا تلامس الشفاه شيئًا.
6. افحص شفاه اللهب: لا خدوش ولا صدأ ولا طلاء ولا حشوات، وقِس فجوة الشفة وطولها إن كان الجهاز يسمح، وقارن بقيم الشهادة أو بجداول IEC 60079-1 لمجموعة الغاز.
7. تحقق من عدم وجود رطوبة أو غبار داخل الغلاف، ومن سلامة الأطراف والعوازل وعدم وجود آثار سخونة أو تفحم.
8. تحقق من وجود الشحم المعتمد فقط على الشفاه (إن أوصى به المصنّع)، وامسح أي مادة غريبة.
9. تحقق من التأريض والربط بين الغلاف والغدد والدرع.
10. أعد الغطاء بمحاذاته الصحيحة، واشدد المسامير بالعزم المحدد وبالتتابع المتقاطع، ثم أعد التغذية بعد إغلاق كل المداخل.
11. سجّل النتائج على نموذج التفتيش وفق IEC 60079-17، وأي قطعة مستبدلة برقم جزئها، والتاريخ والموقّع.

الإصلاح (IEC 60079-19): لا يُصلح غلاف Ex d بلحام أو حشو أو تشغيل الشفاه إلا في ورشة معتمدة، ولا تُستبدل قطعة إلا بمثلها من الصانع، ولا يُعاد طلاء مسار اللهب. والقاعدة: الإصلاح غير المعتمد يعني جهازًا بلا شهادة.

الكفاءة: كثير من الأعطال الخطيرة سببها أشخاص لا يعرفون معنى ما يفعلون: فني يترك مسمارًا، أو يستبدل غدة بأخرى غير مناسبة، أو يفتح غلافًا مغذى. ولذلك يشترط IEC 60079-14 و17 كفاءة موثقة لمن يركب ويفتش، وتوفر برامج مثل IECEx CoPC و CompEx تأهيلًا معترفًا به، ويُستحسن أن يحصل مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس على وحداته الأساسية.

26.12 اختيار طريقة الحماية لأجهزة القياس والتحكم

الجهاز	الاختيار الشائع	لماذا
مرسلات الضغط والحرارة والمستوى والتدفق	Ex ia، وغالبًا معتمدة أيضًا Ex db كخيار	يسمح بالمعايرة والفحص دون تصريح عمل ساخن، وبكابلات أخف
الصمامات الملفية	Ex mb أو Ex db، وبعضها Ex ia منخفض القدرة	تيار الملف أكبر من حدود IS غالبًا
موضّعات الصمامات	Ex ia للموضع، وEx db للملحقات ذات القدرة	حلقة 4–20 mA جوهرية
صناديق التوصيل	Ex eb، وEx ia لأطراف الدوائر الجوهرية	لا شرر أصلًا، وأرخص وأخف
المحللات والخزائن	Ex pxb أو pzc	قدرة كبيرة ومكونات كثيرة
كاشفات الغاز واللهب	Ex db (الحساس الحفزي يسخن) مع Ex e للأطراف	حساس ساخن يحتاج احتواءً
المحركات	Ex eb في المنطقة 2 وأحيانًا 1، و Ex db للأحمال الثقيلة والمنطقة 1	حسب الحجم والزمن tE
الأجهزة المحمولة (جهاز الاتصال، الحاسوب، الهاتف)	Ex ib أو ic معتمدة	تدخل المنطقة يوميًا
المصابيح	Ex eb أو Ex db، وLED لخفض الحرارة	حسب المنطقة

كيف أختار؟ عمود «الاختيار الشائع» نقطة بداية لا قرارًا: يُثبَّت بعده كل جهاز بالمطابقات الأربع، المنطقة ومجموعة الغاز وفئة الحرارة ومستوى حماية المعدات، ثم بمدى الحرارة المحيطة Ta، وإن حمل الجهاز اعتمادين معًا (Ex d وEx ia) اختير أسلوب واحد عند

التركيب وعُلّم على لوحته. وحدّ هذا الجدول أنه يذكر الجهاز ولا يذكر ما يكمل حمايته: الغدد والسدادات وعدد الأطراف وشمول الشهادة للتركيبة كلها، ولا الاعتمادات المحلية التي قد يشترطها المشروع (القسم 26.10). والخطأ الأكثر كلفة اختيار الجهاز صحيحًا ثم إسقاط حمايته عند الغدة أو السدادة أو صندوق أطراف مكتظ، كما في الحالة 26.14، فتُستبدل الصناديق بعد التركيب لا قبله.

26.13 مثال تطبيقي متكامل: اختيار أجهزة لوحدة ضغط غاز

منطقة 1 حول ضاغط غاز طبيعي بتركيز كبريتيد هيدروجين منخفض، ومنطقة 2 في بقية الوحدة، وحرارة محيطة تصل إلى 50 °C، والغاز المعالج ميثان مع H2S.

1. **التصنيف:** المجموعة IIB بسبب H2S، والفئة T3 كافية (AIT للميثان 537 وH2S 260)، وتُختار T4 احتياطًا.
2. **مرسلات الضغط والاهتزاز على الضاغط (منطقة 1):** Ex ia IIC T4 Ga أو Gb عبر عوازل في خزانة التوزيع، مع حساب كل حلقة وتوثيقه، وكابلات زرقاء منفصلة.
3. **مفاتيح السرعة الزائدة ومحولات القرب:** Ex ia مع مضخم معتمد.
4. **الصمامات الملفية على الصمامات الهوائية:** Ex mb IIC T4 Gb أو Ex db، بتيار مناسب لبطاقة المخارج، وغدد معتمدة.
5. **صناديق التوصيل:** Ex eb IIC T4 Gb، بأطراف بعدد لا يتجاوز الشهادة، وأطراف زرقاء منفصلة للدوائر الجوهرية.
6. **كاشفات الغاز:** Ex db eb IIC T4 Gb، وتُراعى وصلة الحساس والغدد.
7. **المحرك الكهربائي:** Ex db IIB T4 Gb لأنه في منطقة 1 وبقدرة كبيرة، وصندوق أطراف Ex eb.
8. **لوحة التحكم المحلية:** إما خارج المنطقة المصنفة، أو Ex pzc في المنطقة 2، أو خزانة Ex db صغيرة مع Ex e للأطراف.

9. **التوثيق:** جدول أجهزة Ex بالوسم والعلامة والشهادة والمنطقة، ووثائق حلقات IS، وشهادات الغدد.
10. **التشغيل:** تفتيش أولي مفصل قبل الطاقة، وإدراج في سجل Ex، وتدريب الفنيين.

26.14 دراسة حالة: صندوق «Ex» الذي لم يكن مناسبًا

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في مشروع توسعة أرسل مقاول صناديق توصيل تحمل لوحة كبيرة كُتب عليها «Ex» ورمز سداسي، فاعتُبرت مناسبة ورُكبت في منطقة 1 قرب مضخات المكثفات. وعند التفتيش الأولي طلب مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس الشهادات، فتبين أن الصناديق معتمدة Ex nA IIC T6 Gc، أي للمنطقة 2 فقط، وأن غددها العادية من دون شهادة، وأن عدد الأطراف المركبة في بعضها ضعف ما يسمح به حتى لو كانت Ex e.

الإصلاح: استُبدلت الصناديق بأخرى Ex eb IIC T5 Gb بغدد معتمدة، وأُعيد توزيع الأطراف، وأُضيفت مراجعة الشهادات إلى قائمة فحص استلام المواد قبل التركيب لا بعده.

الدروس:

- كلمة Ex واللوحة اللامعة ليستا شهادة. تُقرأ العلامة كاملة، ويُطلب المستند.
- الغدد والسدادات والأطراف جزء من الحماية، وليست ملحقات.
- أرخص وقت لاكتشاف الخطأ هو مراجعة الوثائق قبل التركيب.

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ماذا يقرر المهندس	ماذا ينفذ الفني ويقيس
الاختيار	يطابق الشهادة مع المنطقة ومجموعة الغاز وفئة الحرارة وTa، ويقرأ شروط X، ويحسب كل حلقة أمان جوهري ويوثقها	يقرأ اللوحة عند الاستلام ويطابقها مع ورقة البيانات وسجل Ex، ويرفض ما لا يطابق قبل التركيب
التركيب	يحدد الغدد والسدادات وفصل الدوائر الجوهرية ونظام أرضي الأمان الجوهري	يركّب غددًا معتمدة بالحجم الصحيح، ويسد المداخل غير المستخدمة، ويشد المسامير بالعزم المحدد، ويقيس عزل قضيب أرضي الأمان الجوهري عن الهيكل
التفتيش والصيانة	يحدد درجات التفتيش وفتراته، ويدير سجل Ex، ويقيّم أثر أي تعديل في التصنيف	ينفذ التفتيش البصري والقريب والمفصل بتصريح، ولا يفتح غلاف Ex d مغذًّى، ولا يستبدل قطعة إلا بمثلها، ويحيل الإصلاح إلى ورشة معتمدة

26.15 الأخطاء الشائعة

- الاعتقاد بأن Ex تعني جهازًا «مقاومًا للانفجار» صالحًا لأي مكان.
- تركيب جهاز Gc أو Ex n في منطقة 1، أو جهاز IIB في منطقة فيها هيدروجين.
- إهمال الحرارة المحيطة Ta وفئة الحرارة في المواقع الحارة.
- غدد أو سدادات غير معتمدة، أو ثقوب زائدة في الأغلفة، أو مداخل مسدودة بشريط.
- مسامير ناقصة أو من درجة مختلفة في أغلفة Ex d، أو طلاء أو مانع تسرب على مسار اللهب.
- فتح غلاف Ex d والدائرة مغذاة دون تصريح وقياس غاز.

- حلقات أمان جوهري بلا حساب موثق، أو خلط دوائرها مع غيرها، أو أجهزة محمولة غير معتمدة فيها.
- صناديق Ex e مكتظة بأطراف تتجاوز شهادتها.
- تجاهل الحرف X وشروط الاستخدام الخاصة في الشهادة.
- إصلاح محلي غير معتمد لأغلفة Ex d.
- سجل Ex غير محدث، وتفتيش دوري لا يُنفذ أو يُنفذ بلا كفاءة.
- تعديل في العملية يغير التصنيف دون مراجعة الأجهزة المركبة.

26.16 ملخص

الانفجار يحتاج وقودًا وأكسجينًا ومصدر اشتعال؛ والتصنيف إلى مناطق 0 و1 و2 (و20 و21 و22 للغبار) يصف احتمال وجود الجو المتفجر، وأجهزة Ex تمنع أن تكون مصدر اشتعال. والعلامة الكاملة تحدد نوع الحماية ومستواه (d وe وi وp وm وn وt وh بحروف a وb وc)، ومجموعة الغاز (IIA وIIB وIIC) أو الغبار، وفئة الحرارة (T1 إلى T6)، ومستوى حماية المعدات (Ga وGb وGc)، ومدى الحرارة المحيطة، ورقم الشهادة وشروطها الخاصة. و«مقاوم للانفجار» اسم لطريقة واحدة، Ex d، لا وصف لكل ما يحمل Ex. والأمان الجوهري الخيار المفضل لأجهزة القياس، ويحتاج حساب المعاملات الكيانية لكل حلقة. والشهادة تصف الجهاز في المصنع، أما سلامته في الموقع فتصنعها الغدد والسدادات والمسامير والتركيب وفق IEC 60079-14، والتفتيش بدرجاته وفق IEC 60079-17، والإصلاح المعتمد وفق IEC 60079-19، وكفاءة من يعمل عليها.

وفي الفصل التالي: الفصل 27، «اختيار أجهزة القياس وإعداد أوراق البيانات»، يضع طريقة الحماية في سياقها الأوسع: أربعة مرشحات تبدأ بالمائع وتنتهي بتكلفة العمر، وورقة بيانات تثبّت ذلك كله للمورد.

26.17 أسئلة التقييم الذاتي

1. لماذا لا تعني علامة Ex أن الجهاز مقاوم للانفجار؟ وما الطريقة التي يصح وصفها بذلك؟
2. ما الفرق بين المنطقة 0 و1 و2؟ وما مستوى حماية المعدات المقابل لكل منها؟
3. وحدة فيها هيدروجين بحرارة اشتعال ذاتي 560 °C وحرارة محيطة 45. °C. ما مجموعة الغاز وفئة الحرارة الدنيا المقبولة؟ وهل يصلح جهاز Ex db IIB T6 Gb؟
4. اشرح مبدأ الغلاف المقاوم للهب، ولماذا لا يُطلى مسار اللهب ولا يُترك مسمار ناقصًا.
5. حاجز Uo = 25.2 V وIo = 93 mA وPo = 0.59 W وCo = 107 nF وLo = 2.0 mH، ومرسل Ui = 30 V وIi = 120 mA وPi = 1.0 W وCi = 10 nF وLi = 0.1 mH، وكابل 120 nF/km و0.6 mH/km. هل الحلقة آمنة؟ وما أقصى طول للكابل مع مراعاة قاعدة نصف Co وLo؟
6. ما الذي يميز Ex e عن Ex d؟ ولماذا يُفضل لصناديق التوصيل؟ وما القيد على عدد الأطراف؟
7. اقرأ العلامة Ex ia IIC T4 Ga، Ta من −20 إلى +70 °C، وحدد المناطق والغازات والحرارات التي يصلح لها الجهاز.
8. ما معنى الحرف X في نهاية رقم الشهادة؟ وما معنى الحرف U؟
9. ما الفرق بين التفتيش البصري والقريب والمفصل؟ ومتى يُجرى كل منها؟
10. في الحالة 26.14، ما الأخطاء الثلاثة في الصناديق المرسلة؟ وما الإجراء الذي أُضيف لمنع تكرارها؟

مراجع الفصل: سلسلة IEC 60079 (الأجزاء 0 و1 و2 و7 و10-1 و10-2 و11 و14 و17 و19 و25 و31)؛ ISO 80079-36 و37 للمعدات غير الكهربائية؛ توجيها ATEX 2014/34 /EU و1999/92/EC؛ نظام IECEx؛ NFPA 70 (NEC) المادتان 500 و505؛ IEC 60079-

25 لأنظمة الأمان الجوهري؛ مقالة أساس تصميم I&C (R3)؛ كتالوج كابلات الأجهزة (R15)؛ دورة تصنيف المناطق واختيار المعدات التي حضرها المؤلف؛ خبرة المؤلف في تفتيش معدات Ex في المحطات والمنصات؛ وR65 (عتاد نظام أرضي الأمان الجوهري، 26.6)؛ وIEC 60079-11 (الأمان الجوهري)؛ وIEC 60079-14 (التركيب وتأريض دوائر الأمان الجوهري).

الفصل 27: اختيار أجهزة القياس وإعداد أوراق البيانات

لمن هذا الفصل: لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس الذي يقف أمام قائمة أجهزة (Instrument Index) فيها مئات الوسوم ويجب أن يقرر لكل واحد منها: أي تقنية؟ وأي مادة؟ وأي مدى ودقة؟ وأي درجة حماية وشهادة؟ ومن أي مورد وبأي ثمن؟ وللمهندس الذي يراجع أوراق بيانات الموردين، ولمهندس التشغيل والصيانة الذي يستبدل جهازًا تالفًا ويريد أن يختار بديلًا أفضل لا مثله.

الفكرة الأساسية: لا يوجد «أفضل جهاز» بإطلاق؛ يوجد أفضل جهاز **لهذا المائع في هذه العملية في هذا الموقع بهذه المتطلبات وبهذه الميزانية**. والاختيار الصحيح يبدأ من طبيعة ما يُقاس وظروفه، لا من كتالوج المورد، ويمر بأربعة مرشحات متتابعة: هل تعمل التقنية أصلًا مع هذا المائع وهذه الظروف؟ هل تحقق الأداء المطلوب للوظيفة؟ هل تصمد في هذا الموقع؟ ثم أي الخيارات الباقية أقل تكلفةً على مدى عمرها لا يوم شرائها؟ ثم تُثبَّت النتيجة في ورقة بيانات (Datasheet) لا تترك للمورد شيئًا يخمّنه.

27.1 المرشحات الأربعة: من طبيعة المقاس إلى السعر

يلخص الشكل 27-1 المنهجية: تدخل كل التقنيات الممكنة من الأعلى، ويُسقط كل مرشح ما لا يصلح، ويبقى في الأسفل خيار أو خياران يُفاضل بينهما بالتكلفة الكلية.

المرشح 1: طبيعة المقاس والمائع. ما الذي يُقاس فعلًا (ضغط، حرارة، مستوى، تدفق حجمي أم كتلي، تركيز، سطح فاصل)؟ وما حالة المائع: غاز أم سائل أم بخار أم متعدد الأطوار أم مواد صلبة؟ وما خواصه التي تُسقط تقنيات كاملة:

- **الموصلية الكهربائية:** العداد الكهرومغناطيسي يحتاج إلى بضعة µS/cm على الأقل؛ فالهيدروكربونات والماء عالي النقاء خارج نطاقه.
- **الثابت العازل (Dielectric Constant):** الرادار بنوعيه (الموجّه وغير التلامسي) والسعوي يعتمدان عليه؛ الغاز المسال والهيدروكربونات الخفيفة (εr ≈ 1.4 إلى 2) تحتاج إلى رادار مخصص أو مبدأ آخر.
- **اللزوجة والمواد الصلبة والترسبات:** تُسقط لوح الفتحة والتوربيني (انسداد وتآكل) وتفضل الكهرومغناطيسي أو كوريوليس أو الوتد (Wedge).
- **التآكلية والسمية (H_2S، الكلوريدات، الأحماض):** تحدد مواد الأجزاء المبللة (SS316L أو Hastelloy أو التيتانيوم أو التنتالوم أو PTFE) ومتطلبات NACE MR0175/ISO 15156 للخدمة الحامضية، وقد تفرض القياس غير التلامسي (رادار، إشعاعي، عداد مثبّت من الخارج (Clamp-On)).
- **الحرارة والضغط في حدودهما القصوى:** تحددان تقنية الحساس (المزدوج الحراري فوق نحو 600 °C بدل RTD) وحاجة المرسل إلى عزل بحاجز غشائي أو تركيب بعيد.
- **الرغوة والاضطراب والبخار:** تخدع الرادار غير التلامسي وفوق الصوتي وتفضل الضغط التفاضلي أو الرادار الموجّه.
- **الأطوار المتعددة والتغير في التركيب:** تسقط كل ما يعتمد على كثافة ثابتة، وتفضل كوريوليس أو عدادات متعددة الأطوار.
- **التطبيقات الصحية (Hygienic):** تفرض أسطحًا مصقولة ووصلات Tri-Clamp وقابلية التنظيف في المكان (CIP).

المرشح 2: العملية والوظيفة والأداء. ما مدى التشغيل (الأدنى إلى الأقصى) ونسبة المدى المطلوبة (Turndown)؟ ما الدقة والتكرارية اللازمتان فعلًا: عرض بسيط (±2% يكفي)، أو حلقة تحكم (التكرارية أهم من الدقة)، أو موازنة مواد وحساب كفاءة (±0.5%)، أو قياس تجاري ±0.25%) وقابلية تتبع وشهادات)، أو وظيفة سلامة (زمن استجابة، تشخيص، شهادة SIL، معدل فشل معروف، تكرار 2oo3)؟ ما زمن الاستجابة المقبول (حماية الضاغط من الانفصال الهوائي (Surge) تحتاج إلى استجابة بأجزاء من الثانية، وحرارة الخزان إلى دقائق)؟ وما الفقد المسموح في الضغط، وما أثر النبض والاهتزاز؟ وهل يلزم تعويض (كثافة، حرارة) وأي إشارة وتشخيص (4–20 mA/HART، Fieldbus، لاسلكي)؟

المرشح 3: الموقع والبيئة والتركيب. تصنيف المنطقة الخطرة (Zone 0/1/2 ومجموعة الغاز وفئة الحرارة) يحدد نوع الحماية (Ex ia أو Ex d، الفصل 26). والبيئة: حرارة محيطة (من −40 °C في الشمال إلى +55 °C في الخليج، وأشعة الشمس المباشرة تضيف 15 إلى 20 °C على الغلاف)، والرطوبة والملوحة على المنصات البحرية (IP66/67 ومواد وطلاء بحريان)، والغبار، والاهتزاز قرب الآلات، والصواعق، والتداخل الكهرومغناطيسي. والتركيب: قطر الخط والأطوال المستقيمة المتاحة (تحدد إن كان لوح الفتحة ممكنًا أو يلزم عداد بلا اشتراطات)، والفوهات المتاحة على الوعاء، والارتفاع، وسهولة الوصول للمعايرة والاستبدال دون توقف (هل توجد صمامات عزل؟ هل يمكن سحب الجهاز والعملية تعمل؟)، والمسافة إلى الخزانة (هبوط الجهد وسعة الكابل لدوائر IS)، والحاجة إلى تتبع حراري لخطوط النبض.

المرشح 4: المواصفات والسعر وتكلفة العمر. مواصفات المالك (Client Specifications) وقائمة الموردين المعتمدين (Approved Vendor List) والمواصفات القياسية المرجعية تضيق الخيارات. ثم التكلفة: ثمن الشراء جزء صغير أحيانًا من **تكلفة دورة الحياة (Life-Cycle Cost)** التي تجمع: الشراء والملحقات (المانيفولد، الحوامل، الكابل)، والتركيب (القطع في الخط، الأطوال المستقيمة، السقالات)، والتشغيل (فقد الضغط الدائم يتحول

إلى طاقة ضخ أو ضغط سنوية)، والصيانة والمعايرة (تكرارها ومدتها وقطع الغيار)، وتكلفة الفشل (توقف الإنتاج، القياس الخاطئ في المحاسبة)، والتقادم (توافر الدعم وقطع الغيار على مدى عشرين سنة). ويبين الشكل 27-3 كيف يفوز عداد أغلى شراءً حين تُحسب هذه البنود.

الشكل 27-1: *قمع اختيار الجهاز: المرشح الأول طبيعة المقاس والمائع، والثاني العملية والوظيفة والأداء، والثالث الموقع والبيئة والتركيب، والرابع المواصفات والسعر وتكلفة العمر؛ وما يخرج من الأسفل يُثبَّت في ورقة البيانات.*

27.2 خطوات اختيار جهاز قياس

1. **اجمع بيانات العملية من ورقة بيانات العمليات (Process Datasheet):** المائع وتركيبه وحالته، والضغط والحرارة (التشغيل الطبيعي والأدنى والأقصى

والتصميم)، والتدفق أو المستوى بمداه الكامل، والكثافة واللزوجة والموصلية والثابت العازل، والمواد الصلبة والرغوة والتآكل، وأي تغير موسمي أو بين حالات التشغيل (البدء، الحالات البديلة).

2. **حدد وظيفة القياس ومتطلباتها الكمية:** عرض، تحكم، حماية (مع درجة SIL)، محاسبة؛ الدقة والتكرارية ومدى القياس وزمن الاستجابة والتكرار (1oo1، 2oo3).

3. **حدد قيود الموقع:** المنطقة الخطرة، المناخ، الاهتزاز، الأطوال المستقيمة والفوهات المتاحة، الوصول للصيانة، مصدر التغذية، المسافة إلى الخزانة.

4. **استبعد التقنيات التي لا تعمل** بالمرشح الأول (جداول 27.3)، ثم التي لا تحقق الأداء بالمرشح الثاني، ثم التي لا تصمد في الموقع بالمرشح الثالث.

5. **قارن الخيارات الباقية بمصفوفة مرجّحة:** معايير (الملاءمة للمائع، الدقة، المدى، التركيب، الصيانة، فقد الضغط، التشخيص، التكلفة الكلية، خبرة الموقع) بأوزان، وعلامة لكل خيار (المثال في 27.6).

6. **تحقق من التوافق مع مواصفات المالك وقائمة الموردين المعتمدين والمعايير المرجعية**، ومن توافر الشهادات (Ex، SIL، القياس التجاري OIML/MID، NACE، الطعام).

7. **احسب تكلفة دورة الحياة للخيارين الأولين** وقارن، مع أثر فقد الضغط والصيانة والتقادم.

8. **راجع الاختيار مع العمليات والصيانة والسلامة** (ومع المورد لتأكيد قابلية التطبيق: يعطي الموردون الجيدون حسابًا للحجم (Sizing) وتقرير الأداء عند شروطك).

9. **ثبّت الاختيار في ورقة البيانات** بكل الحقول (27.7)، وسجّل مبررات القرار في مذكرة اختيار قصيرة تُرفق بملف الوسم؛ فمهندس بعدك سيسأل «لماذا كوريوليس هنا؟».

10. **أدرج الجهاز في قائمة الأجهزة وطلب الشراء**، وحدد قطع الغيار الأولى ومتطلبات شهادة المعايرة في المصنع (Factory Calibration Certificate) ونقاط الفحص عند الاستلام.

27.3 مصفوفات الاختيار حسب المتغير

الضغط:

الحالة	الاختيار المفضل	ملاحظات
قياس عام في غاز أو سائل نظيف	مرسل بحساس مقاومة إجهادية (Piezoresistive) أو سعوي، تركيب مباشر مع مانيفولد ثنائي	مدى بحيث يقع التشغيل في الثلث الأوسط، وحماية من الضغط الزائد ≤ 1.5 × التصميم
بخار أو مائع ساخن	تركيب بعيد بأنبوب ملفوف (Siphon) أو خط نبض مع وعاء تكثيف	الحرارة عند الغشاء ≥ حد المرسل
مائع لزج أو متبلور أو أكّال أو مُسِدّ	حاجز غشائي (Diaphragm Seal) بشعري قصير أو تركيب مباشر بشفة	أثر الحرارة على سائل الملء وزمن الاستجابة؛ الفراغ يحتاج إلى ملء خاص
ضغط منخفض جدًا أو سحب أفران	مرسل ضغط منخفض بمدى ملليبارات	حماية من الضغط الزائد (Overpressure)، خطوط نبض واسعة
حماية SIS	مرسل بشهادة SIL مع تشخيص، مأخذ مستقل، 2oo3	لا مفاتيح ضغط إلا في الحالات البسيطة (الفصل 11)
قياس محلي فقط	مقياس بوردون بمخمد وأنبوب ملفوف	لا يُستخدم للحماية

كيف أختار؟ للغاز والسائل النظيف مرسل مباشر مع مانيفولد، ولا يُضاف الحاجز الغشائي إلا حين يفرضه المائع (لزج، أو متبلور، أو أكّال)، لأنه يضيف أثر الحرارة وزمن الاستجابة؛ والبخار والمائع الساخن يفرضان تركيبًا بعيدًا يحمي الغشاء. والجدول لا يبين المدى ولا

حماية الضغط الزائد: يُختار المدى بحيث يقع التشغيل في الثلث الأوسط (القسم 27.7)، ويُراجع حد الضغط الزائد مقابل التصميم لا التشغيل. وأكثر الأخطاء كلفة استعمال مفتاح ضغط أو مقياس محلي في وظيفة حماية، أو مأخذ واحد لمرسل التحكم ومرسل الحماية معًا، فيسقط الاثنان بانسداد واحد.

الحرارة:

الحالة	الاختيار المفضل	ملاحظات
200− إلى نحو 600 °C ودقة عالية	RTD Pt100 رباعي أو ثلاثي الأسلاك في غمد	الأفضل للتحكم وحساب الكفاءة؛ حساس للاهتزاز الشديد
فوق 600 °C أو استجابة سريعة أو اهتزاز	مزدوج حراري K أو N (و S/R فوق 1200 °C)	كابل تمديد أو تعويض، وتعويض الوصلة الباردة؛ أفران العمليات وعوادم التوربينات والمفاعلات
ماء التبريد والخزانات وحالات كثيرة رخيصة	RTD مع مرسل في الرأس	الأرخص كليًا مع HART
سطح أنابيب المُصلِح (Reformer) والأفران	مزدوج سطحي ملحوم (Skin TC)	تركيب المصنّع، لا يُستبدل بسهولة
قياس بلا تلامس (متحرك، شديد الحرارة)	بيرومتر تحت الأحمر	يحتاج إلى معرفة الانبعاثية وإلى نافذة نظيفة
قياس متوسط في مجرى كبير	مزدوجات متعددة أو مزدوج متوسِّط (Averaging)	حرارة عادم التوربين، مداخن
حماية SIS	حساس مزدوج (Duplex) مع مرسل SIL، وغمد مستقل	مطابقة الحساس والمرسل (القسم 7.9)

كيف أختار؟ دون نحو 600 °C ومع الحاجة إلى دقة للتحكم وحساب الكفاءة فالخيار RTD Pt100 بثلاثة أو أربعة أسلاك؛ وفوق ذلك أو مع اهتزاز شديد أو استجابة سريعة فالمزدوج الحراري بنوعه المناسب للمدى؛ والبيرومتر فقط حين يمتنع التلامس. والجدول لا يبين الغمد: طوله ومادته وتردد ذيله الدوامي وموضع العنصر في قاعه تحدد الاستجابة والعمر أكثر مما يحددهما نوع الحساس (الفصل 7). وأكثر الأخطاء كلفة مزدوج حراري بكابل تمديد من نوع آخر أو معكوس القطبية، أو RTD ثنائي الأسلاك على كابل طويل، فتعطي القراءة خطأً ثابتًا لا تكشفه المعايرة على المنضدة.

المستوى:

الحالة	الاختيار المفضل	ملاحظات
خزانات تخزين كبيرة، محاسبة	رادار بلا تلامس عالي الدقة (±1 mm) أو خادم (Servo)، مع ثانٍ مستقل للإنذار	متطلبات OISD السارية لخزانات التخزين و3 API MPMS؛ لا يُعتمد جهاز واحد
أوعية عمليات مضغوطة، سائل ثابت الكثافة	ضغط تفاضلي بساق رطبة أو حواجز غشائية	الأرخص والأكثر ألفة؛ يحتاج إلى تعويض كثافة إن تغيرت
كثافة متغيرة أو بخار كثيف	رادار موجّه (GWR) أو رادار بلا تلامس	الرادار الموجّه لا يتأثر بالكثافة؛ يتأثر بالترسب على المسبار
سطح فاصل زيت/ماء	مُزاح (Displacer) أو رادار موجّه أو سعوي	القسم 9.7؛ المستحلب يخدع الجميع
رغوة واضطراب	ضغط تفاضلي أو رادار موجّه أو إشعاعي	فوق الصوتي يفشل
بلا فوهات، أو مواد شديدة الخطورة	إشعاعي (Nuclear) من الخارج	ترخيص ومصدر مشع؛ الأخير في القائمة
مواد صلبة (صوامع)	رادار 80 GHz أو فوق الصوتي أو موجّه	الغبار وزاوية الاستقرار

الحالة	الاختيار المفضل	ملاحظات
غاز مسال LPG	ضغط تفاضلي بوعاء ختم (Seal Pot) على ساق رطبة أو ساق مسخنة مع طقم رفع/كبت الصفر، أو رادار موجّه	معايير OISD ذات الصلة تشترط عادة مؤشرين مستقلين ومفتاح مستوى مرتفع مستقل
حماية SIS (مستوى منخفض/مرتفع جدًا)	مرسل مستقل بمأخذ مستقل ومبدأ مختلف عن مرسل التحكم	2oo3 أو 1oo2؛ لا مفتاح عوامة وحيد في الخدمة القذرة

كيف أختار؟ إن كانت الكثافة ثابتة والوعاء مضغوطًا فالضغط التفاضلي أرخص الخيارات وأكثرها ألفة؛ وإن تغيرت الكثافة أو كثف البخار فالرادار الموجّه؛ وللخزانات الكبيرة والمحاسبة رادار عالي الدقة أو خادم مع جهاز ثانٍ مستقل؛ ولا يأتي الإشعاعي إلا آخر القائمة حين تمتنع الفوهات. والجدول لا يبين ما يخدع كل تقنية في الميدان: الرغوة والمستحلب والترسب على المسبار والدفعات السائلة، فاطلب هذه المعلومات في بيانات العملية قبل الاختيار (القسم 9.7). وأكثر الأخطاء كلفة مرسل حماية بالمبدأ نفسه وعلى الفوهة نفسها التي يقيس منها مرسل التحكم، فيفشلان معًا بالسبب نفسه ولا تكشفه المقارنة بينهما.

التدفق: جدول الاختيار حسب الخدمة في 8.19، ويُكمله هنا معيار الاختيار بالتكلفة الكلية: عناصر الضغط التفاضلي أرخص شراءً لكنها أغلى تشغيلًا (فقد ضغط) وأقل مدى؛ الكهرومغناطيسي الأفضل تكلفةً كليةً للماء والسوائل الموصلة؛ كوريوليس الأغلى شراءً والأقل تكلفةً كليةً في القياس التجاري والدفعات؛ فوق الصوتي متعدد المسارات لخطوط الغاز الكبيرة؛ الدوامي للبخار والمرافق؛ الحراري للغاز منخفض الضغط والهواء.

المحللات: تبدأ بسؤال «هل يلزم محلل مستمر أصلًا أم يكفي قياس مستنتَج أو عينة مخبرية؟»، ثم زمن الاستجابة المطلوب، ثم نظام العينات الذي يكلف غالبًا أكثر من المحلل (الفصل 10).

27.4 الموقع والبيئة: ما يُنسى في المكاتب

- **الشمس والحرارة:** جهاز مواصفته حتى 85 °C على الغلاف قد يتجاوزها في الظهيرة على منصة بلا ظل؛ تُطلب مظلة (Sunshade) أو تركيب بعيد.
- **الصقيع:** خطوط النبض والمانيفولد والحاجز الغشائي تتجمد؛ تتبع حراري كهربائي أو بخاري وعزل، أو تركيب مباشر.
- **الاهتزاز:** الأجهزة على الآلات الترددية تحتاج إلى تركيب بعيد بأنابيب مرنة أو حوامل معزولة؛ الحساسات ذات الأجزاء المتحركة (عوامات، مزاحات، توربيني) تتلف.
- **البحر:** ملوحة ورطوبة: مواد 316L كحد أدنى وطلاء بحري ومداخل كابلات معتمدة ودرجة IP66/67 وشهادات للمنصات، وقيود الوزن والمساحة.
- **الغبار والرمال:** أغطية ومرشحات للتنفيس وحماية النوافذ البصرية.
- **المناطق الخطرة:** الأمان الجوهري للمرسلات ثنائية الأسلاك، و Ex d للأجهزة رباعية الأسلاك والصمامات الملفية عالية القدرة، مع مطابقة المعاملات (الفصل 26).
- **الوصول:** جهاز على ارتفاع 8 m بلا منصة يُعايَر مرة واحدة في العمر. تُنسق مواقع الأجهزة مع الأنابيب مبكرًا (النموذج ثلاثي الأبعاد) لتوفير الوصول والصمامات.
- **الكهرباء والاتصال:** هبوط الجهد على الكابل الطويل، سواء في تغذية الأجهزة رباعية الأسلاك أو في مقاومة حلقة المرسلات ثنائية الأسلاك مقابل أدنى جهد تشغيل لها، وسعة الكابل ومحاثته لدوائر IS، وتوافر الشبكات الحقلية (Fieldbus أو لاسلكي في المواقع البعيدة.

27.5 المواد والمعايير الخاصة

الأجزاء المبللة (Wetted Parts): الافتراضي في النفط والغاز SS316/316L لكل ما يلامس المائع (الغشاء، الشفة، الغمد، جسم العداد). وتُرفع المادة عند: الكلوريدات الساخنة (تشقق تآكلي إجهادي في 316 ← دوبلكس أو تيتانيوم)، والأحماض المركزة (Hastelloy C-276، تنتالوم)، والخدمة الحامضية (H_2S رطب) التي تفرض NACE MR0175/ISO 15156 على المادة وصلادتها ولحامها، والهيدروجين (أغشية مطلية بالذهب لمنع نفاذ الهيدروجين إلى سائل الملء)، وماء البحر (تيتانيوم أو نحاس-نيكل)، والصناعات الغذائية والدوائية (316L مصقول Ra ≤ 0.8 µm مع حشوات مطابقة لاشتراطات FDA).

سوائل الملء: سيليكون قياسي، وسوائل خاملة (Fluorinert) للأكسجين والكلور حيث يكون السيليكون خطرًا، وسوائل غذائية (Neobee) للغذاء، وسوائل للحرارة العالية أو الفراغ.

الحشوات والأختام: الفيتون لا يصلح للأمونيا والبخار، وEPDM لا يصلح للهيدروكربونات؛ PTFE وكالريز وغرافيت للحالات الصعبة.

الشفاه والتصنيفات: تتبع فئة الأنابيب (Piping Class)، وتُرفع لمعدات الضغط العالي؛ ورقة البيانات تحدد الحجم والوجه (RF/RTJ) والتصنيف والمادة.

الشهادات: Ex (ATEX/IECEx/UL)، وSIL (IEC 61508 مع بيانات FMEDA)، وشهادة القياس التجاري (OIML R117/R137، Measurement Canada، MID)، وشهادة المواد 3.1 وفق EN 10204، وPED/CRN لأجزاء الضغط، وNACE، وشهادة المعايرة القابلة للتتبع.

27.6 مثال محلول: مصفوفة الاختيار المرجّحة

المهمة: اختيار عداد تدفق لخط غاز وقود توربين غازي: غاز طبيعي نظيف بضغط 25 barg، حرارة 40 °C، قطر 6 بوصات، التدفق من 2 إلى 12 t/h (مدى 6:1)، الغرض

حساب الكفاءة والانبعاثات (دقة ±1% مقبولة، ±0.5% مرغوبة)، Zone 2 IIA T3، أطوال مستقيمة متاحة 15D قبل و5D بعد، ميزانية شراء أولية 25 ألف دولار للعداد.

الخيارات بعد المرشحات: لوح فتحة مع مرسل DP وتعويض P/T (ممكن، مدى 6:1 يحتاج إلى مرسلين أو مرسل ذكي)، عداد دوامي متعدد المتغيرات (ممكن، 15D كافية)، عداد كوريوليس للغاز (ممكن، بلا اشتراطات)، عداد فوق صوتي (مسار واحد ممكن؛ والضغط 25 barg ملائم للإشارة، لكن دقة المسار الواحد متوسطة لحساسيتها لمقطع السرعة في قطر 6 بوصات).

المعيار	الوزن	لوح فتحة	دوامي	كوريوليس	فوق صوتي
الدقة الكتلية عبر المدى (6:1)	25	2	3	5	3
فقد الضغط (طاقة ضاغط الغاز)	10	1	3	3	5
التركيب وقيود الأطوال	10	3	4	5	3
الصيانة والتحقق	15	3	4	5	4
التشخيص وسهولة الثقة بالقراءة	10	2	3	5	4
تكلفة الشراء والتركيب	20	5	4	2	3
خبرة الموقع وقطع الغيار	10	5	4	3	2
المجموع المرجّح (من 500)		**305**	**355**	**400**	**335**

الحساب لكوريوليس:

المجموع المرجّح = مجموع (الوزن × العلامة) على المعايير السبعة

$$= 25{\times}5 + 10{\times}3 + 10{\times}5 + 15{\times}5 + 10{\times}5 + 20{\times}2 + 10{\times}3$$
$$= 125 + 30 + 50 + 75 + 50 + 40 + 30 = 400$$

وبالطريقة نفسها لوح الفتحة 305 والدوامي 355 وفوق الصوتي 335. يفوز كوريوليس رغم أنه الأغلى شراءً (نحو ضعف الدوامي)؛ ولو كانت الميزانية قاطعة أو الغرض عرضًا فقط لفاز الدوامي. **تكلفة دورة الحياة** تؤكد النتيجة: عند 12 t/h يسبب لوح الفتحة فقدًا دائمًا في الضغط نحو 0.3 bar يُعوَّض بطاقة ضاغط الغاز (بضعة آلاف دولار سنويًا)، ويحتاج إلى معايرة مرسله سنويًا وتغيير اللوح كل بضع سنوات، بينما يحتاج كوريوليس إلى تحقق ذاتي سنوي فقط؛ وخلال عشر سنوات ينقلب فارق الشراء إلى وفر.

الشكل 27-2: *المصفوفة المرجّحة لاختيار عداد غاز الوقود مرسومة أشرطة مكدسة: مساهمة كل معيار (الوزن × العلامة) في مجموع كل عداد من 500؛ كوريوليس 400، والدوامي 355، وفوق الصوتي 335، ولوح الفتحة 305. ويخسر كوريوليس في تكلفة الشراء ويفوز بالدقة والصيانة والتشخيص.*

الشكل 27-3: *تكلفة دورة الحياة لعشر سنوات لأربعة عدادات على خط غاز الوقود في المثال: الشراء والتركيب جزء، وفقد الضغط والمعايرة والصيانة وتكلفة القياس الخاطئ تقلب الترتيب لصالح العداد الأغلى شراءً.*

27.7 ورقة بيانات الجهاز (Instrument Datasheet)

ورقة البيانات هي العقد الفني مع المورد؛ ما لا يُكتب فيها لا يُطلب منه. تُعد وفق نماذج ISA-TR20.00.01 (أو نماذج المالك) بحقول ثابتة لكل نوع، وتنقسم إلى أربع مجموعات:

1. **بيانات عامة:** رقم الوسم، الخدمة، رقم الخط أو الوعاء، رقم P&ID، الموقع، المنطقة الخطرة، مواصفة المشروع، المراجعة.
2. **بيانات العملية (يوفرها مهندس العمليات):** المائع وحالته وتركيبه، والضغط والحرارة (طبيعي/أدنى/أقصى/تصميم)، والتدفق أو المستوى، والكثافة

واللزوجة والموصلية والثابت العازل وضغط البخار، والمواد الصلبة والتآكل، وحالات التشغيل.

3. **بيانات الجهاز (يحددها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس):** التقنية والنوع، والمدى المعاير والمدى الأقصى (URL)، والدقة، ومادة الأجزاء المبللة والغلاف والحشوات وسائل الملء، ووصلة العملية (الحجم والتصنيف والوجه)، ووصلة الكهرباء (M20/½" NPT)، والإشارة والبروتوكول والتغذية، والحماية (Ex والشهادة وIP)، والملحقات (مانيفولد، حامل، مؤشر محلي، مظلة، صمامات)، والغمد وأبعاده للحرارة، والمواصفات الخاصة (SIL، NACE، القياس التجاري)، ومتطلبات الاختبار والشهادات.

4. **بيانات المورد (يملؤها المورد):** الطراز الكامل، والدقة المضمونة عند شروط التشغيل، وفقد الضغط، وزمن الاستجابة، والوزن، والرسم البعدي، وبيانات SIL/FMEDA، وأي انحراف عن المطلوب مع تبرير.

قواعد الملء: لا تُترك خانة فارغة (تُكتب «لا ينطبق» أو «يحدده المورد»)، والوحدات وفق وثيقة أساس التصميم (الفصل 25)، والمدى المعاير يقع فيه التشغيل الطبيعي بين 30% و80% ولا يتجاوز الأقصى 90%، والدقة تُطلب «عند شروط التشغيل» لا «مرجعية» فقط، والحالات البديلة تُذكر كلها (البدء، الصيف/الشتاء، التركيب البديل للغاز).

الشكل 27-4: *اختيار المدى المعاير للمرسل: المدى المعاير من LRV إلى URV داخل حدود الحساس LRL وURL، والتشغيل الطبيعي بين 30% و80% منه والحالة القصوى دون 90%، مقابل مدى واسع يعمل فيه التشغيل عند 10% فتصير الدقة المنسوبة إلى المدى نسبة كبيرة من القراءة.*

بيانات العمليات: من يوفرها ومتى تُجمّد؟ يصدرها مهندس العمليات في مرحلة FEED بعلامة «أولي»، وتُجمَّد (Freeze) قبل إصدار طلبات الشراء. وأي تغيير بعد التجميد يمر بإدارة التغيير ويُقيَّم أثره على الجهاز (مدى جديد؟ مادة جديدة؟ عداد آخر؟). والخطأ الشائع: شراء الأجهزة على بيانات أولية ثم اكتشاف أن التدفق الحقيقي نصف المفترض فيعمل العداد في أسفل مداه.

مراجعة ورقة بيانات المورد: خطوات

1. طابق كل حقل مطلوب بما ملأه المورد؛ الحقول المتروكة أو «بحسب القياسي» تُعاد للتوضيح.

2. تحقق من أن الدقة المعلنة عند شروط التشغيل الفعلية (الحرارة والضغط الساكن والمدى المضبوط) لا عند الشروط المرجعية، وهل الدقة منسوبة إلى القراءة أم إلى المدى (القسم 8.14).
3. تحقق من حساب الحجم (Sizing) المرفق: المدى، وفقد الضغط، ورقم رينولدز عند التدفق الأدنى، والحد الأدنى للتدفق أو المستوى القابل للقياس.
4. تحقق من المواد والشهادات ومطابقتها للخدمة (NACE، Ex، SIL، القياس التجاري) وأن الشهادة تغطي الطراز المعروض بعينه لا عائلته.
5. راجع الرسم البعدي مقابل الفوهات والمساحة المتاحة والحامل، ووزنه للمنصات.
6. راجع الانحرافات (Deviations) التي أعلنها المورد وقرر قبولها أو رفضها كتابةً.
7. تحقق من الملحقات ونطاق التوريد (كابلات، برمجيات، أدوات التهيئة، قطع الغيار، التدريب، الشهادات).
8. أعد الورقة إلى المورد بحالة «معتمدة» أو «معتمدة مع ملاحظات» أو «مرفوضة»، واحفظ المراجعات.

ويبين الشكل 27-5 بنية ورقة بيانات مرسل ضغط تفاضلي بمناطقها الأربع: ما يملؤه مهندس العمليات (شروط العملية) وما يملؤه مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس (المواصفات والخيارات) وما يملؤه المورد (الطراز والرقم التسلسلي)، وسجل المراجعات الذي يحفظ تاريخ كل تغيير.

الشكل 27-5: *بنية ورقة بيانات مرسل ضغط تفاضلي وفق ISA-TR20.00.01: رأس ببيانات الوثيقة، ثم البيانات العامة وشروط العملية والمواصفات الفنية والخيارات، ثم ذيل للملاحظات وبيانات المورد وسجل المراجعات.*

27.8 مخطط المستوى للوعاء (Level Sketch): مثال على وثيقة تفصيلية صغيرة مهمة

عند تحديد أجهزة المستوى على وعاء يُعدّ مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس **مخطط المستوى أو مخطط الوعاء (Level / Vessel Sketch)** الذي يوثق فوهات أجهزة المستوى وارتفاعاتها وأحجامها وتصنيفاتها، ويُسلَّم إلى مهندس الأوعية ليُدخلها في رسم الوعاء (R54).

محتواه:

- رسم تخطيطي للوعاء بخط المرجع (Tangent Line) والفوهات مع الارتفاعات.
- كل جهاز مستوى (مرسل، زجاج أو مؤشر مغناطيسي، مفاتيح) بفوهتيه أو فوهته.
- نطاق القياس ونقاط الإنذار والفصل (LL، L، H، HH) بالارتفاع والنسبة.
- السطح الفاصل إن وجد، بمداه وأجهزته.

قواعده:

- يغطي الزجاج أو المؤشر المغناطيسي مدى المرسل كاملًا (أو يتداخل معه) حتى يمكن التحقق منه بالعين.
- نقاط الفصل داخل مدى المرسل بهامش.
- أجهزة الحماية على فوهات مستقلة وجهات لا تتأثر بالتدفق الداخل.
- حجم الفوهة وتصنيفها يتبعان فئة الوعاء (2 بوصة عادة لمرسل الضغط التفاضلي والرادار الموجّه، وأكبر للرادار بلا تلامس).
- الغرف الجانبية (Bridles) مع صمامات عزل وتصريف.
- أي تغيير في ارتفاع فوهة بعد إصدار المخطط يعني إعادة المعايرة أو تحديد مدى جديد.

الشكل 27-6: *مخطط مستوى لوعاء فاصل: خط المرجع والفوهات بارتفاعاتها، ومرسل الضغط التفاضلي ومؤشر المستوى المغناطيسي بمدى متداخل، ومرسل الحماية على فوهات مستقلة، ونقاط الإنذار والفصل بالارتفاع والنسبة.*

27.9 إدارة التغييرات على أوراق البيانات

كل ورقة بيانات وثيقة مرقمة بمراجعات (Rev. A, B, 0, 1...): المراجعات بالحروف قبل الشراء، وبالأرقام بعده. والتغيير بعد الشراء يمر بإدارة التغيير (MOC): من طلبه ولماذا، وأثره على الجهاز والكابل والبرمجة والرسومات (P&ID، مخطط الحلقة، قائمة الأجهزة)،

ومن يدفع. ويُحدَّث سجل أوراق البيانات (Datasheet Register) مع كل إصدار، وتُغلق الوثيقة بمراجعة «كما بُني» (As-Built) بعد التشغيل التجريبي بالقيم الفعلية (المدى المعاير النهائي، الرقم التسلسلي، إعدادات HART).

الشكل 27-7: *دورة حياة ورقة البيانات: بيانات عمليات أولية في مرحلة FEED ومراجعات بالحروف، ثم تجميد بيانات العمليات قبل طلب الشراء (PO)، ومراجعات بالأرقام بعده مع مراجعة ورقة المورد، وكل تغيير بعد التجميد يمر بإدارة التغيير (MOC)، حتى مراجعة «كما بُني» (As-Built) بعد التشغيل التجريبي.*

27.10 حالة ميدانية: عداد صحيح في المكان الخطأ

الموقف: اختير عداد كهرومغناطيسي لخط ماء معالج بعد أن نجح النوع نفسه في خطوط أخرى بالمصنع. بعد التركيب قرأ صفرًا ثم قيمًا عشوائية. الماء منزوع المعادن (موصلية أقل من 1 µS/cm)، والعداد يحتاج إلى 5 µS/cm على الأقل. أُغفل المرشح الأول (خواص المائع) لأن «الماء ماء».

الحل: استُبدل به عداد دوامي لا يشترط حدًا أدنى للموصلية، وأُعيدت ورقة البيانات لتذكر الموصلية صراحة في بيانات العملية.

الدرس: بيانات العملية التي لا تُكتب لا تُراجع؛ الموصلية والثابت العازل وضغط البخار حقول إلزامية لا اختيارية. (مثال تعليمي مركّب.)

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ماذا يقرر المهندس	ماذا ينفذ الفني ويقيس
الاختيار	يطبق المرشحات الأربعة، ويقارن بمصفوفة مرجحة وتكلفة عمر، ويكتب مذكرة الاختيار	يقدّم خبرة الموقع: أعطال النوع نفسه، وصعوبة الوصول، وتوافر صمامات العزل وقطع الغيار
ورقة البيانات	يملأ الحقول كلها على بيانات عمليات مجمّدة، ويراجع ورقة المورد وانحرافاته	يطابق عند الاستلام الطراز والمادة والمدى والشهادة والوصلات مع الورقة المعتمدة
ما بعد التركيب	يعتمد مراجعة «كما بُني» ويمرر كل تغيير بإدارة التغيير	يسجل المدى المعاير النهائي والرقم التسلسلي وإعدادات HART، ويبلّغ عن تشغيل الجهاز في أسفل مداه

27.11 الأخطاء الشائعة

- الاختيار من الكتالوج أو من «ما اعتدنا عليه» قبل قراءة بيانات العملية.
- شراء على بيانات عمليات أولية غير مجمّدة.
- تجاهل الحالات البديلة والبدء (تدفق أقل من الأدنى، حرارة أعلى من التصميم).
- طلب دقة لا تحتاجها الوظيفة (فيُدفع ثمنها) أو أقل مما تحتاجه المحاسبة (فتُدفع خسائرها).
- نسيان فقد الضغط وتكلفته السنوية في المقارنة.
- مادة غشاء لا تناسب H_2S أو الهيدروجين، أو حشوة فيتون في البخار.

- مدى مرسل يجعل التشغيل عند 10% منه.
- جهاز في مكان لا يمكن الوصول إليه أو بلا صمامات عزل.
- الاعتماد على «الدقة المرجعية» في الكتالوج بدل الدقة عند شروط التشغيل.
- عدم تسجيل مبرر الاختيار، فيتكرر النقاش مع كل استبدال.

27.12 ملخص

اختيار الجهاز قرار هندسي متسلسل: طبيعة المقاس والمائع تُسقط ما لا يعمل؛ ثم الوظيفة والأداء (الدقة والمدى والاستجابة وSIL) تُسقط ما لا يكفي؛ ثم الموقع والبيئة والتركيب تُسقط ما لا يصمد؛ ثم المواصفات والسعر بتكلفة دورة الحياة تُفاضل بين الباقي. وتُثبَّت النتيجة في ورقة بيانات كاملة الحقول مبنية على بيانات عمليات مجمّدة، وتُراجع أوراق الموردين بخطوات، وتُدار التغييرات بمراجعات ومذكرات تبرير.

وفي الفصل التالي: الفصل 28، «دراسات تحديد المخاطر HAZID وHAZOP ودور مهندس التحكم فيها»، ينتقل من سؤال «أي جهاز؟» إلى سؤال يسبقه: «أي حماية نحتاج أصلًا؟»، وهو ما تحسمه دراسات المخاطر قبل أن تصل الحماية إلى ورقة بيانات.

27.13 أسئلة التقييم الذاتي

1. عدّد المرشحات الأربعة لاختيار الجهاز واذكر مثالًا لتقنية تسقط في كل منها.
2. لماذا لا يصلح العداد الكهرومغناطيسي للماء منزوع المعادن ولا للهيدروكربونات؟
3. ما الفرق بين «الدقة المرجعية» و«الدقة عند شروط التشغيل»؟ وأيهما تُطلب في ورقة البيانات؟
4. اذكر ستة بنود في تكلفة دورة الحياة لعداد تدفق، وأيها يقلب المقارنة غالبًا.
5. ما الذي يجب أن تحتويه بيانات العملية في ورقة بيانات مرسل مستوى بالضغط التفاضلي؟

6. أعد مصفوفة 27.6 لخط ماء تبريد بقطر 16 بوصة والغرض عرض وموازنة تقريبية؛ أي عداد يفوز ولماذا؟
7. ما مبررات فرض NACE MR0175 على جهاز؟ وما الذي يتغير فيه؟
8. لماذا يُشترط أن يغطي مؤشر المستوى المحلي مدى المرسل كاملًا في مخطط المستوى؟
9. ما خطوات مراجعة ورقة بيانات المورد؟ وما الذي تفعله بالانحرافات؟
10. متى تُجمّد بيانات العمليات، وما الذي يحدث لتغيير بعد التجميد؟

مراجع الفصل: R3 (Instrumentation and Control Design)، وR14 (Introduction to C&I Engineering)، وR16 وR17، وR54 (Level Transmitter and Level Gauge، Design Tips، Instrumentation Tools)، وR50 (OISD-STD-152 لمتطلبات أجهزة المستوى في LPG والخزانات)، وISA-TR20.00.01 (نماذج أوراق البيانات)، وISA-5.1، و NACE MR0175/ISO 15156، وIEC 60079، وخبرة المؤلف الميدانية (R18).

الفصل 28: دراسات تحديد المخاطر HAZID و HAZOP ودور مهندس التحكم فيها

لمن هذا الفصل: مهندس التحكم والأجهزة الذي يُدعى إلى ورشة HAZID أو HAZOP لأول مرة، ويريد أن يعرف ماذا يُنتظر منه قبل الجلسة وأثناءها وبعدها. ويفيد مهندس المشاريع ومهندس التشغيل اللذين يستلمان توصيات هذه الدراسات ويحولانها إلى إنذارات وحمايات وتعديلات.

الفكرة الأساسية: دراسات المخاطر ليست أوراقًا يملؤها قسم السلامة، بل هي المكان الذي يُقرَّر فيه جزء كبير من تصاميم التحكم والحماية في المشروع. فكل إنذار حرج، وكل وظيفة إيقاف، وكل صمام إغلاق طارئ، يبدأ عادة سطرًا في جدول HAZOP. ومهندس التحكم هو الذي يعرف كيف تفشل الأجهزة، وماذا يحدث حين يتجمد مرسل أو يلتصق صمام أو يتعطل معالج. فإذا غاب عن الجلسة أو صمت فيها، بُنيت الحمايات على افتراضات لا تصمد في الميدان.

28.1 لماذا دراسات المخاطر؟ ومصطلحاتها الأساسية

المنشآت الصناعية تتعامل مع مواد قابلة للاشتعال أو سامة، وضغوط وحرارة مرتفعة، وآلات دوارة سريعة. والتصميم الجيد لا يلغي الخطر، بل يعرفه ويقدّره ويضع أمامه طبقات كافية من الحماية. وقد علّمت الحوادث الكبرى، مثل بوبال وبايبر ألفا وتكساس سيتي، أن كثيرًا من الكوارث كان يمكن أن تُمنع لو طرح أحدٌ السؤال الصحيح في مرحلة التصميم. ودراسات المخاطر هي الإطار المنظم لطرح هذه الأسئلة.

المصطلحات:

المصطلح	المعنى	مثال
الخطر (Hazard)	مصدر محتمل للأذى	غاز قابل للاشتعال تحت ضغط 70 bar
التهديد أو السبب (Threat / Cause)	ما قد يطلق الخطر	فشل صمام التحكم بالضغط مفتوحًا
الحدث الخطر (Hazardous Event)	الحالة التي يتحول فيها الخطر إلى أذى	تمزق الوعاء وتسرب الغاز
النتيجة (Consequence)	الأثر على الأفراد والبيئة والأصول والسمعة	حريق نفاث وإصابات
المخاطرة (Risk)	اجتماع احتمال الحدث وشدة نتيجته	حدث مرة كل 1000 سنة بنتيجة كارثية
الضمانة (Safeguard)	ما يمنع الحدث أو يخفف نتيجته	صمام أمان، أو وظيفة إيقاف بالضغط المرتفع
ALARP (As Low As Reasonably Practicable)	أدنى مستوى معقول عمليًا للمخاطرة	خُفضت المخاطرة حتى صار تخفيضها أكثر تكلفةً بصورة غير متناسبة

تسلسل الضوابط (Hierarchy of Controls): يُفضَّل دائمًا حل المشكلة من أعلى: إزالة الخطر بتغيير التصميم، ثم استبداله بما هو أقل خطرًا، ثم الحلول الهندسية كالحمايات الآلية وصمامات الأمان، ثم الضوابط الإدارية كالإجراءات والتدريب، وأخيرًا معدات الوقاية الشخصية. ولهذا يجب ألا يكون أول ما يقترحه مهندس التحكم إنذارًا جديدًا؛ فالإنذار يعتمد على إنسان منتبه في لحظة ضغط، وهو من أضعف الضمانات.

الشكل 28-1: *تسلسل الضوابط (Hierarchy of Controls). من الأكثر فاعلية، وهو إزالة الخطر بتغيير التصميم، إلى الأقل، وهو معدات الوقاية الشخصية (PPE). ويقع الإنذار بين الضوابط الإدارية لأنه يعتمد على إنسان منتبه في لحظة ضغط.*

موقع الدراسات في المشروع: لا تُجرى دراسة واحدة فقط، بل سلسلة تتعمق مع تقدم التصميم. HAZID في المرحلة المفاهيمية والتصميم الأولي، ثم HAZOP حين تكتمل مخططات P&ID، ثم دراسة SIL وLOPA لتحديد مستوى الحمايات الآلية، ثم مواصفة متطلبات السلامة، ثم التحقق قبل التشغيل، ثم HAZOP لكل تعديل لاحق عبر إدارة التغيير.

الشكل 28-2: *دراسات المخاطر على امتداد دورة حياة المشروع، من HAZID في المرحلة المفاهيمية إلى HAZOP للتعديلات واختبارات الإثبات أثناء التشغيل.*

28.2 مصفوفة المخاطر

تستخدم أغلب الشركات مصفوفة مخاطر (Risk Assessment Matrix) لتقييم المخاطرة تقييمًا نوعيًا، ولها محوران: محور للاحتمالية، ومحور لشدة النتيجة، وغالبًا خمس درجات لكل منهما. وتُعرّف درجات الشدة لكل فئة من الأثر: الأفراد، والبيئة، والأصول والإنتاج، والسمعة. ويُقيَّم كل سيناريو مرتين: مرة قبل احتساب الضمانات لمعرفة حجم الخطر الأصلي، ومرة بعدها لمعرفة المخاطرة المتبقية.

الشكل 28-3: *مصفوفة مخاطر نموذجية بخمس درجات للاحتمالية وخمس للشدة. سيناريو شدته كبيرة واحتماله مرتفع ينتقل بالضمانات من منطقة غير مقبولة إلى منطقة مقبولة مع الضوابط. الحدود الفعلية يحددها نظام الشركة.*

> **مثال محلول (قراءة المصفوفة):** في وحدة ضغط غاز، سيناريو «ارتفاع الضغط في خط التصريف بسبب إغلاق صمام خاطئ». الشدة المحتملة كبيرة (4) لاحتمال تمزق الأنبوب وإصابات، والاحتمالية دون ضمانات محتملة (4) لأن الإغلاق الخاطئ حدث مشهود في هذا النوع من الوحدات. المخاطرة 16 = 4 × 4، أي مرتفعة جدًا. ومع وجود وظيفة إيقاف للضاغط بالضغط المرتفع مستقلة عن التحكم، وصمام أمان مصمم لهذا السيناريو، تنخفض الاحتمالية إلى «غير محتمل» (2)، فتصبح المخاطرة 8، في المنطقة المتوسطة المقبولة بضوابط. أما الشدة فلم تتغير، لأن الضمانات هنا تمنع الحدث ولا تخفف نتيجته إن وقع.

والتنبيه المهم: المصفوفة أداة نوعية للترتيب والتواصل، لا لإثبات كفاية الحمايات. فإذا اعتمدت المخاطرة على حماية آلية، فإن الدرجة المطلوبة لهذه الحماية تُحدد بدراسة SIL وLOPA (الفصل 29)، لا بتحريك الدائرة على المصفوفة.

28.3 دراسة HAZID

التعريف والغرض: HAZID (Hazard Identification) تقنية لتحديد المخاطر مبكرًا في المشروع، وغالبًا هي أول دراسة سلامة رسمية فيه. غرضها أن تُعرف المخاطر الكبرى قبل أن تُتخذ القرارات الأساسية: موقع المنشأة، والتقنية المختارة، وتوزيع الوحدات، وفلسفة الإيقاف. فتغيير التصميم في هذه المرحلة رخيص، وتغييره بعد الشراء والتركيب مكلف جدًا.

التوقيت والمدة: تُجرى في المرحلة المفاهيمية بمعلومات عامة، ثم بتفصيل أكبر في التصميم الأولي حين تتوفر مخططات التدفق والتوزيع العام وكميات المواد الخطرة، ثم تُراجع في التصميم التفصيلي. ومدتها قصيرة نسبيًا، يوم أو يومان، وقد تصل إلى ثلاثة أيام للمشروع الكبير، لأن غرضها التعرف على المخاطر لا حلها. ولا يُنصح بأكثر من ست ساعات عمل في اليوم، فالجلسات المرهقة تنتج دراسات سطحية.

الفريق: يقوده ميسّر مستقل (Facilitator) لا علاقة له بالمشروع، ومعه مدوّن (Scribe). والفريق الأساسي يضم ممثل السلامة، ومهندس المشروع، ومهندس منع الخسائر، ومهندس العمليات، وممثلي التشغيل والصيانة. ويُستدعى المختصون، ومنهم مهندس التحكم، حسب الحاجة. وفي المشاريع المتعاقد عليها يُضاف ممثلو المقاول.

الوثائق المطلوبة: أساس التصميم أو الدراسة المفاهيمية، ومخطط تدفق العملية (PFD)، ومخططات P&ID إن توفرت، والتوزيع العام للموقع، وفلسفات السلامة والتشغيل، وتقارير HAZID السابقة إن وجدت. وتُرسل إلى الفريق قبل الجلسة بأسبوع على الأقل.

قائمة الفحص: تعتمد HAZID على قائمة فحص من فئات المخاطر، تُقسم عادة إلى أربعة أقسام:

- **المخاطر الخارجية والبيئية:** الظروف الجوية القصوى، والزلازل والفيضانات، والصواعق، والعواصف الرملية، والأنشطة المجاورة، والأمن.

- **مخاطر المنشأة:** المواد الخطرة ومخزونها، والحرائق والانفجارات، والضغط العالي، والآلات الدوارة، والرفع الثقيل، وفقدان المرافق كالكهرباء وهواء الأجهزة، والإيقاف الطارئ والإخلاء.
- **المخاطر الصحية:** المواد السامة مثل H_2S، والضجيج، والحرارة، والإشعاع، والمواد الكيميائية.
- **قضايا تنفيذ المشروع:** العمليات المتزامنة، والنقل، والتشغيل التجريبي، والكفاءات، والتعامل مع منشآت قائمة.

خطوات الجلسة: يُقسم المشروع إلى مناطق متجانسة الخطر. ولكل منطقة يُحدد غرض التصميم وظروف التشغيل، ثم تُطبق فئة الخطر وكلماتها الإرشادية لتوليد سيناريوهات، ثم تُبحث الأسباب والنتائج، وتُسجل الضمانات المخطط لها، وتُقدر المخاطرة بالمصفوفة، وتُكتب التوصيات. وتُسجل المخرجات في سجل المخاطر والآثار (Hazard & Effects Register)، ولكل توصية مسؤول وموعد إغلاق.

مثال (سطر من جدول HAZID):

المنطقة	فئة الخطر	السيناريو	السبب	النتيجة	الضمانات	المخاطرة	التوصية
غرفة التحكم المحلية لوحدة الضغط	فقدان المرافق	انقطاع الكهرباء الرئيسية	عطل في المحطة الفرعية	فقدان التحكم والمراقبة في أثناء الإيقاف	مصدر UPS لمدة 30 دقيقة	3 × 4 = 12	التحقق من أن مدة UPS تغطي الإيقاف الآمن الكامل ومراقبة الكاشفات، ودراسة تغذية الصمامات والمخمدات بحالة الفشل الآمن

28.4 دراسة HAZOP

التعريف: HAZOP (Hazard and Operability Study) فحص منهجي دقيق لتصميم العملية، هدفه اكتشاف الانحرافات عن غرض التصميم التي قد تسبب خطرًا أو مشكلة تشغيلية. وقد طُورت في شركة ICI البريطانية في ستينيات القرن الماضي، وأصبحت اليوم ممارسة معيارية في النفط والغاز والكيماويات والأدوية ومحطات الطاقة، ويصفها المعيار IEC 61882. وهي نوعية تعتمد على خبرة الفريق، ولا تضمن اكتشاف كل الانحرافات، لكن الفريق الكفء يلتقط معظمها.

الفرق بين HAZID وHAZOP: HAZID نظرة عامة مبكرة على المنشأة كلها بقائمة فحص، أما HAZOP فتدقيق خطًا بخط ووعاءً بوعاء على مخططات P&ID شبه النهائية. الأولى تسأل: ما الذي قد يؤذي هذا المشروع؟ والثانية تسأل: ماذا يحدث لو زاد الضغط في هذا الخط تحديدًا؟

عناصر المنهجية:

- **العقدة (Node):** جزء محدد من العملية له غرض تصميم واضح، مثل «الفاصل V-501 مع خطوط دخله وخروجه»، أو «خط تصريف المضخة حتى المبادل».
- **غرض التصميم (Design Intent):** ما يجب أن تفعله العقدة وحدود تشغيلها: الضغط والحرارة والتدفق والمستوى الطبيعية.
- **المتغير (Parameter):** التدفق، والضغط، والحرارة، والمستوى، والتركيب، والطور، والتفاعل، وكذلك أنشطة مثل البدء والإيقاف والصيانة وأخذ العينات.
- **الكلمة الإرشادية (Guide Word):** «لا» (No)، و«أكثر» (More)، و«أقل» (Less)، و«عكس» (Reverse)، و«جزء من» (Part of)، و«كذلك» (As Well As)، و«غير» (Other Than).
- **الانحراف (Deviation):** اجتماع المتغير بالكلمة الإرشادية: «لا تدفق»، و«ضغط أعلى»، و«تدفق عكسي».

- **الأسباب، والنتائج، والضمانات، والتوصيات:** تُسجل لكل انحراف في جدول HAZOP.

الشكل 28-4: *خطوات HAZOP لكل عقدة: تحديد غرض التصميم، ثم المتغير والكلمة الإرشادية والانحراف، ثم الأسباب والنتائج دون ضمانات، ثم الضمانات والتقييم والتوصية، والتكرار حتى تنتهي الكلمات والمتغيرات.*

> **قاعدة ذهبية:** تُقدَّر النتائج أولًا كأن الضمانات غير موجودة، ثم تُسجل الضمانات. فلو قال الفريق «لا مشكلة لأن هناك صمام أمان»، فقد قفز فوق السؤال الأهم: ما حجم المشكلة لو لم يعمل صمام الأمان؟ هذا السؤال هو الذي يحدد لاحقًا هل تحتاج الحماية إلى SIL.

الأنماط التشغيلية: لا يكفي أن يُدرس التشغيل المستقر. فكثير من الحوادث يقع في البدء والإيقاف والتحويل بين المعدات والصيانة والتشغيل الجزئي. ولذلك تُضاف أسئلة خاصة لكل عقدة: كيف تبدأ؟ كيف تُعزل للصيانة؟ ماذا يحدث عند فقدان الكهرباء أو هواء الأجهزة؟

الشكل 28-5: *عقدة HAZOP نموذجية: فاصل ثلاثي الطور مع صمام الإيقاف الطارئ على الدخل، وصمامي التحكم بالضغط والمستوى، وصمام الأمان، ومرسلات التحكم ومرسلات الحماية المستقلة.*

> **مثال محلول (سطران من جدول HAZOP لفاصل إنتاج):** العقدة: الفاصل V-501 وخطوطه. غرض التصميم: فصل الغاز والسائل عند 30 barg، والمستوى بين 30% و70%.

الانحراف	السبب	النتيجة دون ضمانات	الضمانات القائمة	التوصية
ضغط أعلى	فشل PCV مغلقًا، أو إغلاق صمام يدوي على خط الغاز، أو تحكم خاطئ من مرسل PT-501 يقرأ منخفضًا	تجاوز ضغط التصميم 40 barg، واحتمال تمزق الوعاء وحريق	إنذار ضغط مرتفع من PT-501، ووظيفة إيقاف بالضغط المرتفع جدًا من PZT-502 تغلق SDV الدخل، وصمام أمان PSV مصمم لحالة الإغلاق	التحقق من استقلال PZT-502 عن PT-501 في المأخذ والكابل والنظام؛ وإحالة وظيفة الإيقاف إلى دراسة SIL؛ والتأكد من أن حساب PSV يغطي انسداد المخرج (فشل PCV مغلقًا) وتدفق الغاز من المنبع عند فشل صمام التحكم في الوحدة السابقة مفتوحًا (Gas Blow-by)
مستوى أقل	فشل LCV مفتوحًا، أو خطأ في مرسل LT-501 يقرأ مرتفعًا	انفلات الغاز (Gas Blow-by) إلى خط السائل والخزان الموالي ذي ضغط التصميم المنخفض، واحتمال تمزقه	إنذار مستوى منخفض من LT-501، ووظيفة إيقاف بالمستوى المنخفض جدًا من LZT-503 تغلق SDV على خط السائل	دراسة SIL لوظيفة المستوى المنخفض جدًا؛ والتحقق من أن الخزان الموالي محمي بصمام أمان لحالة انفلات الغاز؛ ومقارنة LT وLZT في DCS بإنذار انحراف

لاحظ في السطر الأول أن أحد الأسباب هو مرسل التحكم نفسه يقرأ منخفضًا: عندها يغلق PCV ليرفع الضغط الذي يظنه منخفضًا، بينما الضغط الحقيقي يرتفع. ولو كانت وظيفة الإيقاف تأخذ قراءتها من المرسل نفسه، لفشلت الحماية والتحكم معًا بسبب واحد. هذا

النوع من الأسباب المشتركة هو ما يلتقطه مهندس التحكم في الجلسة، ولا يلتقطه غيره غالبًا.

جدول مقارنة: دراسات المخاطر وأين يقف مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس فيها

الدراسة	متى في المشروع	المدخلات	المخرجات	دور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس
HAZID	المفهوم / FEED	مخطط التموضع، PFD، قائمة المخاطر العامة	سجل مخاطر وتوصيات عامة	كشف الحريق والغاز، أنظمة الحماية المطلوبة مبدئيًا
HAZOP	نهاية الدراسة الأمامية أو بداية التصميم التفصيلي (P&ID شبه نهائية)	P&ID، الكلمات الإرشادية، وصف التحكم	انحرافات وضمانات وتوصيات مرقمة	تأكيد الضمانات الآلية، الإنذارات، التعشيق
ماذا لو (What-If) / قائمة فحص	التعديلات الصغيرة والتشغيل	إجراء التشغيل أو التعديل	قائمة أسئلة وأجوبة وإجراءات	مراجعة أثر التعديل على الحلقات والحمايات
LOPA	بعد HAZOP للسيناريوهات عالية الخطورة	تكرار الأحداث الأولية، طبقات الحماية واحتمال فشل كل منها عند الطلب (PFD)	SIL المطلوب لكل وظيفة أو كفاية الطبقات	إثبات استقلالية الطبقات (BPCS ≠ SIS)، PFD الأجهزة

الدراسة	متى في المشروع	المدخلات	المخرجات	دور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس
التحقق من SIL (SIL Verification)	بعد تحديد الدرجة بـ LOPA وقبل الشراء	بنية الوظيفة، معدلات الأعطال، فترة الاختبار	PFDavg وبنية MooN وفترة الإثبات	اختيار الأجهزة المعتمدة، حساب PFD، إجراء الاختبار
CHAZOP	تصميم نظام التحكم	معمارية النظام والشبكات والتغذية	أعطال الأنظمة وآثارها	كل البنود تقريبًا (القسم 28.6)

كيف أختار؟ الدراسة تُختار بالسؤال المطروح ونضج الوثائق لا بالعادة: قبل اكتمال P&ID لا يصلح إلا HAZID؛ وحين تتجمد P&ID تأتي HAZOP؛ وكل سيناريو تعتمد مخاطرته على حماية آلية يُحال إلى LOPA ثم التحقق من SIL؛ والتعديل الصغير أو الإجراء التشغيلي يكفيه «ماذا لو» مع قائمة فحص؛ ومعمارية نظام التحكم نفسها لا يفحصها إلا CHAZOP. وحدّ هذا الجدول أنه لا يغني عن إجراء المالك الذي يفرض الدراسات ومواعيدها، ولا يُظهر أن الدراسة تتكرر مع كل تغيير عبر إدارة التغيير. والخطأ الأكثر كلفة عقد HAZOP على مخططات غير ناضجة فتُعاد بعد أشهر بتوصيات متعارضة، أو الاكتفاء بتحريك الدائرة على مصفوفة المخاطر بدل LOPA لإثبات كفاية حماية آلية (القسم 28.2).

28.5 دور مهندس التحكم والأجهزة في HAZID وHAZOP

قبل الجلسة:

- مراجعة مخططات P&ID للتأكد من أن الأجهزة والحمايات مرسومة ومسماة بوضوح، وأن وضعيات الفشل الآمن للصمامات مكتوبة (FC أو FO أو FL).

- تحضير وثائق داعمة: مصفوفة السبب والنتيجة (Cause & Effect) الأولية، وقائمة الإنذارات والإيقافات بنقاط ضبطها المبدئية، وفلسفة التحكم والإيقاف الطارئ، ووصف الحلقات المعقدة.
- معرفة ما سيُعرض من معدات مورّدة (Packages) بمنطقها الداخلي، مثل الضواغط والتوربينات، وطلب وثائق حماياتها من المورد.

أثناء الجلسة: مهندس التحكم يجيب عن أسئلة لا يستطيع غيره الإجابة عنها بدقة:

- **كيف تفشل الأجهزة؟** المرسل قد يتجمد أو يقرأ أعلى أو أدنى، والصمام قد يلتصق أو يفشل إلى وضعه الآمن عند فقدان الهواء أو الإشارة، والمعالج قد يتوقف. وكل نمط فشل سبب محتمل لانحراف.
- **هل الضمانة مستقلة فعلًا؟** إذا كان سبب الانحراف فشل حلقة التحكم، فلا يجوز احتساب إنذار من الحلقة نفسها أو صمامها ضمانةً. ويجب التمييز بين الحساس المشترك والحساس المستقل، والمعالج المشترك والمستقل.
- **هل الحماية سريعة بما يكفي؟** زمن استجابة الحساس والمنطق وإغلاق الصمام يجب أن يكون أقصر من زمن سلامة العملية، أي الزمن بين بدء الانحراف ووصوله إلى الخطر.
- **هل يستطيع المشغل التدخل؟** الإنذار ضمانة فقط إذا كان مميزًا، وكان أمام المشغل وقت كافٍ وإجراء واضح، ولم يغرق في سيل إنذارات.
- **ماذا يحدث عند فقدان المرافق؟** فقدان الكهرباء أو هواء الأجهزة أو الاتصالات يغير سلوك كل الصمامات والحلقات معًا.

بعد الجلسة:

- متابعة التوصيات الخاصة بالتحكم: إنذارات جديدة، ووظائف إيقاف، وتغيير وضعيات فشل، وحساسات إضافية، وتعديل منطق.
- إحالة كل وظيفة إيقاف تعتمد عليها المخاطرة إلى دراسة SIL.

- تحديث P&ID ومصفوفة السبب والنتيجة وقائمة الإنذارات، وتوثيق إغلاق كل توصية بدليل.

28.6 HAZOP لأنظمة التحكم المبرمجة (CHAZOP)

مع انتقال كثير من وظائف السلامة والتشغيل إلى أنظمة مبرمجة، ظهر نوع خاص من الدراسة يُسمى CHAZOP (Control HAZOP). لا يدرس خطوط العملية، بل يدرس نظام التحكم نفسه: ماذا يحدث عند فشل بطاقة إدخال، أو متحكم، أو شبكة، أو محطة تشغيل، أو مصدر تغذية، أو خادم؟ وكلماته الإرشادية مختلفة: لا إشارة، وإشارة خاطئة، وإشارة متأخرة، وفقدان الاتصال، وفقدان الشاشة، وخطأ المشغل في الإدخال.

أسئلة CHAZOP النموذجية:

- إذا توقف متحكم DCS، ما الحلقات التي تفقد تحكمها معًا؟ وهل توزيعها على المتحكمات يجعل فشلًا واحدًا يعطل حلقة وحمايتها الاحتياطية؟
- إذا فُقد الاتصال بين DCS وSIS، هل تبقى الحمايات تعمل؟ وهل يعرف المشغل حالتها؟
- إذا تجمدت شاشة المشغل وهي تعرض قيمًا قديمة، كيف يكتشف ذلك؟
- ما القيمة التي تأخذها المخارج التناظرية عند فشل البطاقة: آخر قيمة، أم صفر، أم قيمة محددة؟
- هل تستطيع جهة غير مصرح لها تغيير نقطة ضبط حماية؟ وهنا يلتقي CHAZOP بالأمن السيبراني.

28.7 الدراسات والتحليلات الأخرى، ودور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم فيها

لا تقف دراسات السلامة في المشروع عند HAZID وHAZOP ودراسة SIL. فحول هذه الثلاث مجموعة من الدراسات والتحليلات، لكل منها سؤال تجيب عنه ووقت تُجرى فيه. ولا يُطلب من مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم أن يقود هذه الدراسات كلها، فأكثرها يقوده مهندسو العمليات والسلامة. غير أن له في كل منها دورًا محددًا، يمكن تلخيصه في جملة واحدة: **أن يُكتشف الخطر بقياس صحيح، وأن يُحدَّد الفعل المطلوب للتحكم أو الحماية، وأن تكون الوظيفة كلها قابلة للاختبار والصيانة.**

وتقسيم العمل واضح: مهندسو العمليات والسلامة يحددون السيناريوهات الخطرة ومتطلبات الحماية، ومهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم يحوّل ما اتُّفق عليه إلى منظومة آلية يُعتمد عليها ويمكن إثبات أدائها بالاختبار.

الشكل 28-6: *مخطط ربطة العنق (Bow-Tie) لسيناريو ضغط زائد في الفاصل V-501: التهديدات يسارًا تمنعها حواجز وقائية، والحدث المركزي فقدان الاحتواء، والحواجز المخففة يمينًا تحد من النتائج. وأغلب الحواجز الآلية يُبقيها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس سليمة بالاختبار وإدارة التجاوز والتشخيص.*

جدول: دراسات المخاطر والتحليلات في المشروع، ودور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في كل منها

الدراسة	الاسم الكامل	ما تجيب عنه	دور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم
تحديد المخاطر (HAZID)	(Hazard Identification)	ما المخاطر العامة في المشروع؟ وتُجرى مبكرًا	يحدد المخاطر الناشئة عن أعطال الأجهزة، وفقد التغذية الكهربائية أو هواء الأجهزة، وانقطاع الاتصالات، والأفعال غير المقصودة لنظام التحكم (28.3 و 28.5)
دراسة المخاطر وقابلية التشغيل (HAZOP)	(Hazard and Operability Study)	ماذا يحدث إذا انحرف متغير عن غرض التصميم؟	يشرح سلوك الحلقات والإنذارات والتعشيقات والفصل، ويقيّم أعطالًا مثل المرسل المجمّد، والصمام العالق، وخرج المتحكم الخاطئ (28.4 و28.5)
تحليل طبقات الحماية (LOPA)	(Layer of Protection Analysis)	هل تكفي طبقات الحماية المستقلة؟ وما مقدار خفض الخطر المطلوب؟	يقدّم تفاصيل الحمايات الآلية المقترحة واستقلالها عن نظام التحكم، وأسباب العطل المشترك بينها (29.3)
تحديد مستوى SIL	(SIL Determination)	ما مستوى السلامة المطلوب لكل وظيفة سلامة آلية (SIF)؟	يعرّف كل وظيفة: ماذا تقيس، وما الفعل المطلوب منها، وما الحالة الآمنة (29.3)

الدراسة	الاسم الكامل	ما تجيب عنه	دور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم
التحقق من مستوى SIL	(SIL Verification)	هل يحقق التصميم المستوى المطلوب حسابيًا ومعماريًا؟	يقدّم بيانات أعطال الحساس ومحلل المنطق والعنصر النهائي أو يراجعها، ومعمارية التصويت، والتغطية التشخيصية، وفترات اختبار الإثبات المفترضة (29.4)
تقييم المخاطر الكمي (QRA)	(Quantitative Risk Assessment)	ما تكرار الحوادث وعواقبها بالأرقام؟	يقدّم أزمنة الكشف والعزل وخفض الضغط، لأنها تحدد كمية المادة المتسربة
تحليل أنماط الأعطال وآثارها (FMEA وFMECA)	(Failure Modes and Effects (and Criticality) Analysis)	كيف يفشل كل مكوّن؟ وما أثر فشله؟ وما حرجيته؟	يحلل أعطال المكونات والتكرار والمرافق المشتركة (التغذية والهواء والشبكة) وأسباب العطل المشترك في التحكم والحماية
تحليل شجرة العطل (FTA)	(Fault Tree Analysis)	ما تجمعات الأعطال التي تؤدي إلى حادث محدد؟	يبني فروع الأجهزة والمنطق في الشجرة، ويتحقق من أن أحداث البداية الآلية واقعية (39.14)
تحليل شجرة الأحداث (ETA)	(Event Tree Analysis)	ما نتائج حدث ابتدائي بحسب نجاح الحمايات أو فشلها؟	يقدّم احتمال فشل كل حماية آلية عند الطلب
تحليل ربطة العنق (Bow-Tie)	(Bow-Tie Risk Analysis)	ما الحواجز التي تمنع الحادث، وما التي تخفف أثره؟	يحدد الحواجز الآلية على جانبي الحادث، ويبيّن ما يُبقيها سليمة: الاختبار، والتجاوز، والتشخيص
ماذا لو (What-If و SWIFT)	(Structured What-If Technique)	ماذا لو حدث كذا؟ بأسئلة منظمة	يطرح أسئلة أعطال الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم، ويجيب عنها

الدراسة	الاسم الكامل	ما تجيب عنه	دور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم
الاعتمادية والتوافر وقابلية الصيانة (RAM)	(Reliability, Availability and Maintainability)	كم يُتوقع أن يتوقف الإنتاج بسبب الأعطال والصيانة؟	يقدّم معدلات أعطال الأجهزة والفصل الكاذب، وأثر التكرار في التوافر
تغطية كواشف الحريق والغاز (F&G Mapping)	(Fire and Gas Detector Mapping)	هل تغطي الكواشف المنطقة كما يجب؟	يشارك في اختيار تقنيات الكواشف ومواقعها وترتيب تصويتها، ويحوّل الاستجابة المطلوبة إلى منطق نظام الحريق والغاز (30)
تقييم الحريق والانفجار	(Fire and Explosion Risk Assessment)	ما آثار سيناريوهات الحريق والانفجار، وما الحماية اللازمة؟	يقدّم أزمنة الكشف والعزل، ومتطلبات تحمّل الأجهزة والكابلات للحريق
انتشار الغاز (Dispersion Study)	(Gas Dispersion Study)	كيف ينتشر الغاز القابل للاشتعال أو السام عند التسرب؟	يستعمل نتائجها في اختيار مواقع الكواشف وحدود إنذارها
التنفيس وخفض الضغط	(Pressure Relief and Depressurization Study)	ما حالات الضغط الزائد، وما متطلبات التنفيس وخفض الضغط؟	يحدد صمامات خفض الضغط وأزمنة فتحها ومنطق تشغيلها، ويتحقق من اتساقها مع الدراسة
الطرق المائي والحالات العابرة (Surge / Transient Study)	(Hydraulic Surge and Transient Analysis)	ما تغيرات الضغط العابرة عند إغلاق صمام أو توقف مضخة؟	يقدّم أزمنة شوط الصمامات وتسلسل الإغلاق، ويضبط منطق التسلسل بما تفرضه الدراسة

الدراسة	الاسم الكامل	ما تجيب عنه	دور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم
ترشيد الإنذارات (Alarm Rationalization)	(Alarm Rationalization)	هل كل إنذار ضروري؟ وما أولويته وحده وإجراء المشغل؟	يعمل مع التشغيل والعمليات على الأولوية وحد الإنذار والتأخير والتخلف والإجراء المطلوب (22.3 و20.14)
تقييم مخاطر الأمن السيبراني	(OT/ICS Cybersecurity Risk Assessment)	ما المخاطر السيبرانية على أنظمة التحكم والحماية؟	يحصر أصول نظام التحكم واتصالاته وصلاحيات الوصول والتدابير التي تحفظ التشغيل الآمن (24)
العوامل البشرية وموثوقية الإنسان (HRA)	(Human Factors / Human Reliability Analysis)	ما أثر تصميم العمل والواجهات في الخطأ البشري؟	يراجع تصميم الشاشات والإنذارات والأوامر اليدوية وزمن استجابة المشغل (22.2)
العمليات المتزامنة (SIMOPS)	(Simultaneous Operations Risk Assessment)	ما مخاطر تداخل التشغيل والصيانة والإنشاء؟	يحدد التجاوزات والعزل المطلوبة لأنظمة التحكم والحماية أثناء الأعمال المتزامنة
تحليل سلامة العمل (JSA وJHA)	(Job Safety / Job Hazard Analysis)	ما مخاطر خطوات مهمة ميدانية محددة، وما ضوابطها؟	يعدّه لأعمال الآلات الدقيقة وأجهزة القياس: فتح حلقة حماية، أو اختبار صمام إغلاق، أو العمل في منطقة خطرة (39.2)

مراجعات وتقييمات مرتبطة بهذه الدراسات:

- **تصنيف المناطق الخطرة (Hazardous Area Classification – HAC):** يحدد المناطق ومجموعات الغاز وفئات الحرارة، ومنه يختار مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس نوع الحماية المناسب لكل جهاز (26).

- **تقييم السلامة الوظيفية (Functional Safety Assessment – FSA):** حكم مستقل على تحقق متطلبات السلامة الوظيفية في مراحل دورة الحياة (29.5).
- **مراجعة السلامة قبل البدء (Pre-Startup Safety Review – PSSR):** يثبت فيها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم أن الأجهزة والإنذارات والتعشيقات ووظائف الإيقاف رُكّبت وهُيّئت واختُبرت وفق المتطلبات المعتمدة.
- **إدارة التغيير (Management of Change – MOC):** كل تغيير في حد فصل أو منطق أو جهاز حماية يمر بتقييم قبل تنفيذه (29.5).

الشكل 28-7: *مراحل دراسة SIL، وهي ليست خطوة واحدة: من دراسة المخاطر إلى تحديد المستوى، ثم مواصفة المتطلبات، ثم التصميم والتحقق، ثم الاختبار والمصادقة، ثم التشغيل واختبار الإثبات؛ ودور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في كل مرحلة.*

«دراسة SIL» ثلاث خطوات لا واحدة. يُستعمل التعبير في المشاريع كأنه عمل واحد، وهو في الحقيقة ثلاثة أعمال متتالية، ولكل منها وقت ومسؤول (الشكل 28-7):

1. **تحديد المستوى المطلوب (SIL Determination):** بعد HAZOP، بطريقة LOPA أو مخطط المخاطر، ويُحدَّد فيه مقدار خفض الخطر المطلوب من كل وظيفة (29.3).

2. **التحقق من التصميم (SIL Verification):** بعد اختيار الأجهزة والمعمارية، يُحسب متوسط احتمال الفشل عند الطلب، وتُفحص قيود المعمارية والقدرة المنهجية للأجهزة (29.4).
3. **المصادقة على الوظيفة المنفذة (SIL Validation):** قبل البدء، باختبار الوظيفة كاملة من الحساس إلى العنصر النهائي، وإثبات أنها تطابق مواصفة متطلبات السلامة (29.5) (SRS).

ثم يبقى المستوى قائمًا في التشغيل باختبار الإثبات الدوري، وضبط التجاوزات، وإدارة التغيير. **ومستوى SIL صفة للوظيفة كاملة، لا لجهاز أو PLC وحده.** فالمرسل أو محلل المنطق يُوصف بأنه «صالح للاستعمال حتى SIL 2» مثلًا (قدرة منهجية)، لكن الوظيفة لا تبلغ SIL 2 إلا إذا حققت أجزاؤها الثلاثة معًا، بمعماريتها واختبارها، المتطلب المحسوب.

ما يسلّمه مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم من هذه الدراسات:

- إجراءات الدراسات الخاصة بالأجهزة، مع دليل إغلاق كل إجراء.
- مصفوفات السبب والنتيجة (Cause & Effect)، ووصف التحكم (Control Narrative)، ومخططات المنطق (القسم 17.10.1 والفصل 20).
- مواصفة متطلبات السلامة (SRS) لوظائف السلامة الآلية.
- اختيار الأجهزة ومدياتها، وحدود الإنذار والفصل، وأوضاع الفشل للصمامات (الفصلان 27 و15).
- إجراءات FAT وSAT واختبار الحلقات والاختبار الوظيفي (20.17).
- إجراءات اختبار الإثبات، وقواعد التجاوز وإعادة الضبط والتشخيص.

مثال محلول: من سيناريو ضغط عالٍ إلى وظيفة قابلة للاختبار

- **المعطيات:** أظهرت HAZOP أن انسداد مخرج الغاز من فاصل قد يرفع ضغطه حتى تتسرب المادة من الوصلات. وقدّرت دراسة العمليات **زمن سلامة العملية (Process Safety Time)**، أي الزمن من بدء الطلب إلى بلوغ الحالة الخطرة إن لم يُفعل شيء، بنحو 30 s.
- **الافتراضات:** تستعمل الشركة قاعدة داخلية تشترط ألا يتجاوز زمن استجابة الوظيفة نصف زمن سلامة العملية، أي 15 s. وهذه ممارسة شائعة لا نصٌّ في المعيار؛ فالمعيار IEC 61511 يشترط أن يكون زمن الاستجابة أقل من زمن سلامة العملية.
- **الحل:** يجيب مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم عن ستة أسئلة:
  - **أي جهاز يكتشف الخطر؟** مرسلا ضغط مستقلان عن مرسل التحكم، بتصويت 1oo2.
  - **أي منطق يبدأ الفصل؟** مقارنة لكل قناة في نظام السلامة، ثم ممسك بأولوية الضبط (20.5 و20.8).
  - **أي عنصر ينفذ؟** صمام إغلاق على خط الدخول يغلق بقطع التغذية عن صمامه الملفي (20.13) (Solenoid Valve).
  - **كم يستغرق؟** استجابة المرسل 0.5 s، ودورة المنطق 0.3 s، وتنفيس الصمام الملفي 1 s، وشوط الصمام 8 s، والمجموع 9.8 s، وهو أقل من 15 s.
  - **ماذا يحدث عند العطل؟** انقطاع سلك مرسل أو قراءته 3.6 mA أو أقل يُعالج كما تحدده SRS: إما أن يُعدّ طلب فصل فتفصل الوحدة، وإما أن يُرفع إنذار وتعمل الوظيفة 1oo1 على القناة السليمة مدةَ إصلاح محددة. وانقطاع تغذية الملف يغلق الصمام في الحالتين.

- **كيف تُختبر الوظيفة كلها؟** بحقن ضغط في كل مرسل، ومراقبة الممسك، وقياس زمن شوط الصمام الفعلي، في كل اختبار إثبات بالفترة المحددة في حساب التحقق.

- **المعنى ميدانيًا:** لو كان شوط الصمام 20 s بدل 8 s لتجاوز زمن الاستجابة الحد المطلوب (15 s)، ولفشلت الوظيفة حتى لو حققت احتمال الفشل المطلوب. فزمن الاستجابة متطلب في SRS مستقل عن رقم SIL، ويُقاس في كل اختبار.

الشكل 28-8: *ميزانية زمن استجابة وظيفة الفصل بالضغط العالي: المرسل 0.5 s والمنطق 0.3 s وتنفيس الصمام الملفي 1 s وشوط الصمام 8 s، بمجموع 9.8 s دون حد 15 s (نصف زمن سلامة العملية البالغ 30 s)؛ ولو كان الشوط 20 s لبلغ المجموع 21.8 s وفشلت الوظيفة.*

28.8 حالة ميدانية: الضمانة التي كانت جزءًا من السبب

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في ورشة HAZOP لتعديل على وحدة تسخين زيت حراري، درس الفريق انحراف «حرارة أعلى» في مخرج السخان. وكان السبب المسجل «فشل حلقة التحكم بالحرارة TIC-201». والضمانات المسجلة: «إنذار حرارة مرتفعة TAH-201»، و«إيقاف الحارق بالحرارة المرتفعة جدًا TAHH-201». وقُيمت المخاطرة مقبولة.

سأل مهندس التحكم عن مصدر الإشارات الثلاث. تبين أن الإنذار والإيقاف والتحكم كلها مأخوذة من مزدوجة حرارية واحدة في غمد واحد، وتدخل بطاقة واحدة في نظام التحكم نفسه، ومنطق الإيقاف مبرمج في المتحكم نفسه. فإذا انفصلت المزدوجة عن قاع الغمد، أو تعطلت البطاقة وتجمدت القراءة، قرأ النظام حرارة أدنى من الحقيقة. عندها يزيد التحكم الوقود، ولا يصدر الإنذار، ولا يعمل الإيقاف، لأن الثلاثة يرون القراءة الخاطئة نفسها.

أُعيد تقييم السيناريو دون احتساب الإنذار والإيقاف ضمانتين، فأصبحت المخاطرة غير مقبولة. وخرجت التوصيات: مزدوجة حرارية مستقلة في غمد مستقل للإيقاف، ونظام إيقاف منفصل عن التحكم، وإنذار انحراف بين المزدوجتين، ودراسة SIL للوظيفة، ومراجعة إعداد «احتراق المزدوجة» (Burnout) في البطاقة ليتجه إلى القيمة العليا، مع التنبه إلى أن هذا الإعداد يكشف انقطاع المزدوجة فقط، أما انفصالها عن قاع الغمد أو تجمد القراءة فيكشفه إنذار الانحراف بين المزدوجتين.

الشكل 28-9: *حالة السخان H-201. (أ) قبل الدراسة كان التحكم والإنذار والإيقاف من مزدوجة واحدة وبطاقة واحدة ومتحكم واحد، فيفشل الثلاثة معًا بسبب واحد؛ (ب) بعدها مزدوجة مستقلة في غمد مستقل إلى نظام إيقاف منفصل (SIS) يغلق صمام الإغلاق SDV، مع إنذار انحراف بين المزدوجتين (TDA).*

الدروس:

- اسأل عن مصدر كل ضمانة: الحساس، والبطاقة، والمعالج، والعنصر النهائي.
- الضمانة التي تشترك مع السبب في مكون واحد ليست ضمانة لذلك السبب.
- حضور مهندس التحكم في HAZOP ليس رفاهية؛ فبعض الأسئلة لا يطرحها غيره.

دور المهندس ودور الفني:

المرحلة	ماذا يقرر المهندس	ماذا ينفذ الفني ويقيس
قبل الجلسة	يراجع P&ID ووضعيات الفشل، ويحضّر مصفوفة السبب والنتيجة الأولية وقائمة الإنذارات والإيقافات	يتحقق ميدانيًا في المنشآت القائمة من مصدر كل إشارة: أي مأخذ، وأي كابل، وأي بطاقة ومتحكم
أثناء الجلسة	يشرح أنماط فشل الأجهزة، ويرفض احتساب ضمانة تشترك مع السبب، ويقارن زمن الاستجابة بزمن سلامة العملية	يقدّم سجلات الأعطال والتجاوزات وأزمنة شوط الصمامات المقيسة فعلًا، لا المكتوبة في الكتالوج
بعد الجلسة	يتابع التوصيات ويحيل وظائف الإيقاف إلى دراسة SIL ويحدّث الوثائق	ينفذ التعديلات ويختبرها، ويقيس زمن الاستجابة الكلي من الحساس إلى الصمام ويسجله

28.9 الأخطاء الشائعة

- إرسال ممثل غير متفرغ أو قليل الخبرة عن التحكم إلى الورشة، أو غيابه عن أيام دراسة العُقد الحرجة.
- احتساب ضمانات قبل تقدير النتيجة دونها.
- احتساب إنذار أو إيقاف من حلقة التحكم نفسها التي يكون فشلها سبب الانحراف.
- الاكتفاء بدراسة التشغيل المستقر وإهمال البدء والإيقاف والصيانة وفقدان المرافق.
- كتابة توصيات عامة مثل «مراجعة التصميم» دون تحديد المطلوب والمسؤول.
- اعتبار الإنذار ضمانة دون التحقق من زمن استجابة المشغل وإجرائه.
- عدم متابعة توصيات التحكم حتى الإغلاق، أو إغلاقها دون تحديث الوثائق.

- تنفيذ تعديل على منطق الحمايات بعد التشغيل دون HAZOP أو مراجعة إدارة التغيير.
- إهمال المعدات المورّدة بحجة أن حماياتها من مسؤولية المورد.

28.10 ملخص

HAZID دراسة مبكرة واسعة بقائمة فحص تحدد المخاطر الكبرى قبل القرارات الأساسية، وHAZOP دراسة تفصيلية على مخططات P&ID تفحص كل عقدة بالمتغيرات والكلمات الإرشادية لتكتشف الانحرافات وأسبابها ونتائجها وضماناتها. وتُقيّم المخاطرة بمصفوفة نوعية، وتُفضل الحلول الأعلى في تسلسل الضوابط على الإنذارات. ومهندس التحكم يحضر الوثائق قبل الجلسة، ويشرح أنماط فشل الأجهزة واستقلال الضمانات وزمن الاستجابة أثناءها، ويتابع التوصيات ويحيل وظائف الإيقاف إلى دراسة SIL بعدها. و CHAZOP تمد المنهجية نفسها إلى نظام التحكم المبرمج.

وفي الفصل التالي: الفصل 29، «أنظمة السلامة الآلية SIS ودراسة SIL وLOPA»، يتسلّم وظائف الإيقاف التي تحيلها HAZOP، فيحدد مقدار الموثوقية المطلوب من كل منها وكيف يُثبت بالحساب ويُصان بالاختبار.

28.11 أسئلة التقييم الذاتي

1. عرّف الخطر والمخاطرة والضمانة، ومثّل لكل منها من وحدة تعرفها.
2. ما الفرق في الغرض والتوقيت والوثائق بين HAZID وHAZOP؟
3. لماذا تُقدّر النتائج في HAZOP قبل احتساب الضمانات؟
4. اكتب خمسة انحرافات لعقدة «خط تصريف مضخة» مستخدمًا كلمات إرشادية مختلفة.
5. سيناريو احتماليته 3 وشدته 5 على مصفوفة 5×5. أين يقع؟ وماذا يتغير إذا أضيفت حماية تخفض الاحتمالية درجتين؟

6. متى لا يجوز احتساب إنذار من DCS ضمانةً في سيناريو HAZOP؟
7. عدّد أربعة أنماط فشل لمرسل ضغط، وبيّن أثر كل منها على حلقة تحكم بالضغط.
8. ما الوثائق التي يحضرها مهندس التحكم قبل ورشة HAZOP؟
9. اذكر ثلاثة أسئلة من CHAZOP تخص فشل الاتصال بين DCS وSIS.
10. في الحالة 28.8، ما الذي جعل الضمانتين غير صالحتين؟ وكيف عولج ذلك؟

مراجع الفصل: دليل إرشادي لدراسة تحديد المخاطر HAZID في شركة نفط وطنية (QP-GDL-S-040؛ التوقيت، والفريق، وقائمة الفحص، وسجل المخاطر والآثار، ومصفوفة المخاطر؛ عرض تدريبي في HAZOP؛ المنهجية، والعقد، والمتغيرات، والكلمات الإرشادية، وتطور الطريقة في ICI؛ IEC 61882 لدراسات HAZOP؛ IEC 61511 لأنظمة السلامة الآلية في الصناعات العملياتية؛ ISO 17776 لإدارة المخاطر في منشآت النفط والغاز البحرية؛ CCPS، Guidelines for Hazard Evaluation Procedures؛ وللقسم 28.7: IEC 60812 (تحليل أنماط الأعطال وآثارها)، وIEC 61025 (شجرة العطل)، وIEC 62502 (شجرة الأحداث)، وIEC 60079-10-1 (تصنيف المناطق الخطرة)، وISA-18.2 (إدارة الإنذارات)، وIEC 62443 (الأمن السيبراني)، ومذكرة المؤلف عن خريطة الدراسات ودور مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم فيها؛ خبرة المؤلف في ورش HAZOP لمشاريع التوليد والنفط والغاز.

الفصل 29: أنظمة السلامة الآلية SIS ودراسة SIL وLOPA

لمن هذا الفصل: مهندس التحكم الذي يصمم وظائف الإيقاف أو يشارك في دراسة SIL، ومهندس الصيانة الذي يختبر هذه الوظائف ويدير تجاوزاتها، ومهندس المشاريع الذي يراجع عروض أنظمة السلامة. ويبني على الفصل 28، ويمهد لتفصيل دورة الحياة والحسابات في الفصلين 81 و82 من الجزء القادم.

الفكرة الأساسية: حين تقول دراسة HAZOP إن سيناريو ما يحتاج إلى حماية آلية، يبقى سؤالان: ما مقدار الموثوقية المطلوب من هذه الحماية؟ وكيف نثبت أنها كذلك؟ الجواب عن الأول هو «مستوى تكامل السلامة» (Safety Integrity Level – SIL) الذي تحدده دراسة SIL بطرق مثل LOPA. والجواب عن الثاني تصميم وتحقق واختبار دوري وفق IEC 61511. والفكرة التي تربط كل ذلك بسيطة: الحماية ليست «موجودة أو غير موجودة»، بل لها احتمال فشل عند الطلب، وهذا الاحتمال يُحسب ويُصمم ويُحافظ عليه طوال عمر المنشأة.

29.1 ما نظام السلامة الآلي؟

التعريف: نظام السلامة الآلي (Safety Instrumented System – SIS) نظام مستقل عن التحكم الأساسي، ينقل العملية إلى حالة آمنة حين تتجاوز حدودها الخطرة. ويتكون من وظيفة سلامة آلية واحدة أو أكثر (Safety Instrumented Function – SIF)، ولكل وظيفة ثلاثة أجزاء:

- **الحساسات:** مرسلات أو مفاتيح تقيس المتغير الخطر، بحساس واحد (1oo1) أو بتكرار (1oo2 أو 2oo3) بحسب الدرجة المطلوبة وقيود البنية وكلفة الإيقاف الكاذب.
- **حلّال المنطق (Logic Solver):** متحكم سلامة معتمد وفق IEC 61508، يقرر الفصل.
- **العناصر النهائية:** صمامات إيقاف مع ملفاتها ومشغلاتها، أو قواطع محركات، أو صمامات تنفيس.

وتشمل أنظمة السلامة الآلية أنظمة الإيقاف الطارئ (ESD)، وأنظمة الحماية من الضغط العالي (HIPPS)، وأنظمة إدارة الحارقات (BMS)، وأنظمة الحريق والغاز (F&G) حين تُصمم بمنهجية السلامة الوظيفية، وحمايات الآلات مثل إيقاف التوربين بالسرعة الزائدة.

الشكل 29-1: *التحكم الأساسي ونظام السلامة الآلي سلسلتان مستقلتان على العملية نفسها: لكل منهما حساساته ومنطقه وعنصره النهائي.*

لماذا الاستقلال؟ لأن كثيرًا من الحوادث يبدأ بفشل في التحكم نفسه. فإذا شاركت الحماية التحكم في الحساس أو البطاقة أو المعالج أو الصمام، فقد يُسقطهما عطل واحد معًا. ولهذا يشترط IEC 61511 أن تكون الحماية مستقلة عن السبب الذي تحمي منه، ولا يسمح بالمشاركة بينهما إلا في حدود ضيقة وبشروط وتحليل.

المعايير:

المعيار	النطاق	من يستخدمه
IEC 61508	المعيار الأم للسلامة الوظيفية للأنظمة الكهربائية والإلكترونية والمبرمجة	مصنعو الأجهزة والمتحكمات لاعتماد منتجاتهم
IEC 61511 (ANSI/ISA-61511)	تطبيق السلامة الوظيفية في الصناعات العملياتية	المالكون وشركات التصميم ومتكاملو الأنظمة
IEC 62061 وISO 13849	سلامة الآلات	صناعة الماكينات
IEC 61513	المحطات النووية	القطاع النووي

نمط الطلب: أغلب وظائف العمليات تعمل في «نمط الطلب المنخفض»، أي أن الطلب عليها لا يزيد على مرة واحدة في السنة. ومقياس موثوقيتها احتمال الفشل عند الطلب المتوسط PFDavg. أما الوظائف التي يُطلب عملها كثيرًا أو باستمرار فتُقاس بتكرار الفشل الخطر في الساعة (PFH).

درجات SIL لنمط الطلب المنخفض:

الدرجة	PFDavg	عامل تخفيض المخاطرة RRF
SIL 1	من 0.01 إلى أقل من 0.1	من 10 إلى 100
SIL 2	من 0.001 إلى أقل من 0.01	من 100 إلى 1000
SIL 3	من 0.0001 إلى أقل من 0.001	من 1000 إلى 10,000

الدرجة	PFDavg	عامل تخفيض المخاطرة RRF
SIL 4	من 0.00001 إلى أقل من 0.0001	من 10,000 إلى 100,000

ومعنى PFDavg = 0.01 أن الوظيفة ستفشل في المتوسط مرة واحدة من كل مئة مرة يُطلب منها العمل. و4 SIL نادر جدًا في الصناعات العملياتية، وإذا خرجت به دراسة فالأصل مراجعة التصميم لإضافة طبقات أخرى بدل بناء وظيفة بهذه الدرجة.

والتنبيه الشائع: درجة SIL صفة للوظيفة كاملة، من الحساس إلى الصمام، لا لجهاز واحد. فمرسل «معتمد SIL 3» لا يجعل الحلقة SIL 3؛ هو فقط مناسب للاستخدام في وظيفة بهذه الدرجة إذا صُممت بقية الحلقة لذلك.

جدول مقارنة: نظام التحكم الأساسي مقابل نظام السلامة مقابل الحريق والغاز

المعيار	BPCS (DCS/PLC)	SIS (ESD/PSD)	F&G
الغرض	إبقاء العملية في نقطة الضبط	إعادة العملية إلى حالة آمنة عند الخروج عن الحدود	كشف الحريق والغاز والتخفيف
حالة الخرج الطبيعية	متغيرة باستمرار	مُطاقة (Energized)، تُفصل عند الطلب	مخارج الإطفاء غير مُطاقة وتُطاق عند الحدث، ومخارج الإيقاف مُطاقة وتُفصل عند الحدث (القسم 30.1)
المعيار الحاكم	ممارسات جيدة	IEC 61511 / SIL	IEC 61511 + NFPA 72 + ISA-TR84.00.07
التكرار	حسب الأهمية	معتمد SIL 2/3 (1oo2D، TMR)	كذلك SIL 2/3
التصويت	نادرًا	1oo2، 2oo3 حسب SIL والإتاحة	1ooN إنذار، 2ooN إجراء

المعيار	BPCS (DCS/PLC)	SIS (ESD/PSD)	F&G
التغيير والتثبيط	بصلاحية المشغل	إدارة تغيير وتصريح تثبيط مسجل	كذلك، مع إبقاء الإنذار
الاختبار	عند الحاجة	اختبار إثبات دوري بفترة من حساب SIL	كذلك + اختبار استجابة الكاشفات
الاستقلالية	—	مستقل عن BPCS حساسًا ومنطقًا وعنصرًا نهائيًا	مستقل عن BPCS، وقد يشارك SIS منصته المعتمدة بحواجز

كيف أختار؟ أين تُنفَّذ الوظيفة يحدده ما يُطلب منها: إن كان فشلها يكلف إنتاجًا فقط أو تلتقطه طبقة أخرى فمكانها نظام التحكم الأساسي؛ وإن احتسبتها HAZOP أو LOPA طبقة تخفض المخاطرة فمكانها SIS بحساساته وعناصره المستقلة؛ وإن كانت تعمل بعد فقدان الاحتواء، كشفًا وعزلًا وإطفاءً، فمكانها نظام الحريق والغاز. وحدّ هذه المقارنة أنها لا تقول كم يجب أن تكون الوظيفة موثوقة، فذلك من LOPA (القسم 29.3)، ولا تغطي الحمايات المدمجة في الحزم التي يوردها مصنّعها. والخطأ الأكثر كلفة إبقاء وظيفة محتسبة في LOPA داخل DCS لأن فيه قنوات فارغة، فتشترك مع الحدث المسبب في الحساس أو البطاقة أو المعالج ويسقط اعتمادها كطبقة، كما في حالة السخان في القسم 28.8.

29.2 طبقات الحماية

الفكرة التي يُبنى عليها كل ذلك أن الخطر لا يُترك لحماية واحدة، بل تُحيط به طبقات متتالية، ولكل طبقة احتمال فشل. والحادث يقع حين تفشل كل الطبقات معًا. وإذا كانت الطبقات مستقلة، فإن احتمال فشلها معًا حاصل ضرب احتمالاتها، وهذا يسمح بتخفيض كبير في تكرار الحدث.

الشكل 29-2: *طبقات الحماية حول خطر العملية، من التصميم الآمن بطبيعته والتحكم الأساسي والإنذارات، إلى نظام السلامة الآلي والحماية المادية، ثم الاستجابة للطوارئ داخل المصنع وخارجه.*

شروط الطبقة المستقلة (IPL): لا تُحتسب طبقة في دراسة LOPA إلا إذا كانت:

- **فعالة ومحددة:** قادرة وحدها على منع السيناريو المدروس إن عملت.
- **مستقلة:** عن الحدث المسبب وعن الطبقات الأخرى المحتسبة في السيناريو نفسه.
- **موثوقة:** لها احتمال فشل عند الطلب معروف ومبرر.
- **قابلة للتدقيق:** تُختبر وتُصان ويُثبت أداؤها بسجلات.

قيم نموذجية لاحتمال فشل الطبقات (للتوضيح، والمرجع إرشادات الشركة وCCPS):

الطبقة	PFD نموذجي	ملاحظات
حلقة تحكم في BPCS	0.1	لا يُحتسب لنظام التحكم الأساسي أكثر من هذا، ولا أكثر من طبقة واحدة منه في السيناريو عادة

الطبقة	PFD نموذجي	ملاحظات
إنذار مع تدخل المشغل	0.1	بشرط زمن كافٍ للاستجابة (لا يقل غالبًا عن 10 إلى 20 دقيقة)، وإجراء واضح وتدريب
صمام أمان مصمم للسيناريو	0.01	مع صيانة واختبار منتظمين
وظيفة SIS بدرجة SIL 1 أو 2 أو 3	0.1 إلى 0.0001	حسب الدرجة المصممة والمتحقق منها
سد احتواء أو جدار ناري	0.01	للنتائج التي يخففها فعلًا

29.3 تحديد درجة SIL المطلوبة

تُحدد درجة SIL لكل وظيفة في جلسة يُسميها كثيرون «دراسة SIL» أو «تصنيف SIL» (SIL Classification أو SIL Assessment). وتُستخدم فيها ثلاث طرق شائعة:

- **مصفوفة المخاطر المعايرة:** تُحدد الدرجة من خانة في مصفوفة شدة واحتمالية معايرة لهذا الغرض. سريعة، لكنها خشنة.
- **مخطط المخاطر (Risk Graph):** شجرة قرارات بأربعة عوامل: شدة النتيجة (C)، ونسبة وجود الأشخاص في المنطقة (F)، وإمكانية تجنب الخطر (P)، ومعدل الطلب (W)، وتنتهي بدرجة SIL. مناسب لفرز عدد كبير من الوظائف.
- **تحليل طبقات الحماية (LOPA):** طريقة شبه كمية تحسب تكرار الحدث بالأرقام، وهي الأكثر اعتمادًا اليوم للوظائف المهمة.

خطوات LOPA:

1. تحديد السيناريو من HAZOP: سبب واحد يؤدي إلى نتيجة واحدة.
2. تحديد تكرار الحدث المسبب في السنة (Initiating Event Frequency).

3. إضافة معدِّلات الظروف إن وجدت: احتمال وجود أشخاص، احتمال الاشتعال، وغيرها.
4. سرد الطبقات المستقلة المحتسبة وضرب احتمالات فشلها.
5. مقارنة التكرار الناتج بالتكرار المقبول الذي يحدده معيار الشركة لهذه الشدة.
6. إذا بقيت فجوة، فهذه الفجوة هي عامل تخفيض المخاطرة المطلوب من وظيفة SIS، ومنه تُقرأ درجة SIL.

> **مثال محلول (LOPA لضغط زائد في فاصل):** السيناريو: فشل حلقة التحكم بالضغط بحيث يُغلق صمامها، فيرتفع الضغط فوق ضغط التصميم ويتمزق الوعاء، والنتيجة المحتملة وفاة. معيار الشركة للتكرار المقبول لحدث بهذه الشدة 1×10^{-5} في السنة.

البند	القيمة
تكرار الحدث المسبب: فشل حلقة BPCS	0.1 في السنة
الطبقة 1: إنذار ضغط مرتفع مستقل كليًا عن حلقة التحكم الفاشلة (مرسلًا وبطاقة ومعالجًا) مع تدخل المشغل وزمن كافٍ	PFD = 0.1
معدِّل: احتمال وجود شخص في منطقة الأثر	0.5
الطبقة 2: صمام أمان مصمم لهذا السيناريو	PFD = 0.01
التكرار الناتج قبل SIS	$0.1 \times 0.1 \times 0.5 \times 0.01 = 5 \times 10^{-5}$ في السنة
التكرار المقبول	1×10^{-5} في السنة
عامل التخفيض المطلوب من SIS	$5 \times 10^{-5} \div 1 \times 10^{-5} = 5$

العامل المطلوب 5 أقل من 10، فالمطلوب نظريًا أقل من SIL 1. لكن كثيرًا من الشركات تعتمد في هذه الحالة وظيفة SIL 1 أو تصنفها «SIL a» أو «حماية بلا درجة» حسب

نظامها، مع اشتراط حد أدنى من الجودة. ولو كان الإنذار غير مؤهل لأن المشغل لا يملك وقتًا كافيًا، لسقطت الطبقة الأولى، وصار العامل المطلوب 50، أي SIL 1 صراحة. ولو سقط الإنذار ولم يكن صمام الأمان أيضًا مصممًا لحالة الإغلاق، لصار العامل 5000، أي SIL 3. هكذا يتضح أن نتيجة LOPA حساسة جدًا لصدق كل طبقة محتسبة.

الشكل 29-3: *مثال LOPA: كل طبقة مستقلة تخفض تكرار الحدث، والفجوة المتبقية بين التكرار الناتج والتكرار المقبول هي ما يُطلب من وظيفة السلامة الآلية.*

29.4 التحقق من درجة SIL المصممة

بعد أن تحدد الدراسة الدرجة المطلوبة، يصمم مهندس التحكم الوظيفة ويثبت بالحساب أنها تحققها. ويشمل التحقق ثلاثة شروط يجب أن تتحقق كلها:

- **الشرط الكمي:** PFDavg المحسوب للوظيفة كاملة يقع في نطاق الدرجة المطلوبة.
- **قيود البنية (Architectural Constraints):** تسامح العطل في العتاد (Hardware Fault Tolerance – HFT) كافٍ. ووفق الجدول 6 في IEC 61511-1 (طبعة 2016) لنمط الطلب المنخفض: HFT = 0 لـ SIL 1 وSIL 2، وHFT = 1 لـ

SIL 3، أي أن الوظيفة تبقى تعمل مع عطل خطر واحد كما في بنية 1oo2 أو 2oo3، و2 = HFT لـ SIL 4. أما اشتراط HFT = 1 لـ SIL 2 و2 = HFT لـ SIL 3 مع جواز خفضه بدرجة للأجهزة المختارة بالاستخدام السابق (Prior Use) فهو من الطبعة الأولى (2003).

- **القدرة المنهجية (Systematic Capability):** الأجهزة مصممة ومصنعة بعمليات تمنع الأخطاء المنهجية، أو مثبتة بخبرة الاستخدام السابق (Prior Use).

معادلات تقريبية لـ PFDavg: حيث λDU معدل الفشل الخطر غير المكتشف، وTI فترة اختبار الإثبات:

- بنية 1oo1: $PFDavg \approx \lambda DU \times TI \div 2$.
- بنية 1oo2: $PFDavg \approx [(1 - \beta) \times \lambda DU \times TI]^2 \div 3 + \beta \times \lambda DU \times TI \div 2$، حيث β عامل السبب المشترك، ويتراوح عادة بين 2% و10%.
- الوظيفة كاملة: PFDavg = PFDحساسات + PFDمنطق + PFDعناصر نهائية.

الشكل 29-4: *احتمال فشل الوظيفة عند الطلب يرتفع خطيًا بين اختبارات الإثبات ويعود إلى قرب الصفر بعد كل اختبار، ومتوسطه λDU·TI/2. أما الاختبار غير الكامل التغطية فيترك جزءًا يتراكم مع السنين.*

مثال محلول (التحقق من وظيفة ضغط مرتفع جدًا): الوظيفة المطلوبة SIL 2. التصميم الأولي: مرسل ضغط واحد، ومتحكم سلامة معتمد، وصمام إيقاف واحد مع مشغله وملفه. واختبار الإثبات سنوي، TI = 8760 h.

الجزء	البيانات	PFDavg
مرسل الضغط 1oo1	$\lambda_{DU} = 3 \times 10^{-7}$ في الساعة	$3 \times 10^{-7} \times 8760 \div 2 = 1.3 \times 10^{-3}$
حلّال المنطق	من شهادة المصنّع	1×10^{-4}
صمام الإيقاف مع المشغل والملف 1oo1	$\lambda_{DU} = 2 \times 10^{-6}$ في الساعة	$2 \times 10^{-6} \times 8760 \div 2 = 8.8 \times 10^{-3}$
المجموع		1.02×10^{-2}

المجموع أكبر قليلًا من 0.01، فالوظيفة تحقق SIL 1 فقط. ويظهر من الجدول أن الصمام وحده يمثل نحو 86% من الاحتمال، وهذا نمط شائع: العناصر النهائية هي الحلقة الأضعف غالبًا.

التحسين: نضيف صمام إيقاف ثانيًا على التوالي فتصبح العناصر النهائية 1oo2، مع $\beta = 10\%$:

- الجزء المستقل: $[(0.9 \times 2 \times 10^{-6} \times 8760)^2] \div 3 = (0.0158)^2 \div 3 \approx 8.3 \times 10^{-5}$.
- جزء السبب المشترك: $0.1 \times 2 \times 10^{-6} \times 8760 \div 2 \approx 8.8 \times 10^{-4}$.
- مجموع العناصر النهائية $\approx 9.6 \times 10^{-4}$.
- الوظيفة كاملة: $1.3 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-4} + 9.6 \times 10^{-4} \approx 2.4 \times 10^{-3}$، أي SIL 2 بهامش مريح.

ولاحظ أن السبب المشترك صار هو الغالب في جزء الصمامين. فلو كان الصمامان من الطراز نفسه، يغذيهما ملف واحد، ويُصانان بالإجراء نفسه في اليوم نفسه، لارتفع β

وضاعت فائدة التكرار. البديل الآخر: الاختبار الجزئي لشوط الصمام (Partial Stroke Test) أثناء التشغيل كل شهر، فيكتشف جزءًا كبيرًا من أعطال الالتصاق دون إيقاف العملية، ويخفض PFDavg للصمام الواحد (القسم 29.5).

والعنصر النهائي الذي يهيمن على الحساب ليس صمامًا فقط بل تجميعة كاملة (الشكل 29-5): صمام إغلاق طارئ، ومشغل هوائي نابضي يعيد الصمام إلى وضع الأمان عند فقد الهواء، وصمام ملفي يُسقط الهواء عند أمر الفصل، وصمام تنفيس سريع يقصّر زمن الإغلاق، ومفاتيح موضع أو مرسل موضع يؤكد أن الصمام وصل إلى نهايته. وكل جزء من هذه الأجزاء له معدل فشله الخاص، ويدخل في حساب PFDavg وفي تغطية اختبار الإثبات.

الشكل 29-5: *نموذج ثلاثي الأبعاد للعنصر النهائي لوظيفة سلامة: صمام كروي للإغلاق الطارئ بمشغل هوائي نابضي، وصمام ملفي يسقط الهواء عند أمر الفصل، وصمام تنفيس سريع، ومفاتيح حدية ومرسل موضع لتأكيد الإغلاق واختبار الشوط الجزئي.*

معدل الإيقاف الكاذب: التكرار يزيد الأمان لكنه قد يزيد الإيقافات الكاذبة. فبنية 1oo2 في الحساسات تفصل إذا أخطأ أي حساس في اتجاه الفصل. ولهذا تُفضل 2oo3 في الحساسات حين يكون الإيقاف الكاذب مكلفًا، كما في التوربينات ووحدات الإنتاج الكبيرة، فهي تجمع HFT = 1 مع توافر مرتفع.

جدول مقارنة: بنى التصويت في وظائف السلامة

البنية	الأمان (يفصل عند الطلب)	الإيقافات الكاذبة	الإتاحة	التشخيص	الاستخدام المعتاد
1oo1	أساس المقارنة	أساس المقارنة	متوسطة	لا	SIL 1 غير الحرجة
1oo2	أعلى (تكفي قناة واحدة)	ضعف 1oo1	منخفضة	لا	SIL 2/3 حين يُقبل الإيقاف الكاذب
2oo2	أقل من 1oo1 (يجب اتفاق القناتين)	أقل كثيرًا من 1oo1 (يلزم عطلان آمنان معًا)	عالية	لا	الإتاحة أهم من الأمان (نادر في SIS)
2oo3	أعلى من 1oo1 وأقل قليلًا من 1oo2	قريب من 2oo2	عالية	بالمقارنة	SIL 2/3 للآلات الحرجة والقياسات التناظرية
1oo2D	مثل 1oo2 مع تشخيص يُقصي القناة المعطلة	مثل 2oo2 عند سلامة التشخيص	عالية	نعم (حاكم)	حلّالات المنطق المعتمدة
2oo4	مثل 2oo3 مع سماح بعطل ثانٍ	أقل من 2oo3	الأعلى	نعم	الحلّالات الرباعية (QMR)

كيف أختار؟ في الحساسات: 1oo2 حين يُحتمل الإيقاف الكاذب، و2oo3 حين يكلف الإيقاف الكاذب كما في التوربينات ووحدات الإنتاج الكبيرة، لأنها تعطي HFT = 1 مع توافر مرتفع؛ وفي العناصر النهائية: صمامان على التوالي (1oo2) حين يهيمن الصمام على

PFDavg كما في مثال 29.4؛ وفي حلّال المنطق تُقبل البنية المعتمدة التي يقدمها المورد (1oo2D أو TMR أو QMR). وحدّ هذا الجدول أنه لا يُظهر عامل السبب المشترك β ولا تغطية التشخيص، وهما ما يحدد فعليًا كم يبقى من فائدة التكرار. والخطأ الأكثر كلفة مضاعفة الصمامات من الطراز نفسه بملف واحد وهواء واحد واختبار في اليوم نفسه ثم احتساب PFD بنية 1oo2 كاملة، أو اختيار 1oo2 في حساسات آلة حرجة ثم العيش مع إيقافات كاذبة حتى يعتاد المشغلون تجاوز الوظيفة كلها كما في الحالة 29.8.

29.5 دورة حياة السلامة ومواصفة متطلبات السلامة

يعامل IEC 61511 السلامة الوظيفية دورة حياة كاملة، لا تصميمًا لمرة واحدة:

1. تقييم المخاطر وتحديد الطبقات: HAZOP ثم LOPA أو غيرها.
2. توزيع وظائف السلامة على الطبقات، وتحديد درجة SIL لكل وظيفة.
3. كتابة مواصفة متطلبات السلامة (Safety Requirements Specification – SRS).
4. التصميم والهندسة: البنية، واختيار الأجهزة، وحسابات التحقق، وبرمجة المنطق.
5. التركيب والتشغيل التجريبي والمصادقة (Validation): اختبار كل وظيفة من الحساس إلى الصمام.
6. التشغيل والصيانة: اختبارات الإثبات، وإدارة التجاوزات، وتسجيل الطلبات والأعطال.
7. التعديل عبر إدارة التغيير، ثم الإيقاف النهائي.

وتتخلل ذلك مراجعات تقييم السلامة الوظيفية (Functional Safety Assessment – FSA) في مراحل محددة، وأهمها قبل إدخال المواد الخطرة إلى المنشأة.

محتوى SRS لكل وظيفة: وصف الوظيفة والسيناريو الذي تحمي منه، والحساسات ونقاط الضبط ومنطق التصويت، والحالة الآمنة والإجراء المطلوب، ودرجة SIL وPFDavg المستهدف، وزمن سلامة العملية وزمن الاستجابة المطلوب، وفترة اختبار الإثبات

ومتطلباته، وإجراءات إعادة الضبط اليدوي، ومتطلبات التجاوز والإنذارات المرتبطة، وسلوك الوظيفة عند فشل الحساس أو فقدان التغذية أو الهواء، ومعدل الإيقاف الكاذب المقبول.

اختبار الإثبات لوظيفة سلامة: خطوات

اختبار الإثبات (Proof Test) هو ما يعيد PFD إلى قرب الصفر في الشكل 29-4، ولا يفعل ذلك إلا إذا اختبر الوظيفة كاملة من الحساس إلى الصمام وبتغطية معروفة. ويُنفَّذ وفق الإجراء المكتوب في SRS بالخطوات التالية (الشكل 29-6):

1. **التصريح والتجاوز:** احصل على تصريح العمل، وأبلغ غرفة التحكم، وفعّل التجاوز (Bypass) المعتمد للوظيفة في نظام السلامة مع تسجيله في سجل التجاوزات، وتأكد من وجود حماية بديلة (مراقبة يدوية أو وظيفة أخرى) طوال مدة الاختبار.
2. **الحساسات:** طبّق المتغير الحقيقي أو محاكاته عند كل حساس على حدة (ضغط من مضخة، أو حرارة من فرن جاف، أو مستوى بالتعبئة)، وسجّل القيمة التي عبر عندها الحساس نقطة الفصل كما وُجدت (As-Found)، ثم عاير إن لزم وسجّل القيمة بعد المعايرة (As-Left). واختبر تشخيصات الحساس (خرج أقل من 3.6 mA) إن كانت جزءًا من الوظيفة.
3. **المنطق:** تحقق من أن حلّال المنطق أطلق الفصل بالتصويت الصحيح (فحساسان من ثلاثة يجب أن يفصلا، وواحد يجب ألا يفصل)، وأن زمن الاستجابة ضمن المطلوب، وأن الإنذارات والرسائل ظهرت للمشغل، وأن سجل الأحداث (SOE) وثّق التسلسل.
4. **العنصر النهائي:** أزل التجاوز عن الصمام ودع أمر الفصل يصل إليه فعلًا: راقب سقوط الملف، وحركة الصمام إلى وضع الأمان، وزمن الشوط الكامل بساعة توقيت مقارنة بالحد المطلوب، وتأكيد مفاتيح الموضع، وتسرب المقعد إن كانت الوظيفة تشترط إحكامًا (اختبار الإحكام وفق الإجراء).

5. **الإعادة إلى وضع التشغيل:** أعد الصمام إلى وضع التشغيل، وتحقق من أن إعادة الضبط (Reset) لا تتم تلقائيًا بل بأمر المشغل، وأن التجاوزات كلها رُفعت.
6. **الإغلاق والتوثيق:** أعد الوظيفة إلى الخدمة، وأبلغ غرفة التحكم، وسجّل التاريخ والنتائج والانحرافات والقطع المستبدلة، وأي عطل خطر اكتُشف (فهو بيان لمعدل الفشل الفعلي مقارنة بالمفترض في الحساب)، وموعد الاختبار التالي.

وإذا كان اختبار الشوط الجزئي (Partial Stroke Test) جزءًا من الاستراتيجية فهو لا يغني عن اختبار الإثبات الكامل؛ بل يسمح بإطالة فترته لأنه يكشف جزءًا من أعطال الصمام (الالتصاق مثلًا) بين اختبارين كاملين.

الشكل 29-6: *تسلسل اختبار الإثبات لوظيفة سلامة، من التصريح والتجاوز إلى الحساسات فالمنطق فالعنصر النهائي، ثم الإعادة ورفع التجاوزات والتوثيق.*

29.6 دور مهندس التحكم في دراسة SIL وفي دورة الحياة

في جلسة SIL وLOPA:

- يشرح كل وظيفة إيقاف مقترحة: حساساتها، ومنطقها، وعناصرها النهائية، وزمن استجابتها.
- يتحقق من استقلال الطبقات المحتسبة: هل الإنذار المحتسب من مرسل مستقل؟ هل حلقة التحكم التي تُحتسب طبقةً ليست هي نفسها سبب الحدث؟
- يقدّر ما يمكن تحقيقه عمليًا: فالدراسة التي تطلب SIL 3 لوظيفة على صمام قديم دون تكرار لا تكفيها ورقة.
- ينبه إلى الإيقافات الكاذبة وأثرها، وإلى أن وظيفة مزعجة تُتجاوز كثيرًا تفقد قيمتها.

في التصميم: اختيار أجهزة معتمدة أو مثبتة بالاستخدام، وحساب PFDavg وقيود البنية، وتصميم الفصل بين SIS وBPCS في الحساسات والكابلات والمعالجات والتغذية، واختيار مبدأ الفشل الآمن (قطع التغذية للفصل)، وكتابة منطق مطابق لمصفوفة السبب والنتيجة، ومراجعته مراجعة مستقلة.

في التشغيل التجريبي: اختبار المصادقة لكل وظيفة من طرفها إلى طرفها، بإدخال الإشارة الحقيقية عند الحساس وقياس زمن إغلاق الصمام، لا بمحاكاة داخل المتحكم فقط.

في التشغيل: إعداد إجراءات اختبارات الإثبات وتنفيذها في مواعيدها، ومتابعة الطلبات الحقيقية على الوظائف والأعطال المكتشفة، وإدارة التجاوزات بتصريح ومدة محددة وإجراء تعويضي، وتحديث حسابات التحقق حين تتغير معدلات الفشل الفعلية أو فترات الاختبار.

29.7 هرمية الإيقاف الطارئ (ESD): المستويات والتسلسل

الإيقاف الطارئ ليس زرًا واحدًا بل هرم مستويات، كل مستوى يشمل ما تحته (وفق الممارسة الشائعة لدى المشغلين المستندة إلى API RP 14C، وتختلف التسمية والترقيم بين الشركات):

المستوى	الاسم الشائع	المُطلق	ما يُنفَّذ	مثال
0 / APS	التخلي عن المنشأة (Abandon Platform Shutdown)	يدوي من غرفة التحكم أو نقطة التجمع	كل ما في المستوى 1 + فصل كامل للكهرباء إلا الطوارئ + إعلان التخلي عن المنشأة والتوجه إلى زوارق النجاة (بحريًا، بقرار يدوي من قائد المنصة)	حريق لا يمكن السيطرة عليه على منصة
1 / ESD-1	إيقاف طارئ للمنشأة (Total Shutdown)	حريق مؤكد كبير، غاز مؤكد في مناطق متعددة، يدوي	عزل كل مداخل ومخارج الهيدروكربون (ESDV)، تفريغ (BDV) بتسلسل، إيقاف كل الآلات، فصل الكهرباء غير الأساسية	تسرب كبير في مجمع الغاز الرئيسي
2 / ESD-2 (USD)	إيقاف وحدة (Unit Shutdown)	غاز مؤكد أو حريق مؤكد في وحدة	عزل الوحدة وتفريغها وإيقاف آلاتها، مع بقاء الوحدات الأخرى	غاز مؤكد عند K-201: تُعزل وحدة الضغط
3 / PSD	إيقاف العملية (Process Shutdown)	حمايات العملية (PSHH، LSHH) عبر SIS	إيقاف معدة أو مسار عملية بلا تفريغ عادة	ضغط عالٍ جدًا في الفاصل: إغلاق دخوله
4 / ESD-4 (Equipment)	إيقاف معدة	حمايات الآلة (اهتزاز، سرعة زائدة، زيت)	إيقاف الآلة وحدها	اهتزاز عالٍ في K-201

قواعد التصميم التي يراجعها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس:

- **التسلسل الهرمي في المنطق:** المستوى الأعلى يطلق الأدنى تلقائيًا، ولا يمكن لإعادة ضبط مستوى أدنى أن تعيد تشغيل ما أوقفه مستوى أعلى.

- **تسلسل التفريغ (Blowdown Staging):** فتح كل صمامات BDV معًا يحمّل الشعلة فوق طاقتها؛ لذلك تُقسم على مراحل بتأخيرات (0، 30 s، 60 s...) وفق دراسة حمل الشعلة، وتُوثق التأخيرات في المصفوفة وتُختبر.
- **أزرار الإيقاف اليدوي:** في غرفة التحكم ونقاط التجمع ومخارج الوحدات، بغطاء واقٍ، سلكية إلى SIS لا عبر الشبكة، مع «إعادة ضبط» منفصلة؛ ويُختبر كل زر سنويًا على الأقل.
- **الواجهة بين F&G وSIS:** F&G يكشف ويطلب، وSIS ينفذ الإيقاف والعزل (ESDV/BDV) عبر تعشيق سلكي أو رابط سلامة معتمد ومكرر؛ أما الإطفاء والتهوية وPAGA فيُنفَّذ من F&G مباشرة (R46).
- **الأنظمة الأساسية أثناء ESD:** تبقى في الخدمة: مضخات الحريق، إضاءة الطوارئ، UPS، PAGA للأنظمة، تهوية غرفة البطاريات (أو تُدار بحسب غاز)، مولد الطوارئ؛ وتُدرج في قائمة «لا يُفصل بـ ESD-1» الموثقة.

الشكل 29-7: *هرم مستويات الإيقاف من إيقاف المعدة إلى التخلي عن المنشأة، وما يشمله كل مستوى، ومن يطلقه؛ ومسار الأمر من F&G إلى SIS إلى الصمامات، مع ما ينفذه F&G مباشرة.*

29.8 حالة ميدانية: وظيفة SIL 2 على الورق وSIL 0 في الميدان

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في مراجعة لأداء وظائف السلامة في محطة معالجة غاز، كانت وظيفة الإيقاف بالضغط المرتفع جدًا لخط الغاز الرئيسي مصنفة SIL 2، ومحسوبة على أساس اختبار إثبات سنوي لصمامي الإيقاف.

عند مراجعة السجلات، تبين أن الصمامين لم يُختبرا بشوط كامل منذ ثلاث سنوات، لأن الاختبار يحتاج إلى إيقاف الخط، والتوقفات المخططة أُجلت مرتين. وكانت الوظيفة نفسها في وضع التجاوز (Bypass) عدة أيام في كل شهر تقريبًا، لأن أحد المرسلات الثلاثة كان يعطي قراءات متذبذبة تسبب إنذارات، فاعتاد المشغلون تجاوزه ثم نسيان إعادته. ومع أن المنطق 2oo3، فإن التجاوز كان يُطبق على الوظيفة كاملة لا على المرسل وحده.

حين أعيد الحساب بفترة اختبار ثلاث سنوات وبنسبة وقت التجاوز الفعلية، خرج PFDavg أسوأ من 0.1، أي أن الوظيفة لم تكن تحقق حتى SIL 1. وعند فحص الصمامين في التوقف التالي، أُغلق أحدهما في زمن يبلغ ثلاثة أضعاف المواصفة بسبب ترسبات على الساق.

عولجت المشكلة بإضافة اختبار شوط جزئي شهري، وتعديل المنطق ليسمح بتجاوز مرسل واحد فتتحول الوظيفة مؤقتًا إلى 1oo2 بدل تجاوزها كلها، وربط التجاوز بتصريح ومؤقت ينذر بعد ثماني ساعات، وإصلاح المرسل المتذبذب، وجدولة الاختبار الكامل ضمن التوقفات بوصفه بندًا لا يُؤجَّل إلا بتقييم للمخاطر.

الدروس:

- درجة SIL تتحقق في الميدان بالاختبار والصيانة وإدارة التجاوز، لا في جدول الحساب.
- الوظيفة المزعجة تُتجاوز، والوظيفة المتجاوزة غير موجودة.
- تصميم التجاوز جزء من تصميم الوظيفة.

دور المهندس ودور الفني:

المرحلة	ماذا يقرر المهندس	ماذا ينفذ الفني ويقيس
التصميم	يحدد الدرجة بـ LOPA، ويحسب PFDavg وقيود البنية، ويكتب SRS، ويصمم التجاوز على مستوى الحساس لا الوظيفة	—
المصادقة والاختبار	يكتب إجراء اختبار الإثبات وتغطيته، ويحدد زمن الاستجابة المقبول	يحقن المتغير عند كل حساس، ويسجل «كما وُجد» و«كما تُرك»، ويقيس زمن شوط الصمام بساعة توقيت، ويتحقق من أن إعادة الضبط يدوية
التشغيل	يراجع سجلات الطلبات والأعطال ويحدّث الحساب إن اختلفت المعدلات الفعلية	يطبق التجاوز بتصريح ومؤقت، ويرفعه فور الانتهاء، ويبلّغ عن كل عطل خطر اكتُشف لأنه بيان لمعدل الفشل الحقيقي

29.9 الأخطاء الشائعة

- الظن أن جهازًا معتمدًا لـ SIL 3 يجعل الوظيفة SIL 3.
- احتساب أكثر من طبقة من نظام التحكم الأساسي في السيناريو نفسه، أو احتساب طبقة ليست مستقلة عن الحدث المسبب.
- احتساب إنذار ومشغل دون زمن كافٍ أو إجراء واضح.
- إهمال العناصر النهائية في الحساب أو التقليل من معدلات فشلها.
- اعتماد تكرار الصمامات مع مصادر سبب مشترك واضحة، مثل ملف واحد أو هواء واحد.
- فترات اختبار في الحساب لا تُطبق في الميدان.

- اختبارات مصادقة داخل المتحكم بالمحاكاة دون اختبار الأجهزة الحقيقية وزمن الإغلاق.
- تجاوز الوظائف دون تصريح ومدة وإجراء تعويضي.
- تعديل نقاط الضبط أو المنطق دون إدارة تغيير ومراجعة لمواصفة SRS.

29.10 ملخص

نظام السلامة الآلي مستقل عن التحكم الأساسي، ويتكون من وظائف لكل منها حساسات ومنطق وعناصر نهائية. ودرجة SIL مقياس لاحتمال فشل الوظيفة عند الطلب، من SIL 1 بعامل تخفيض 10 إلى 100 حتى SIL 4. وتُحدد الدرجة المطلوبة بدراسة SIL، وأشهر طرقها LOPA التي تضرب تكرار الحدث المسبب باحتمالات فشل الطبقات المستقلة وتقارن الناتج بالتكرار المقبول. ثم يُثبت التصميم بحساب PFDavg وقيود البنية والقدرة المنهجية، ويُحافظ عليه طوال دورة الحياة باختبارات الإثبات وإدارة التجاوز والتغيير. ومهندس التحكم حاضر في كل ذلك: يشرح الوظائف ويتحقق من الاستقلال في الدراسة، ويصمم ويحسب، ويختبر ويصون.

وفي الفصل التالي: الفصل 30، «التصميم التفصيلي لأنظمة الحريق والغاز (F&G)»، يطبق هذا المنطق على طبقة التخفيف: كشف بتغطية مدروسة، وتصويت، وإطفاء، وواجهة مع هرم الإيقاف الذي عرضه القسم 29.7.

29.11 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الأجزاء الثلاثة لوظيفة السلامة الآلية؟ ولماذا يجب أن تكون مستقلة عن التحكم الأساسي؟
2. وظيفة سلامة قيمة PFDavg لها 0.004. ما درجتها وعامل تخفيض المخاطرة؟
3. اذكر الشروط الأربعة للطبقة المستقلة في LOPA.

4. في مثال LOPA في 29.3، أعد الحساب إذا كان التكرار المقبول 1×10^{-6} في السنة.
5. لماذا لا يُحتسب لنظام التحكم الأساسي أكثر من طبقة واحدة في السيناريو نفسه غالبًا؟
6. احسب PFDavg لصمام إيقاف واحد معدل λDU له 1.5×10^{-6} في الساعة بفترة اختبار سنتين.
7. ما أثر عامل السبب المشترك β في فائدة تكرار الصمامات؟ اذكر ثلاثة مصادر له.
8. لماذا تُفضل بنية 2oo3 في حساسات وظائف إيقاف التوربينات؟
9. عدّد ستة بنود أساسية في مواصفة متطلبات السلامة لوظيفة واحدة.
10. في الحالة 29.8، ما العاملان اللذان أفقدا الوظيفة درجتها؟ وكيف عولجا؟

مراجع الفصل: عرض تدريبي «Understanding Safety Integrity Level»: مفاهيم السلامة والمخاطر، ودرجات SIL، والمعايير، وطبقات الحماية، وطرق المصفوفة ومخطط المخاطر وLOPA؛ IEC 61508 وIEC 61511 (ANSI/ISA-61511)؛ CCPS، Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment؛ ISA-TR84.00.02 لحساب PFDavg؛ exida، Safety Equipment Reliability Handbook لمعدلات الفشل؛ API RP 14C لهرمية الإيقاف (29.7)؛ R46 (مواصفة نظام الحريق والغاز) للواجهة بين F&G وSIS؛ خبرة المؤلف في وظائف الإيقاف في محطات التوليد ومنشآت النفط والغاز.

الفصل 30: التصميم التفصيلي لأنظمة الحريق والغاز (F&G): الكشف والإطفاء والتصويت والاختبار

> **لمن هذا الفصل:** لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم الذي يراجع مخطط توزيع كاشفات الحريق والغاز، أو يكتب مصفوفة السبب والنتيجة، أو يقبل نظام F&G في اختبار المصنع، أو يُسأل في الميدان: «لماذا لم يُطلق الإطفاء مع أن كاشفًا أعطى إنذارًا؟». يشرح تقنيات الكاشفات في القسمين 30.4 و30.5، ويبني على طبقات الحماية وSIL في الفصل 29، وعلى المناطق الخطرة في الفصل 26، ويرتبط بحمايات المعدات في الفصل 31 وبحارقات المراجل في الفصل 36.
>
> **الفكرة الأساسية:** نظام الحريق والغاز ثلاثة أجزاء لا ينفصل بعضها عن بعض: **كشف** موزع بدراسة تغطية لا بتوزيع منتظم، و**منطق** يقرر بالتصويت متى يُنذر ومتى ينفّذ، و**حماية فعّالة** (إطفاء وعزل وتنفيس وإخلاء) تُطلق على المستوى الصحيح. الخطأ في أي جزء يُبطل الجزأين الآخرين: كاشف في مكان خاطئ لا يرى التسرب، ومنطق 1oo1 على الإطفاء يفرغ الغاز على الناس بإنذار كاذب، وإطفاء بلا تأخير ما قبل الإطلاق يُغلق الباب على من بالداخل.

30.1 فلسفة الحريق والغاز: ماذا نريد من النظام قبل أن نختار كاشفًا

تبدأ كل مواصفة جادة لأنظمة F&G (مثل R46 لمشروع تطوير حقل غاز) بغرض واضح: مراقبة مستمرة لكل منطقة قد يحدث فيها حريق أو تجمع غاز قابل للاشتعال أو سام؛ وإتاحة إجراءات حماية يدوية وآلية تعزل مصدر التسرب وتفرغ المحتوى الهيدروكربوني

وتقلل احتمال الاشتعال وتطلق الإغراق أو الإطفاء لمنع التصعيد؛ وتنبيه الأفراد في الموقع وفي مكان مأهول باستمرار إلى وجود الخطر وموقعه العام. ومن هذا الغرض تُشتق الوثائق الأربع التي يعمل بها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس:

الوثيقة	ما تحدده	من يملكها
فلسفة الحريق والغاز (F&G Philosophy)	أنواع الخطر بكل منطقة، مستويات الإنذار، مبادئ التصويت، الإجراءات التنفيذية العامة	السلامة مع الأجهزة
دراسة التغطية ومخطط المواقع (F&G Mapping / Location Layout)	نوع كل كاشف وموضعه وارتفاعه واتجاهه، ونقاط الإنذار اليدوي	الأجهزة بأداة نمذجة
مصفوفة السبب والنتيجة (Cause & Effect Matrix)	لكل سبب (كاشف أو مجموعة مصوَّتة) الأثر: إنذار، إيقاف، عزل، إطفاء، تهوية	الأجهزة مع العمليات والسلامة
مواصفة نظام F&G (System Specification)	حلّال المنطق، والمدخلات والمخرجات، والتكرار، والتشخيص، والاختبار، والتوثيق	الأجهزة

ما تحدده المواصفة النموذجية لحلّال المنطق (مستخلص من R46): حلّال منطق معتمد SIL 3 (TÜV) فئة 5 أو 6) من نوع 1oo2D أو TMR، مع إنذار مخصص عند تدهور النظام إلى قناة واحدة ودون قيد زمني على البقاء في هذه الحالة؛ تقنية مجرَّبة خمس سنوات على الأقل في منشآت نفطية؛ استبدال أي معالج أو بطاقة أو حساس ميداني دون إيقاف؛ إتاحة 99.5% على الأقل؛ لا يقل معدل المسح عن 4 مرات في الثانية؛ تشخيص كل الدوائر كل 500 ms على الأكثر مع كشف «العالق مفتوحًا» و«العالق مغلقًا» لكل نقطة؛ 20% احتياطي مركّب وموصّل من كل نوع I/O و60% حمولة قصوى للمعالج و50% للشبكة؛ تغذية 24 V DC من مغذيين أحدهما من UPS يكفي 8 ساعات؛ وبطاقات لا تزيد على 16 قناة لتقليل أثر عطل البطاقة.

قاعدة الطاقة التي تختلف عن SIS: خرج نظام F&G نحو الإطفاء وصفارات الإنذار **يُنشَّط عند الحدث (Energize-to-Activate)** لا يُفصل، لأن فقد الجهد أو انقطاع كابل لا يجوز أن يفرغ خزان CO_2 على من في الغرفة. ولذلك تُراقَب هذه الدوائر بمراقبة الخط (Line Monitoring) بمقاومة نهاية الخط لكشف الانقطاع والقصر، وتُحمى كابلاتها من الحريق (Fire-Proofing) لأنها يجب أن تعمل أثناء الحريق نفسه. أما مخرجات F&G إلى الأنظمة الأخرى (إيقاف HVAC، فصل MCC، إيقاف توربين) فتكون **تُفصل تغذيتها للإيقاف (De-Energize-to-Trip)** سلكية، لأن الجانب الآمن هناك هو الإيقاف. هذه التفرقة بين «آمن عند الفقد» و«غير آمن عند الفقد» في النظام الواحد هي أول ما يُراجع في مخططات الحلقات.

الشكل 30-1: *مبدأ الطاقة في مخرجات نظام الحريق والغاز: (أ) خرج الإطفاء والصفارات يُنشَّط عند الحدث (Energize-to-Activate) ويُراقب خطه بمقاومة نهاية الخط (EOL) لكشف الانقطاع والقصر؛ (ب) خرج الواجهات إلى HVAC وMCC والتوربين يُفصل عند الإيقاف (De-Energize-to-Trip).*

30.2 كاشفات الحريق: ماذا يكشف كل نوع وأين يوضع

في القسم 30.4 تفصيل كاشفات اللهب؛ وهنا خريطة الاختيار حسب المكان:

المكان	الخطر المتوقع	الكاشف الأول	الكاشف المكمل	لماذا
منطقة عمليات مفتوحة (ضواغط، فواصل، مضخات)	حريق بركة أو نافورة هيدروكربونية	لهب IR3 (أو UV/IR بمخروط 90 إلى 120°)	كاشف حرارة خطي على المضخات، كاميرات	اللهب يظهر قبل الحرارة في الهواء الطلق؛ الدخان يتشتت
حاوية توربين غازي أو ضاغط مغلقة	حريق زيت تزييت أو غاز وقود	لهب UV/IR (سرعة) مع حرارة معدل ارتفاع	غاز داخل الحاوية عند مخرج التهوية	الحاوية مغلقة وسريعة التسخين؛ يلزم كشف سريع قبل الإطفاء الغازي
غرفة تحكم وغرف معدات كهربائية	حريق كابلات ولوحات (دخان أولًا)	دخان بصري في السقف وتحت الأرضية المرتفعة	شفط عينات هواء عالي الحساسية (VESDA) في غرف الخوادم	الدخان يسبق اللهب بدقائق في الأحمال الكهربائية
مباني السكن والمكاتب	حريق عادي	دخان بصري/أيوني، حرارة في المطابخ	نقاط إنذار يدوي عند المخارج	وفق NFPA 72 ولوحة إنذار الحريق FACP
صهاريج التخزين (سطح عائم)	حريق حافة السطح	كاشف حرارة خطي (كابل حراري) حول الحافة	لهب IR3 على الجدار المقابل	الحافة مكان محدد يصعب رؤيته من بعيد

المكان	الخطر المتوقع	الكاشف الأول	الكاشف المكمل	لماذا
أرصفة التحميل والشعلة	حريق على الرصيف أو بجوار المضخات	لهب IR3 بعيد المدى	حرارة على أذرع التحميل	مساحة واسعة وقليلة العوائق
مبادلات وأفران	حريق تسرب وقود أو زيت ساخن	لهب IR3 مع حجب لهب الفرن المقصود	حرارة	يجب ألا يرى الكاشف لهب الحارقات العادي

كيف أختار؟ ابدأ من طبيعة الحريق المتوقع في المكان لا من نوع الكاشف: لهب في الهواء الطلق وحول المعدات الهيدروكربونية، ودخان حيث تسبق الكابلات واللوحات اللهب بدقائق، وحرارة خطية حيث يكون الحريق في موضع محدد يصعب رؤيته كحافة الصهريج. والجدول يعطي الكاشف الأول والمكمل، لكنه لا يعطي العدد ولا المواضع؛ فهذه تُثبت بدراسة التغطية والحريق التصميمي لا بالمسطرة. والخطأ الأكثر كلفة أن يوضع كاشف لهب حيث يرى لهب الحارقات المقصود أو وهج اللحام، أو أن يُظن أن كاشف اللهب يغني عن كاشف الغاز فيمر التسرب بلا إنذار حتى يشتعل.

قواعد الوضع العملية لكاشفات اللهب:

1. حدد أولًا **الحريق التصميمي** (مثلًا حوض هبتان 0.1 m² على بعد 15 m في الهواء الطلق) لأن مدى الكاشف في ورقة بياناته مقيد بهذا الشرط، ويقل إلى النصف تقريبًا عند 45° عن المحور وأكثر مع الضباب أو الأمطار.
2. تغطية مزدوجة على الأقل لكل هدف عالي المخاطر (مضخة هيدروكربون ساخن، ضاغط) من زاويتين مختلفتين، حتى يصوّت النظام 2ooN وحتى لا يحجب عمود أو خزان الرؤية.

3. الارتفاع 3 إلى 5 m بميل 30 إلى 45° نحو الأسفل، بعيدًا عن مصادر الوهج المتذبذب (الشعلة، لحام محتمل، أسطح معدنية عاكسة) ومع مراعاة اتجاه الشمس المنخفضة.
4. الوصول للتنظيف والاختبار: كاشف على ارتفاع 8 m بلا منصة لن يُنظف ولن يُختبر.
5. في الحاويات المغلقة يُحسب زمن الكشف مع زمن التهوية: الحاوية بتدفق هواء عالٍ تسحب اللهب الصغير بعيدًا عن الكاشف، فيُضاف كاشف عند مخرج التهوية.

قواعد كاشفات الدخان والحرارة في المباني: المساحة النموذجية لكاشف الدخان النقطي نحو 80 m² في سقف مستوٍ بارتفاع حتى 3 m ونحو 40 m² للحرارة، وتقل مع الأسقف العالية وكمرات السقف والتهوية القوية؛ تُوضع كاشفات تحت الأرضيات المرتفعة وفوق الأسقف المستعارة حيث تمر الكابلات؛ وفي غرف الخوادم يُفضل الشفط الهوائي عالي الحساسية لأن التبريد القوي يخفف الدخان. ونقاط الإنذار اليدوي (MACP) عند مخارج الطوارئ وعلى طرق الهروب بمسافة لا تزيد على نحو 30 m سيرًا في مناطق العمليات.

جدول مقارنة: كاشفات الدخان

النوع	كيف يعمل	الاستخدام المعتاد	ما يفسده
ضوئي (Photoelectric / Optical)	جسيمات الدخان تشتت الضوء داخل حجرة الكشف	الغرف والمكاتب والممرات؛ الحرائق المتوهجة	الغبار والبخار والحشرات
تأيّني (Ionization)	الدخان يغيّر تيار التأيّن بين قطبين	الحرائق المشتعلة سريعة اللهب؛ الأنواع الأقدم	مصدر مشع صغير، حساس لتيارات الهواء والطهي

النوع	كيف يعمل	الاستخدام المعتاد	ما يفسده
شعاعي (Beam)	انخفاض شدة شعاع بين مرسل ومستقبل عبر القاعة	المستودعات والقاعات العالية والصالات	المحاذاة، الاهتزاز، الرافعات التي تقطع الشعاع
بالشفط (Aspirating – ASD)	عينات هواء عبر أنابيب مثقبة إلى وحدة كشف ليزرية عالية الحساسية	الإنذار المبكر جدًا في غرف الأجهزة والكابلات والخوادم (VESDA اسم تجاري شائع)	انسداد الأنابيب، تدفق العينة، الغبار
متعدد الحساسات (Multi-Sensor)	دخان + حرارة (وأحيانًا CO) بخوارزمية	تحسين التمييز بين الحريق والإنذارات غير المرغوبة	التهيئة الخاطئة للخوارزمية

جدول مقارنة: كاشفات الحرارة

النوع	متى يُنذر	ملاحظة الاختيار
درجة ثابتة (Fixed Temperature)	عند تجاوز درجة التشغيل (مثل 57 أو 70 أو 90 °C)	تُختار درجته فوق أعلى حرارة طبيعية للمكان بهامش
معدل الارتفاع (Rate-of-Rise)	حين ترتفع الحرارة أسرع من حد (نحو 8 إلى 10 °C/min)	لا ينتظر بلوغ درجة ثابتة؛ لا يناسب الأماكن ذات التسخين السريع الطبيعي (قرب الأفران)
مركّب (Fixed + ROR)	بأي من الشرطين	الأشيع في الحاويات وغرف المعدات
خطّي (Linear Heat Detection)	سخونة في أي نقطة على طول كابل حراري أو ليف بصري	مسارات الكابلات، الأنفاق، حواف الصهاريج العائمة، السيور الناقلة

الفرق العملي: كاشف الدخان ينتظر وصول الدخان إليه، وكاشف الحرارة ينتظر أثر الحرارة، وكاشف اللهب يرى الإشعاع لحظيًا؛ فلا يُستبدل أحدها بالآخر دون دراسة طبيعة

الحريق والبيئة، و«كاشف الحريق (Fire Detector)» اسم عام يشمل الثلاثة لا نوعًا رابعًا. وكاشف اللهب ليس بديلًا عن كاشف الغاز: تسرب الغاز قبل اشتعاله لا يعطي أي إنذار لهب.

30.3 كاشفات الغاز: التوزيع بدراسة التغطية لا بالمسطرة

تقنيات الكاشفات في القسم 30.5. السؤال هنا: كم كاشفًا وأين؟ الجواب لا يُؤخذ من قاعدة «كاشف لكل 5 أمتار» إلا بوصفها نقطة بداية، بل من **دراسة تغطية** بإحدى طريقتين:

- **التغطية الجغرافية (Geographic Coverage):** تُقسم المنطقة إلى شبكة نقاط ويُحسب لكل نقطة كم كاشفًا «يراها» (سحابة كروية بقطر تصميمي، عادة 5 m للغاز القابل للاشتعال في المناطق المفتوحة، يوضع مركزها على نقطة الشبكة، وأي كاشف داخلها يكشفها). ومن أمثلة الأهداف التي يعرضها ISA-TR84.00.07 (وهي أمثلة غير ملزمة): تغطية 1ooN لنحو 90% من المنطقة و2ooN لنحو 60 إلى 80% في المناطق عالية المخاطر.
- **التغطية بالسيناريو (Scenario-Based):** تُنمذج تسربات محددة (فلنجة ضاغط، سدادة مضخة) مع الرياح السائدة، ويُتحقق من أن السحابة القابلة للاشتعال تصل إلى كاشفين قبل أن تبلغ حجمًا خطرًا (مثلًا حجم يعادل 5 إلى 10% من حجم المنطقة المزدحمة).

منطقة	الغاز	ما يوضع	ارتفاع وموضع	الملاحظة
ضواغط ومضخات في الهواء الطلق	ميثان/غاز طبيعي	نقطية IR بشبكة 5 إلى 8 m + خطية على حدود الوحدة في اتجاه الريح	النقطية 0.5 إلى 1 m فوق مصدر التسرب للغازات الخفيفة، الخطية على ارتفاع 1 إلى 2 m	الخطية تكشف السحابة الكبيرة التي تفلت بين النقطية

منطقة	الغاز	ما يوضع	ارتفاع وموضع	الملاحظة
مضخات LPG وبروبان	غاز أثقل من الهواء	نقطية على ارتفاع 0.3 إلى 0.5 m من الأرض	قرب الأحواض والحفر والمصارف	يتجمع الغاز في المنخفضات
رؤوس الآبار والفواصل الحامضة	H_2S	كهروكيميائية على ارتفاع 0.5 إلى 1 m عند نقاط العمل والممرات	مع كاشفات شخصية للعمال	الإنذار 5/10 ppm يتعلق بحد التعرض
مداخل هواء غرفة التحكم والحاويات المكيفة	ميثان و H_2S	نقطية في مجرى الهواء قبل المداخل (Damper)	داخل المجرى مع 2oo2 أو 2oo3	تغلق المداخل وتعزل التكييف قبل دخول الغاز؛ الإنذار المنخفض أقل 10% (LEL)
مداخل هواء التوربينات والمحركات	ميثان	2oo3 على مرشح مدخل الهواء	داخل حجرة المرشح	الغاز في مدخل الضاغط يسبب ارتفاع سرعة وانفجارًا
داخل حاوية التوربين	غاز الوقود	نقطية عند مخرج تهوية الحاوية (2 على الأقل)	في مجرى العادم	التهوية تسحب كل تسرب إلى نقطة واحدة معروفة
غرف البطاريات	هيدروجين	نقطية حفازة/كهروكيميائية للهيدروجين في السقف	أعلى نقطة	IR لا يرى الهيدروجين
مراجل وأفران بالغاز	غاز الوقود	نقطية قرب مجمع الغاز والحارقات	حسب كثافة الغاز	ضمن BMS وF&G معًا

مثال محلول (تغطية جغرافية أولية لمنطقة ضواغط):

- **المعطيات:** منطقة ضاغطي غاز مفتوحة 30 m × 20 m، غاز طبيعي (أخف من الهواء)، سحابة تصميمية بقطر 5 m، والمطلوب تغطية 1ooN لـ 90% من المساحة و2ooN لـ 70% حول الضاغطين.
- **الافتراضات:** لا عوائق كبيرة، وكل كاشف نقطي يكشف سحابة مركزها ضمن 2.5 m منه (أي يكشف أي تسرب يصل مركزه ضمن دائرة قطرها 5 m)، وبداية بشبكة منتظمة.
- **الحل بالوحدات:**
  - عدد كاشفات الشبكة المنتظمة = (الطول ÷ خطوة الشبكة + 1) × (العرض ÷ خطوة الشبكة + 1)
  - بشبكة 5 m × 5 m: (30 ÷ 5 + 1) × (20 ÷ 5 + 1) = 7 × 5 = 35 كاشفًا، وهذا مفرط.
  - بشبكة 7.5 m: 4 × 5 = 20 كاشفًا، ولا تحقق 2ooN حول الضاغطين.
  - الحل الهندسي: شبكة 7.5 m للمنطقة العامة (20 كاشفًا) + 4 كاشفات إضافية على مسافة 3 إلى 4 m حول كل ضاغط (8 كاشفات) + كاشفان خطيان على الحدين المعرضين للريح = 28 نقطيًا + 2 خطيًا.
  - ثم تُحسب التغطية بالأداة وتُنقل الكاشفات إلى مواضع الفلنجات والسدادات الفعلية بدل نقاط الشبكة.
- **معنى النتيجة:** العدد الأولي بالمسطرة ليس التصميم؛ التصميم هو نقل الكاشفات إلى مصادر التسرب الحقيقية (فلنجة تصريف الضاغط وسدادة العمود) وإلى اتجاه الريح، ثم إثبات النسبة المئوية بالأداة وتوثيقها في مخطط المواقع. وكل كاشف يُضاف يزيد الاختبار السنوي والإنذارات الكاذبة،

فالأكثر ليس الأفضل.

ما يُضاف إلى تقنيات القسم 30.5 عند التصميم: كاشف التأيّن الضوئي – PID (Photoionization Detector) يؤيّن الأبخرة العضوية المتطايرة (VOC) بمصباح فوق بنفسجي ويقيسها بـ ppm، وهو للمركبات التي تقل طاقة تأينها عن طاقة المصباح لا كاشفًا عامًا لكل الغازات؛ ويُقاس الأكسجين بخلية كهروكيميائية مخصصة بوحدة % حجمًا (الإنذار عند نقص إلى 19.5% أو زيادة فوق 23.5%). و**قراءة 20% LEL لا تعني أن الغاز يشكل 20% من الهواء**، بل أن التركيز بلغ خُمس الحد الأدنى للاشتعال لذلك الغاز (للميثان: 1% = 20% LEL حجمًا). وكاشف IR الهيدروكربوني لا يرى الهيدروجين، والكاشف الخطي يعطي LEL·m لا تركيزًا نقطيًا (الشكل 30-4).

نقاط الإنذار وما يترتب عليها (القيم من R46 كمثال، وتحددها فلسفة كل مشروع):

المستوى	الغاز القابل للاشتعال	H_2S	ما يحدث
إنذار منخفض (Low)	20 إلى 25% LEL على كاشف واحد	5 ppm	إنذار صوتي ومرئي في غرفة التحكم وفي المنطقة؛ لا إجراء تنفيذي؛ المشغل يتحقق
إنذار مرتفع / غاز مؤكد (High / Confirmed)	60% LEL على كاشف واحد، أو 20% على كاشفين في منطقة واحدة (2ooN)	10 ppm على كاشفين	إجراءات تنفيذية: عزل مصادر الاشتعال (فصل MCC غير Ex)، إغلاق مداخل التهوية، إيقاف المعدات، ثم ESD إن تأكد بالتصويت
عطل الكاشف (Fault)	إشارة خارج نطاق القياس، عادة 3.6 mA أو أقل أو 21 mA أو أكثر وفق NAMUR NE43 أو مستويات المورّد	كذلك	إنذار عطل، ويُعامل الكاشف في التصويت كما تحدد الفلسفة (انظر 30.7)

الأشيع في المواصفات أن يكون الإدخال التناظري 0 إلى 22 mA (أو 0 إلى 24 mA) حتى تُقرأ إشارات العطل فوق 20 mA، ويحمل النطاق 4 إلى 20 mA القياس (LEL،%

LEL·m، ppm)، وما يتجاوز هامشًا صغيرًا دون 4 mA أو فوق 20 mA (عادة 3.6 mA فأقل أو 21 mA فأكثر) يُعرَّف عطلًا بمستويات يوثقها المورّد (تثبيط، معايرة، عطل بصري)، ويجب أن يُثبت المورّد أن الجهاز لا يمكن أن يفشل في حالة الإنذار.

الشكل 30-2: *مقياس إشارة كاشف الغاز على دخل 0 إلى 22 mA. العطل عند 3.6 mA فأقل أو 21 mA فأكثر، والقياس من 4 إلى 20 mA يقابل 0 إلى 100% LEL، مع عتبتي الإنذار المنخفض 20% LEL (7.2 mA) والمرتفع 60% LEL (13.6 mA).*

الشكل 30-3: *مخطط توزيع نموذجي لمنطقة ضاغطين في الهواء الطلق: كاشفات غاز نقطية على شبكة مع تكثيف حول مصادر التسرب، وكاشفان خطيان على الحدين اللذين تتجه إليهما الريح السائدة والثانوية، وكاشفا لهب من زاويتين لكل ضاغط، ونقاط إنذار يدوي عند المخارج؛ ودائرة السحابة التصميمية بقطر 5 m.*

30.4 كشف اللهب

تُستخدم كاشفات اللهب في مجالين مختلفين تمامًا، والخلط بينهما شائع:

1. **كشف الحريق (Fire Detection):** ضمن نظام الحريق والغاز (F&G) لكشف لهب غير مرغوب فيه في مساحة مفتوحة أو حجرة معدات.
2. **مراقبة اللهب المقصود (Flame Monitoring / Flame Scanners):** ضمن نظام إدارة الحارقات (BMS) في المراجل والأفران، أو في غرف احتراق التوربينات الغازية، للتأكد من وجود اللهب؛ وغيابه يعني قطع الوقود فورًا قبل تراكم خليط متفجر.

لماذا الأشعة فوق البنفسجية وتحت الحمراء؟ لأن ضوء الشمس الواصل إلى الأرض شبه خالٍ من الأشعة فوق البنفسجية بين نحو 185 و260 nm (تمتصها طبقة الأوزون)، ومن الأشعة تحت الحمراء عند نحو 4.3 – 4.4 µm (يمتصها ثاني أكسيد الكربون في الجو)، بينما يبثّ اللهب في هذين النطاقين بوضوح. فالكاشف «ينظر» حيث لا ترى الشمس.

الشكل 30-4: *توضيح نوعي لنافذتي كشف اللهب: فوق البنفسجية القصيرة ونطاق ثاني أكسيد الكربون عند 4.4 µm، حيث يكاد إشعاع الشمس يختفي.*

النوع	المبدأ	المزايا	القيود ومصادر الإنذار الكاذب
فوق بنفسجي (UV)	أنبوب غازي حساس للنطاق 185 – 260 nm	سريع جدًا، يكشف لهب الهيدروجين والمعادن	لحام القوس الكهربائي، البرق، الأشعة السينية، ويحجبه الدخان وطبقات الزيت على النافذة
تحت أحمر أحادي (Single IR)	كاشف عند 4.4 µm مع تحليل وميض اللهب (1 – 20 Hz)	يرى عبر الدخان	الأجسام الساخنة المتذبذبة وانعكاسات الشمس، ولا يكشف لهب الهيدروجين النقي

النوع	المبدأ	المزايا	القيود ومصادر الإنذار الكاذب
فوق بنفسجي وتحت أحمر (UV/IR)	يشترط إشارة النطاقين معًا	مناعة عالية ضد الإنذار الكاذب	يتأخر أو يفشل إذا حُجب أحد النطاقين بالدخان
ثلاثي الأشعة تحت الحمراء (IR3 / Multi-IR)	نطاق 4.4 µm مع نطاقين مرجعيين وخوارزمية مقارنة	أبعد مدى (عشرات الأمتار لحريق هيدروكربوني قياسي)، ومناعة عالية	أغلى ثمنًا؛ وللهيدروجين توجد طرازات خاصة بنطاق بخار الماء
كاشف اللهب بالفيديو (Video Flame Detection)	تحليل صورة كاميرا	يعطي المشغل صورة للتحقق	يحتاج إلى إضاءة ومعالجة، ويُستخدم مكملًا في الغالب

التصميم والتركيب:

- **مخروط الرؤية (Cone of Vision):** عادةً 90° إلى 120°، وتقل الحساسية بالابتعاد عن المحور؛ ومدى الكشف مقيد بالحريق التصميمي (انظر القسم 30.2).
- **دراسة التغطية (Fire & Gas Mapping):** تُحدد مواضع الكاشفات بنمذجة ثلاثية الأبعاد تراعي العوائق، لا بتوزيع منتظم على المخطط (ISA-TR84.00.07).
- **الميل والتنظيف:** تُمال الكاشفات إلى الأسفل قليلًا حتى لا تتراكم المياه والغبار على النافذة، وتُفضَّل الطرازات ذات الفحص الذاتي للنافذة (Optical Integrity Test).
- **التصويت:** كاشف واحد يعطي إنذارًا، وكاشفان مؤكدان (2ooN) يبدآن الإجراء التنفيذي كإطلاق الإطفاء أو الإيقاف الطارئ، حسب مصفوفة السبب والنتيجة (Cause & Effect).

- **الاعتماد:** مواصفات الأداء مثل FM 3260 وEN 54-10، مع شهادة الحماية من الانفجار وشهادة SIL عند الحاجة.

ماسحات اللهب في المراجل والتوربينات: تُستخدم الماسحات فوق البنفسجية عادةً للهب الغاز، وتحت الحمراء للهب الفحم والوقود الثقيل. وفي المراجل متعددة الحارقات تحديدًا، يجب أن يميّز الماسح لهب حارقه من لهب الحارقات المجاورة (بتمييز تردد الوميض وزاوية الرؤية)، وإلا رأى لهبًا غير موجود. وتتضمن متطلبات NFPA 85 فحصًا ذاتيًا للماسحات التي تعمل باستمرار (مثل الغالق الميكانيكي الذي يحجب اللهب دوريًا ليتحقق من هبوط الإشارة). وفي التوربينات الغازية تُركّب عدة ماسحات على غرف الاحتراق مع منطق تصويت يحدده الصانع لإعلان «فقدان اللهب» (Loss of Flame).

30.5 كاشفات الغاز النقطية والخطية

مفاهيم لا بد منها:

- **حد الاشتعال الأدنى (LEL – Lower Explosive Limit):** أقل تركيز حجمي للغاز في الهواء يشتعل. الميثان نحو 5% حجمًا، والبروبان نحو 2.1%، والهيدروجين نحو 4%. ويعطي IEC 60079-20-1 قيمًا أدنى قليلًا (الميثان 4.4% والبروبان 1.7%)، فيُعاير الكاشف وفق المعيار الذي يعتمده المشروع. وكاشفات الغازات القابلة للاشتعال يكون مداها عادةً من 0 إلى 100% LEL.
- **الغازات السامة:** تُقاس بـ ppm، وأشهرها كبريتيد الهيدروجين (H_2S) في النفط والغاز الحامضي، وأول أكسيد الكربون والأمونيا والكلور.
- **كثافة الغاز نسبةً إلى الهواء:** تحدد ارتفاع التركيب مبدئيًا: الهيدروجين والميثان يصعدان، والبروبان وH_2S يميلان إلى الأسفل. لكن حرارة الغاز وضغط التسرب وحركة الهواء قد تغيّر ذلك، فالقاعدة بداية لا بديل عن دراسة التغطية.

التقنية	الغازات	المزايا	القيود
الحبيبة الحفازة (Catalytic Bead / Pellistor)	الغازات القابلة للاشتعال بما فيها الهيدروجين	رخيصة، وتستجيب لمعظم الوقودات	تحتاج إلى أكسجين، وتُسمَّم بالسيليكون ومركبات الكبريت والرصاص، وقد تعطي قراءة مضللة فوق 100% LEL، ولا تكشف التسمم ذاتيًا
الأشعة تحت الحمراء النقطية (Point IR / NDIR)	الهيدروكربونات (امتصاص عند نحو 3.3 – 3.4 µm) وCO_2	لا تتسمم، وتعمل دون أكسجين، وتكشف أعطالها ذاتيًا، وفترات معايرتها أطول	لا تكشف الهيدروجين، واستجابتها تختلف حسب نوع الهيدروكربون
الخطية مفتوحة المسار (Open Path IR)	الهيدروكربونات بوحدة LEL·m	تغطي مسارًا طويلًا (عشرات إلى نحو 200 m) وتكشف السحب الغازية على حدود الوحدات	لا تعطي التركيز في نقطة، وتتأثر بالضباب الكثيف واهتزاز الحوامل وحجب المسار
الكهروكيميائية (Electrochemical)	الغازات السامة: H_2S وCO وCl_2 و NH_3	حساسية عالية بـ ppm وانتقائية جيدة	عمر محدود (عادةً 2 – 3 سنوات)، وتتأثر بالحرارة العالية والجفاف، ولها تداخلات مع غازات أخرى
أشباه الموصلات (MOS / Semiconductor)	H_2S والهيدروكربونات	تتحمل الحرارة والجفاف	قليلة الانتقائية، وقد تغفو بعد فترات طويلة من غياب الغاز
كاشفات التسرب بالموجات فوق الصوتية (Ultrasonic Gas Leak)	أي غاز مضغوط يتسرب	تسمع التسرب نفسه مهما تشتت الغاز بالرياح	لا تقيس التركيز، وتحتاج إلى ضبط ضجيج الخلفية

كيف أختار؟ القاعدة العملية: تحت حمراء نقطية للهيدروكربونات حيث يُخشى التسمم أو يغيب الأكسجين، وحبيبة حفازة حيث يوجد هيدروجين لأن IR لا يراه، وكهروكيميائية للغازات السامة بـ ppm، وخطية على الحدود لكشف السحابة الكبيرة التي تفلت بين النقطية. وما لا يظهر في الجدول: زمن الاستجابة T90 وفترة المعايرة وتوافر غاز المعايرة في الموقع، وهي التي تحدد كلفة الاختبار السنوي. والخطأ الأكثر كلفة تركيب كاشف حفاز في بيئة فيها سيليكون أو كبريت فيتسمم بصمت ويبقى صفره «مطمئنًا» أسابيع بلا حماية (القسم 30.15).

> **مثال محلول (الكاشف الخطي):** كاشف خطي يقرأ 1 LEL·m، وهذه القراءة يمكن أن تعني سحابة بطول 1 m عند 100% LEL على المسار، أو سحابة بطول 5 m عند 20% LEL، أو سحابة بطول 10 m عند 10% LEL. فالكاشف الخطي يقيس «كمية الغاز على المسار» لا خطورة التركيز في نقطة، ولذلك تُضبط إنذاراته بـ LEL·m (مثل 1 و3 LEL·m) بناءً على حجم السحابة التي يُراد كشفها.

الشكل 30-5: *ثلاث سحب غازية مختلفة الطول والتركيز تعطي القراءة نفسها 1 LEL·m في الكاشف الخطي.*

نقاط الإنذار النموذجية: يعرض جدول القسم 30.3 القيم الشائعة (20% و60% LEL في المساحات المفتوحة، و5 و10 ppm لـ H_2S)، وتُخفض القيم في الحجرات المغلقة ومداخل هواء التهوية وحاويات التوربينات. وكلها أمثلة تحددها فلسفة المشروع ومواصفات المالك.

الإشارة والتشخيص: خرج 4 – 20 mA، مع مستويات خاصة تحت 4 mA للعطل والمعايرة والتعطيل (وتختلف قيمها بين الصانعين، كأن يُستخدم 2 mA للمعايرة أو التثبيط)؛ ويجب أن يُبرمج نظام الحريق والغاز على القيم الفعلية للطراز المركّب.

المعايرة والاختبار:

- **اختبار الاستجابة (Bump / Response Test):** غاز إلى المجس للتأكد من أنه يستجيب وأن الإنذار يصل إلى النظام؛ لا يغني عن المعايرة.
- **المعايرة (Calibration):** صفر بهواء نظيف (والنيتروجين مقبول للكاشف تحت الأحمر لا للكاشف الحفّاز الذي يحتاج إلى الأكسجين)، ثم غاز معايرة معتمد بتركيز معروف (مثل 50% LEL ميثان)، بمعدل تدفق وكأس معايرة يحددهما الصانع.
- **الغاز المستهدف وغاز المعايرة:** كاشف معايَر بالميثان والغاز المتوقع بروبان يحتاج إلى عامل تصحيح من الصانع، وإلا كانت قراءته أقل أو أكثر من الحقيقة.
- **المعايير:** IEC 60079-29-1 لأداء كاشفات الغازات القابلة للاشتعال، وIEC 60079-29-2 للاختيار والتركيب والصيانة، وIEC 60079-29-4 للكاشفات مفتوحة المسار، وEN 45544 للغازات السامة.

اختبار الاستجابة والمعايرة لكاشف غاز نقطي: خطوات

1. راجع سجل الكاشف ونوعه وغازه المستهدف، وتحقق من صلاحية أسطوانة غاز المعايرة وتركيزها (عادة 50% LEL للميثان، أو 25 ppm لكبريتيد الهيدروجين) وشهادتها.

2. أبلغ غرفة التحكم، وضَعِ الكاشف في وضع الصيانة أو التعطيل (Inhibit) في نظام الحريق والغاز حتى لا يُطلق الاختبارُ فصلًا أو إطلاق مواد إطفاء، وسجّل وقت التعطيل.
3. افحص الكاشف بصريًا: غطاء الرذاذ ومرشح المجس نظيفان وغير مسدودين، ولا تآكل في الغلاف أو الغدة، والقراءة الحالية قرب الصفر في هواء نظيف.
4. ركّب غطاء المعايرة (Calibration Cap) على المجس، وصل الأسطوانة عبر منظم تدفق ثابت (عادة 0.5 L/min أو ما يحدده المصنّع).
5. **اختبار الاستجابة (Bump Test):** مرّر غاز المعايرة وراقب ارتفاع القراءة وظهور الإنذار في النظام؛ يُقبل الكاشف إذا وصل إلى الإنذار الأول في أقل من نحو 30 ثانية وإلى 90% من القيمة في زمن T90 المعلن. إن نجح ولم تكن المعايرة مستحقة فانتقل إلى الخطوة 9.
6. **الصفر:** في هواء نظيف (أو بغاز صفر إن كان الجو ملوثًا) اضبط الصفر بعد استقرار القراءة.
7. **المدى:** مرّر غاز المعايرة حتى تستقر القراءة (دقيقتان إلى ثلاث)، واضبط قيمة المدى على تركيز الأسطوانة، وسجّل «كما وُجد» (As-Found) قبل الضبط و«كما تُرك» (As-Left) بعده.
8. تحقق من أن الخرج 4–20 mA عند المرسل يطابق القراءة (مثلًا 12 mA عند 50% LEL)، وأن القيمة تظهر صحيحة في النظام.
9. أزل الغاز وغطاء المعايرة، وتأكد من عودة القراءة إلى أقل من 5% LEL خلال زمن التعافي المعلن.
10. أعد الكاشف إلى الخدمة في النظام، وسجّل ذلك مع الوقت، ووثّق النتائج والغاز المستخدم وتاريخ الاختبار التالي. ولا تترك كاشفًا معطّلًا في النظام؛ فهذا أخطر من كاشف غير معايَر.

الشكل 30-6: *ترتيب اختبار الاستجابة ومعايرة كاشف غاز نقطي: أسطوانة غاز معايرة ومنظم تدفق ثابت وغطاء معايرة على المجس، مع الخطوات والقيم المتوقعة عند كل منها.*

30.6 طرق الإطفاء ووسائطه: أي وسيط لأي حريق ولأي مكان

الحريق يحتاج إلى وقود وأكسجين وحرارة وتفاعلًا متسلسلًا؛ وكل وسيط إطفاء يهاجم واحدًا أو أكثر: الماء يبرّد، والرغوة تعزل الوقود عن الأكسجين، وCO_2 والغازات الخاملة تخفض الأكسجين، والمساحيق والوسائط النظيفة الكيميائية تكسر التفاعل المتسلسل وتمتص الحرارة.

أصناف الحريق (ISO 3941 / NFPA 10): A مواد صلبة عادية، B سوائل قابلة للاشتعال، C غازات (في التصنيف الأوروبي؛ الأمريكي: كهربائي)، D معادن، F/K زيوت الطهي. حريق الغاز (C) قاعدته الأولى **لا يُطفأ قبل عزل المصدر**، لأن إطفاء لهب غاز ما زال يتسرب يصنع سحابة انفجارية أخطر من الحريق.

النظام / الوسيط	كيف يعمل	أفضل استخدام	لا يصلح لـ	متطلبات F&G
رشاشات الماء (Sprinklers)	رؤوس تنفتح بالحرارة كلٌّ على حدة، تبريد	مبانٍ ومستودعات ومكاتب	معدات كهربائية حية، سوائل هيدروكربونية (تنشر الحريق)	مفتاح تدفق ومراقبة الصمام؛ لا يحتاج إلى أمر F&G
الإغراق المائي (Deluge)	رؤوس مفتوحة، صمام إغراق يُفتح بأمر F&G أو بحلقة هوائية ذات رؤوس قابلة للكسر	ضواغط، مضخات، فواصل، أرصفة، تبريد خزانات مجاورة	حاويات مغلقة بمعدات كهربائية	صمام إغراق بملف كهربائي (يُنشَّط عند الحدث)، مراقبة ضغط شبكة الماء، بدء مضخات الحريق آليًا عند هبوط ضغط الحلقة، وإطلاق يدوي محلي وعن بعد
رذاذ الماء الدقيق (Water Mist)	قطرات دقيقة تبرّد وتخنق موضعيًا بماء قليل	حاويات توربينات ومحركات، غرف مولدات	مساحات مفتوحة واسعة	مثل الإغراق مع مضخة ضغط عالٍ ومراقبتها
الرغوة (Foam: AFFF/AR-AFFF/FFFP والبديل الخالي من الفلور)	غطاء يعزل بخار الوقود ويبرّد	صهاريج الهيدروكربون، الأحواض، أرصفة التحميل، حظائر الطائرات	إطفاء حريق بركة الغاز المسال المبرد (تُستخدم الرغوة عالية التمدد للسيطرة على تبخره وإشعاعه لا لإطفائه)، المعادن	مضخة رغوة أو خلاط، مراقبة مخزون المركّز، ملف على صمام الرغوة

النظام / الوسيط	كيف يعمل	أفضل استخدام	لا يصلح لـ	متطلبات F&G
ثاني أكسيد الكربون (CO_2)	يخفض الأكسجين دون 15% ويبرّد قليلًا	حاويات توربينات وضواغط غير مأهولة، لوحات كهربائية، مخازن دهانات	أي مكان قد يوجد فيه إنسان دون إخلاء مضمون؛ فهو خطر على الحياة من نحو 10% حجمًا (فقدان وعي سريع ثم وفاة مع التعرض)، بينما تركيز التصميم الأدنى للغمر الكلي 34% وفق NFPA 12	إنذار ما قبل الإطلاق، تأخير 20 إلى 30 s، قفل يدوي للصيانة، إطلاق ثانٍ (Extended Discharge) لحاويات التوربينات الساخنة لعشرات الدقائق
الوسائط النظيفة الكيميائية (HFC-227ea «FM-200»، FK-5-1-12 «Novec 1230»)	تمتص الحرارة وتقطع التسلسل الكيميائي عند تركيز 7 إلى 9% (HFC-227ea) أو 4.5 إلى 6% (FK-5-1-12)	غرف تحكم ومعدات وخوادم مأهولة	حرائق المعادن، الخزانات الكبيرة	تأخير ما قبل الإطلاق مع إيقاف التكييف وإغلاق المداخل، اختبار كتامة الغرفة (Door Fan Test)، مراقبة ضغط الأسطوانات؛ HFC مقيد بيئيًا في كثير من الدول

النظام / الوسيط	كيف يعمل	أفضل استخدام	لا يصلح لـ	متطلبات F&G
الغازات الخاملة (IG-541 «Inergen»، IG-55، IG-100 نيتروجين)	تخفض الأكسجين إلى نحو 12 إلى 13% (يبقى صالحًا للتنفس القصير)	الغرف المأهولة الكبيرة وغرف الكابلات	حاويات تحتاج إلى تركيز عالٍ مستمر مع تسرب	أسطوانات عالية الضغط كثيرة العدد، فتحات تنفيس للضغط الزائد في الغرفة
المسحوق الجاف (Dry Chemical)	يكسر التفاعل المتسلسل	حرائق نافورات الغاز والسوائل في الهواء الطلق، رؤوس الآبار، الأنظمة المحمولة على الشاحنات	المعدات الإلكترونية (تلوث)، المساحات المغلقة المأهولة	إطلاق يدوي غالبًا؛ أنظمة ثابتة على رؤوس الآبار بمشغل نيتروجين
الأيروسول المكثف (Condensed Aerosol)	جسيمات أملاح البوتاسيوم تقطع التسلسل	لوحات كهربائية وغرف معدات صغيرة غير مأهولة	الأماكن المأهولة أثناء وجود الأفراد	إطلاق كهربائي مراقب؛ تنظيف بعد الإطلاق
وسيط المطابخ الرطب (Wet Chemical)	تصبن زيوت الطهي	مطابخ المخيمات والسكن	غيرها	ربط مع فصل الغاز/الكهرباء عن المطبخ

كيف أختار؟ ثلاثة أسئلة تحسم الوسيط: ما صنف الحريق (سائل، غاز، كهربائي)، وهل الحيز مغلق يمكن غمره أم مفتوح، وهل قد يوجد فيه إنسان لحظة الإطلاق. فالماء والإغراق للمعدات المكشوفة، والرغوة للسوائل، وCO_2 للحاويات غير المأهولة، والوسائط النظيفة أو الغازات الخاملة للغرف المأهولة، والمسحوق للنافورات. والجدول لا يعطي

الكمية ولا زمن البقاء ولا كتامة الغرفة، وهذه تُحسب لكل حيز ويُثبتها اختبار مروحة الباب. والخطأ الأكثر كلفة، وقد يكون قاتلًا، اختيار CO_2 لغرفة قد يدخلها أحد، أو إطفاء لهب غاز ما زال يتسرب قبل عزل مصدره.

المساحيق بالتفصيل والهالون: المسحوق متعدد الأغراض ABC (فوسفات أحادي الأمونيوم) يعطل الاحتراق ويغطي الأسطح لكنه يلوث المعدات؛ ومساحيق BC (بيكربونات الصوديوم أو البوتاسيوم «Purple-K») لحرائق السوائل والغازات وهي الأكثر فعالية لنافورات الغاز؛ ومسحوق الفئة D تركيبة خاصة بالمعدن المحترق (مغنيسيوم، صوديوم) ولا يُستبدل بمسحوق ABC. أما الهالون (Halon 1301/1211) فعامل نظيف قديم يعطل سلسلة التفاعل، أُوقف إنتاجه الجديد لاستنزافه الأوزون، وما بقي منه في أنظمة قديمة يُدار ببنوك الهالون؛ والبدائل النظيفة لا توضع في أسطوانات الهالون ونظامه دون إعادة تصميم واعتماد.

جدول مقارنة: طريقة التوصيل ليست هي الوسيط

ترتيب النظام	كيف يعمل	ما يجب أن يعرفه مهندس F&G
رشاشات تلقائية (Automatic Sprinkler)	يفتح الرأس الذي بلغته الحرارة فقط	لا تعمل كل الرؤوس لمجرد إنذار دخان؛ مفتاح التدفق يخبر النظام بعد الفتح
نظام إغراق (Deluge)	صمام الإغراق يُفتح فتتدفق المياه من كل الفوهات المفتوحة في منطقته	يُطلق من F&G أو حلقة هوائية أو يدويًا؛ يحتاج إلى مراقبة ضغط الشبكة وبدء المضخات
تطبيق موضعي (Local Application)	الوسيط يُوجّه إلى معدة أو خطر محدد (CO_2 أو مسحوق أو رذاذ)	التغطية بالفوهات تُحسب للمعدة لا للغرفة
غمر كلي (Total Flooding)	الوسيط يملأ الحيز إلى تركيز تصميمي ويُحتفظ به	يحتاج إلى كتامة الغرفة، وإغلاق التهوية، تنفيس الضغط الزائد، وإخلاء مضمون

ترتيب النظام	كيف يعمل	ما يجب أن يعرفه مهندس F&G
مطفأة محمولة (Portable)	شخص مدرب لحريق ابتدائي مع مسار خروج	ليست جزءًا من F&G لكنها تُدرج في مخطط المواقع

ثلاث نقاط لا يُخلط بينها: الماء العادي ليس رذاذ الماء الدقيق (كون نظام رذاذ معتمدًا لتطبيق كهربائي لا يجعل أي رشاش ماء آمنًا للكهرباء الحية). وكون CO_2 لا يترك بقايا لا يجعله آمنًا على الأشخاص (أنظمة الغمر الكلي تحتاج إلى إنذار قبل التفريغ يتيح الخروج الآمن وقفلًا للصيانة)؛ والهالون ليس Novec («Novec 1230» اسم تجاري للعامل FK-5-1-12، لا اسمًا عامًا لغازات الإطفاء).

تسلسل الإطلاق الغازي القياسي (الحاويات والغرف): تأكيد بالتصويت (2ooN لهب أو لهب + حرارة) ← إنذار ما قبل الإطلاق صوتي ومرئي مختلف عن إنذار الحريق ← إيقاف التكييف وإغلاق المداخل (Dampers) وإغلاق الأبواب الآلية ← تأخير 20 إلى 30 s (قابل للإيقاف بزر إجهاض (Abort) يُمسك باليد لا يُقفل) ← إطلاق الوسيط بملف أو مشغل هوائي مراقب ← إشارة «أُطلق» من مفتاح ضغط على مجمع التصريف ← منع إعادة التشغيل حتى إعادة الضبط اليدوي. مفتاح القفل اليدوي (Lock-off) عند باب الحاوية يعطل الإطلاق أثناء الصيانة ويُعلن حالته على شاشة F&G، ودخول أي شخص إلى حاوية توربين بنظام CO_2 فعال مخالفة تكفي وحدها لإيقاف العمل.

مثال محلول (كمية وسيط نظيف لغرفة معدات):

- **المعطيات:** غرفة معدات كهربائية 12 m × 8 m × 3.5 m، الوسيط FK-5-1-12 بتركيز تصميمي 5.6% عند 20 °C، الحجم النوعي للبخار ≈ 0.0719 m^3/kg.
- **الافتراضات:** الغرفة محكمة (اجتاز اختبار مروحة الباب)، ولا خصم للمعدات الصلبة (تحفظي)، وارتفاع الغرفة أقل من 4 m فلا تصحيح للارتفاع.

- **الحل بالوحدات:**
  - حجم الغرفة: V = الطول × العرض × الارتفاع = 12 × 8 × 3.5 = 336 m³
  - كمية الوسيط: W = (V ÷ s) × (C ÷ (100 − C))
  - التعويض: W = (336 ÷ 0.0719) × (5.6 ÷ 94.4) = 4,673 × 0.0593
  - النتيجة: W = 277 kg
  - بأسطوانات سعة 100 kg يلزم ثلاث أسطوانات (300 kg) ويُضبط الملء عليها، وزمن التفريغ ≥ 10 s وفق NFPA 2001، ووقت البقاء (Hold Time) 10 min على الأقل يُثبت باختبار مروحة الباب.
- **معنى النتيجة:** الكمية تُعاد إذا أُضيف حاجز أو أُزيل سقف مستعار، ولذلك يُدرج «تعديل حجم الغرفة» في إدارة التغيير. ومهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس يتحقق من: مفتاح ضغط التفريغ موصول إلى F&G، ومراقبة وزن/ضغط الأسطوانات، ومنطق التأخير والإجهاض، وإغلاق مداخل التكييف قبل الإطلاق.

مثال محلول (إغراق مائي لمنطقة ضاغط):

- **المعطيات:** منطقة ضاغط مساحتها المحمية 10 m × 15 m، كثافة الرش التصميمية 10.2 L/min·m² (NFPA 15 للمعدات)، زمن التشغيل 30 min.
- **الافتراضات:** توزيع منتظم عبر رؤوس مفتوحة، بلا رغوة.
- **الحل بالوحدات:**
  - المساحة المحمية: A = 15 × 10 = 150 m²
  - التدفق: Q = A × الكثافة = 150 × 10.2 = 1,530 L/min ≈

92 m^3/h

- الماء اللازم: $Q = V \times$ الزمن = 46 $m^3 \approx 45,900\ L = 30 \times 1,530$ لهذا النظام وحده.
- يضاف إلى الطلب المتزامن للخراطيم والمراقبات (Monitors) ليُحدد حجم مضخات الحريق وخزانها.

- **معنى النتيجة:** ما يهم مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس: ضغط الحلقة المائية مراقب بمرسل مع إنذار منخفض يبدأ مضخة الحريق الاحتياطية آليًا، ومفتاح تدفق/ضغط بعد صمام الإغراق يؤكد الإطلاق إلى غرفة التحكم، وصمام الإغراق قابل للإطلاق من ثلاثة أماكن (محليًا بزر، من لوحة نقطة التجمع، ومن F&G في غرفة التحكم)، وكلها تُختبر دوريًا.

الشكل 30-7: *(أ) خريطة اختيار وسيط الإطفاء حسب المكان ونوع الحريق ووجود الأفراد؛ (ب) تسلسل زمني لإطلاق وسيط غازي في حاوية: تأكيد بالتصويت، وإنذار ما قبل الإطلاق، وإغلاق التهوية، وتأخير مع زر الإجهاض، والإطلاق، وتأكيد التفريغ.*

30.7 منطق التصويت: كيف يقرر النظام بين الإنذار والإجراء

التصويت (Voting) هو مطالبة النظام بعدد أدنى من الكاشفات المتفقة قبل إجراء تنفيذي. الرمز «MooN» يعني: M من أصل N كاشفًا في المنطقة نفسها يجب أن يتجاوز عتبته. والقاعدة الذهبية: **إنذار على 1ooN، وإجراء تنفيذي على 2ooN** ما لم يكن الكاشف الواحد بالغ الموثوقية والإجراء رخيصًا. الأسباب: كاشف اللهب يرى وهج لحام، وكاشف الغاز الحفاز يتأثر بالمذيبات، وأي كابل منقطع في نظام يُفصل عند الحدث يعطي إنذارًا؛ فإطلاق CO_2 أو إيقاف وحدة على كاشف واحد يجعل النظام نفسه مصدر خطر وخسارة.

المنطق	متى يُستخدم	السلوك مع عطل كاشف	مثال صناعي
1ooN	الإنذارات، وإجراءات رخيصة سريعة العودة (إغلاق مدخل تهوية)، والغازات السامة لحماية الأفراد	العطل لا يُحسب تصويتًا؛ إنذار عطل	كاشف H_2S واحد عند 10 ppm يشغل الصفارة والمنارة في المنطقة فورًا
2ooN	الإجراءات التنفيذية: ESD، الإغراق، الإطفاء الغازي، إيقاف التوربين	يتحول عادة إلى 1oo(N−1) ما دام كاشف واحد على الأقل صالحًا، أو يُبقي 2oo(N−1)، بحسب الفلسفة	ثلاثة كاشفات غاز حول ضاغط: اثنان عند 20% LEL ← إيقاف الضاغط وعزله وتفريغه
2oo3	الحاويات والمداخل الحرجة حيث الإنذار الكاذب والفقد كلاهما مكلف	كاشف معطل ← 2oo2 أو 1oo2 مع إنذار	مدخل هواء التوربين: 2oo3 عند 10% LEL ← إيقاف التوربين

المنطق	متى يُستخدم	السلوك مع عطل كاشف	مثال صناعي
التصويت العابر للمناطق (Cross-Zone)	المناطق الكبيرة بلا حواجز: كاشف من منطقة وآخر من المجاورة	كما 2ooN	فناء مضخات مفتوح: 20% LEL في منطقة A + 20% LEL في B ← غاز مؤكد
المختلط (لهب + حرارة، لهب + غاز)	تأكيد نوعي: إطفاء غازي في حاوية	أي مسار مكتمل يكفي	حاوية توربين: كاشفا لهب UV/IR (2oo3) أو لهب واحد + حرارة معدل الارتفاع ← إطلاق CO_2
العتبة العالية على كاشف واحد (1ooN High)	حين تجعل العتبة العالية الإنذار الكاذب مستبعدًا	كما 1ooN	60% LEL على كاشف واحد ← غاز مؤكد، لأن 60% لا يُنتجه عطل عابر عادة

كيف أختار؟ القاعدة: إنذار على 1ooN، وإجراء تنفيذي على 2ooN، ويُستثنى الإجراء الرخيص سريع العودة والغاز السام لحماية الأفراد فيكفيهما كاشف واحد، والعتبة العالية على كاشف واحد حين لا يُنتجها عطل عابر. والجدول يفترض أن الكاشفات تغطي السيناريو فعلًا؛ فإن كانت السحابة أو اللهب لا يصل إلا إلى كاشف واحد فالتصويت 2ooN يعني عمليًا لا حماية، ويجب أن يناسب التصويتُ التغطيةَ لا عدد الكاشفات. والخطأ الأكثر كلفة ترك سلوك التدهور عند عطل كاشف غير مكتوب، فيتحول 2oo3 إلى 1oo1 أو إلى لا شيء دون أن يعلم أحد.

جدول مقارنة: صيغ التصويت وتعبيرها المنطقي

التصويت	شرط التشغيل	التعبير المنطقي	يقبل عطل كاشف واحد؟	أثر الإنذار الكاذب من كاشف واحد
1oo1	الكاشف الوحيد	A	لا	يُنفَّذ الإجراء

التصويت	شرط التشغيل	التعبير المنطقي	يقبل عطل كاشف واحد؟	أثر الإنذار الكاذب من كاشف واحد
1oo2	أي كاشف من اثنين	A أو B	نعم (للأمان)	يُنفَّذ الإجراء
2oo2	الكاشفان معًا	A و B	لا (عطل واحد يمنع الإجراء)	لا يُنفَّذ
1oo3	أي كاشف من ثلاثة	A أو B أو C	نعم	يُنفَّذ الإجراء
2oo3	أي اثنين من ثلاثة	AB أو AC أو BC	نعم (مع بقاء الإجراء ممكنًا)	لا يُنفَّذ
2ooN	أي اثنين من مجموعة المنطقة	عدد الإشارات الفعالة ≥ 2	نعم	لا يُنفَّذ

جدول الحقيقة لـ 2oo3 (1 = الكاشف في إنذار):

A	B	C	الشرط متحقق؟
0	0	0	لا
1	0	0	لا
0	1	0	لا
0	0	1	لا
1	1	0	نعم
1	0	1	نعم
0	1	1	نعم
1	1	1	نعم

«نعم» هنا تعني تحقق شرط التصويت فقط؛ وما يترتب عليه (إنذار مؤكد، عزل وقود، بدء تسلسل إطفاء) تحدده مصفوفة السبب والنتيجة. ولماذا لا نستخدم 2oo3 دائمًا؟ لأن سحابة الغاز قد تصل إلى كاشف واحد فقط، وقد يرى كاشف واحد اللهب بينما تحجبه معدة عن الآخرين؛ فالتصويت يجب أن يناسب التغطية الفعلية والسيناريو لا عدد الكاشفات. وثلاث حقائق تُنسى: كاشف IR3 واحد بثلاثة نطاقات لا يساوي ثلاثة كاشفات مستقلة بتصويت 2oo3؛ وتصويت معالجات حلّال المنطق (1oo2D، TMR) شيء وتصويت الكاشفات الميدانية شيء آخر؛ ولا يُفترض أن 2oo3 «يتحول تلقائيًا» إلى 1oo2 عند عطل كاشف، بل يُكتب سلوك التدهور صراحة في الفلسفة ويُبرمج ويُختبر.

كيف يُبنى منطق التصويت عمليًا:

1. يُعرَّف لكل كاشف تناظري ثلاث حالات: عطل (عادة ≥ 3.6 mA أو ≤ 21 mA وفق NAMUR NE43 أو مستويات المورّد)، إنذار منخفض (≤ 20% LEL)، إنذار مرتفع (≤ 60% LEL)، مع تأخير مضاد للارتداد 1 إلى 3 s وتخلف (Hysteresis) نحو 5% LEL حتى لا يرتجف الإنذار.
2. تُجمع الكاشفات في **مناطق (Zones)** جغرافية وفق مخطط المواقع، ولكل منطقة عدّاد للكاشفات في الإنذار المنخفض وآخر للمرتفع وثالث للأعطال.
3. «غاز مؤكد» في المنطقة = (عدد الإنذارات المنخفضة ≤ 2) أو (عدد الإنذارات المرتفعة ≤ 1) أو (إنذار يدوي من MACP إن قررت الفلسفة).
4. **الحالة المتدهورة:** إذا كان عدد الأعطال ≤ 1 يُعاد حساب N الفعال. الأشيع: عند بقاء كاشف واحد صالح فقط يصبح التصويت 1oo1 مع إنذار «تصويت متدهور» وطلب إصلاح خلال مدة محددة (مثلًا 72 ساعة)، وإن فُقد الجميع تُشغَّل إجراءات يدوية أو يُوقف التشغيل بحسب المنطقة.
5. **التثبيط (Inhibit/Bypass):** لكل كاشف تثبيط بكلمة سر أو مفتاح، لا لنقاط الإنذار اليدوي (MACP) ولا لماسحات اللهب في BMS، ولا يجوز أن يلغي

التثبيط الإنذار ولا وظيفة «أول سبب» (First-Out)، ويُسجل بوقته ويظهر إنذار تثبيط مشترك (R46). التثبيط أثناء المعايرة يمنع الإطفاء لا الإنذار.

6. **الإمساك (Latching):** الإجراء التنفيذي يُمسك حتى إعادة ضبط يدوية بعد تحقق المشغل؛ أما الإنذار المنخفض فيمكن أن يعود تلقائيًا مع القراءة.

الشكل 30-8: *منطق التصويت في منطقة واحدة: ثلاثة كاشفات غاز بعتبتين ومنطق 1oo3 للإنذار و 2oo3 للإجراء التنفيذي و1oo3 عالٍ للتأكيد، مع معالجة العطل (تدهور إلى 2oo2 ثم 1oo1 مع إنذار) وجدول بخمس حالات نموذجية.*

مثال محلول (تصويت منطقة ضاغط مع كاشف معطل):

- **المعطيات:** منطقة ضاغط K-201 بأربعة كاشفات غاز نقطية GD-201A/B/C/D وكاشفي لهب FD-201A/B. الفلسفة: إنذار 1ooN عند 20% LEL، غاز مؤكد 2ooN عند 20% أو 1ooN عند 60%؛ حريق مؤكد 2oo2 لهب أو لهب + حرارة؛ عند عطل كاشف: تصويت 2oo(N−1)، وعند بقاء كاشف واحد 1oo1 مع إنذار متدهور. في يوم الحدث: GD-201C في عطل (2.5 mA بعد تلوث النافذة)، وGD-201A يقرأ 28% LEL، وGD-201B يقرأ 17% ثم 23%، والباقي صفر.
- **الافتراضات:** لا تأخير في الاتصال، وعتبات دقيقة كما في الفلسفة.
- **الحل بالوحدات:** N الفعال = 3 (A وB وD). عند قراءة A = 28%: إنذار منخفض 1oo3 ← صفارة ومنارة وإنذار في غرفة التحكم، لا إجراء. عند بلوغ B 23%: اثنان من ثلاثة فوق 20% ← «غاز مؤكد» ← إيقاف K-201 وعزله (ESD-2 للمنطقة) وتفريغ الغاز إلى الشعلة وفصل الأحمال غير Ex في المنطقة وإغلاق مداخل تهوية غرفة التحكم المجاورة. لو كان B قد بقي عند 17% لما تجاوز الأمر الإنذار، إلا إذا بلغ A 60%.
- **معنى النتيجة:** الكاشف المعطل لم يُحسب في التصويت ولم يمنع الحماية؛ لكن لو تعطل كاشف ثانٍ لصار التصويت 2oo2 ثم 1oo1، أي أن أي إنذار كاذب يوقف الضاغط. لهذا يُدرج «كاشف في عطل > 72 ساعة» في مؤشرات أداء السلامة ويُصلح قبل أن يتحول النظام إلى مصدر إيقافات.

مثال محلول (حاوية توربين: لهب وغاز وإطفاء CO_2):

- **المعطيات:** حاوية توربين غازي بثلاثة كاشفات لهب UV/IR وكاشفي حرارة معدل ارتفاع وكاشفي غاز عند مخرج التهوية، ونظام CO_2 بإطلاق أولي وممتد.
- **الافتراضات:** الفلسفة: حريق مؤكد = 2oo3 لهب أو (1oo3 لهب + 1oo2 حرارة)؛ غاز مؤكد في الحاوية = 1oo2 عند 25% LEL (لأن الحاوية مغلقة والتهوية تركّز الغاز) أو 2oo2 عند 10%.
- **الحل بالوحدات:** حريق مؤكد ← إيقاف التوربين (Trip) وإغلاق مداخل التهوية وإيقاف مراوحها، إنذار ما قبل الإطلاق 30 s، ثم إطلاق CO_2 الأولي (تركيز 34% خلال دقيقة) ثم الإطلاق الممتد لإبقاء 30% مدة 20 min لأن الأسطح الساخنة تعيد الاشتعال؛ ومنع إعادة التشغيل حتى إعادة الضبط اليدوية وتهوية الحاوية. غاز مؤكد ← إيقاف التوربين وعزل غاز الوقود وإبقاء التهوية تعمل (على عكس حالة الحريق) لتشتيت الغاز، ولا يُطلق CO_2.
- **معنى النتيجة:** الحدثان يتطلبان تصرفين متعاكسين في التهوية؛ مصفوفة السبب والنتيجة يجب أن تنص على ترتيب الأولوية إن تزامنا (الحريق يحكم إغلاق التهوية بعد الإطلاق). وزر الإجهاض يؤخر ما دام مضغوطًا ولا يلغي، ومفتاح القفل عند الباب يظهر على شاشة F&G كتثبيط.

30.8 مصفوفة السبب والنتيجة: الوثيقة التي يُختبر النظام عليها

المصفوفة جدول: الأسباب صفوفًا (كل كاشف مصوَّت أو مجموعة أو زر يدوي) والنتائج أعمدة (إنذارات، إيقافات، عزل، إطفاء، تهوية، PAGA)، وفي كل تقاطع رمز: X إجراء فوري، T إجراء بعد تأخير (يُكتب الزمن)، L إجراء يُمسك، A إنذار فقط، M يدوي. نموذج مختصر لمنطقة ضاغط:

السبب ← النتيجة	إنذار غرفة التحكم	صفارة/منارة المنطقة	PAGA رسالة غاز	إيقاف K-201 وعزله	تفريغ إلى الشعلة
غاز ≥ 20% LEL (1oo2N)	X	X	—	—	—
غاز مؤكد (≥ 20% LEL أو ≥ 60% LEL) (2oo2N)	X	X	X	X L	T 30 s
لهب (1oo2)	X	X	—	—	—
حريق مؤكد (2oo2) لهب)	X	X	X (حريق)	X L	X L
نقطة إنذار يدوي MACP في المنطقة	X	X	X	—	—
عطل كاشف أو تثبيط	X (عطل)	—	—	—	—
ضغط حلقة ماء الحريق منخفض	X	—	—	—	—

جدول: مصفوفة السبب والنتيجة لمنطقة ضاغط (تابع): الفصل والتهوية والإغراق و ESD

السبب ← النتيجة	فصل MCC غير Ex	إغلاق مداخل تهوية غرفة التحكم	إغراق مائي	ESD-1 للمنشأة
غاز ≥ 20% LEL (1oo2N)	—	—	—	—
غاز مؤكد (≥ 20% LEL (2oo2N) أو ≥ 60% LEL (1oo2N))	X	X	—	—
لهب (1oo2)	—	—	—	—

السبب ← النتيجة	فصل MCC غير Ex	إغلاق مداخل تهوية غرفة التحكم	إغراق مائي	ESD-1 للمنشأة
حريق مؤكد (2oo2 لهب)	X	X	X L	T 60 s
نقطة إنذار يدوي MACP في المنطقة	—	X	M	M
عطل كاشف أو تثبيط	—	—	—	—
ضغط حلقة ماء الحريق منخفض	—	—	بدء مضخة الحريق	—

مثال ثانٍ: مصفوفة مختصرة لحاوية معدات محمية بوسيط غازي (مثال تعليمي لا إعداد جاهز):

الحالة	الاستجابة المحتملة في التصميم
إنذار من كاشف لهب واحد	إنذار أولي وتحديد موقعه على شاشة F&G؛ لا إجراء
تحقق تصويت الحريق المعتمد (2oo3 لهب أو لهب + حرارة)	حريق مؤكد: عزل الوقود أو إيقاف المعدة وفق التسلسل، إغلاق التهوية
بدء تسلسل الإطفاء الغازي	إنذار ما قبل التفريغ، إغلاق المخمدات، بدء التأخير مع زر الإجهاض
تحقق شروط الإطلاق (انتهاء التأخير بلا إجهاض)	أمر فتح صمام الإطفاء عبر خرج مراقب يُنشَّط عند الحدث
عمل مفتاح ضغط التفريغ	تأكيد وصول ضغط إلى خط التفريغ؛ لا يثبت وحده بلوغ التركيز في كامل الحيز
عطل كاشف أو قطع كابل	إنذار عطل، وإعادة حساب التصويت وفق فلسفة الأعطال المكتوبة

الحالة	الاستجابة المحتملة في التصميم
كاشف في وضع تثبيط (Bypass)	إظهار التثبيط بوضوح، إنذار تثبيط مشترك، وتطبيق قواعد التصويت أثناء الصيانة

لا تُطبَّق استجابة واحدة على كل المخاطر: تسرب الغاز يحتاج إلى استراتيجية تهوية تختلف عن الحريق أو تفريغ العامل الغازي (القسم 30.7)، وأثر تعطل كاشف أو تثبيطه يُحدد مسبقًا.

> **قاعدة المراجعة:** كل خلية X في المصفوفة تقابل حالة اختبار في FAT وSAT؛ إن لم يكن لخلية اختبار موثق فهي غير موجودة. وتُراجع المصفوفة مع HAZOP وفلسفة ESD حتى لا يعطي F&G أمرًا يتعارض مع أمر SIS (مثلًا فتح BDV بينما SIS يمنعه).

30.9 الواجهة مع الإيقاف الطارئ (ESD)

نظام الحريق والغاز يكشف ويطلب، ونظام السلامة الآلي ينفذ الإيقاف والعزل والتفريغ. وتُشرح هرمية مستويات الإيقاف الطارئ وقواعد تصميمها في (29.7)، والحلقة الهوائية للإيقاف الطارئ والوصلات القابلة للانصهار في منشآت الإنتاج في (38.7). وما يخص هذا الفصل منها هو الواجهة: أي كشف يطلب أي مستوى، وكيف يصل الطلب إلى SIS بتعشيق سلكي أو رابط سلامة معتمد ومكرر، وما ينفذه نظام الحريق والغاز مباشرة من إطفاء وتهوية ونداء عام.

30.10 نظام إدارة الحارقات (BMS): ما يخص مهندس F&G منه

تفصيل إدارة الحارقات في المراجل في الفصل 36 (التطهير، تسلسل الإشعال، مراقبة اللهب، MFT). وما يلتقي فيه مع F&G:

- **مراقبة اللهب** بماسحات UV/IR على كل حارق (القسم 30.4) هي وظيفة BMS لا F&G، لكن كاشف لهب F&G قرب الفرن يجب أن يُضبط بحيث لا يرى لهب الحارقات (اتجاه، حجب، عتبة).
- **كاشفات غاز الوقود** قرب مجمع الغاز وصمامات القطع المزدوجة مع التنفيس (Double Block and Bleed) تُقرأ في F&G وتطلق قطع الوقود عبر BMS/SIS.
- **التطهير قبل الإشعال** (5 تغييرات حجم وفق NFPA 85 للمراجل، و4 تغييرات وفق NFPA 86 لأفران العمليات) يمنع الانفجار الذي لا تكشفه كاشفات الغاز في الوقت المناسب؛ ولا يجوز لأي تثبيط في F&G أن يلغي هذا التعشيق.
- **الإيقاف الرئيسي للوقود (MFT)** عند فقد اللهب أو ضغط الوقود أو الهواء أو سحب الفرن؛ ويُرسل إلى F&G بوصفه حالة، ويطلب F&G من BMS إغلاق الوقود عند غاز أو حريق مؤكد في منطقة الفرن.

30.11 الواجهات: PAGA والتهوية والكهرباء ولوحة إنذار المباني

الواجهة	الاتجاه	الوسيلة	ما يُراجع
الإذاعة والإنذار العام (PAGA)	من F&G	مخرجات سلكية مراقبة: «إنذار عام»، «غاز مؤكد»، «حريق مؤكد»، إلى معالجي PAGA المكررين؛ توليد النغمة في PAGA	تمييز النغمات، تغطية الصوت في المناطق الصاخبة > 90 dB بمنارات مرئية
التهوية والتكييف (HVAC)	من F&G	مخرجات فاصلة عند الفقد إلى مداخل الهواء (Dampers) والمراوح	إغلاق مداخل غرفة التحكم عند غاز، إيقاف تهوية الحاوية عند حريق مع إبقائها عند غاز
مراكز التحكم بالمحركات (MCC)	من F&G	فصل الأحمال غير Ex في منطقة الغاز المؤكد	قائمة الأحمال التي تبقى (مضخات الحريق، الإضاءة)

الواجهة	الاتجاه	الوسيلة	ما يُراجع
لوحة إنذار حريق المباني (FACP)	ثنائي	Modbus RS-485 أو TCP مكرر؛ الحوادث تُسجل في F&G	لا يجوز أن يعتمد إخلاء المبنى على رابط الشبكة وحده
نظام السلامة (SIS)	من F&G إلى SIS	سلكي أو رابط سلامة مكرر معتمد	كل طلب ESD موثق في مصفوفة SIS
نظام التحكم (PCS/DCS)	من F&G	روابط مكررة لعرض الحالة على شاشات المشغل ومحطة F&G المخصصة	لا أوامر تنفيذية من DCS إلى F&G
لوحة الحريق والغاز (Matrix Panel)	من F&G	لوحة مصابيح ومفاتيح سلكية مستقلة عن PCS: إطلاق يدوي للإغراق والرغوة، بدء مضخات الحريق	تعمل بلا شبكة، وتكرر حالة الأجهزة

الكابلات: صناديق تجميع وكابلات ومسارات إنهاء مستقلة عن PCS وSIS بحواجز معدنية موسومة داخل الصناديق المشتركة؛ حساس واحد لكل دائرة ميدانية (إلا الأنظمة القابلة للعنونة في المباني)؛ مقاومات نهاية الخط في كل تلامس؛ كابلات المناطق المأهولة قليلة الدخان خالية من الهالوجين؛ وحماية من الحريق لدوائر التنشيط عند الحدث (R46).

30.12 الاختبار والقبول: من المصنع إلى الحلقة الميدانية

1. **اختبار المصنع الأولي (Shop Test):** تجميع الأجهزة وتحميل البرمجيات واختبار التكرار والتشخيص، وتقرير مكتوب قبل FAT بعشرة أيام عمل على الأقل.
2. **اختبار القبول في المصنع (FAT):** إجراء موافق عليه قبل أربعة أسابيع، محاكيات إشارات لكل المدخلات والمخرجات، اختبار كل خلية في مصفوفة السبب والنتيجة، والتدهور والاستعادة (سحب بطاقة، فصل مغذٍّ، فقد اتصال)،

والواجهات، وزمن الاستجابة، ووثائق P&ID والسرد التحكمي كمرجع للتحقق، وقائمة نواقص (Punch List) تُغلق قبل الشحن؛ ويكون FAT متكاملًا مع PCS و SIS.

3. **اختبار القبول في الموقع (SAT):** بعد اكتمال الكابلات، إعادة اختبار التعشيقات «ساخنة»، والاتصالات مع الأنظمة البعيدة، والتأريض والشبكات.
4. **اختبار الحلقات الميدانية (Loop Test):** لكل كاشف: حقن غاز اختبار أو مصدر لهب اختبار معتمد (مصباح اختبار IR/UV والتحقق من القيمة على شاشة F&G ومن الإنذار والتصويت والإجراء (مع تثبيط الإجراء عند اللزوم وتوثيقه)، ولكل مخرج: تشغيل الملف أو الصفارة فعليًا، أو مع عزل الأجهزة الطرفية ميكانيكيًا (غلق أسطوانات الوسيط بأدوات القفل) مع مراقبة مفتاح الإطلاق.
5. **اختبارات الإثبات الدورية:** حسب سجل الأداء وحسابات SIL: اختبار استجابة كاشفات الغاز ربع سنوي أو نصف سنوي، ومعايرة سنوية أو بحسب الصانع، واختبار كاشفات اللهب بمصباح كل 6 إلى 12 شهرًا، وتنشيط صمامات الإغراق سنويًا بتدفق فعلي حيث أمكن، ونزع أسطوانات الإطفاء ووزنها/فحص ضغطها، واختبار أزرار MACP وESD، مع تسجيل كل ذلك في نظام إدارة الصيانة.
6. **إدارة التغيير بعد القبول:** كل تعديل في المنطق أو المصفوفة يمر بإجراء تغيير يراجع أثره على السلامة والأنظمة الأخرى ويحدد من ينفذه، وتُحدَّث النسخ المحفوظة من التهيئة.

30.13 مشروع الكتاب المتصل: F&G لوحدة ضغط الغاز

في وحدة ضغط الغاز التي تتبعها أمثلة الكتاب (وعاء الشفط V-101، الضاغط K-201، مبرد الهواء E-102): منطقة الضاغط بأربعة كاشفات غاز نقطية IR وكاشفين خطيين على الحد المعرض للريح وكاشفي لهب IR3؛ منطقة وعاء الشفط بثلاثة كاشفات غاز وكاشف لهب؛ مدخل هواء غرفة التحكم بـ 2oo3 غاز عند 10% LEL؛ حاوية محرك الضاغط

الغازي بثلاثة كاشفات لهب UV/IR وحرارة وCO_2. المصفوفة: غاز مؤكد في منطقة الضاغط ← ESD-2 (عزل الوحدة: إغلاق SDV دخول V-101 وSDV مخرج K-201، فتح BDV إلى الشعلة بعد 30 s، إيقاف K-201، فصل MCC غير Ex، إغلاق مداخل غرفة التحكم)؛ حريق مؤكد عند الضاغط ← ما سبق + إغراق مائي + ESD-1 بعد 60 s إن استمر. وتُختبر هذه المصفوفة في كل إيقاف سنوي مع سجل زمن الاستجابة من الكاشف إلى الصمام (الهدف: أقل من 10 s للغاز المؤكد إلى إغلاق SDV، دون احتساب زمن شوط الصمام).

الشكل 30-9: *سلسلة السبب والنتيجة لغاز مؤكد في منطقة الضاغط K-201 ضمن مشروع الكتاب: من تحقق التصويت إلى ESD-2 وأفعالها الفورية ثم فتح BDV بعد 30 s، وما يُضاف عند الحريق المؤكد من إغراق مائي وESD-1 بعد 60 s إن استمر الحريق.*

30.14 حالة ميدانية: إطلاق CO_2 في حاوية توربين بلا حريق

مثال تعليمي مركّب: العَرَض: إطلاق كامل لنظام CO_2 في حاوية توربين غازي أثناء تشغيل عادي، مع إيقاف التوربين وخسارة إنتاج يومين، ولحسن الحظ لم يكن أحد في الحاوية. **الفرضيات:** حريق حقيقي صغير لم يُعثر عليه؛ إنذار كاذب على كاشفي لهب معًا؛ خطأ في المنطق يجعل كاشفًا واحدًا يكفي؛ إطلاق كهربائي بسبب قصر في الكابل. **الفحوص:** سجل الأحداث في F&G (تسلسل بالمللي ثانية)، فحص الحاوية (لا أثر احتراق)، اختبار كاشفات اللهب بالمصباح، مراجعة برنامج التصويت، قياس عزل كابلات الإطلاق. **الدليل الحاسم:** سجل الأحداث يبين أن FD-A أعطى «لهب» ثم بعد 400 ms أعطى FD-B «لهب» وقت مرور عربة لحام متنقلة أمام فتحة تهوية الحاوية المفتوحة للصيانة، وأن التصويت مضبوط 2oo3 صحيحًا لكن الكاشفين مثبتان على الجدار نفسه بزاوية تسمح لهما برؤية الفتحة نفسها. **السبب الجذري:** تغطية «مزدوجة» بلا استقلال مكاني: كاشفان يريان مصدر الإنذار الكاذب نفسه، ولوحة تهوية أُزيلت للصيانة دون تثبيط الإطفاء. **الإجراء والدرس:** نقل كاشف إلى الجدار المقابل مع إعادة دراسة التغطية، واشتراط 2oo3 من زاويتين مختلفتين في الفلسفة، وإضافة «تثبيط الإطفاء عند فتح لوحات الحاوية» بمفتاح حد على اللوحات إلى إجراء تصريح العمل، وتسجيل الحدث في مؤشرات الإنذارات الكاذبة. التصويت الصحيح لا يحمي من كاشفين متطابقي الرؤية.

الشكل 30-10: *مسقط علوي لحاوية التوربين في الحالة الميدانية 30.14: (أ) كاشفا لهب على الجدار نفسه يريان فتحة التهوية المفتوحة فيعطيان 2oo3 كاذبًا من مصدر واحد هو عربة اللحام؛ (ب) الترتيب المصحح بكاشفين من جهتين متقابلتين، ومفتاح حد (ZS) على اللوحة يثبّط الإطفاء عند فتحها.*

30.15 حالة ميدانية: كاشفات غاز «هادئة» بعد الصيانة

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

بعد صيانة رئيسية لتوربين غازي، أعاد الفريق تركيب ألواح حاجز التوربين (Enclosure) وأغلق فواصلها بمادة إحكام سيليكونية. كانت كاشفات الغاز داخل الحاجز وفي مجرى هواء التهوية من نوع الحبيبة الحفازة. مرّ البدء دون أي إنذار، وكانت القراءات صفرًا ثابتًا.

في اختبار الاستجابة الدوري بعد أسابيع، أعطى غاز المعايرة بتركيز 50% LEL قراءةً لا تتجاوز 10 – 15% LEL في معظم الكاشفات. فالسيليكون المتبخر من مادة الإحكام مع

حرارة الحاجز سمّم العناصر الحفازة. الصفر المستقر كان «مطمئنًا»، لكن التوربين عمل أسابيع دون حماية فعلية من تسرب الغاز في حجرة مغلقة.

استُبدلت المجسات، ومُنع استخدام المواد السيليكونية داخل الحواجز إلا بموافقة، وأُضيف اختبار استجابة إلزامي بالغاز إلى قائمة إعادة التشغيل بعد أي صيانة. وفي مرحلة لاحقة استُبدلت بالكاشفات الحفازة كاشفات تحت حمراء حيث يكون الوقود غازًا طبيعيًا خاليًا من الهيدروجين.

الدروس:

- الصفر الثابت ليس دليل سلامة؛ الكاشف المسموم يبدو تمامًا مثل الكاشف السليم في الأيام العادية.
- اختيار التقنية يبدأ من البيئة: مواد مسمّمة محتملة تعني تفضيل الأشعة تحت الحمراء حيث تصلح.
- المواد الكيميائية المستخدمة في الصيانة جزء من تصميم نظام الحريق والغاز، ويجب أن تمر بإدارة التغيير.

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ماذا يقرر المهندس	ماذا ينفذ الفني ويقيس
الكشف	يختار التقنية، ويثبت التغطية بدراسة موثقة، ويحدد العتبات والتصويت وسلوك التدهور	ينفذ اختبار الاستجابة والمعايرة بالخطوات، وينظف النوافذ والمرشحات، ويسجل «كما وُجد» و«كما تُرك»
المنطق والمصفوفة	يكتب مصفوفة السبب والنتيجة، ويحسم أولوية الحريق على الغاز في التهوية، ويحدد قواعد التثبيط	يثبّط الكاشف قبل العمل ويعيده إلى الخدمة فورًا بعده، ولا يترك تثبيطًا مفتوحًا بلا سجل

المجال	ماذا يقرر المهندس	ماذا ينفذ الفني ويقيس
الإطفاء	يحسب كمية الوسيط وزمن التأخير، ويحدد مراقبة الخطوط والأسطوانات	يختبر المخارج مع قفل الأسطوانات ميكانيكيًا، ويزن الأسطوانات أو يفحص ضغطها، ويتحقق من مفتاح القفل عند الباب

30.16 الأخطاء الشائعة

- توزيع الكاشفات على شبكة منتظمة في المخطط دون دراسة تغطية ولا نقلها إلى مصادر التسرب الفعلية واتجاه الريح.
- كاشفات غاز للبروبان أو H_2S مركبة على ارتفاع الميثان (أو العكس).
- إجراء تنفيذي على كاشف واحد بعتبة منخفضة، أو إنذار فقط على 2ooN فيتأخر التصرف.
- كاشفا لهب «مزدوجان» على الجدار نفسه يريان المشهد نفسه.
- دوائر الإطفاء تُفصل عند الحدث كأنها SIS، فتفرغ الأسطوانات عند انقطاع كابل.
- إطلاق غازي بلا تأخير ما قبل الإطلاق أو بزر إجهاض «يُقفل»، أو بلا مفتاح قفل معلن للصيانة.
- إطفاء لهب غاز يتسرب قبل عزل المصدر.
- كمية وسيط نظيف محسوبة لغرفة لم تعد كما كانت (سقف مستعار أُزيل، فتحات جديدة) بلا اختبار كتامة.
- تثبيط يلغي الإنذار مع الإجراء، أو تثبيطات مفتوحة لأسابيع بلا سجل.
- كاشفات في عطل لأشهر تحوّل التصويت إلى 1oo1 دون أن يلاحظ أحد.
- مصفوفة سبب ونتيجة لم تُحدَّث بعد تعديل، فيختبر الفريق نسخة والنظام ينفذ أخرى.
- أوامر F&G وSIS متعارضة على الصمام نفسه بلا أولوية محددة.

- إغلاق تهوية الحاوية عند غاز (بدل الحريق) فيتراكم الغاز داخلها.

30.17 ملخص

نظام الحريق والغاز يكشف بتغطية مدروسة، ويقرر بالتصويت، وينفذ بوسيط مناسب على المستوى المناسب من هرم الإيقاف. كاشفات اللهب بالزوايا والمدى لحريق تصميمي، وكاشفات الغاز بارتفاع يناسب كثافة الغاز وعلى مصادر التسرب واتجاه الريح، والخطية على الحدود، وكلها بنسب تغطية موثقة. الإنذار على 1ooN والإجراء على 2ooN مع معالجة صريحة للعطل والتدهور والتثبيط. وسائط الإطفاء تُختار بحسب الحريق والمكان ووجود الأفراد: ماء وإغراق للمعدات المكشوفة، رغوة للسوائل، CO_2 للحاويات غير المأهولة مع إطلاق ممتد، وسائط نظيفة أو غازات خاملة للغرف المأهولة مع تأخير وإجهاض واختبار كتامة، ومسحوق للنافورات؛ وحريق الغاز لا يُطفأ قبل عزله. دوائر التنشيط عند الحدث تُراقب وتُحمى من الحريق، وأوامر الإيقاف تُفصل عند الفقد. ومصفوفة السبب والنتيجة هي ما يُختبر خلية خلية في FAT وSAT وكل إيقاف، وهرم ESD يحدد من يوقف ماذا وبأي تسلسل تفريغ.

وفي الفصل التالي: الفصل 31، «الحمايات الآلية النموذجية لمعدات صناعة الهيدروكربونات (وفق OISD-STD-152)»، ينتقل من نظام بعينه إلى المعدات نفسها: ما الحد الأدنى من الحمايات المتعارف عليه لكل فاصل وفرن وضاغط وخزان.

30.18 أسئلة التقييم الذاتي

1. منطقة مضخات LPG: على أي ارتفاع تُركب كاشفات الغاز ولماذا، وما الذي يتغير لو كان الغاز هيدروجينًا؟
2. مساحة مفتوحة 40 m × 25 m بغاز طبيعي وسحابة تصميمية 5 m: احسب عدد الكاشفات الأولي بشبكة 7.5 m ثم اذكر ثلاثة أسباب لتعديل مواضعها.

3. لماذا تُنشَّط دوائر الإطفاء عند الحدث بينما تُفصل دوائر ESD عند الفقد؟ وما الذي يعوّض غياب «الأمان عند الفقد» في الأولى؟

4. غرفة 3 m × 6 m × 10 m بوسيط HFC-227ea بتركيز 7% وحجم نوعي 0.1373 m^3/kg عند 20 °C: احسب الكمية.

5. منطقة بأربعة كاشفات غاز، تعطل اثنان: ما التصويت الفعال وفق فلسفة «2oo(N−1) ثم 1oo1»، وما الخطر التشغيلي؟

6. اكتب صف مصفوفة السبب والنتيجة لكاشف H_2S واحد عند 10 ppm في منطقة رؤوس آبار.

7. لماذا يُبقى على تهوية حاوية التوربين عند غاز مؤكد وتُغلق عند حريق مؤكد؟ وما الأولوية عند تزامنهما؟

8. ما الفرق بين الإطلاق الأولي والممتد لنظام CO_2 في حاوية توربين؟

9. ما مستويات هرم ESD الخمسة، وأيها ينفذه SIS وأيها ينفذه F&G مباشرة؟

10. ما البنود التي تُختبر في اختبار الحلقة الميدانية لكاشف لهب وصمام إغراق، وكيف تُختبر أسطوانات الإطفاء دون إطلاقها؟

مراجع الفصل: R46 (مواصفة نظام الحريق والغاز لمشروع تطوير حقل غاز: حلّال المنطق، والمدخلات والمخرجات، والإنذارات ومستويات LEL 25%/60%، ومرافق الاختبار والتثبيط، والمخرجات المراقبة، والإغراق، والخصائص الكهربائية للكاشفات، و FAT/SAT)، وISA-TR84.00.07 (تقييم فعالية كشف الحريق والغاز)، وIEC 61511 وIEC 61508، وNFPA 72 (الإنذار)، وNFPA 12 (CO_2)، وNFPA 2001 (الوسائط النظيفة)، و NFPA 15 (الرش المائي)، وNFPA 11 (الرغوة)، وNFPA 85/86 (الحارقات)، وAPI RP 14C (هرمية الإيقاف)، وEN 54 وFM 3260 (اعتماد الكاشفات)، وR19 (الإغراق وكبح الانفجار)، وR56 (مذكرة المؤلف في كواشف الحريق والغاز ووسائط الإطفاء والتصويت، 2026)، وR18 (الخبرة الميدانية للمؤلف)، والفصول 29 و26 و12 و36 و31 من هذا

الكتاب؛ وR64 (مبادئ الأجهزة: الحلقة الهوائية للإيقاف والوصلات القابلة للانصهار، 38.7).

الفصل 31: الحمايات الآلية النموذجية لمعدات صناعة الهيدروكربونات (وفق OISD-STD-152)

لمن هذا الفصل: لمهندس التحكم والسلامة الذي يشارك في HAZOP أو يكتب مواصفة متطلبات السلامة (SRS) أو يراجع مخططات P&ID لوحدة جديدة ويريد أن يعرف «ما الحد الأدنى من الحمايات المتعارف عليه لهذه المعدة»، ولمهندس التشغيل والصيانة الذي يريد أن يفهم لماذا يفصل الضاغط عند مستوى عالٍ في وعاء الشفط أو لماذا يُفصَل الفرن عند تدفق منخفض في ممر واحد.

الفكرة الأساسية: الفصلان 28 و29 شرحا *الطريقة* (HAZOP، LOPA، SIL، دورة حياة SIS). هذا الفصل يعرض *النتيجة المتراكمة* لتلك الطريقة عبر عقود من الحوادث والدروس: قوائم بالحمايات الآلية الدنيا لكل معدة نموذجية في المصافي ومعالجة الغاز وخطوط الأنابيب والبتروكيماويات، كما جمعتها مواصفة OISD-STD-152 (Safety Instrumentation for Process Systems in Hydrocarbon Industry) الصادرة عن مديرية سلامة صناعة النفط الهندية (R50). وهي ليست بديلًا من دراسة المخاطر لكل مشروع، بل نقطة انطلاق وقائمة تحقق: ما فيها يُعدّ الحد الأدنى، والدراسة قد تضيف ولا تُنقص إلا بتبرير موثق.

31.1 المبادئ العامة التي تفرضها المواصفة على كل حماية

قبل قوائم المعدات تضع المواصفة شروطًا عامة لأي نظام فصل آلي (Automatic Safety Shutdown System)، وهي تتطابق مع ما تعلمناه في الفصل 29 لكنها تصوغه كمتطلبات إلزامية:

1. **تحديد متغيرات الفصل من دراسة المخاطر (PHA):** لا تُضاف حماية لأنها «معتادة» فقط، ولا تُحذف حماية في هذا الفصل لأن الدراسة لم تذكرها إلا بتبرير.
2. **حساس مستقل لكل متغير فصل، ويفضل تركيبه مباشرة على العملية:** حساس التحكم لا يُستخدم للفصل؛ وحيثما ذُكر «مفتاح» مستوى أو حرارة أو تدفق فالمقصود اليوم مرسل مستقل ذكي (لا مفتاح ميكانيكي) بفوهة مستقلة.
3. **الفصل بالمرسلات الذكية أو المفاتيح المباشرة** مع تشخيص، وتصويت 2oo3 حيث تقتضيه دراسة SIL (وتحديدًا للأفران عند الضغط العالي جدًا).
4. **إنذار مسموع ومرئي لكل فصل** وتسجيل تسلسل الأحداث.
5. **إعادة الضبط محليًا فقط بعد التحقيق:** الصمامات التي أغلقها الفصل تُعاد يدويًا من الموقع بعد معرفة السبب، لا من غرفة التحكم بضغطة زر.
6. **إدارة إنذارات وفق أفضل الممارسات** (القسم 22.3).
7. **ما يفصل الضاغط يفصل المحرك ويغلق صمامي الشفط والتصريف** — الفصل ليس مجرد إيقاف للمحرك.

رؤوس الآبار: تُعالج منظومة إيقاف رأس البئر، وحساسات خط التدفق، ولوحة تحكم رأس البئر، ومستويات الإيقاف والتجاوز والاختبار، ومنهج API RP 14C، في الفصل 38، لأنها مادة فصل كامل. ويبقى هذا الفصل مرجعًا للحمايات النموذجية بحسب المعدة.

31.2 الفواصل (Separators)

فواصل المنبع (Upstream، حقول الإنتاج البرية) ومعالجات التسخين (Heater-Treater):

المتغير	الفعل	الملاحظة
ضغط عالٍ (PT مستقل)	قطع التغذية الداخلة للوعاء	مع إنذار ضغط عالٍ قبله
ضغط منخفض جدًا (PSLL)	قطع التغذية الداخلة	يدل على تمزق أو تسرب في المنبع
مستوى عالٍ جدًا (LSHH)	قطع التغذية	إذا كان مستقبل الغاز في المصب لا يتحمل السائل
مستوى منخفض جدًا (LSLL)	قطع خط خروج السائل	إذا كان المصب غير مصمم لتحمّل اختراق الغاز (Gas Breakthrough)
حرارة عالية جدًا (TSHH)	قطع مصدر التسخين	في المعالجات المسخنة
حالات غير طبيعية أو مستوى منخفض	قطع تغذية محول الجهد العالي للفصل الكهروستاتيكي	يمنع القوس في الغاز

كيف أختار؟ كل صف في الجدول مشروط بما في المصب: فصل المستوى العالي جدًا لازم حين لا يتحمل مستقبل الغاز السائل، وفصل المستوى المنخفض جدًا لازم حين لا يتحمل المصب اختراق الغاز؛ فابدأ من سؤال «ماذا يتحمل ما بعد الفاصل؟» لا من نسخ القائمة. والجدول لا يذكر عدد المرسلات ولا الفوهات، وفي الخدمات القذرة أو المتجمدة يلزم مرسلان بفوهتين مستقلتين لأن الانسداد أخطر من خطأ المرسل. والخطأ الأكثر كلفة استعمال مرسل التحكم نفسه للفصل، أو إسقاط بند من القائمة بحجة أن صمام التحكم «يكفي» كما في الحالة الميدانية 31.17.

فواصل المصب في المصافي ومعالجة الغاز والبتروكيماويات (مثل وعاء شفط الضاغط، KOD):

- إنذار مستوى عالٍ + **تعشيق مستوى عالٍ جدًا يفصل الضاغط** لمنع دخول السائل إليه (من أكثر أسباب تحطم الضواغط الترددية شيوعًا).
- إنذارات مستوى منخفض للهيدروكربون ولسطح الماء الفاصل (Interface)؛ وحيث لا يتحمل المصب اختراق الغاز يُضاف صمام قطع على مخرج السائل الهيدروكربوني ومخرج الماء عند LSLL.
- في الخدمات المتجمدة أو القذرة (الماء الحامضي مثلًا) **فوهتان مستقلتان ومرسلان** للمستوى لأن الانسداد أخطر من خطأ المرسل.

ويجمع الشكل 31-1 حمايات الفاصل النموذجي في رسم واحد.

الشكل 31-1: *الحمايات الدنيا لفاصل ثلاثي الأطوار: مرسلات مستقلة للضغط والمستوى وسطح الماء، وصمامات قطع على الدخول وخروج الهيدروكربون والماء، والإنذارات المسبقة قبل كل فصل، وفصل الضاغط في المصب عند مستوى عالٍ جدًا.*

31.3 وحدات تجفيف الغاز بالجلايكول (Gas Dehydrators)

في برج التلامس (Contactor) الذي يلتقي فيه الغاز الرطب بالجلايكول المركز:

1. ضغط عالٍ على البرج → قطع دخول الغاز.
2. ضغط منخفض على البرج → قطع دخول الغاز (تسرب أو انهيار ضغط الشبكة).
3. مستوى عالٍ في قاع البرج → إيقاف مضخة الجلايكول وقطع دخول الغاز (يمنع حمل الجلايكول إلى خط الأنابيب).
4. مستوى منخفض → إغلاق خط خروج الجلايكول (يمنع هروب الغاز عالي الضغط إلى نظام إعادة التوليد منخفض الضغط، وهو سيناريو تمزق كلاسيكي).

5. نظام تخفيف ضغط آلي (Depressurising) إلى الشعلة عند الطوارئ.
6. صمامات فصل (SDV) على دخول الغاز وخروجه.

الشكل 31-2: *الحمايات الدنيا لبرج التلامس في وحدة تجفيف الغاز بالجلايكول مرقمة كما في القائمة: الضغط العالي جدًا والمنخفض جدًا يقطعان دخول الغاز، والمستوى العالي جدًا يوقف مضخة الجلايكول ويقطع الدخول، والمستوى المنخفض جدًا يغلق صمام قطع مستقلًا عن صمام التحكم على خروج الجلايكول الغني، مع صمام تخفيف الضغط (BDV) إلى الشعلة وصمامات الفصل (SDV) على الدخول والخروج. فبغير حماية المستوى المنخفض يخترق غاز 70 bar إلى وعاء الوميض المصمم لـ 7 bar.*

31.4 خطوط الأنابيب العابرة (Cross-Country Pipelines)

عام: صمامات فصل طارئ سريعة الإغلاق قبل كل محطة وبعدها؛ صمامات إضافية لعزل المقاطع التي تحددها دراسة المخاطر؛ حماية من موجة الضغط (Surge Relief) وفق

تحليل موجات الضغط (Surge Analysis)؛ كشف حريق وغاز في محطات الضغط للغاز؛ خزانات المحطات بإنذارات مستوى عالٍ وعالٍ جدًا ومنخفض.

مضخات الخط الرئيسي (Mainline Pumps) لخطوط السوائل:

المتغير	الفعل
ضغط تصريف عالٍ	إنذار وفصل المضخة
ضغط شفط منخفض	إنذار وفصل (يمنع التكهف والتشغيل الجاف)
ضغط تصريف منخفض	فصل عند الحاجة (دلالة تمزق الخط)
حرارة غلاف عالية، حرارة كراسي عالية	إنذار
صمامات MOV قبل المضخة وبعدها	مربوطة بمنطق البدء والتشغيل: تفصل المضخة إذا أُغلق أحدهما، ولا تبدأ إلا وهما مفتوحان
مضخة بسداد مزدوج	إنذار عند فشل السداد الأولي
توصيات الصانع	فصل اهتزاز عالٍ جدًا، حرارة كراسي وغلاف (RTD/مزدوجات)، حرارة كراسي المحرك وملفاته لكل طور

محطات الاستلام: إنذار مستوى عالٍ جدًا للخزان المستقبل محليًا وفي غرفة تحكم الخط، **وإغلاق صمام التسليم (MOV/ROV) عند LAHH**؛ كاشفات غاز في محطات ضخ LPG؛ نظام SCADA.

المحركات (Engines) التي تدير مضخات الخط: ضغط منخفض لهواء الأجهزة، ضغط منخفض للوقود، حرارة عالية لكراسي علبة التروس والمحرك وماء التبريد، **كاشف رذاذ الزيت (Oil Mist Detector)** مع تنقية CO_2 عند ارتفاعه، حرارة زيت التزييت العالية.

خطوط الغاز: في المرشح/الفاصل (Scrubber) مؤشر مستوى بإنذارات منخفض ومنخفض جدًا وعالٍ، وصمام قطع على خط المكثفات عند LSLL؛ في نظام المكثفات فصل مضخة المكثفات عند مستوى منخفض في الحوض وإنذارات مستوى عالٍ في الحوض

والخزان العلوي؛ في سخانات الغاز إنذار حرارة خروج عالية جدًا وحرارة جلد عالية للسخان الكهربائي؛ في محطة تخفيض الضغط (PRI) **صمام قطع سريع يعزل المصب عند ضغط عالٍ**؛ صمامات تقسيم (Sectionalising) بتشغيل بعيد لعزل المقاطع عند التسرب أو التمزق.

31.5 مزيل الأملاح الكهروستاتيكي (Electrostatic Desalter)

إنذار وتعشيق مستوى السطح الفاصل ماء/خام عالٍ جدًا (يمنع وصول الماء الموصل إلى الأقطاب)، وإنذار سطح فاصل منخفض جدًا (يمنع مرور الخام مع الماء)، وفصل المحول عند تيار عالٍ (قوس داخلي)، وإنذارات ضغط عالٍ ومنخفض، وما يوصي به الصانع.

31.6 أبراج التقطير (Distillation Columns)

1. **مستوى القاع بمرسلين ذكيين مختلفين وفوهات منفصلة**؛ ومرسل مستقل ثالث حيثما وُجد فصل.
2. حرارة القمة بنقطتين على الأقل: واحدة للتحكم وأخرى للبيان مع إنذاري عالٍ ومنخفض.
3. إنذار حرارة عالية للقاع.
4. بيان ضغط للقمة ولمنطقة الوميض (Flash Zone).
5. إنذارا مستوى عالٍ ومنخفض لوعاء الارتجاع العلوي.
6. **إنذار تدفق ارتجاع منخفض كمؤشر مبكر** على اضطراب القمة.
7. **صمام فصل آلي على مخرج القاع يغلق عند LSLL** في ثلاث حالات: حرارة قاع فوق حرارة الاشتعال الذاتي؛ الحاجة إلى عزل فوري للبرج عند حريق تحته؛ أو مصب (خزان مثلًا) غير مصمم لاستقبال الغاز.

الشكل 31-3: *الحمايات الدنيا لبرج تقطير: ضغط القمة العالي جدًا ومستوى القاع (مرسلان بفوهات منفصلة) يفصلان التغذية وبخار المرجل، مع حماية مضختي القاع والارتجاع من المستوى المنخفض، وإنذار فرق الضغط عبر الصواني، وصمام أمان مستقل عن كل ذلك.*

31.7 أفران العمليات (Process Heaters/Furnaces)

تُصمم حماية الأفران وفق OISD-STD-111 (وبالنظير NFPA 86/85 والفصل 36)، وتقسمها المواصفة إلى ثلاثة أقسام يجمعها الشكل 31-4:

الشكل 31-4: *حمايات فرن عمليات متعدد الممرات متوازن السحب: قسم التغذية (تدفق كل ممر، حرارة الخروج، جلد الأنابيب، غاز المداخن)، وقسم هواء الاحتراق (FD/ID)، صمام المدخنة، ضغط الفرن بتصويت 2oo3)، وقسم المشاعل (دليل، وقود رئيسي، بخار التذرية، أزرار الطوارئ).*

(أ) قسم التغذية (Feed Section):

الحماية	التفصيل
إنذار تدفق تغذية منخفض	لكل ممر (Pass)
إنذار حرارة عالية	لكل ممر وعند مخرج الفرن المجمع
حرارة جلد الأنابيب (Skin)	ثلاثة مواضع لكل ممر مع إنذار عالٍ لكل وسم
إنذار حرارة غاز مداخن عالية جدًا	يدل على حريق في الأنابيب أو احتراق متأخر
تعشيق تدفق كلي منخفض	يأخذ الفرن إلى الحد الأدنى من الحريق (المشاعل الدليلية فقط)
فوهات مستقلة لقياس التدفق	للسوائل الثقيلة المتجمدة

الحماية	التفصيل
فصل الفرن	عند: تدفق منخفض جدًا في ممر **مع** حرارة خروج عالية جدًا للممر نفسه؛ تدفق منخفض في ممرين على الأقل أو تدفق كلي منخفض؛ فشل غاز إعادة التدوير في أفران المحفّز (Reformer)؛ حرارة خروج مجمعة عالية؛ حرارة خروج ملف عالية جدًا لأي ممر؛ ضغط ملف عالٍ
حقن آلي لبخار/نيتروجين التنقية في الملفات عند الفصل	يمنع تفحم الملف بعد توقف التدفق

(ب) نظام هواء الاحتراق:

- التحقق من دوران مروحة الدفع (FD) بإغلاق قاطع المحرك **و** مفتاح ضغط تصريف منخفض جدًا معًا (حماية إيجابية من سوء تشغيل ريش التوجيه).
- إنذار تدفق هواء منخفض، وفصل الفرن عند ضغط هواء احتراق منخفض **و** تدفقه المنخفض (بوابة AND).
- خزان هواء لضمان فتح باب الإسقاط (Drop-out Door) عند فشل الهواء، مع فتح ميكانيكي بديل، وإمكانية اختبار فتحه أثناء التشغيل («اختبار الفتح الجزئي»).
- حماية مروحة السحب (ID) بقاطع المحرك ومفتاح ضغط؛ **فصل ID أو FD يفتح صمام المدخنة تلقائيًا**.
- **فصل الضغط العالي جدًا في الفرن (PHH) يُستشعر بثلاثة مفاتيح/مرسلات ضغط مركبة مباشرة بتصويت 2oo3**، ويسبقه إنذار ضغط عالٍ.
- عند الإيقاف الكامل للفرن لا عند كل قطع للوقود، إذ تبقى المراوح عادة للتنقية بعد الإطفاء وفق (NFPA 85/86: التسلسل هو فتح صمام المدخنة ← فصل ID ← فصل FD.

- كاشف غاز هيدروكربوني عند غطاء شفط مروحة FD؛ وسرعة المروحة وقاطع المحرك في منطق الفصل.

(ج) نظام المشاعل (Burner System):

1. إنذار ضغط منخفض ومنخفض جدًا لغاز الدليل (Pilot) ضمن منطق الحماية.
2. **صمام قطع مستقل لمجمع غاز الدليل يغلق فقط عند ضغط دليل منخفض جدًا** ولا يغلق عند فصل الفرن لأسباب أخرى (بقاء الدليل يسهّل إعادة البدء الآمنة ويمنع تراكم غاز غير محترق).
3. صمامات قطع على مجمعات زيت الوقود وغازه تعمل بضغط الوقود المنخفض وبأسباب الفصل الأخرى.
4. صمام قطع بزر يدوي لقطع وقود المشاعل الرئيسية، ومجموعتان من أزرار الفصل الطارئ (غرفة التحكم وقرب الفرن).
5. مرسلات ضغط مركبة مباشرة على مجمعات الوقود.
6. عند الحرق المزدوج (زيت/غاز) لا يقطع التبديل التشغيل.
7. كشف لهب الدليل قبل السماح بالوقود الرئيسي حيث يوجد إشعال بعيد.
8. عزل إيجابي لخط غاز الوقود (Block-and-Bleed إلى الشعلة).
9. قطع حرق زيت الوقود عند **ضغط تفاضلي منخفض جدًا بين بخار التذرية وزيت الوقود**.

31.8 المفاعلات: نزع الكبريت بالهيدروجين (HDS) والتكسير الهيدروجيني (Hydrocracker)

مفاعل HDS:

- تجميعة مزدوجات حرارية بأطوال مختلفة لقياس حرارة الطبقة (Bed) على ارتفاعات متعددة، مع تبريد هيدروجيني (Quench) بين الطبقات وإنذارات حرارة عالية لكل طبقة.
- إنذارا حرارة عالية لدخول المفاعل وخروجه بحساسات منفصلة عن المسجلات.
- التحكم في حرارة الدخول مدمج في حلقة حرارة خروج الفرن.
- **تعشيق السلامة عند:** تدفق هيدروجين منخفض، تغذية منخفضة، حرارة مفاعل عالية.
- **فصل مضخة التغذية والفرن عند تدفق غاز إعادة التدوير المنخفض** (فقدان غاز التدوير يعني ارتفاعًا حراريًا جامحًا في الطبقة).

وحدة التكسير الهيدروجيني (تعمل عند ضغط هيدروجين عالٍ وحرارة مرتفعة، وتفاعلها طارد للحرارة بشدة): يُضاف إلى ما سبق **تخفيف ضغط آلي (Depressurisation) عبر صمام التفريغ (Dump Valve) عند حرارة عالية جدًا بتصويت أي اثنين من مؤشرات الحرارة على الطبقة العليا**؛ وهذا هو الرد الأساسي الأكثر فعالية على الانفلات الحراري (Temperature Runaway): خفض الضغط يخفض الضغط الجزئي للهيدروجين فيُبطئ التفاعلات الطاردة للحرارة. ويُتبع في كل الأحوال دليل مرخّص العملية (Licensor).

الشكل 31-5: *الحمايات النموذجية لمفاعل التكسير الهيدروجيني: مزدوجات حرارية متعددة النقاط في كل طبقة مع إنذار حرارة عالية، وتبريد هيدروجيني (Quench) بين الطبقات، وفصل مضخة التغذية والفرن عند انخفاض تدفق غاز التدوير، وتعشيق السلامة عند انخفاض تدفق الهيدروجين أو التغذية أو ارتفاع حرارة المفاعل. أما الحرارة العالية جدًا بتصويت اثنين من مؤشرات الطبقة العليا فتفتح صمام التفريغ (Dump Valve) لتخفيف الضغط إلى الشعلة، لأن خفض الضغط الجزئي للهيدروجين يُبطئ التفاعلات الطاردة للحرارة.*

31.9 ضواغط غاز العمليات (Process Gas Compressors)

الحماية	التفصيل
ضغط شفط منخفض جدًا وضغط تصريف عالٍ جدًا	فصل الضاغط

الحماية	التفصيل
صمامات أمان (PSV)	على خط التصريف ووعاء الطرد (KOD) لكل مرحلة
كشف غاز وحريق	إذا كان الضاغط داخل مبنى مغلق من الجهات كلها، ويشمل حاويات التوربينات
حماية الآلة وفق الصانع	اهتزاز زائد، سرعة، ضغط زيت تزييت منخفض، ضغط تفاضلي منخفض لزيت السداد، حرارة كراسي عالية، حرارة تصريف عالية، ضغط زيت الحاكم المنخفض (الفصلان 35 و32)
مستوى عالٍ جدًا في وعاء الشفط	فصل الضاغط

تعريف الفصل: إيقاف المحرك **وإغلاق صمامي القطع/المحركين على الشفط والتصريف**؛ وإذا كان هناك تفريغ (Blowdown) آلي يُنسق معهما (القسم 35.11).

الشكل 31-6: *حمايات ضاغط غاز عمليات مع وعاء الشفط: مستوى عالٍ جدًا في الوعاء (مرسل مستقل عن حلقة التحكم)، وضغط الشفط والتصريف وحرارة التصريف، وحمايات الآلة وفق API 670، وضغط زيت التزييت وغاز الإحكام؛ والفصل الكامل يعني إيقاف المحرك وعزل الشفط والتصريف وفتح التنفيس وتسجيل السبب الأول.*

31.10 وحدة التكسير الحفزي المائع (FCC): المفاعل وإعادة التوليد

المفاعل يحوي أبخرة هيدروكربونية والمُجدِّد (Regenerator) يحوي هواء ساخنًا عند نحو 650 إلى 730 °C؛ دخول الهواء إلى المفاعل أو الهيدروكربون إلى المجدد يعني انفجارًا. يُحفظ المجدد عند ضغط أعلى بنحو 0.5 kg/cm² مع عمود المحفّز في الصمامات المنزلقة (Slide Valves) كحاجز. الحمايات:

1. **إغلاق آلي لصمام المحفّز المستهلك (SCSV) عند ضغط تفاضلي منخفض عبره،** وكذلك لصمام المحفّز المجدد (RCSV) — انخفاض الفرق يعني قرب انعكاس التدفق.
2. إنذار حرارة عالية للمفاعل.
3. **تحويلة تغذية طارئة** تحوّل التغذية عن المفاعل، مدمجة مع فتح البخار إلى الرافع (Riser) وإغلاق الصمامين المنزلقين.
4. رافعة يدوية (Hand Jack) لكل صمام منزلق مع تشغيل محلي كهربائي/هيدروليكي/هوائي.
5. إنذار تدفق بخار منخفض مع إدخال طارئ للبخار وتحويل التغذية.
6. إنذار حرارة خروج مفاعل منخفضة (يمنع دخول هيدروكربون غير متبخر إلى المجدد).
7. إنذار حرارة عالية للطور المخفف (Dilute Phase) في المجدد (احتراق لاحق Afterburn).
8. **فصل الوحدة عند تدفق هواء منخفض إلى المجدد.**

الشكل 31-7: *حمايات وحدة التكسير الحفزي المائع (FCC): يُحفظ المجدد عند ضغط أعلى من المفاعل بنحو 0.5 kg/cm²، ويشكّل عمود المحفز في الصمامين المنزلقين (SCSV وRCSV) حاجزًا يمنع اختلاط الهواء بالهيدروكربون، فيُغلق كل منهما آليًا عند انخفاض فرق الضغط عبره. ومعها تحويلة التغذية الطارئة وإدخال البخار الطارئ إلى الرافع، والفصل عند انخفاض تدفق هواء الاحتراق، وإنذارات حرارة المفاعل وحرارة خروجه والطور المخفف في المجدد.*

31.11 الشعلة والخزانات وضواغط الهواء والتوربينات

نظام الشعلة: إنذارا مستوى عالٍ ومنخفض في وعاء الطرد لتشغيل مضخة السائل وإيقافها آليًا؛ إنذار مستوى ماء منخفض في وعاء السداد المائي (فقدان السداد يسمح برجوع اللهب)؛ إنذار ضغط منخفض لمجمع غاز الدليل؛ كاشف غاز قرب وعاء الطرد؛ ويُستحسن إنذار فشل لهب الشعلة ومراقبة تلفازية.

خزانات التخزين الجوية (وفق OISD-STD-108): مقياسا مستوى على مبدأين مختلفين على الأقل، أحدهما مخصص لإنذاري LAHH وLAL؛ **عزل آلي لخط الاستلام عند LAHH** للخزانات التي تستقبل بمعدلات عالية (من سفينة أو خط أنابيب)؛ مفتاح LSLL من المقياس الأولي لإيقاف مضخة النقل (اختياري)؛ إنذار حرارة عالية حيث يلزم. (ويشترط API 2350 أن يأتي إنذار المستوى العالي جدًا من قياس مستقل عن مقياس التشغيل؛ وتُفصَّل الخزانات في الفصل 101 من الجزء القادم.)

ضواغط الهواء الترددية: فصل عند تدفق ماء تبريد منخفض، وحرارة تصريف عالية، وضغط زيت الإطار منخفض، وضغط تصريف عالٍ؛ ونظام تحميل/تفريغ آلي.

التوربينات (بخارية وغازية) وفق الصانع: فصل عند ضغط زيت تزييت منخفض، ضغط زيت الحاكم منخفض، ضغط عادم عالٍ، سرعة زائدة، إزاحة محورية، اهتزاز عالٍ، فصل طارئ، حرارة تشغيل عالية، ضغط غاز وقود منخفض، **حرارة عادم عالية (متوسط ثلاث مزدوجات على الأقل)**، حرارة زيت عالية، مستوى عالٍ في وعاء طرد الوقود؛ وإنذار مستوى مكثفات عالٍ وحرارة غطاء العادم. ويُضاف للتوربين الغازي: فصل فشل اللهب، وكاشفات غاز في الحاوية، وإنذارات مستوى خزان الزيت (يُراجع القسم 34.9 والفصل 37 وكتاب المؤلف R42).

31.12 تخزين LPG المضغوط والتحميل، وحجرات الفحم Coke (Drums)، ووحدة استرداد الكبريت

كرات LPG والخزانات الأسطوانية الأفقية (Bullets) وفق OISD-144/150:

- كشف وحماية حريق آلية بحساسات حرارية (فتائل/كرات كوارتز/كاشفات EP) خاصة قرب صمامات ROV، مع كاشفات غاز نقطية أو مفتوحة المسار لكشف التسرب المبكر.

- **تفعيل مفتاح ضغط نظام الحريق يؤدي إلى:** إغلاق ROV في المنطقة المتأثرة، وتشغيل نغمة أو صافرة المنطقة، وفصل مضخات وضواغط LPG؛ وأزرار طوارئ في اللوحة وفي مكان آمن بالميدان.
- كاشفات غاز عند بيت المضخات والضواغط وأرصفة تحميل الشاحنات والقطارات ونقاط أخذ العينات وقرب ROV، بمستويين **20% و60% من LEL.**
- **مؤشرا مستوى مستقلان على الأقل** للكرة، ومفتاح مستوى عالٍ منفصل للإنذار في غرفة التحكم.
- مرسل المستوى التفاضلي: وعاء سداد مائي على جانب الضغط المنخفض بتصنيف الكرة نفسه، أو تتبع حراري للساق المنخفضة، مع عدة رفع/كبت الصفر (القسم 9.3).

حجرات الفحم في التفحيم المؤجل: تتبدل الحجرات دوريًا بين التعبئة وإزالة الفحم، وأخطر لحظاتها تبديل الصمامات وفتح الأغطية والقطع المائي؛ ويلخص الجدول الحمايات المطلوبة:

المتغير أو المرحلة	الفعل	ملاحظة
تبديل الحجرات	تعشيق للصمامات الآلية أو البعيدة، وقفل ميكانيكي للصمامات اليدوية	مصابيح بيان عند الصمام ولوحته لمنع الحركة غير المقصودة
فك الغطاءين العلوي والسفلي	أتمتة الفك	لإبعاد العمال عن الحجرة الساخنة
القطع المائي (Hydro-blasting): إخراج الأداة	تحويل تصريف مضخة القطع إلى الخزان آليًا	يمنع نفث الماء عالي الضغط خارج الحجرة
ارتفاع رأس القطع فوق حد محدد	تعشيق يمنع تشغيل مضخة القطع	مع **مرسل مستوى إضافي بتصويت 1oo2**

المتغير أو المرحلة	الفعل	ملاحظة
مستوى الحجرة	إنذارات مستوى	لمنع حمل الرغوة أو الفحم إلى الأعلى
ضغط الحجرة	إنذار ضغط عالٍ بخط نبض مستقل	خط النبض ينسد بالفحم إن لم يكن مستقلًا ومنفوخًا
الحرارة	حرارة مخرج البخار ومزدوجات جلد أعلى ووسط وأسفل الحجرة	تتابع التبريد وتكشف النقاط الساخنة
ضغط تصريف مضخة القطع منخفض، أو فتح صمام العزل عند الحجرة الأخرى، أو خروج الأداة دون تحويل التصريف	فصل مضخة القطع	حماية العاملين على السطح

وحدة استرداد الكبريت (SRU): لأن الغاز الحامضي غني بـ H_2S (يتراوح عادة بين 30% و90% بحسب التغذية والمذيب) تُقطع التغذية ويُفصل الفرن عند: ضغط عالٍ داخل فرن التفاعل، أو تدفق/ضغط هواء احتراق منخفض، أو فصل محرقة الغاز المتبقي (Incinerator)؛ مع ما يطلبه المرخّص.

31.13 البتروكيماويات: التخزين المبرد، والطاردات المركزية، والموسع-الضاغط، وفرن التكسير الحراري

التخزين المبرد (LNG عند −161 °C، الإيثيلين عند −104 °C) في خزانات مزدوجة الجدار وفق API 620: تعشيق صمامات كاسر الفراغ؛ فصل المضخة عند مستوى منخفض جدًا وعند ضغط منخفض جدًا؛ فصل مضخة وحدة التكسير عند مستوى عالٍ جدًا في الخزان؛ فصل مضخة الضخ الداخلي عند LSLL؛ **ESD يغلق كل صمامات الدخول عند مستوى عالٍ جدًا أو ضغط عالٍ جدًا**، بأزرار في غرفة التحكم وخارج محيط الخزان.

الطاردة المركزية (فصل مسحوق البوليمر عن المذيب): خطر الانفجار داخلي (وقود + أكسجين + شرارة من الكهرباء الساكنة أو الاحتكاك)، لذا: منع التنقية حتى يُغلق الغطاء؛ **منع الدوران حتى ينخفض الأكسجين دون الحد بحساسي أكسجين يؤكدان معًا**؛ صمام تغذية طبيعي الإغلاق لا يُفتح إلا للتغذية؛ التأكد من مستوى الأكسجين الآمن قبل دخول المشغل في نهاية الدفعة عبر محلل؛ فصل المحرك عند اهتزاز عالٍ أو عزم عالٍ؛ وإيقاف منظم عند فشل المحلل أو الهواء أو الكهرباء أو الحساس أو النيتروجين.

الموسع-الضاغط (Expander-Compressor، جدول 1 في المواصفة):

متغير الفصل	جانب الموسع (المحرك)	جانب الضاغط (الحمل)
حرارة الكراسي	عالية جدًا، ومنخفضة جدًا (تجمد)	عالية جدًا
اهتزاز العمود	عالٍ جدًا	عالٍ جدًا
سرعة العمود	—	عالية جدًا
ΔP زيت التزييت	منخفض جدًا	منخفض جدًا
ΔP غاز السداد	منخفض جدًا	منخفض جدًا
ΔP الدفع المحوري	عالٍ جدًا	عالٍ جدًا
ضغط الشفط	منخفض جدًا	منخفض جدًا
ضغط التصريف	—	عالٍ جدًا ومنخفض جدًا
حرارة التصريف	منخفضة جدًا	عالية جدًا
مستوى وعاء الشفط	عالٍ جدًا	عالٍ جدًا
مستوى الفاصلين I وII	عالٍ جدًا	—
مفتاح نهاية صمام SDV للموسع	إغلاق SDV يفصل الموسع	—

متغير الفصل	جانب الموسع (المحرك)	جانب الضاغط (الحمل)
تدفق التصريف	—	منخفض جدًا
فشل الكهرباء	تلامس من المحطة الفرعية يفصل الوحدة كلها	

فرن التكسير الحراري بالبخار (Pyrolysis): حماياته على مستويين: **إيقاف جزئي** تبقى فيه مروحة السحب ID عاملة، و**إيقاف كامل**:

المستوى	المتغير	الفعل
جزئي	تدفق تغذية الهيدروكربون لمنطقة منخفض جدًا	قطع تغذية تلك المنطقة
جزئي	مستوى درم البخار منخفض جدًا، أو حرارة مخرج ملف البخار المحمّص عالية جدًا	إعادة ضبط صمامات بخار التخفيف
جزئي	ضغط غاز مشاعل الأرضية منخفض جدًا	قطع غاز مشاعل الأرضية
جزئي	صمام تحويلة درم إزالة الفحم	يفعّل الإيقاف الجزئي
جزئي	زر إيقاف جزئي يدوي في الميدان وغرفة التحكم	تفعيل الإيقاف الجزئي وقطع غاز المشاعل الجدارية
كامل	تدفق بخار التخفيف الرئيسي منخفض جدًا	قطع الوقود الرئيسي بصمام سريع
كامل	حرارة قمة برج التبريد المائي عالية جدًا	فصل الفرن
كامل	ضغط غاز الوقود منخفض جدًا	قطع الوقود الرئيسي بصمام سريع
كامل	ضغط قوس الفرن عالٍ جدًا	إيقاف كامل: قطع الوقود الرئيسي وفتح مخمّد المدخنة
كامل	أزرار إيقاف كامل في الميدان وغرفة التحكم	إيقاف كامل

كيف أختار؟ القاعدة: اجعل الإيقاف جزئيًا حين يكون الخطر محصورًا في منطقة أو مسار واحد ويبقى الفرن بمروحة السحب قابلًا للتعافي، واجعله كاملًا حين يهدد الحدث

صندوق الاحتراق كله (بخار التخفيف، ضغط الوقود، ضغط القوس). والجدول لا يحدد المؤقتات ولا ترتيب الأفعال في الإيقاف الكامل (المدخنة ثم ID ثم FD)، وهذه تؤخذ من المرخّص والقسم 31.7. والخطأ الأكثر كلفة الاكتفاء بإيقاف كامل لكل شيء «احتياطًا»، فتتحول أعطال صغيرة إلى إطفاءات كاملة مكلفة، ثم يميل التشغيل إلى تجاوز الحماية.

31.14 الممارسات الموصى بها (Recommended Practices)

تختم المواصفة بممارسات مستخلصة من الحوادث الكبرى ومن أدلة المرخّصين والصانعين:

- **تشخيص تنبؤي:** كشف انسداد خطوط النبض من ضوضاء الإشارة (القسم 9.3)، ومواضع ذكية على الصمامات الحرجة لاختبار الشوط الجزئي (PST) مع ضمان أن الطلب الحقيقي يتجاوز الاختبار في أي لحظة (صمامات التفريغ مثالًا) — القسم 29.5.
- **اختبار دوري متكرر** لضمان إتاحة SIS ومكوناته عند الطلب (فترات الإثبات من حسابات SIL، القسم 29.4).
- **الالتزام بتوصيات المرخّص وبالمعايير الدولية** IEC 61511-1/2/3 لوظائف الفصل والإنذار والإيقاف الطارئ، وضمان مستوى SIL المطلوب لمكونات SIS وفق IEC 61508.
- **الدفاع ضد الفشل المشترك بمراقبة متغيرات مختلفة لكن مترابطة** في المعدة نفسها: مثل تدفق ماء التبريد المنخفض **و** حرارة خروج الماء العالية معًا، بدل الاعتماد على حساسين من النوع نفسه.

إدارة الإنذارات: الحمايات في هذا الفصل تولّد إنذارات قبل الفصل، وهذه تخضع لفلسفة الإنذار في المنشأة كلها. وتُشرح معايير EEMUA 191 ومبدأ «لا إنذار بلا فعل» في (22.3).

31.15 كيف تستخدم هذا الفصل في مشروع: خطوات

1. **حدد المعدات في نطاقك** من P&ID وطابقها بالأقسام 31.2 إلى 31.13 (فاصل، مجفف، فرن، ضاغط…).
2. **انسخ قائمة الحد الأدنى لكل معدة** إلى ورقة عمل «سجل الحمايات» بأعمدة: المتغير، الحد، الفعل، الحساس المستقل؟، الصمام النهائي، مصدر المتطلب (HAZOP / OISD-152) / الصانع / المرخّص).
3. **أضف توصيات الصانع والمرخّص** (الآلات الدوارة، المفاعلات، الأفران) لأن المواصفة تحيل إليها صراحة.
4. **مرر القائمة على نتائج HAZOP وLOPA:** كل حماية في القائمة إما تُثبَّت كطبقة حماية في LOPA وتُحدد SIL لها، أو تُسجَّل كتعشيق غير SIL (Interlock) في DCS، أو تُحذف بتبرير موثق ومعتمد (نادر).
5. **تحقق من الاستقلالية:** لكل فصل حساس مستقل بفوهة مستقلة عن حساس التحكم؛ والعنصر النهائي غير صمام التحكم إلا إذا أثبتت LOPA كفايته.
6. **تحقق من التصويت:** 2oo3 حيث تفرضه المواصفة (ضغط الفرن) أو حسابات SIL أو الإتاحة (القسم 29.4).
7. **حدد الإنذار المسبق لكل فصل** (إنذار عالٍ قبل فصل عالٍ جدًا) وأولويته وفق فلسفة الإنذار.
8. **صمم تسلسل الأفعال** حيث يهم الترتيب (أفران: فتح المدخنة ← FD ← ID؛ ضواغط: محرك + صمامات قطع + تفريغ).
9. **اكتب إعادة الضبط:** محلية بعد التحقيق، ولا تجاوز دون إجراء تجاوز معتمد (القسم 38.5).
10. **أدخل النتيجة في SRS ومخططات السبب والنتيجة** (القسم 29.5)، وراجع مصفوفة الاختبار الدوري.

31.16 مثال محلول: من القائمة إلى مصفوفة السبب والنتيجة لوعاء شفط ضاغط

المعطيات: ضاغط غاز طارد مركزي بمحرك كهربائي، وعاء شفط (KOD) بسعة 8 m^3، غاز عملية عند 12 barg. HAZOP أعطى سيناريو «سائل يحمل إلى الضاغط» بتكرار أولي 0.1/سنة وعواقب تحطم الضاغط وتسرب غاز (هدف 10^{-4}/سنة).

الحل:

1. من 31.2 و31.9: مطلوب إنذار LAH + تعشيق LAHH يفصل الضاغط؛ إنذارات LAL وسطح فاصل؛ ومن 31.9: فصل عند PSLL شفط وPSHH تصريف، PSV، حماية آلة.
2. LOPA (الفصل 29): الحدث البادئ هنا دفقة سائل من المنبع لا فشل حلقة LIC نفسها. ولو احتُسب تحكم المستوى الأساسي (LIC مع صمام تصريف) طبقة 0.1 وإنذار LAH مع استجابة المشغل طبقة 0.1 أخرى لكان المتبقي 10^{-3} مقابل هدف 10^{-4}، ولبدا أن SIF بـ PFD ≤ 0.1 أي **SIL 1** يكفي؛ لكن الإنذار LAH يأتي من LT-201 نفسه في نظام التحكم نفسه، فلا يستقل عن LIC ولا يُحتسبان إلا طبقة واحدة 0.1 (IEC 61511)، فيبقى 10^{-2} مقابل الهدف 10^{-4}، ويلزم SIF بـ PFD ≤ 10^{-2} أي SIL 2 فعلًا لا هامشًا.
3. **مصفوفة السبب والنتيجة (جزء):**

الشكل 31-8: *المثال المحلول لوعاء شفط الضاغط: (أ) مرسل التحكم LT-201 بالضغط التفاضلي ومرسل الحماية LT-202 بالرادار الموجّه على فوهات مستقلة، بعتبة 70% للإنذار LAH و85% للفصل LAHH؛ (ب) تحليل طبقات الحماية (LOPA) يبين أن LIC والإنذار LAH من المرسل نفسه يُحتسبان طبقة واحدة لا طبقتين، فيبقى التكرار 10^{-2} في السنة ويلزم SIF من SIL 2 لبلوغ الهدف 10^{-4}.*

السبب	الحساس	الحد	إنذار	فصل المحرك	إغلاق SDV شفط/تصريف	فتح صمام التفريغ
مستوى KOD عالٍ	LT-201 (تحكم)	70%	LAH	—	—	—
مستوى KOD عالٍ جدًا	LT-202 (SIS، فوهات مستقلة، رادار موجّه)	85%	LAHH	✓	✓	✓ بعد 5 ثوانٍ

السبب	الحساس	الحد	إنذار	فصل المحرك	إغلاق SDV شفط/تصريف	فتح صمام التفريغ
ضغط شفط منخفض جدًا	PT-203 (SIS)	8 barg	PALL	✓	✓	—
ضغط تصريف عالٍ جدًا	PT-204 (SIS)	36 barg	PAHH	✓	✓	✓
اهتزاز عالٍ جدًا	VT-205/206 (2oo2 لكل كرسي، API 670)	حد المصنّع بالميكرومتر قمة إلى قمة (µm pk-pk)	VAHH	✓	✓	—

4. **التحقق من الاستقلالية:** LT-202 على فوهات مستقلة عن LT-201 وبمبدأ مختلف (رادار مقابل DP) ليتحقق الدفاع ضد الفشل المشترك (31.14).
5. **إعادة الضبط:** من لوحة محلية بعد التحقق من تصريف الوعاء؛ والتجاوز لاختبار LT-202 يمر بإجراء التجاوز مع حماية بديلة (مشغل عند مقياس المستوى المحلي).

31.17 حالة ميدانية: الحماية التي «لم تكن في القائمة»

الموقف: وحدة تجفيف غاز بالجلايكول في محطة معالجة صُمّمت بحمايات ضغط ومستوى عالٍ على البرج، لكن لم يُركب تعشيق المستوى المنخفض على خط خروج الجلايكول (البند 4 في 31.3) لأن HAZOP الأصلي اعتبر أن صمام التحكم بالمستوى

«يكفي». بعد سنتين علق صمام التحكم مفتوحًا أثناء تنظيف مرشح، فانخفض مستوى القاع حتى اخترق الغاز عند 70 bar إلى وعاء الوميض منخفض الضغط (تصميم 7 bar)، ففتح صمام الأمان إلى الشعلة وتضررت أطراف الوعاء؛ ولم تقع إصابات.

التحليل: كانت المواصفة المرجعية تتضمن الحماية صراحة، والدراسة أسقطتها بلا تبرير كمي؛ ولو طُبقت الخطوة 4 في 31.15 (كل حذف بتبرير موثق) لاستُعيدت. أُضيفت بعد الحادث SDV على خروج الجلايكول بمرسل مستقل (SIL 1) وإنذار LAL مسبق.

الدرس: القوائم المرجعية ليست بيروقراطية؛ هي ذاكرة حوادث سابقة. وإسقاط بند منها يحتاج إلى حجة أقوى من «يكفي». (مثال تعليمي مركّب.)

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ماذا يقرر المهندس	ماذا ينفذ الفني ويقيس
سجل الحمايات	ينسخ قائمة الحد الأدنى لكل معدة، ويطابقها مع HAZOP وLOPA وتوصيات الصانع والمرخّص، ويوثق كل حذف بتبرير معتمد	يتحقق ميدانيًا من أن كل حماية في السجل مركّبة فعلًا، ومن أن حساس الفصل على فوهة مستقلة عن حساس التحكم
الاختبار	يحدد التسلسل المطلوب لكل فصل (المدخنة ثم ID ثم FD في الأفران، المحرك وصمامات القطع والتفريغ في الضواغط) وفترات الاختبار	يختبر الفصل كاملًا حتى العنصر النهائي، ويتحقق من الترتيب والتأخيرات، ويسجل السبب الأول
إعادة الضبط والتجاوز	يكتب قواعد إعادة الضبط المحلية وإجراء التجاوز والحماية البديلة	يعيد الضبط محليًا بعد معرفة السبب فقط، ولا يتجاوز حماية إلا بتصريح معتمد

31.18 الأخطاء الشائعة

- استخدام حساس التحكم للفصل («المرسل نفسه يعطي إنذارًا وفصلًا») خلافًا للمبدأ 2 في القسم 31.1.
- فصل الضاغط بإيقاف المحرك فقط دون إغلاق صمامي القطع، فيبقى الغاز عالي الضغط في الغلاف ويرجع عبر الضاغط.
- إغلاق غاز الدليل عند كل فصل للفرن، فيصعب إعادة البدء ويتراكم غاز غير محترق.
- مقياسا مستوى للخزان من المبدأ نفسه (رادارين مثلًا) بدل مبدأين مختلفين.
- الاكتفاء بمرسل مستوى واحد في الخدمات القذرة أو المتجمدة.
- تجاهل تسلسل المدخنة/ID/FD عند فصل الفرن فيتراكم الضغط في صندوق الاحتراق.
- ربط إنذار LAHH لخزان الاستلام بغرفة تحكم الخزانات فقط دون إغلاق صمام التسليم، فيفيض الخزان قبل أن يتصل أحد بمحطة الضخ.
- اعتبار أهداف EEMUA 191 لمعدل الإنذارات (القسم 22.3) «أهدافًا مثالية غير واقعية» بدل مؤشرات تُقاس شهريًا.
- عدم توثيق سبب حذف حماية واردة في المواصفة المرجعية.

31.19 ملخص

يقدم هذا الفصل الحد الأدنى المتعارف عليه للحمايات الآلية في المعدات النموذجية لصناعة الهيدروكربونات كما جمعتها OISD-STD-152: من الفواصل والمجففات وخطوط الأنابيب، إلى الأبراج والأفران والمفاعلات والضواغط وFCC، إلى الشعلة والخزانات والتوربينات وLPG والفحم والكبريت، ثم معدات البتروكيماويات. والمبادئ العابرة لكل القوائم: حساس مستقل لكل فصل، والفصل يعني عزلًا كاملًا لا إيقاف محرك، وإنذار مسبق

قبل كل فصل، وإعادة ضبط محلية بعد التحقيق، ودفاع ضد الفشل المشترك بمتغيرات مختلفة، وإدارة إنذارات وفق EEMUA 191/ISA-18.2. والاستخدام الصحيح: قائمة تحقق تُطابَق مع HAZOP وLOPA وتوصيات الصانع والمرخّص، لا بديلًا عنها.

وفي الفصل التالي: الفصل 32، «قياس السرعة والاهتزاز وأجهزة الآلات الدوارة وحماية الآلات»، يفتح الباب السادس بتفصيل ما أحالت إليه قوائم هذا الفصل مرارًا بعبارة «حماية الآلة وفق الصانع»: كيف تُقاس السرعة والاهتزاز والإزاحة المحورية، وكيف يُبنى رف الحماية وفق API 670.

31.20 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الشروط العامة السبعة التي تفرضها المواصفة على أي نظام فصل آلي، وأيها الأكثر إغفالًا في الممارسة؟
2. لماذا يجب أن تُعاد الصمامات التي أغلقها الفصل محليًا فقط؟
3. اذكر الحمايات الدنيا لوعاء شفط ضاغط، وما الفرق بين «فصل الضاغط» و«إيقاف المحرك».
4. لماذا يُشترط في الخزانات مقياسان على مبدأين مختلفين، وما علاقة ذلك بالفشل المشترك؟
5. اشرح تسلسل الأفعال عند الإيقاف الكامل لفرن متوازن السحب، ولماذا هذا الترتيب؟ ولماذا لا يُطبق عند كل قطع للوقود؟
6. لماذا لا يُغلق صمام غاز الدليل عند فصل الفرن لأسباب غير ضغط الدليل؟
7. ما الحماية الأساسية الأكثر فعالية ضد الانفلات الحراري في مفاعل التكسير الهيدروجيني، وكيف تُستشعر؟
8. في FCC لماذا يُغلق الصمام المنزلق عند ضغط تفاضلي منخفض عبره؟

9. بالرجوع إلى القسم 22.3: ما معدل الإنذارات المقبول وفق EEMUA 191 في التشغيل المستقر وبعد الاضطراب، ولماذا يسبق كل فصل في هذا الفصل إنذار مسبق؟

10. طبّق خطوات 31.15 ومثال 31.16 على مجفف غاز بالجلايكول واكتب مصفوفة السبب والنتيجة لحماياته الست.

مراجع الفصل: OISD-STD-152: Safety Instrumentation for Process) R50 Systems in Hydrocarbon Industry، الأقسام 3 إلى 6)، وOISD-STD-111 (الأفران) و OISD-STD-108 (الخزانات) وOISD-144/150 (LPG) وOISD-141/241 (خطوط الأنابيب) بالإحالة، وIEC 61508/61511، وEEMUA 191 وISA-18.2، وAPI 670 وAPI 14C، وNFPA 85/86، والفصول 35 و32 و28 و29 و36 من هذا الكتاب، وخبرة المؤلف الميدانية (R18)؛ وR64 (مبادئ الأجهزة: منظومة إيقاف رأس البئر ومنهج API RP 14C، 38.1 إلى 38.6)؛ وAPI Spec 6A (معدات رأس البئر وشجرة الإنتاج وصماماتها السطحية)؛ وAPI Spec 14A وAPI RP 14B (الصمامات تحت السطحية وأنظمتها).

الباب السادس: تطبيقات المعدات والطاقة والإنتاج

يطبق هذا الباب ما سبق على المعدات التي تُبنى حولها محطات الطاقة ومنشآت النفط والغاز: قياس الاهتزاز وحماية الآلات وتحليل حالتها (الفصلان 32 و33)، ثم التحكم بالتوربينات الغازية (الفصل 34)، والضواغط ومنع الانفصال الهوائي (الفصل 35)، والمراجل ومولدات البخار (الفصل 36)، والتوربينات البخارية والدورة المركبة (الفصل 37)، ورؤوس الآبار ومنشآت الإنتاج (الفصل 38). وفي كل فصل منها تتكرر الأدوات نفسها: القياس، والحلقات، والانتقاء، والحماية.

الفصل 32: قياس السرعة والاهتزاز وأجهزة الآلات الدوارة وحماية الآلات

لمن هذا الفصل: لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم الذي يتعامل مع التوربينات الغازية والبخارية والضواغط والمضخات والمحركات وعلب التروس: من يختار مجسات السرعة والاهتزاز ويركبها ويعايرها، ومن يهيئ رفوف الحماية وفق API 670 ويضبط الإنذارات والإيقافات، ومن يقيس الاهتزاز بجهاز محمول ويحتاج إلى معرفة ماذا يقيس وكيف يحكم على النتيجة. أما تحليل الطيف وتشخيص الأعطال فموضوع الفصل 33 الذي يليه مباشرة ويبني على قياسات هذا الفصل.

الفكرة الأساسية: الآلة الدوارة تخبر عن حالتها بأربع لغات: سرعتها، واهتزاز عمودها وغلافها، وموضع عمودها المحوري، وحرارة محاملها. وأجهزة الآلات الدوارة تترجم هذه اللغات إلى إشارات موثوقة تكفي لثلاثة أغراض متدرجة: التحكم (السرعة للحاكم)، والحماية (الإيقاف قبل التلف)، والمراقبة (اكتشاف التدهور مبكرًا). والفرق بين مجس مركّب بإتقان ومجس مركّب على عجل هو الفرق بين إيقاف أنقذ آلة بملايين الدولارات وإيقاف كاذب أوقف مصنعًا بلا سبب.

32.1 ما الذي يُقاس في الآلة الدوارة ولماذا

يلخص الجدول القياسات النموذجية بحسب نوع الآلة، وفق ممارسة API 670 (أنظمة حماية الآلات) ومواصفات الآلات (API 612 للتوربينات البخارية، وAPI 617 للضواغط، و API 610 للمضخات):

القياس	ما يكشفه	الآلات التي تحتاجه عادة	المجس
السرعة (Speed)	التحكم بالحاكم، والسرعة الزائدة، والسرعة الصفرية، وعبور السرعات الحرجة	كل التوربينات والضواغط والمحركات الكبيرة	مغناطيسي سلبي، أو فعال (Hall)، أو قرب على عجلة مسننة
الاهتزاز النسبي للعمود (Radial Shaft Vibration)	حركة العمود داخل المحمل: عدم اتزان، انحناء، تلامس، عدم استقرار زيت	آلات المحامل الانزلاقية (توربينات، ضواغط طاردة، علب تروس كبيرة)	زوج مجسي قرب X- Y عند كل محمل
اهتزاز الغلاف (Casing / Bearing Housing Vibration)	اهتزاز الجسم: محامل الدحرجة، التروس، الأساسات، التكهف	مضخات ومحركات ومراوح وعلب تروس ذات محامل دحرجة، وأغلفة التوربينات الغازية	مقياس تسارع أو مجس سرعة زلزالي
الموضع المحوري (Axial / Thrust Position)	حالة محمل الدفع وتآكله؛ الحماية من تلامس الدافعات بالغلاف	ضواغط وتوربينات بمحمل دفع	مجسا قرب (2) عند طوق الدفع
الانحراف (Eccentricity)	انحناء العمود أثناء الدوران البطيء قبل البدء	التوربينات البخارية الكبيرة	مجس قرب عند نهاية العمود
تمدد الغلاف والتمدد التفاضلي (Case / Differential Expansion)	تمدد الغلاف الحراري ونسبته إلى تمدد الدوّار؛ الخلوص المحوري بين الريش	التوربينات البخارية	LVDT أو مجس قرب طويل المدى
المرجع الطوري (Keyphasor / Phase Reference)	نبضة واحدة كل دورة: تحديد الطور والسرعة للتحليل والاتزان	كل الآلات الحرجة	مجس قرب على ثلم أو بروز

القياس	ما يكشفه	الآلات التي تحتاجه عادة	المجس
حرارة معدن المحامل	تلف الطبقة البيضاء (Babbitt)، فقد التزييت، الحمل الزائد	كل المحامل الانزلاقية	RTD أو مزدوج حراري مغروس، بعنصرين للتكرار
حرارة الزيت وضغطه وتدفقه	نظام التزييت	كل الآلات الكبيرة	مرسلات ومفاتيح (القسم 35.10)
حرارة ملفات المحرك والهواء	الحمل الزائد والتبريد	المحركات الكبيرة	RTD مغروس في الملفات (6 عادة)

كيف أختار؟ ابدأ من نوع المحمل: محامل انزلاقية تعني مجسي قرب X-Y للعمود مع موضع محوري إن وُجد محمل دفع، ومحامل دحرجة تعني مقياس تسارع على الغلاف؛ ثم أضف ما يفرضه نوع الآلة (الانحراف والتمدد للتوربين البخاري، والمرجع الطوري لكل آلة حرجة). والجدول لا يقول أي القياسات يفصل وأيها يراقب فقط؛ فهذا قرار فلسفة الحماية وAPI 670 ووثائق الصانع. والخطأ الأكثر كلفة الاكتفاء بمقياس تسارع على غلاف توربين بمحامل انزلاقية ظنًا أنه «يقيس الاهتزاز»، بينما حركة العمود داخل المحمل، وهي ما يتلف الآلة، لا تصل إلى الغلاف إلا مخففة ومتأخرة.

الشكل 32-1: *أجهزة مجموعة توربين وعلبة تروس وضاغط: مجسا قرب X-Y عند كل محمل انزلاقي، ومجسا الإزاحة المحورية عند طوق الدفع، والمرجع الطوري، ومجسات السرعة على العجلة المسننة، ومقاييس التسارع على أغلفة علبة التروس، وRTD المحامل، كلها إلى رف الحماية ومنه إلى نظام التحكم ونظام مراقبة الحالة.*

32.2 قياس السرعة

المبدأ المشترك: تُقاس سرعة الدوران بعدّ نبضات تولدها أسنان عجلة (Toothed Wheel) أو ثقوب أو مفاتيح على العمود أمام مجس، ثم تحويل التردد إلى دورات في الدقيقة:

$$\text{n (rpm)} = \text{f (Hz)} \times 60 \div \text{N}$$

حيث N عدد الأسنان. فعجلة بستين سنًا تعطي 1 Hz لكل rpm، وهو اختيار شائع لأنه يجعل التردد بالهرتز يساوي السرعة بالدورات في الدقيقة.

أنواع المجسات:

- **المجس المغناطيسي السلبي (Passive Magnetic / Variable Reluctance Pickup):** مغناطيس دائم يحيط به ملف؛ مرور السن يغير الممانعة المغناطيسية فيولّد الملف جهدًا جيبيًا تقريبًا دون تغذية خارجية.

سعته تزداد مع السرعة وحجم السن وتقل كلما كبرت الفجوة: بضعة مللي فولت عند الدوران البطيء وعشرات الفولتات عند السرعة الكاملة. بسيط ومتين ومقاوم للحرارة ولا يحتاج إلى تغذية، لكنه لا يقرأ السرعات المنخفضة جدًا (تحت نحو 50 إلى 100 rpm حسب العجلة والفجوة)، ويحتاج إلى بطاقة إدخال تقبل السعات المتغيرة بعتبة كشف مناسبة. الفجوة النموذجية 0.5 إلى 1.5 mm، ويُضبط الجهد عند أدنى سرعة تشغيل بحيث يفوق عتبة البطاقة بهامش.

- **المجس الفعال (Hall-Effect / Active أو Magnetoresistive):** يحتاج إلى تغذية (عادة 5 إلى 24 V) ويعطي نبضة مربعة ثابتة السعة مهما كانت السرعة، فيقرأ حتى السرعة الصفرية تقريبًا. ويشيع في حماية السرعة الزائدة الحديثة وفي كشف السرعة الصفرية (Zero Speed) قبل تشغيل الدوران البطيء أو فتح صمام البدء. وبعضه يعطي قناتين بإزاحة طور تكشف اتجاه الدوران.
- **مجس القرب بالتيارات الدوامية (Eddy-Current Proximity Probe):** المجس نفسه المستخدم للاهتزاز (القسم 32.4)، موجه إلى عجلة مسننة أو ثلم؛ يعطي إشارة تتبع الفجوة بدقة عند أي سرعة، ويستخدم للمرجع الطوري (نبضة واحدة كل دورة على ثلم Keyphasor) ولقياس السرعة في رفوف API 670.
- **المشفرات والمجسات الضوئية:** في المحركات المتحكم في سرعتها ونظم الاختبار (الفصل 11).

التكرار وحماية السرعة الزائدة: حماية السرعة الزائدة (Overspeed Protection) وظيفة سلامة تصنف عادة SIL 2 أو SIL 3، ويشترط API 670 وAPI 612 لها نظامًا إلكترونيًا مستقلًا عن الحاكم: ثلاثة مجسات مستقلة على عجلة مسننة (أو على عجلة خاصة بالحماية غير عجلة الحاكم)، تدخل ثلاث قنوات مستقلة بتصويت 2oo3، مع اختبار دوري لكل قناة على حدة دون إيقاف الآلة (تُحقن إشارة تردد مكافئة للسرعة الزائدة في قناة واحدة فيُفصل مرحّلها فقط)، وزمن استجابة كلي قصير جدًا في حدود عشرات المللي ثانية (يُرجع في قيمته إلى الطبعة المعتمدة من API 670). ونقطة الفصل

الإلكترونية عادة 110% من السرعة المقننة، ويبقى الفصل الميكانيكي (Mechanical Overspeed Bolt) في التوربينات القديمة عند نحو 110 إلى 112% وفق المصنّع.

الشكل 32-2: *إشارتا مجس السرعة: المغناطيسي السلبي يعطي موجة تكبر سعتها مع السرعة وتختفي عند الدوران البطيء، والفعال يعطي نبضات ثابتة السعة حتى السرعة الصفرية؛ وفي الأسفل حساب السرعة من التردد وعدد الأسنان.*

مثال محلول (تهيئة قناة السرعة): توربين سرعته المقننة 5100 rpm وعجلته المسننة 60 سنًا.

- المعادلة: $f = n \times N \div 60$
- عند السرعة المقننة: $f = 5100 \times 60 \div 60 = 5100$ Hz
- عند السرعة الزائدة 110%: $f = 5610$ Hz

- عند الدوران البطيء 3 rpm: f = 3 Hz
- فالبطاقة يجب أن تقبل 0 إلى 6 kHz على الأقل، وأن يكون زمن تحديث القراءة مناسبًا: فعند 3 rpm تصل نبضة كل 0.33 s، وبطاقة تحسب من نبضة واحدة تعطي قراءة كل ثلث ثانية، أما عند 5100 rpm فتصل 5100 نبضة في الثانية ويمكن لبطاقة تقيس زمن الدور على نافذة 10 ms أن تعطي دقة 1 rpm تقريبًا. وإذا كان المجس سلبيًا وسعته عند 3 rpm أقل من عتبة البطاقة، فإن قراءة الدوران البطيء تحتاج إلى مجس فعال أو مجس قرب.

مثال محلول (المجس المغناطيسي والفجوة): تعطي ورقة بيانات مجس سلبي 25 V p-p عند 1000 Hz وفجوة 0.5 mm على عجلة معيارية، وتنص على أن الخرج يتناسب عكسيًا تقريبًا مع الفجوة ويتناسب طرديًا مع التردد. المطلوب: الخرج عند فجوة 1.0 mm وأدنى سرعة تشغيل معنية للتحكم 300 rpm على عجلة 60 سنًا (300 Hz).

- المعادلة: الخرج ≈ الخرج المرجعي × (الفجوة المرجعية ÷ الفجوة) × (التردد ÷ التردد المرجعي)
- التعويض: الخرج ≈ 25 × (0.5 ÷ 1.0) × (300 ÷ 1000)
- النتيجة: الخرج ≈ 3.75 V p-p
- عتبة كشف البطاقة 1 V p-p، فالهامش كافٍ. أما عند 30 rpm (30 Hz) فالخرج ≈ 0.375 V ولا يُكشف، وهذا مقبول إذا كانت البطاقة مخصصة للحاكم لا للسرعة الصفرية.

الشكل 32-3: *نموذج ثلاثي الأبعاد لعجلة مسننة على عمود التوربين مع ثلاثة مجسات سرعة مستقلة لحماية السرعة الزائدة بتصويت 2oo3، ومجس رابع للحاكم، ومجس مرجع طوري على ثلم في العمود.*

32.3 أساسيات قياس الاهتزاز: ماذا نقيس وبأي وحدة

الاهتزاز حركة متذبذبة، ويمكن وصفها بثلاث كميات مرتبطة رياضيًا عند تردد معين:

الكمية	الوحدة الشائعة	التعبير	ما تناسبه
الإزاحة (Displacement)	µm قمة إلى قمة (p-p) أو mil (1 mil = 25.4 µm)	x	اهتزاز العمود النسبي في المحامل الانزلاقية، والترددات المنخفضة (أقل من نحو 10 Hz)

الكمية	الوحدة الشائعة	التعبير	ما تناسبه
السرعة (Velocity)	mm/s جذر متوسط المربعات (rms) أو قمة (peak)	$v = 2\pi f x$	اهتزاز الغلاف العام في 10 إلى 1000 Hz؛ أساس معايير ISO 20816
التسارع (Acceleration)	g (1 g = 9.81 m/s²) أو m/s²	$a = 2\pi f v = (2\pi f)^2 x$	الترددات العالية: التروس ومحامل الدحرجة والتكهف (فوق نحو 1 kHz)

كيف أختار؟ القاعدة من التردد: إزاحة لما دون نحو 10 Hz وللعمود داخل المحامل الانزلاقية، وسرعة للنطاق 10 إلى 1000 Hz حيث تعيش معظم أعطال الغلاف ومعايير ISO 20816، وتسارع لما فوق نحو 1 kHz كالتروس ومحامل الدحرجة. والجدول يربط الكميات رياضيًا لجيب نقي واحد فقط؛ فلا تُحوَّل قيمة كلية لإشارة مركبة من كمية إلى أخرى، ولا تُقارن قراءة عمود بقراءة غلاف. والخطأ الأكثر كلفة مقارنة رقم rms برقم قمة، أو قيمة بنطاق ترددي بقيمة بنطاق آخر، ثم الحكم بأن الآلة «تدهورت» أو «تحسنت» على فرق ليس إلا فرق تعريف.

تحويل الوحدات: القمة إلى القمة = 2 × القمة، والقمة = rms × √2 للموجة الجيبية النقية فقط؛ وفي الإشارات المركبة تختلف النسبة، ولذلك تحدد المعايير الوحدة والقياس (rms أو peak) والنطاق الترددي معًا، ولا يقارن رقم بغير مثله.

مثال محلول (تحويل بين الكميات): مضخة تدور بسرعة 2950 rpm وتهتز عند تردد الدوران (1X = 49.2 Hz) بسرعة 4.5 mm/s rms.

- الإزاحة: $x\ (\text{rms}) = v \div (2\pi f)$
- التعويض: $x = 4.5 \div (2\pi \times 49.2) = 0.01456$ mm
- النتيجة: $x = 14.6$ µm rms، أي قمة إلى قمة ≈ $14.6 \times 2\sqrt{2} \approx 41$ µm p-p
- التسارع: $a = 2\pi f v$

- التعويض: $a = 2\pi \times 49.2 \times 4.5 \times 10^{-3}$
- النتيجة: $a = 1.39\ m/s^2 \approx 0.14\ g$
- ولو كان الاهتزاز نفسه 4.5 mm/s rms عند 500 Hz (تردد تعشيق تروس) لكان التسارع 14.1 m/s² أي 1.44 g، بينما الإزاحة 1.4 µm فقط. وهذا يوضح لماذا تُختار الكمية بحسب التردد: الإزاحة للبطيء والتسارع للسريع والسرعة في الوسط.

النطاق الترددي وسرعة الدوران: الاهتزاز يُقاس عادة بدلالة مضاعفات سرعة الدوران (Orders): 1X تردد الدوران، و2X ضعفه، وهكذا. فعدم الاتزان يظهر عند 1X، وعدم المحاذاة عند 2X غالبًا، والتروس عند عدد الأسنان × السرعة. وأجهزة القياس المستمر تعطي عادة القيمة الكلية (Overall) في نطاق محدد (مثلًا 10 إلى 1000 Hz)، وتعطي أجهزة المراقبة والتحليل الطيف كاملًا (الفصل 33).

32.4 مجسات القرب بالتيارات الدوامية (Proximity Probes)

المبدأ: ملف صغير في طرف المجس يُغذى بإشارة ترددها نحو 1 إلى 2 MHz من وحدة تُسمى وحدة التشغيل أو Proximitor (Driver / Oscillator-Demodulator). يولّد الملف مجالًا مغناطيسيًا متناوبًا يُحدث تيارات دوامية في سطح العمود المعدني أمامه، فتمتص طاقة من الملف بقدر يعتمد على البعد بينهما. تقيس وحدة التشغيل هذه الطاقة وتعطي جهدًا مستمرًا سالبًا يتناسب خطيًا مع الفجوة (Gap): كلما بعُد العمود زاد الجهد سالبًا. فالمكوّن المستمر من الخرج يمثل الموضع المتوسط للعمود (الفجوة)، والمكوّن المتردد يمثل اهتزازه.

النظام المطابق (Matched System): المجس وكابل التمديد ووحدة التشغيل تُعاير معًا بطول كهربائي محدد (5 m أو 9 m عادة)، لأن سعة الكابل ومحاثته جزء من دائرة الرنين؛ فلا يُقطع الكابل ولا يُستبدل بطول آخر، وإلا تغير معامل القياس. **معامل القياس (Scale Factor)** القياسي 7.87 V/mm (200 mV/mil)، والمدى الخطي عادة نحو 2 mm (80

(mil بين 2− و−18 V تقريبًا، ويُضبط المجس في التركيب على **جهد فجوة (Gap Voltage)** في منتصف المدى الخطي، عادة 10− V (نحو 1.27 mm / 50 mil أو ما يحدده صانع الآلة، بحيث يستطيع العمود التحرك في الاتجاهين دون الخروج من المدى.

مادة الهدف: المعايرة القياسية لفولاذ AISI 4140؛ ولمادة أخرى (فولاذ سبائكي 4340 أو فولاذ مقاوم للصدأ أو سبائك خاصة) يتغير المعامل ويلزم مجس معاير للمادة أو تصحيح. ولا تصلح الأسطح المطلية بالكروم أو المغنطة أو ذات الخدوش، لأنها تعطي **جريانًا كهربائيًا (Electrical Runout)** يظهر اهتزازًا وهميًا؛ ويشترط API 670 أن يكون مجموع الجريان الكهربائي والميكانيكي عند مسار المجس أقل من نحو 25% من الاهتزاز المسموح أو 6 µm أيهما أكبر، ويُقاس بالدوران البطيء ويُطرح أحيانًا (Slow-Roll Compensation) في التحليل.

التركيب: زوج مجسي X وY عند كل محمل، متعامدان، بزاوية 45° على جانبي المحور الرأسي (لتفادي شق تقسيم المحمل)، ومعرفة الاتجاه ضرورية لرسم المدار (Orbit). ويُثبت المجس بحامل صلب لا يهتز، وبمسافة كافية عن أي معدن آخر (خلوص جانبي لا يقل عن ضعفي قطر رأس المجس)، وبعيدًا عن مجس آخر بمسافة تمنع التداخل (Cross-Talk). ويُربط الكابل ويُحمى في مسار، وتُركب وحدة التشغيل في صندوق قريب من الآلة، ومنه إلى رف الحماية بكابل مدرع مع مخرج مخزّن (Buffered Output) لأجهزة التحليل.

الشكل 32-4: *نظام مجس القرب: المجس وكابل التمديد ووحدة التشغيل بطول كهربائي مطابق، ومنحنى الجهد مقابل الفجوة بمعامل 7.87 V/mm ومدى خطي نحو 2 mm، ونقطة الضبط عند 10− V في منتصفه.*

لماذا يُضبط جهد الفجوة بين 9− و10− V تقريبًا؟ الهدف أن يقف المجس قرب منتصف المدى الخطي، فيقيس حركة العمود نحوه وبعيدًا عنه دون أن تخرج الإشارة من المجال الصحيح. وخرج وحدة التشغيل جزءان:

- **جهد الفجوة المستمر (DC Gap Voltage):** يمثل المسافة المتوسطة بين رأس المجس وسطح العمود.
- **إشارة الاهتزاز المتناوبة (AC Vibration Signal):** التغيّر حول جهد الفجوة بسبب اهتزاز العمود.

> **مثال رقمي:** مجس معامله 7.87 V/mm مضبوط على 9.5− V، والعمود يهتز بسعة 50 µm من القمة إلى القمة.
>
> - المعادلة: سعة الإشارة = الإزاحة × معامل القياس
> - التعويض: سعة الإشارة = 7.87 × 0.050
> - النتيجة: سعة الإشارة ≈ 0.39 V، فتتأرجح القراءة بين نحو 9.30− و− 9.70 V.
> - ولو تأرجحت بين 9.0− و−10.0 V، أي 1 V من القمة إلى القمة، لكان الاهتزاز نحو 127 µm. وتحويل فرق الجهد إلى إزاحة يعتمد دائمًا على معامل النظام الفعلي، لا على الرقم القياسي وحده.

لماذا لا يُضبط أقرب أو أبعد؟ لأن حركة العمود قد تُخرج المجس عندئذ من المنطقة الخطية، فتتشوه الموجة (تُقصّ قمتها في جهة واحدة) وتصبح قراءة الاهتزاز غير دقيقة، مع أن المجس ما زال يعطي إشارة ولا يرفع إنذار عطل.

ولماذا 9− أو 9.5− V أحيانًا لا 10− V؟ هذه القيم كلها قرب منتصف المدى الخطي لكثير من أنظمة المجسات بحسب منحنى الجهد مقابل الفجوة، والفرق بينها صغير (0.5 V ≈ 64 µm). ولا علاقة لها بنصف جهد التغذية البالغ 24− V كما يُظن أحيانًا، ولا قيمة عامة لكل الأنظمة. لكن بعض الصانعين يختار قيمة غير المنتصف ليعوّض انتقال العمود أثناء التشغيل: ففي المحامل الانزلاقية يرتفع العمود داخل الخلوص حين يدور ويتكوّن غشاء الزيت، فيتغير جهد الفجوة بين التوقف والتشغيل، ويُراد أن يكون المجس في منتصف مداه **أثناء التشغيل** لا أثناء التوقف. وفي مجسات الموضع المحوري تُحدد القيمة بحسب موضع العمود على وسادة الدفع كما في الإجراء 2 من القسم 32.9. **فالقيمة الصحيحة ليست رقمًا واحدًا لكل مجس:** تؤخذ من دليل المجموعة (المجس وكابل التمديد ووحدة التشغيل) وتعليمات صانع الآلة، وتُسجل في سجل الآلة.

ضبط الفجوة ليس معايرة. ضبط الفجوة يحدد نقطة التشغيل فقط. أما المعايرة فتتحقق من علاقة الجهد بالمسافة، ومن معامل النظام وخطيته عبر عدة نقاط على منضدة المعايرة (الإجراء 1 في 32.9). ومجس ضُبطت فجوته بدقة قد يكون معامله خاطئًا، لأن مادة الهدف مختلفة أو الكابل استُبدل بطول آخر.

32.5 مجسات الغلاف: مقاييس التسارع ومجسات السرعة

مقياس التسارع الكهرضغطي (Piezoelectric Accelerometer): كتلة صغيرة تضغط على بلورة كهرضغطية؛ التسارع يولد قوة فشحنة كهربائية. الأنواع الشائعة في الصناعة من نوع IEPE (أو ICP): إلكترونيات مدمجة تُغذى بتيار ثابت (نحو 4 mA) على السلكين نفسيهما وتعطي جهدًا (حساسية 100 mV/g عادة، أو 10 mV/g للاهتزازات الشديدة و 500 mV/g للبطيئة). نطاقه الترددي واسع (من نحو 1 Hz إلى عشرات الكيلوهرتز) بحسب التركيب، ويتحمل الحرارة حتى نحو 120 °C (والشحني بلا إلكترونيات حتى 500 °C وأكثر لأغلفة التوربينات الغازية مع مكبر شحنة بعيد). ولمعظم تطبيقات الحماية تُدمج إشارته إلى سرعة (mm/s) في وحدة التشغيل أو في الرف، أو يُستخدم **مرسل اهتزاز** يعطي 4–20 mA لقيمة كلية مباشرة إلى DCS في الآلات غير الحرجة.

مجس السرعة الزلزالي (Seismic Velocity Transducer): ملف معلق بنوابض حول مغناطيس، تحرك الغلاف يولد جهدًا يتناسب مع السرعة مباشرة، دون تغذية. نطاقه نحو 10 إلى 1000 Hz، وهو أثقل وأكثر حساسية للتوجيه والتآكل من مقياس التسارع، لكنه ما زال مستخدمًا في التوربينات الغازية القديمة وبعض التطبيقات ذات الحرارة العالية. وتحل محله عمليًا مقاييس التسارع المدمجة.

التركيب يحدد النطاق الترددي: التثبيت بمسمار ملولب على سطح مستوٍ يعطي أعلى تردد (عشرات الكيلوهرتز)، والتثبيت باللاصق أقل، والمغناطيس أقل بكثير (بضعة كيلوهرتز، ويسقط سريعًا على سطح غير مستوٍ أو مطلي)، والمجس المحمول باليد لا يُوثق به فوق نحو 1 kHz. ويُثبت المجس على غلاف المحمل في الاتجاه الذي تنتقل فيه

القوى (أفقي وعمودي ومحوري في القياس المحمول، وعادة واحد أو اثنان في الحماية الدائمة)، على معدن صلب لا على غطاء رقيق أو حماية مروحة.

الشكل 32-5: *مجسات الغلاف: بنية مقياس التسارع IEPE ومجس السرعة الزلزالي، وأثر طريقة التثبيت على الحد الأعلى للتردد الموثوق، ومجالات استخدام الكميات الثلاث بحسب التردد.*

جدول مقارنة: مجسات الاهتزاز الثلاثة

وجه المقارنة	مقياس التسارع (Accelerometer)	مجس السرعة الاهتزازية (Velocity Sensor)	مجس القرب بالتيارات الدوامية (Eddy-current Proximity Probe)
الكمية المقاسة	التسارع (Acceleration)	سرعة الحركة الاهتزازية (Vibration Velocity)، لا سرعة دوران العمود	الإزاحة والمسافة (Displacement / Gap)
الوحدات الشائعة	g أو m/s^2، مع بيان القمة (Peak) أو الجذر التربيعي المتوسط (RMS)	mm/s أو in/s، وغالبًا RMS	µm أو mil، وغالبًا من القمة إلى القمة (p-p)
ما يراقبه	اهتزاز غلاف المعدة أو بيت المحمل (قياس مطلق)	اهتزاز غلاف المعدة أو بيت المحمل (قياس مطلق)	حركة العمود نسبةً إلى موضع المجس (قياس نسبي)، وموضعه الساكن أيضًا
مكان التركيب	على الغلاف قرب المحمل، بمسمار أو لاصق أو مغناطيس	على الغلاف أو بيت المحمل بمسمار	في حامل داخل غطاء المحمل مقابل سطح العمود، بفجوة محددة
التلامس	يلامس الجزء الثابت، ولا يلامس العمود	يلامس الجزء الثابت، ولا يلامس العمود	لا يلامس العمود
مبدأ العمل	كتلة تضغط عنصرًا كهرضغطيًا (Piezoelectric)، فتتولد شحنة تتناسب مع التسارع	ملف ومغناطيس في النوع التقليدي (Moving Coil)، أو مقياس تسارع مع تكامل إلكتروني في نوع السرعة الكهرضغطي (Piezo-velocity)	ملف بتردد عالٍ يولّد تيارات دوامية في المعدن، فتتغير الإشارة مع المسافة

وجه المقارنة	مقياس التسارع (Accelerometer)	مجس السرعة الاهتزازية (Velocity Sensor)	مجس القرب بالتيارات الدوامية (Eddy-current Proximity Probe)
نطاق التردد النموذجي	من نحو 1 Hz إلى 10 kHz وأكثر، بحسب الطراز وطريقة التثبيت	نحو 10 إلى 1,000 Hz للنوع التقليدي، وأوسع للنوع الكهرضغطي	من 0 Hz (الموضع الساكن) إلى نحو 10 kHz ضمن عرض نطاق النظام
الإشارة	شحنة أو جهد يتناسب مع التسارع، مثل 100 mV/g	جهد يتناسب مع السرعة، مثل 100 mV/(in/s) أي نحو 3.94 mV/(mm/s)	جهد مستمر للفجوة يعلوه تغيّر ديناميكي للاهتزاز، بمعامل 7.87 V/mm عادة
التغذية	نوع IEPE يحتاج إلى تيار تغذية ثابت، ونوع الشحنة يحتاج إلى مضخّم شحنة	التقليدي يولّد إشارته ذاتيًا، والكهرضغطي يحتاج إلى تغذية	وحدة تشغيل / Driver) (Proximitor بتغذية 24−V عادة، وكابل بطول مطابق
ضبط جهد الفجوة	لا؛ جهد الانحياز في نوع IEPE لا يمثل فجوة	لا	نعم، وفق مواصفات النظام (32.4)
التحقق والمعايرة	هزّاز معايرة (Shaker) بتسارع وتردد معلومين	هزّاز بسرعة وتردد معلومين	منضدة ميكرومتر بهدف من مادة العمود للتحقق من المعامل والخطية عبر عدة نقاط، واختبار ديناميكي عند الحاجة (32.9)
الآلات المناسبة	محامل دحرجية، وعلب تروس، وترددات عالية	مضخات ومراوح متوسطة السرعة، وشدة الاهتزاز عند تردد الدوران ومضاعفاته	محامل انزلاقية: توربينات، وضواغط، ومولدات (API 670)

وجه المقارنة	مقياس التسارع (Accelerometer)	مجس السرعة الاهتزازية (Velocity Sensor)	مجس القرب بالتيارات الدوامية (Eddy-current Proximity Probe)
الحرارة	حتى نحو 120 °C للعادي، و260 °C وأكثر للأنواع الخاصة	حتى نحو 120 °C، وأعلى لبعض الأنواع	المجس حتى نحو 175 °C نموذجيًا، ووحدة التشغيل في مكان أبرد
أهم مصادر الخطأ	تثبيت ضعيف، ورنين التركيب، ونطاق تردد غير مناسب، والكابل	اتجاه تركيب غير مناسب، والعمل خارج نطاق التردد، وتآكل الأجزاء المتحركة في النوع التقليدي	فجوة خاطئة، وعدم تطابق مكونات النظام، ومادة سطح العمود وحالته، والجريان (Runout)
أهم قيد	لا يقيس حركة العمود داخل المحمل	لا يقيس حركة العمود داخل المحمل	لا يعطي اهتزاز العمود المطلق وحده، فحركة الحامل نفسه تدخل في القياس
الاستخدام الأبرز	مراقبة الحالة والتشخيص	مراقبة عامة، وحماية بعض الآلات	حماية الآلات الحرجة بالفصل

كيف أختار؟ القاعدة: مجس قرب حيث يهم موضع العمود داخل محمل انزلاقي (توربينات وضواغط ومولدات وفق API 670)، ومقياس تسارع حيث تنتقل قوى العطل إلى الغلاف عبر محامل دحرجة أو تروس، ومجس سرعة زلزالي حيث يفرضه تركيب قديم أو حرارة عالية بلا تغذية. وما لا يظهر في الجدول أن الاختيار يسبق الشراء بقرار التأريض ومسار الكابل والنظام المطابق، وهذه لا تُصلح لاحقًا في الموقع. والخطأ الأكثر كلفة تركيب مقياس تسارع بمغناطيس على سطح مطلي ثم الوثوق بطيفه فوق كيلوهرتز، أو استبدال كابل تمديد مجس القرب بطول آخر فيتغير معامل القياس بلا أي إنذار.

الشكل 32-6: *(أ) ثلاثة مجسات على محمل واحد: مجس القرب يرى حركة العمود نسبةً إلى البيت، ومقياس التسارع ومجس السرعة يريان اهتزاز البيت المطلق. (ب) اهتزاز جيبي واحد بسرعة ثابتة 4.5 mm/s rms: إزاحته 40.5 µm p-p وتسارعه 0.20 g قمة (peak) عند 50 Hz، لكنهما 0.4 µm و 20 g قمة عند 5 kHz؛ ولذلك يناسب مجس القرب الترددات المنخفضة، ومقياس التسارع الترددات العالية.*

ثلاث قواعد في التطبيق:

- قد يعرض جهاز يعمل بمقياس تسارع قراءته بوحدة mm/s، لأنه يكامل التسارع إلكترونيًا فيحصل على السرعة. فالوحدة المعروضة لا تدل وحدها على نوع المجس.
- في التوربين تُستعمل مجسات القرب للعمود، ومجسات السرعة أو مقاييس التسارع لبيت المحمل معًا، وكل منها يراقب حركة مختلفة (الشكل 32-6أ). فلا يغني أحدها عن الآخر.
- لا تُقارن قراءة بوحدة µm p-p بقراءة بوحدة mm/s rms مباشرة، إلا بعد معرفة التردد وطبيعة الإشارة ومكان القياس.

مثال محلول: التحويل بين الكميات الثلاث

- **المعطيات:** اهتزاز جيبي نقي بتردد 50 Hz، وإزاحته 50 µm من القمة إلى القمة.
- **الافتراضات:** الإشارة جيب واحد، والقياس كله في النقطة نفسها وبالاتجاه نفسه.
- **الحل:**
  - القمة: $x = 25$ µm (نصف القيمة من القمة إلى القمة)
  - السرعة القمية: $v = 2\pi f x = 2\pi \times 50 \times 0.025\ \text{mm} \approx 7.85\ \text{mm/s}$
  - السرعة RMS $= 7.85 \div \sqrt{2} \approx 5.55\ \text{mm/s}$
  - التسارع القمي: $a = 2\pi f v = 2\pi \times 50 \times 7.85\ \text{mm/s} \approx 2.47\ \text{m/s}^2 \approx 0.25\ \text{g}$
- **المعنى ميدانيًا:** هذه العلاقات صحيحة لجيب واحد في نقطة واحدة فقط. أما إزاحة العمود من مجس القرب فقياس نسبي داخل المحمل، وسرعة البيت قياس مطلق للغلاف، فلا تُحوَّل إحداهما إلى الأخرى بهذه المعادلات. ولكل كمية حدودها في المواصفات: ISO 20816 لسرعة الغلاف (الشكل 32-12)، وحدود إزاحة العمود من صانع الآلة وAPI 670.

32.6 الموضع المحوري والانحراف والتمدد والمرجع الطوري

الموضع المحوري (Axial / Thrust Position): مجسا قرب متقابلان أو متجاوران يوجَّهان إلى طوق الدفع أو نهاية العمود، ويقيس الرف المكوّن المستمر من إشارتيهما (الموضع لا الاهتزاز). يُضبط الصفر عند وضع العمود الطبيعي على وسادة الدفع الفاعلة، وتُضبط الإنذارات والإيقافات في الاتجاهين (مثلًا إنذار عند ±0.4 mm وإيقاف عند

mm ±0.6، وفق خلوص الآلة وسمك الطبقة البيضاء). ويُعتمد عادة التصويت 2oo2 بين المجسين (أو مقارنة) لمنع الإيقاف الكاذب من مجس واحد؛ ولهذا يجب أن يكونا على أسطح مستقلة وبمسارات كابل مستقلة. ووحدة الرف تحتاج إلى معرفة اتجاه الحركة الذي يزيد جهد المجس: نحو المجس أو بعيدًا عنه (Normal / Reverse).

الشكل 32-7: *الموضع المحوري للعمود: (أ) مجسا قرب مستقلان يواجهان نهاية العمود، وطوق الدفع بين وسادات الدفع الفاعلة وغير الفاعلة ذات الطبقة البيضاء (Babbitt)؛ (ب) يُضبط الصفر عند استناد العمود على الوسادات الفاعلة، ويُنذر عند 0.4 ±mm ويُفصل عند 0.6 ±mm في الاتجاهين بتصويت 2oo2 بين المجسين، والقيم مثال تُحدد من خلوص الآلة وسمك الطبقة البيضاء.*

الانحراف (Eccentricity): مجس قرب عند طرف الدوّار يقرأ الإزاحة قمة إلى قمة أثناء الدوران البطيء (Slow Roll، عادة بضع دورات في الدقيقة) قبل بدء التوربين البخاري؛

فارتفاعه يعني أن الدوّار انحنى حراريًا ويجب مواصلة الدوران البطيء حتى يستقيم قبل رفع السرعة، وإلا سبب اهتزازًا شديدًا عند عبور السرعة الحرجة.

تمدد الغلاف (Case Expansion): LVDT أو مجس قرب طويل المدى (عشرات المليمترات) بين قاعدة التوربين البخاري وغلافه، يقيس تمدد الغلاف الحراري أثناء التسخين. **التمدد التفاضلي (Differential Expansion):** الفرق بين تمدد الدوّار وتمدد الغلاف، يُقاس بمجسات قرب طويلة المدى على سطح مائل أو حافة في الدوّار، ويُراقب لأن الخلوص المحوري بين الريش الدوارة والثابتة صغير؛ فالتجاوز يعني تلامسًا وتلفًا.

المرجع الطوري (Keyphasor): مجس قرب موجه إلى ثلم (Notch) أو بروز واحد على العمود، يعطي نبضة واحدة كل دورة. لا يدخل في الحماية عادة، لكنه ضروري لتحليل الاهتزاز والاتزان الميداني: يحدد الطور (زاوية الاهتزاز نسبة إلى علامة ثابتة) ويعطي السرعة الدقيقة، ويربط الترتيب الزمني بالزاوية في مخططات بود (Bode) والمدار (الفصل 33).

32.7 حرارة المحامل

في المحامل الانزلاقية يُغرس RTD (Pt100 عادة) أو مزدوج حراري في الطبقة البيضاء عند منطقة الحمل الأقصى (على بعد ملليمترات من سطح الانزلاق)، بمجسين لكل وسادة أو محمل للتكرار، ويُوصلان بمرسل أو ببطاقة إدخال في الرف أو في نظام التحكم. القيم النموذجية: تشغيل عادي 70 إلى 90 °C، إنذار نحو 105 إلى 120 °C، إيقاف نحو 115 إلى 130 °C، وتحددها وثائق الآلة. والارتفاع البطيء مع الزمن يشير إلى تدهور الزيت أو المحمل، والارتفاع السريع مع اهتزاز إلى تلامس أو فقد تزييت. وفي المحامل الدحرجية تُقاس حرارة الغلاف عادة بمجس سطحي أو بمقياس محمول، وهي أقل دلالة.

32.8 رف الحماية وفق API 670

بنية النظام: رف (Rack) بمصدري تغذية مكررين، ووحدة واجهة للرف، ووحدات مراقبة (Monitor Modules) كل منها بقناتين أو أربع قنوات لنوع قياس (اهتزاز شعاعي، موضع محوري، سرعة، حرارة، انحراف)، ووحدة مرحّلات (Relay Module) بمنطق تصويت قابل للبرمجة، ووحدة مرجع طوري، ووحدة اتصال بنظام التحكم (Modbus أو OPC أو 4–20 mA)، ومخارج مخزّنة (Buffered Outputs) على الواجهة لكل قناة لتوصيل أجهزة التحليل دون التأثير في القياس. ويوجد لكل قناة مؤشر OK يراقب سلامة المجس والكابل ووحدة التشغيل (بمراقبة جهد الفجوة ضمن مدى مقبول أو تيار IEPE)؛ فإذا خرج عن المدى تُعلن القناة Not OK ويُمنع إنذارها أو فصلها (Alarm/Trip Inhibit) بدل أن تفصل الآلة بسبب كابل مقطوع، ويُطلق إنذار عطل نظام.

وظائف الحماية النموذجية في الرف:

- عتبتان لكل قناة: **إنذار (Alert / Alarm)** و**خطر (Danger / Trip)**، مع تأخير زمني قصير قابل للضبط (عادة 1 إلى 3 s للاهتزاز و0 للسرعة الزائدة) لمنع الفصل من نبضة كهربائية عابرة.
- **التصويت:** إنذار من أي قناة، والفصل بحسب فلسفة الحماية: بتصويت 2oo2 (أي AND بين X وY عند المحمل نفسه)، أو 1oo2 (الفصل من أي قناة) في بعض الفلسفات، أو 2oo3 للسرعة؛ ويُذكر أن فصل الاهتزاز من قناة واحدة شائع في المحامل الحرجة رغم أنه يزيد الإيقاف الكاذب.
- **مضاعف الفصل (Trip Multiply):** رفع العتبات مؤقتًا (إلى ضعفيها أو ثلاثة أضعافها) أثناء عبور السرعات الحرجة في البدء والتوقف، يُفعَّل من نظام التحكم بإشارة زمنية أو بنطاق سرعة، ويُلغى تلقائيًا بعدها.
- **التجاوز (Bypass / Inhibit):** لكل قناة، لفترة الصيانة، بمفتاح أو أمر مسجل، مع إنذار ظاهر طوال فترة التجاوز.

- **التثبيت (Latching):** يبقى الفصل مثبتًا حتى يُعاد يدويًا، ويسجل الرف **أول سبب (First-Out)** وقيمة القناة عند لحظة الفصل، وهذا ما يحقق فيه المهندس لاحقًا.
- **إخفاء الإنذار عند تعطيل OK (Timed OK Channel Defeat):** يُبقي القناة مثبّطة مدة قصيرة بعد عودتها إلى حالة OK، فيمنع إنذارًا أو فصلًا كاذبًا عند إعادة توصيل المجس.

فلسفة الإيقاف: المواصفة API 670 تحدد أن الفصل يذهب مباشرة إلى نظام الإيقاف (إلى صمام الفصل أو قاطع المحرك) عبر تلامسات المرحّلات، ولا يمر بشبكة أو بمنطق قابل للتعديل من المشغل، مع أن الحالة والقيم ترسل إلى DCS للعرض. وحين يكون الرف جزءًا من وظيفة سلامة (سرعة زائدة) يُشترى بشهادة SIL وتُطبق عليه دورة حياة السلامة في الفصل 29.

الشكل 32-8: *بنية نظام حماية الآلات وفق API 670: المجسات ووحدات التشغيل في الحقل، والرف بوحدات المراقبة والمرحّلات ومخارجه المخزّنة، وطريقان مستقلان: تلامسات الفصل إلى نظام الإيقاف مباشرة، والبيانات إلى نظام التحكم ونظام مراقبة الحالة.*

مثال محلول (جدول حماية محمل): ضاغط طارد مركزي بسرعة 9000 rpm، خلوص المحمل القطري 0.25 mm. وفق إرشاد شائع تُوضع عتبة الإنذار عند نحو 40% من الخلوص القطري (≈ 100 µm p-p)، أو ما يوصي به الصانع) وعتبة الفصل عند نحو (≈ 150 µm p-p 60%)، مع مقارنة بحدود ISO 20816-3 (سابقًا ISO 7919-3) للآلات الصناعية المقترنة: حدود المناطق A/B وB/C وC/D عند 4800/√n و9000/√n و13200/√n ميكرومتر قمة إلى قمة، فعند 9000 rpm تكون 51 و95 و 139 µm p-p على التوالي. يستنتج المهندس أن عتبة الإنذار 100 µm تقع فوق حد B/C (95) وعتبة الفصل 150 فوق حد C/D (139)، وهذا مقبول ومتوافق، وقد يشدد الصانع الإنذار إلى 90 µm. وتُضبط الحرارة: إنذار 105 °C وفصل 115 °C، والموضع المحوري: إنذار ±0.4 mm وفصل ±0.6 mm، مع مضاعف فصل 2 أثناء عبور السرعة الحرجة الأولى بين 3800 و4400 rpm.

32.8.1 مسار العودة: ثلاثة أنظمة أرضي لا نظام واحد

كل ما سبق في هذا الفصل يفترض أن الإشارة التي تصل إلى الرف هي الإشارة التي خرجت من المجس. وهذا الافتراض يسقط حين يُهمل **مسار العودة (Return Path)**. فالحديث عن التأريض ليس حديثًا عن السلامة الكهربائية وحدها، بل عن المرجع الذي تُقاس بالنسبة إليه كل إشارة: المجس يعطي جهدًا، والجهد كمية نسبية لا معنى لها إلا مقابل نقطة مرجع؛ فإذا تحرّكت نقطة المرجع تحرّكت القراءة، ولو كان العمود ساكنًا تمامًا.

ولهذا تُفصل في المنشأة الصناعية ثلاثة أنظمة تأريض مستقلة، لكل منها غرض مختلف تمامًا:

جدول مقارنة: أنظمة التأريض الثلاثة

البند	الأرضي الوقائي (Protective Earth – PE)	أرضي الأجهزة أو الأرضي المرجعي (Instrument / Reference Earth – IE أو RE)	أرضي الأمان الجوهري (Intrinsically Safe Earth – IS)
الغرض	حماية الأشخاص والمعدات من الصعق والعطل الأرضي	توفير مرجع جهد نظيف وثابت للإشارات	نقطة المرجع لكل دوائر الأمان الجوهري وحواجزها
ما يُربط به	أغلفة الأجهزة، هياكل الخزائن، حوامل الكابلات، دروع الكابلات المسلحة، هياكل الآلات والمنشأة	حجب كابلات الإشارة، ومراجع البطاقات والعوازل ووحدات التشغيل	قضبان تركيب حواجز زينر، ومراجع دوائر Ex i
ما يسري فيه	تيارات عطل كبيرة وتيارات تسرب دائمة	لا يسري فيه تيار في التشغيل العادي (مرجع لا مسار قدرة)	لا يسري فيه تيار في التشغيل العادي
مستوى التلوث الكهربائي	مرتفع جدًا (تيارات شاردة وتوافقيات من المحركات ومغيّرات التردد)	نظيف بالتعريف؛ يفقد معناه إن لوّثه غيره	نظيف، ومعزول عن الهيكل
العلاقة بالهيكل	موصول بالهيكل والمنشأة	معزول عن الهيكل، ويُوصل بنقطة واحدة فقط	معزول عن الهيكل، ولا يُربط بالأرضي الرئيسي للمنشأة إلا عند نقطة واحدة موثقة
الشرط الحاكم	مقاومة منخفضة وموصلات كافية المقطع	مسار إشارة مباشر إلى النقطة المرجعية، وحجب متصل بلا انقطاع ولا حلقات	ممانعة بينه وبين الأرضي الرئيسي للمنشأة أقل من 1 Ω

لماذا تُفصل؟ لأن الأرضي الوقائي، بحكم وظيفته، موصول بكل هيكل معدني في المنشأة، فتمر فيه تيارات التسرب والتيارات الشاردة وتوافقيات مغيّرات التردد. فهو أرضي «ملوّث» لا يصلح مرجعًا لإشارة قدرها بضع عشرات من الملّي فولت. وأرضي الأجهزة يصلح مرجعًا لأنه لا يحمل تيارًا، لكنه يفقد هذه الصفة في اللحظة التي يُوصَل فيها بالهيكل في نقطة ثانية: يصير عندها مسارًا موازيًا لتيار الأرضي الوقائي، ويُنقل التلوث كله إلى مرجع القياس.

وأرضي الأمان الجوهري ثالث مستقل لأنه ليس مرجع قياس فحسب، بل جزء من إثبات السلامة نفسه: لو ارتفع جهده عن الأرضي الرئيسي للمنشأة، لفقد حاجز زينر قدرته على تصريف الطاقة الزائدة إلى الأرض، وسقطت الحماية. ولهذا يُشترط أن تقل **الممانعة بين الأرضي الرئيسي للمنشأة وأرضي الأمان الجوهري عن 1 Ω**، وأن يكون هذا الربط عند نقطة واحدة موثقة، لا عند كل خزانة (وتفصيل عتاده في القسم 26.6).

> **قاعدة عملية:** إن لم تستطع أن تجيب، لأي كابل إشارة في الوحدة، عن سؤال «أين النقطة الوحيدة التي يلتقي فيها مرجع هذه الإشارة بالأرض؟» فأنت أمام مشكلة تأريض قائمة لم تُكتشف بعد.

32.8.2 كيف تتولد الحلقة الأرضية فيزيائيًا

خذ جهازين: وحدة التشغيل (Proximitor) عند الآلة تُخرج جهدًا، وبطاقة الرف في غرفة التحكم تقيسه. البطاقة لا تقيس «الجهد» بل الفرق بين طرف الإشارة ومرجعها الخاص. فإذا كان مرجع وحدة التشغيل مؤرضًا عند هيكل الآلة، ومرجع الرف مؤرضًا عند قضيب الخزانة، فبين نقطتي الأرضي مسافة، وللمسافة موصل، وللموصل مقاومة.

وثلاث حقائق تجتمع فتصنع المشكلة:

1. **المجالات الكهربائية والمغناطيسية حاضرة دائمًا** حول المحركات والمولدات والمحولات ومغيّرات التردد وكابلات القدرة، وتحقن تيارات شاردة في شبكة التأريض والهيكل.

2. **المسار بين نقطتي الأرضي له مقاومة غير صفرية**، تكبر بالمسافة وتصغر بالمقطع.
3. **حالما يُؤرَّض مرجع الإشارة في نقطتين، يُغلق مسار موصل ثانٍ** بين هاتين النقطتين هو **الحلقة الأرضية (Ground Loop)**: التيار الشارد يجد فيها طريقًا فيسري، وحاصل ضرب هذا التيار في مقاومة الموصل جهد يظهر على التوالي مع الإشارة.

وهذا الجهد له بصمة مميزة: **تردده هو التردد المسيطر في التركيب الكهربائي، أي 50 Hz أو 60 Hz حسب الشبكة**، ومعه توافقياته 100/120 Hz)، و(150/180 Hz، وهو مستقل تمامًا عن سرعة الآلة. وسعته تتغير مع تشغيل الأحمال الكبيرة وتوقفها، وهذا يفسر لماذا تظهر المشكلة نهارًا وتختفي ليلًا، أو تظهر عند بدء ضاغط احتياطي.

ويتضاعف الأثر حين لا تكون الآلة نفسها مربوطة بشبكة التأريض ربطًا سليمًا: فالقاعدة الخرسانية والعوازل الاهتزازية وطبقات الدهان تحت قوائم التثبيت تعزل هيكل الآلة جزئيًا عن الشبكة، فيصير جهد الهيكل عائمًا وتابعًا لما يحقنه المحرك فيه، ويصبح حجب الكابل المؤرض عند الآلة هو الموصل الأدنى مقاومة الذي يعود منه هذا التيار كله إلى غرفة التحكم.

مثال محلول (جهد الحلقة الأرضية وما يعادله من اهتزاز):

- **المعطيات:** صندوق وحدات تشغيل عند ضاغط، ورف الحماية في غرفة التحكم، والمسافة بينهما 150 m. موصل المرجع (0 V) في كابل الإشارة نحاسي بمقطع 0.5 mm^2، ومقاومة النحاس النوعية 0.0175 $\Omega \cdot mm^2/m$. مرجع وحدة التشغيل مؤرض عند هيكل الآلة، ومرجع الرف مؤرض عند قضيب الأرضي في الخزانة. تيار شارد عند 50 Hz يسري في الحلقة قدره 120 mA (تسرب محرك مغذّى من مغيّر تردد مع لاتزان أحمال). معامل قياس مجس القرب 7.87 V/mm، أي 200 mV/mil.
- **الافتراضات:** الموصل المؤرض من الطرفين هو مرجع الإشارة نفسه، فالجهد

المتولد يظهر كاملًا على التوالي مع الإشارة (أسوأ الحالات). ولو كان الدخل تفاضليًا بنسبة رفض نمط مشترك عالية والجهد نمطًا مشتركًا متوازنًا تمامًا لانخفض الأثر كثيرًا، لكن التوازن ينهار عمليًا لأن مقاومتي الموصلين إلى الأرض غير متساويتين ولأن الحجب نفسه أحد طرفي الحلقة.

- **الحل بالوحدات:**
  - مقاومة الموصل: $R = 0.0175 \times 150 \div 0.5 = \mathbf{5.25\ \Omega}$
  - جهد الحلقة: $V = 0.120\ A \times 5.25\ \Omega = \mathbf{0.63\ V\ rms}$
  - بالقيمة قمة إلى قمة: $0.63 \times 2\sqrt{2} = \mathbf{1.78}$ V p-p (1782 mV p-p)
  - ما يعادله إزاحة: 7.87 mV ÷ 1782 µm p-p/**226 µm p-p** = µm، أي $200 \div 1782 = \mathbf{8.9\ mil\ p\text{-}p}$
- **معنى النتيجة:** عتبة فصل نموذجية لمحمل انزلاقي في ضاغط عالي السرعة نحو 150 µm p-p (القسم 32.8). فجهد حلقة أرضي قدره 0.63 V وحده يكفي لتجاوز عتبة الفصل بقناة واحدة، والآلة سليمة تمامًا. والأخطر أن الفصل لا يُنسب إلى الكابل لأن القيمة «حقيقية» في نظر الرف.

الشكل 32-9: *كيف تولّد الحلقة الأرضية اهتزازًا وهميًا: مرجع وحدة التشغيل (Proximitor) مؤرض عند هيكل الآلة ومرجع الرف عند قضيب الخزانة، فيسري تيار شارد 120 mA عند 50 Hz في موصل مرجع طوله 150 m ومقاومته 5.25 Ω، ويظهر على التوالي مع الإشارة جهد 0.63 V rms (1.78 V p-p يعادل 226 µm p-p، أي فوق عتبة الفصل 150 µm p-p والآلة سليمة.*

كم يساوي جهد الحلقة الأرضية بوحدات القياس؟ الجدول التالي يحوّل جهد الحلقة إلى ما يقرأه كل نوع من المجسات، ويبيّن أن عشرات الملّي فولت وحدها تكفي لإفساد قياس:

جهد الحلقة (mV rms)	قمة إلى قمة (mV)	مجس قرب 7.87 mV/µm (µm p-p)	مجس قرب 200 mV/mil (mil p-p)	مقياس تسارع 100 mV/g (g rms)	ما يعادله سرعة عند 50 Hz (mm/s rms)
10	28	3.6	0.14	0.10	3.1
50	141	18.0	0.71	0.50	15.6
100	283	35.9	1.41	1.00	31.2

جهد الحلقة (mV rms)	قمة إلى قمة (mV)	مجس قرب 7.87 mV/µm (µm p-p)	مجس قرب 200 mV/mil (mil p-p)	مقياس تسارع 100 mV/g (g rms)	ما يعادله سرعة عند 50 Hz (mm/s rms)
630	1782	226	8.9	6.30	197

(حُسبت السرعة من التسارع عند 50 Hz بالعلاقة $v = a \div 2\pi f$، و$1\ g = 9.81\ m/s^2$.)

والقراءة الأهم في هذا الجدول هي السطر الأول: **جهد حلقة قدره 10 mV فقط** — وهو ما لا يكاد يُلاحَظ بفولتميتر — يظهر على مقياس تسارع الغلاف بما يعادل 3.1 mm/s r ms، وهذه قيمة تقارب حدّ الإنذار في كثير من الآلات الصناعية المتوسطة وفق ISO 20816، ويظهر على مجس القرب بما يعادل 3.6 µm p-p، وهو من مرتبة الحدّ المسموح للجريان الكهربائي والميكانيكي (نحو 6 µm، القسم 32.4). أي أن حلقة أرضي «صغيرة» لا تسبب فصلًا كاذبًا فحسب، بل تستهلك ميزانية الخطأ كلها قبل أن يبدأ القياس.

32.8.3 طوبولوجيا التأريض: النقطة النجمية مقابل التأريض التسلسلي

حين تُوصل عدة أجهزة بمرجع أرضي مشترك، لا توجد إلا طوبولوجيتان:

- **التأريض بالنقطة النجمية (Star Point Grounding):** نقطة أرضي واحدة، ويُوصل كل جهاز إليها بموصل مخصص له وحده. فلا يمر تيار عودة جهاز في موصل يشترك فيه جهاز آخر، ولا تُغلق حلقة بين جهازين. وهذه هي الطوبولوجيا المطلوبة لكل دوائر القياس والحماية.
- **التأريض التسلسلي (Serial Grounding):** أن «يستعير» جهاز أرضيه من جهاز آخر، فيُوصل الثاني بالثالث والثالث بالرابع ثم يُوصل آخر السلسلة بنقطة الأرضي. وهو في حقيقته توصيل على التوالي، ويُمنع في دوائر القياس.

لماذا يُمنع التسلسلي؟ لأن الموصل المشترك بين جهازين يحمل مجموع تياري عودتهما، فيرفع هبوط الجهد عليه مرجعَ الجهاز الأبعد عن الأرض الحقيقية، ويتراكم الخطأ كلما

طالت السلسلة. والأسوأ أن مرجع كل جهاز يصير تابعًا لما يفعله الجهاز الذي قبله، فعطل أو تغيّر حمل في أحدها يظهر قراءةً في الآخر.

مثال محلول (انزياح المرجع في سلسلة تأريض):

- **المعطيات:** ثلاثة صناديق تجميع على مسار آلة، بينها موصلات ربط أرضي من النحاس مقطعها 1.5 mm² وطول كل وصلة 15 m، والصناديق موصولة تسلسليًا (الأبعد ← الأوسط ← الأقرب ← نقطة الأرضي). ويسحب عتاد كل صندوق تيار عودة قدره 80 mA.
- **الافتراضات:** مقاومة النحاس النوعية 0.0175 Ω·mm²/m، ومقاومة التلامسات مهملة، والتيارات مستمرة لتبسيط الحساب.
- **الحل بالوحدات:**
  - مقاومة الوصلة الواحدة: R = 0.0175 × 15 ÷ 1.5 = **0.175 Ω**
  - الوصلة الأقرب إلى نقطة الأرضي تحمل 3 × 80 = 240 mA ← الهبوط = 0.240 × 0.175 = 42 mV
  - الوصلة الوسطى تحمل 160 mA ← الهبوط = 28 mV
  - الوصلة الأبعد تحمل 80 mA ← الهبوط = 14 mV
  - انزياح مرجع الصندوق الأبعد عن الأرضي الحقيقي = 42 + 28 + 14 = **84 mV**
- **معنى النتيجة:** 84 mV على معامل 7.87 mV/µm تعادل انزياحًا ظاهريًا قدره **10.7 µm** في جهد الفجوة. وهذا انزياح مستمر لا يُقارن مباشرة بحدّ الجريان المسموح (نحو 6 µm) لأن الجريان مكوّن متغير مع الدوران، لكنه يفوقه مقدارًا، ويكفي لإفساد سجل جهد الفجوة الذي يُقارَن به في كل فحص لاحق (الإجراء 2 في القسم 32.9)، ولإزاحة صفر الموضع المحوري إن كان الصندوق الأبعد يخدم مجسات الدفع. ولو حمل أي من هذه

> الموصلات مركّبة 50 Hz لظهرت المشكلة اهتزازًا لا انزياحًا.

32.8.4 قاعدة تأريض حجب الكابل: طرف واحد، ومتى يُستثنى

هذه أكثر نقاط التأريض إثارةً للخلاف في الموقع، وكثيرًا ما تتعارض فيها وثائق المشروع نفسه. وقد وضع القسم 25.11.5 القاعدة العامة في أساس التصميم، ونفصّلها هنا لإشارات الآلات الدوارة. والقاعدة الحاسمة لإشارات القياس التناظرية منخفضة المستوى — ومنها كل إشارات هذا الفصل — هي:

> **يُؤرَّض حجب كابل الإشارة من طرف واحد فقط، عند جانب نظام الحماية أو غرفة التحكم، ويُقطع الحجب ويُعزل ويُغلَّف عند جانب الحساس.**

لماذا جانب نظام الحماية لا جانب الحساس؟ لسببين:

1. **مرجع القياس موجود هناك.** البطاقة تقيس بالنسبة إلى مرجعها في الرف، فتأريض الحجب عند المرجع نفسه يعطي الشحنات الملتقطة **مسارًا مباشرًا للإشارة (Direct Signal Path)** إلى النقطة التي يُقاس بالنسبة إليها، فلا يُدخل التأريض فرق جهد بين مرجعين.
2. **جانب الحساس هو الجانب الملوث.** هيكل الآلة موصول بالأرضي الوقائي، وتسري فيه تيارات المحرك الشاردة، ويهتز، وتتدهور تلامساته. فتأريض الحجب هناك يوصل مرجع الإشارة بأقذر نقطة في الوحدة.

وهذا قرار يسبق اختيار الحساس لا يتبعه: بعض المجسات ومجموعات الكابلات لا تتيح أصلًا عزل الحجب عند طرف الحساس (انظر الطرق الأربع في القسم 32.8.5)، فيجب أن يُحسم أسلوب التأريض في أساس التصميم قبل إصدار طلب الشراء، لا أثناء فحص الحلقات.

جدول قرار: أين يُؤرَّض الحجب

الكابل أو الإشارة	طرف التأريض	الطرف الآخر	السبب
مجس قرب ووحدة تشغيل (Proximitor)	جانب رف الحماية	يُقطع ويُعزل ويُغلَّف	مرجع القياس في الرف، والمجس ملاصق للآلة
مقياس تسارع أو مجس سرعة زلزالي	جانب الرف أو خزانة المراقبة	يُعزل عند الغلاف	إشارة منخفضة المستوى على هيكل مهتز
مزدوج حراري وRTD وإشارات mV	جانب الخزانة	يُعزل	مرجع البطاقة في الخزانة
حلقة 4–20 mA و HART	جانب الخزانة	يُعزل	يكمل قاعدة القسم 25.11.5
حجب زوج مفرد داخل كابل متعدد الأزواج	جانب الخزانة	يُعزل وتُمرَّر أطراف الحجب على أطراف عبور مخصصة	منع حلقة لكل زوج
الحجب الإجمالي لكابل متعدد الأزواج	جانب الخزانة (الأجهزة)	يجوز تأريضه من الطرفين ضمن تصميم توافق كهرومغناطيسي موثق وشبكة تساوي جهود	يحمي من التداخل المشترك ولا يلامس مراجع الأزواج
شبكات رقمية عالية التردد (Ethernet الصناعي، الشبكات الحقلية)	وفق مواصفة الشبكة، غالبًا من الطرفين أو تأريض هجين بمكثف	مباشر أو عبر مكثف	الحجب المؤرض من طرف واحد يفقد فاعليته عند الترددات العالية

الكابل أو الإشارة	طرف التأريض	الطرف الآخر	السبب
درع الكابل المسلح (Armour)	من الطرفين دائمًا	—	مسار أرضي وقائي وحماية ميكانيكية، وليس حجب إشارة
دوائر الأمان الجوهري	قضيب أرضي الأمان الجوهري في الخزانة	يُعزل عن الهيكل تمامًا	فصل نظام IS شرط سلامة لا شرط جودة إشارة

كيف أختار؟ القاعدة لكل إشارة تناظرية منخفضة المستوى في هذا الفصل واحدة: تأريض الحجب من طرف واحد عند الرف أو الخزانة حيث مرجع القياس، وعزله وتغليفه عند الحساس. ويُستثنى منها ما ليس حجب إشارة أصلًا: درع الكابل المسلح والحجب الإجمالي للكابل متعدد الأزواج وحجوب الشبكات الرقمية السريعة، وهنا يُتبع تصميم التوافق الكهرومغناطيسي أو مواصفة الشبكة. والجدول لا يحل تعارض الوثائق؛ فحين يختلف إجراء التركيب عن أساس التصميم فالأخير هو الحاكم ويُوثَّق الحل في مخطط الحلقة. والخطأ الأكثر كلفة الخلط بين حجب الزوج والحجب الإجمالي فيُؤرَّض حجب كل زوج من الطرفين، فينتج خط 50/60 Hz يُقرأ عدم اتزان وتُهدر عليه عملية اتزان كاملة (القسم 32.8.7).

الاستثناءات الثلاثة ومنطقها:

1. **الترددات العالية:** الحجب المؤرض من طرف واحد يكافئ هوائيًا مفتوح الطرف، وتقل فاعليته كلما اقترب طول الكابل من ربع طول الموجة، كما أنه لا يقدم حماية من المجال المغناطيسي لأن هذه الحماية تتطلب مرور تيار معاكس في الحجب. ولذلك تُؤرَّض حجوب الشبكات الرقمية السريعة من الطرفين وفق توصية المصنّع.
2. **الحجب الإجمالي (Overall Screen) للكابلات متعددة الأزواج:** هو غلاف حماية من التداخل المشترك ولا يلامس مرجع أي زوج، فتأريضه من جانب

الأجهزة هو المعتاد، ويجوز من الطرفين حيث توجد شبكة تساوي جهود موثقة. أما **حجب كل زوج على حدة فيبقى من طرف واحد دائمًا**، وهذا التمييز هو ما يُخلط فيه غالبًا عند قراءة الوثائق.

3. **التأريض الهجين (Hybrid):** تأريض مباشر عند جانب الرف، ومكثف صغير (نحو 10 nF بجهد عزل مناسب) بين الحجب والأرضي عند الطرف الآخر. فيمر للترددات العالية مسار منخفض الممانعة، وتبقى حلقة 50/60 Hz مفتوحة لأن ممانعة المكثف عندها عالية. وهو حل عملي حين تُطلب حماية من الترددات العالية على كابل إشارة تناظرية.

الشكل 32-10: *قاعدة تأريض حجب كابل الإشارة: (أ) التأريض من طرف واحد عند الرف مع عزل الحجب وتغليفه عند الحساس فلا تتكون حلقة؛ (ب) التأريض من الطرفين يغلق حلقة عبر الحجب وشبكة التأريض يسري فيها تيار 50/60 Hz فيظهر خط كاذب في الطيف؛ (ج) التأريض الهجين بمكثف نحو 10 nF عند طرف الحساس، ممانعته نحو 318 kΩ عند 50 Hz ونحو 16 Ω عند 1 MHz.*

ما الذي يحدث عمليًا إذا أُرِّض الحجب من الطرفين:

1. يسري في الحجب تيار دائم، يظهر في القراءة مركّبة عند 50/60 Hz وتوافقياتها لا علاقة لها بسرعة الآلة.
2. ترتفع القيمة الكلية للاهتزاز، وتتحرك مع تشغيل الأحمال الكبيرة، فتتولد إنذارات كاذبة وفصل كاذب بلا نمط زمني مفهوم.

3. يضلّل التحليل: يُقرأ خط 50 Hz على آلة تدور 2950 rpm على أنه 1X فيُحكم بعدم الاتزان، وتُصرف ساعات على اتزان ميداني لا يغيّر شيئًا.
4. يتآكل مع الوقت طرف الحجب والغدة التي يمر منها التيار، فتظهر المشكلة متقطعة وتزداد سوءًا موسميًا مع الرطوبة.
5. في دوائر الأمان الجوهري يُخلّ ذلك بشرط من شروط الشهادة، لأن نظام أرضي الأمان الجوهري يجب أن يبقى معزولًا عن الهيكل وعن الأنظمة الأخرى.

وحسم التعارض الوثائقي: حين تنص مواصفة التركيب أو إجراء التشغيل التجريبي على تأريض الحجب من الطرفين بينما ينص أساس التصميم على طرف واحد، **فأساس التصميم هو الحاكم**، ويُصحَّح التعارض بانحراف موثق قبل بدء التركيب. ويُثبَّت الحل في **مخطط الحلقة (Loop Diagram)** لكل حلقة: النقطة التي يُؤرَّض عندها الحجب، والنقاط التي يُمرَّر فيها على أطراف عبور، والنقطة التي يُقطع عندها ويُغلَّف. فالمخطط هو ما يراه الفني بعد خمس سنوات، لا الفلسفة.

32.8.5 الطرق الأربع لتوصيل الحجب عند جانب الحساس

حتى مع قاعدة الطرف الواحد، يبقى السؤال: كيف يُنهى الحجب عند الحساس نفسه (مقطوعًا ومعزولًا، أو موصولًا بغلاف الحساس دون أن يلامس الهيكل)؟ وللمجسات التجارية أربع صور شائعة، تختلف اختلافًا جوهريًا في جودة المسار:

#	الطريقة	مسار الحجب	التقييم
1	**طرف غلاف مخصص (Case Terminal)** في موصل المجس	داخل جسم المجس مباشرة إلى غلافه	الأفضل: مسار إشارة مباشر، بلا تلامس ميكانيكي وسيط
2	**كابل حساس مدمج (Integral Sensor Cable)**: زوج مجدول مع حجب وسلك تصريف موصول داخليًا	مصنعي دائم داخل الجسم	الأفضل أيضًا: مسار مباشر، ولا يتأثر بالفك والتركيب

#	الطريقة	مسار الحجب	التقييم
3	**تجميعة كابل بموصل مانع للرذاذ (Splash Proof Connector)**	عبر جسم الموصل ووصلته الملولبة	مقبول، لكن المسار يمر بتلامس ميكانيكي
4	**توصيل سلك التصريف إلى غلاف موصل الحساس**	عبر الغلاف والتلامس المفكوك	مقبول، والأضعف من حيث الاستقرار

لماذا الأوليان أفضل؟ لأن الحجب فيهما يصل إلى غلاف الحساس عبر **مسار الإشارة المباشر** داخل الجسم، فلا توجد بينهما وصلة قابلة للفك ولا سطح تلامس معرّض للأكسدة. أما الطريقتان الأخيرتان فمسار الأرضي فيهما يمر بغلاف الموصل أو بوصلته، أي عبر تلامس ميكانيكي.

وهنا يدخل الاهتزاز عاملًا حاسمًا: الحساس مركّب على آلة دوارة، والوصلة الميكانيكية تحت اهتزاز دائم تفقد شدّها تدريجيًا، ويتشكل بين سطحي التلامس أكسيد رقيق. فترتفع مقاومة المسار من أجزاء من الأوم إلى عشرات الأوم أو إلى قطع متقطع، ويتحول الحجب من درع إلى هوائي. ولهذا **يُدرَج فحص هذه الوصلة في الصيانة الدورية**، لا عند ظهور العطل فقط:

1. أوقف الآلة أو ثبّت القناة على التثبيط (Inhibit) قبل أي فك.
2. افحص شدّ صامولة الموصل يدويًا، وابحث عن أثر تآكل أو ماء أو رمل في التجويف.
3. قِس الاستمرارية بين سلك التصريف (أو طرف الغلاف) وجسم الحساس بأوميتر بوظيفة REL بعد طرح مقاومة سلكي القياس: يُقبل عادة أقل من نحو 0.5 Ω، ويُقارن بالقيمة المسجلة عند التركيب.
4. سجّل القيمة في سجل الآلة بجانب جهد الفجوة، فارتفاعها التدريجي مؤشر مبكر قبل أن تظهر إنذارات كاذبة.
5. أعد التثبيت بعزم الشدّ الموصى به، وثبّت الكابل بمشابك معدنية في مسار صلب لا بربطات بلاستيكية (وانظر الحالة في القسم 32.11).

32.8.6 علامات الحلقة الأرضية على القراءة وتشخيصها ميدانيًا

العلامات على القراءة:

العلامة	ما يُلاحَظ	ما يميّزها عن العطل الميكانيكي
مركّبة ثابتة التردد	خط عند 50 أو 60 Hz بالضبط، ومعه توافقيات 100/120 و150/180 Hz	لا تتحرك مع تغيّر سرعة الآلة، بينما كل مركّبة ميكانيكية تتحرك مع السرعة
ارتباط بأحمال كهربائية	ترتفع القيمة عند بدء محرك أو ضاغط أو مغيّر تردد مجاور، وتهبط عند توقفه	العطل الميكانيكي لا يعرف شيئًا عن جدول تشغيل المحركات
إنذارات وفصل كاذب	قفزات مفاجئة تعود إلى طبيعتها، وقنوات متعددة تتأثر معًا	العطل الحقيقي يتطور تدريجيًا وغالبًا في محمل واحد
تحليل مضلَّل	خط قريب من تردد الدوران يُقرأ 1X فيُحكم بعدم الاتزان بلا فائدة من الاتزان	الطور غير مستقر ولا يتكرر، ولا يستجيب لإضافة كتلة تجريبية
أثر على القياس المستمر	انزياح في جهد الفجوة أو في صفر الموضع المحوري دون تغيّر ميكانيكي	لا يقابله تغيّر في الحرارة ولا في الأداء

> **قاعدة الفصل الحاسمة:** غيّر سرعة الآلة قليلًا (أو استغل التوقف أو التسارع) وراقب الخط المشتبه به. المركّبة الميكانيكية تتحرك مع السرعة، ومركّبة الحلقة الأرضية تبقى مسمّرة عند تردد الشبكة. وهذه الملاحظة وحدها تحسم أغلب الحالات قبل فك أي شيء.

قائمة فحص ميدانية مرقّمة لحلقة أرضي مشتبه بها:

1. وثّق الحالة أولًا: سجّل الطيف والقيمة الكلية وجهد الفجوة لكل قناة، وسجّل ما يعمل من معدات كهربائية في الجوار لحظة القياس.
2. ثبّت قنوات الحماية المعنية على التثبيط (Inhibit) بتصريح، وأبلغ غرفة التحكم قبل أي عمل على الكابلات.

3. حدّد التردد بدقة بطيف عالي التمييز (Resolution): هل هو 50.0 Hz بالضبط أم تردد الدوران؟ وراقبه أثناء تغيّر السرعة.
4. افحص الطيف بحثًا عن التوافقيات: وجود 50 و100 و150 Hz معًا بلا مركّبات تتبع السرعة دليل كهربائي قوي.
5. قِس فرق الجهد بين نقطتي الأرضي: فولتميتر على وضع الجهد المتناوب بين هيكل الآلة (أو صندوق الوحدات الميداني) وقضيب الأرضي في خزانة الرف. أي قراءة تتجاوز بضعة ملّي فولت مؤشر، وقراءة بمئات الملّي فولت حاسمة. كرر القياس على وضع الجهد المستمر أيضًا.
6. أعد قياس الخطوة 5 أثناء بدء أكبر حمل كهربائي مجاور: قفزة القراءة تربط المصدر بالمسبب.
7. تتبع الحجب بصريًا من الحساس إلى الرف: عند كل صندوق توصيل، هل الحجب مُمرَّر على طرف عبور أم مربوط بالهيكل أو بمسمار الصندوق؟ التوصيلة المضافة لاحقًا هي المتهم الأول.
8. قِس الاستمرارية بين الحجب وهيكل الآلة بعد فصل طرف الرف: القراءة القريبة من الصفر تؤكد وجود تأريض ثانٍ في الميدان.
9. افصل طرفًا واحدًا فقط (طرف الميدان) وراقب الطيف مباشرة: اختفاء خط 50/60 Hz وهبوط القيمة الكلية هو الدليل الحاسم. لا تفصل الطرفين معًا فتفقد المرجع وتحصل على نتيجة لا تعني شيئًا.
10. تحقق من ربط هيكل الآلة بشبكة التأريض بموصل مخصص مرئي وقابل للفحص، وقِس مقاومته؛ فالقاعدة العازلة وطبقات الدهان تجعل الربط الظاهري وهميًا.
11. راجع طوبولوجيا التأريض في الخزانة: هل كل جهاز موصول بالنقطة النجمية بموصل خاص، أم يستعير أرضيه من جاره (القسم 32.8.3)؟

12. تحقق من فصل القضبان: قضيب الأرضي الوقائي، وقضيب أرضي الأجهزة، وقضيب الأمان الجوهري ثلاثة منفصلة؛ قِس بينها بعد فصل التغذية وتأكد أنها لا تلتقي إلا في النقطة المصممة.
13. بعد الإصلاح: أعد القياس في الظروف نفسها التي ظهرت فيها المشكلة (النهار الحار، تشغيل الاحتياطي)، لا في ظروف هادئة.
14. وثّق في مخطط الحلقة نقطة التأريض النهائية وقيمة فرق الجهد بعد الإصلاح، وأعد تفعيل القنوات وأزل التثبيط، وسجّل جهد الفجوة الجديد مرجعًا للفحوص القادمة.

32.8.7 حالة ميدانية: اتزان لم ينفع

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

العَرَض: مضخة كبيرة بمحرك كهربائي يدور 2965 rpm في وحدة عمليات. ارتفع اهتزاز غلاف المحرك من 2.1 إلى 4.8 mm/s rms خلال أسابيع، والطيف يُظهر خطًا مسيطرًا عند نحو 50 Hz فُسِّر أنه تردد الدوران (1X) ونُسب إلى عدم اتزان. أُجري اتزان ميداني بمعاملات التأثير فلم تتحسن القراءة إلا قليلًا ثم عادت. ولاحظ المشغلون أن القيمة تختلف بين المناوبات وتهبط ليلًا.

الفرضيات: (1) عدم اتزان متبقٍ أو اتساخ الدوّار؛ (2) ارتخاء ميكانيكي أو ضعف أساس؛ (3) مصدر كهرومغناطيسي في المحرك — لكن هذا يظهر عادة عند ضعف تردد الشبكة (100 Hz) لا عنده؛ (4) حلقة أرضي في كابل مقياس التسارع.

الفحوص:

1. طيف عالي التمييز حول المنطقة: ظهر **خطان منفصلان**، أحدهما 49.42 Hz والآخر 50.00 Hz.

2. خُفّضت سرعة المضخة إلى 2930 rpm: تحرك الخط الأول إلى 48.83 Hz وبقي الثاني عند 50.00 Hz بلا حراك.
3. قياس فرق الجهد بالفولتميتر المتناوب بين هيكل المضخة وقضيب الأرضي في خزانة المراقبة: 0.42 V rms، ارتفعت إلى 1.1 V عند بدء مروحة تبريد كبيرة في الوحدة.
4. تتبّع الكابل: وُجد سلك تصريف الحجب مربوطًا بمسمار في صندوق التوصيل الميداني المثبَّت على قاعدة المضخة، إضافةً إلى تأريضه القياسي عند الخزانة.
5. فُصل طرف الميدان وحده وروقب الطيف مباشرة.

الدليل الحاسم: ثبات الخط عند 50.00 Hz بالضبط مع تغيّر السرعة (وهو مستحيل لمركّبة ميكانيكية)، ثم اختفاؤه تمامًا بفصل طرف أرضي واحد، مع هبوط القيمة الكلية من 4.8 إلى 2.2 mm/s rms.

الشكل 32-11: *تشخيص الحالة الميدانية (32.8.7) بالطيف: خط 1X الميكانيكي يتحرك مع السرعة من 49.42 إلى 48.83 Hz، وخط 50.00 Hz ثابت لا يتحرك، ثم يختفي بفصل طرف الحجب الميداني وحده فتهبط القيمة الكلية من 4.8 إلى 2.2 mm/s rms.*

السبب الجذري: أُرِّض حجب كابل مقياس التسارع من الطرفين بعد تعديل أُجري في صيانة سابقة، فتشكلت حلقة بين نقطتي أرضي يفصلهما نحو 120 m، وسرى فيها تيار شارد من دائرة قدرة مجاورة. وزاد الأمر سوءًا أن ربط قاعدة المضخة بشبكة التأريض كان عبر مسمار تثبيت مدهون، فكان حجب الكابل أدنى المسارين مقاومة.

الإجراء والدرس: عُزل الحجب في الميدان وأُبقي التأريض عند جانب الخزانة وحده؛ ورُكّب موصل ربط أرضي مخصص بين قاعدة المضخة وشبكة التأريض وقيست مقاومته؛ ووُثّقت نقطة التأريض في مخطط الحلقة؛ وأُضيف إلى إجراء التحليل بندٌ واحد: **قبل الحكم بعدم الاتزان، غيّر السرعة وتأكد أن المركّبة تتبعها**. والدرس الأعم أن كلفة الحلقة الأرضية هنا لم تكن إنذارًا كاذبًا فحسب، بل عملية اتزان كاملة على آلة متزنة.

◆ ◆ ◆

32.9 التركيب والمعايرة واختبار الحلقات: خطوات

الإجراء 1: التحقق من مجس قرب على منضدة *(Static Calibration)*

1. اجمع المجس وكابل التمديد ووحدة التشغيل بالطول الكهربائي المطابق (تحقق من الملصقات: 5 m أو 9 m، والمادة المستهدفة)، وغذّ وحدة التشغيل بجهد −24 V (أو ما تحدده الوثائق) وصل فولتميتر رقمي بمخرجه.
2. ركّب المجس في أداة معايرة ذات ميكرومتر (Spindle Micrometer) بهدف من مادة العمود نفسها (4140 عادة) أو بقطعة من العمود.
3. قرّب الهدف حتى يلامس المجس (فجوة صفر) وسجّل الجهد، ثم أبعِده بخطوات 0.25 mm (10 mil) وسجّل الجهد عند كل خطوة حتى يتجاوز الجهد −20 V.
4. ارسم الجهد مقابل الفجوة، واحسب معامل القياس في كل خطوة (ΔV ÷ Δفجوة)؛ يُقبل النظام إذا كان المعامل المتوسط ضمن ±5% من 7.87 V/mm، وكل معامل خطوة ضمن ±10% داخل المدى الخطي (عادة من 0.25 إلى 2.25 mm)، وفق API 670.
5. حدد نقطة منتصف المدى الخطي (نحو −10 V) ووثّق المنحنى مع الرقم التسلسلي للثلاثة (مجس، كابل، وحدة تشغيل)؛ فأي تبديل لأحدها يتطلب إعادة التحقق.

الإجراء 2: ضبط فجوة مجس القرب عند التركيب

1. نظّف سطح العمود في مسار المجس وتأكد من خلوه من الخدوش والطلاء، وقِس الجريان الميكانيكي والكهربائي بالدوران البطيء إن أمكن (يجب أن يكون المجموع أقل من الحد المسموح).

2. أدخل المجس في حامله، وصِل الفولتميتر بمخرج وحدة التشغيل، ثم أدرْه نحو العمود حتى يقرأ جهد الفجوة المطلوب (−10 V أو قيمة الصانع)، مع مراعاة اتجاه القياس.
3. ثبّت صامولة القفل مع ملاحظة تغير الجهد أثناء الشد؛ أعد الضبط إن تغير أكثر من 0.2 V.
4. للموضع المحوري: ادفع العمود يدويًا أو بالرافعة إلى وسادة الدفع الفاعلة (الوضع الطبيعي) ثم اضبط جهد الفجوة للمجسين هناك، وسجّل الجهد عند الحدين الميكانيكيين (الخلوص الكلي)؛ فهذا المرجع الذي يُقارن به لاحقًا.
5. اربط الكابل دون شد أو انحناء حاد، وسجّل جهد الفجوة النهائي لكل مجس في سجل الآلة (Gap Voltage Record) للمقارنة في الفحوص القادمة.

الإجراء 3: اختبار حلقة الاهتزاز من الرف إلى الإيقاف

1. مع الآلة متوقفة وبتصريح، تحقق من قراءة جهد الفجوة في الرف وأنها ضمن مدى OK، وأن التوجيه (X/Y، Normal/Reverse) والمعامل في تهيئة القناة مطابقان للتركيب.
2. صل مولد إشارة عبر أداة اختبار (أو محاكي مجس) بمدخل القناة وأدخل إشارة جيبية بسعة معروفة (مثلًا 100 µm p-p = 0.787 V p-p عند 7.87 V/mm) عند تردد الدوران؛ يجب أن تقرأ القناة القيمة ضمن ±5%.
3. ارفع السعة تدريجيًا حتى عتبة الإنذار وسجّل القيمة والزمن الذي ظهر فيه الإنذار في الرف وفي نظام التحكم.
4. ارفع حتى عتبة الفصل وتحقق من تشغيل المرحّل خلال زمن التأخير المضبوط، ومن وصول الفصل إلى نظام الإيقاف (مع تجاوز صمام الفصل الفعلي إن تعذّر إيقاف الآلة)، ومن تسجيل أول سبب.
5. تحقق من منطق التصويت: إشارة على قناة واحدة يجب ألا تفصل في بنية 2oo2، وعلى القناتين معًا تفصل.

6. اختبر مضاعف الفصل: فعّله وتحقق من ارتفاع العتبات، ثم ألغه وتحقق من عودتها.
7. اختبر حالة Not OK: افصل المجس فيجب أن تُعلن القناة عطلًا ولا تفصل، ثم أعد التوصيل.
8. أزل التجاوزات ووثّق كل القيم والأزمنة في شهادة الاختبار.

الإجراء 4: اختبار حماية السرعة الزائدة

1. تحقق من فجوة المجسات الثلاثة وسعة إشارتها (بالراسم أو بقراءة الرف) عند الدوران البطيء وعند السرعة العادية إن سمحت الظروف.
2. لكل قناة على حدة، مع القناتين الأخريين في الخدمة: احقن ترددًا يعادل 110% من السرعة عبر مدخل الاختبار وتحقق من تغيّر حالة القناة ومرحّلها وحدها دون فصل الآلة (التصويت 2oo3 يمنع الفصل من قناة واحدة)، وسجّل زمن الاستجابة.
3. احقن الإشارة في قناتين معًا (والآلة متوقفة أو بتصريح فصل حقيقي) وتحقق من الفصل الكامل ووصوله إلى صمام الفصل، وسجّل الزمن الكلي من الإشارة إلى بدء حركة الصمام (يجب أن يكون أقل من الحد المحدد، عادة عشرات الملي ثانية للإلكترونيات).
4. تحقق من إنذار اختلاف القنوات (Channel Discrepancy) بإدخال ترددات مختلفة.
5. **اختبار السرعة الزائدة الفعلي:** يُجرى بعد العمرات الكبيرة وبقرار مكتوب: رفع سرعة التوربين بلا حمل ببطء إلى نقطة الفصل مع تسجيل مستمر، وبحضور المسؤولين، وبعد التأكد من عمل الفصل الإلكتروني والميكانيكي كل على حدة؛ ويُوقف الاختبار يدويًا إذا لم يفصل عند 1% فوق النقطة المضبوطة.
6. وثّق النتائج وأزل تجاوزات الاختبار.

الإجراء 5: فحص مقياس تسارع مركّب

1. قِس جهد الانحياز (Bias Voltage) للمجس IEPE على السلكين (عادة 8 إلى 12 V DC)؛ الصفر يعني قصرًا أو انقطاع تيار التغذية، والجهد القريب من جهد التغذية يعني دائرة مفتوحة (كابلًا مقطوعًا أو مجسًا تالفًا).
2. تحقق من شد المسمار أو اللاصق ومن عدم وجود حركة نسبية بين المجس والغلاف، ومن أن الكابل مثبت ولا يهتز.
3. قارن القراءة بقياس محمول عند النقطة نفسها والاتجاه نفسه؛ التوافق ضمن نحو ±10% مقبول لاختلاف النطاقات الترددية.
4. للمعايرة الدقيقة تُستخدم هزازة مرجعية (Shaker) تعطي 10 mm/s rms عند 159.2 Hz (أي 10 m/s² ≈ 1 g)، ويُقارن خرج المجس بحساسيته المعلنة.

32.10 القياس المحمول للاهتزاز والحكم عليه

في المضخات والمحركات والمراوح التي لا تحمل مجسات دائمة، تُقاس الاهتزازات بجهاز محمول ضمن جولات دورية (Route-Based). خطوات القياس الصحيح:

1. حدد نقاط القياس مرة واحدة وثبّتها على الآلة بعلامة أو بقاعدة معدنية ملصقة: عند كل غلاف محمل في الاتجاهات الأفقي (H) والرأسي (V) والمحوري (A)، على معدن صلب قريب من المحمل.
2. استخدم طريقة تثبيت واحدة دائمًا (مغناطيس على سطح مستوٍ نظيف أو قاعدة ملولبة)، وبنطاق ترددي واحد (عادة 10 إلى 1000 Hz للقيمة الكلية بالسرعة)، حتى تكون القياسات قابلة للمقارنة مع الزمن.
3. تأكد من أن الآلة في حالة تشغيل معتادة (السرعة والحمل والحرارة) وسجّل ظروف التشغيل مع القياس.
4. سجّل القيمة الكلية بالسرعة mm/s rms في كل اتجاه، والطيف إن كان الجهاز يعطيه، وقارن بالقياس السابق (الاتجاه أهم من القيمة المطلقة).

5. احكم على القيمة بمعيار ISO 20816-3 للآلات الصناعية (مجموعة 1: أكبر من 300 kW أو ارتفاع عمود أكبر من 315 mm، ومجموعة 2: من 15 إلى 300 kW) وبحسب صلابة الأساس (صلب أو مرن). حدود المناطق التقريبية بالسرعة rms للمجموعة 1 على أساس صلب: A/B عند 2.3 mm/s، وB/C عند 4.5 mm/s، وC/D عند 7.1 mm/s؛ وللمجموعة 2 على أساس صلب: 1.4 و2.8 و4.5 mm/s. والمنطقة A للآلات الجديدة، وB للتشغيل المستمر دون قيد، وC غير مناسبة للتشغيل الطويل، وD ضرر محتمل.

6. سجّل النتيجة، وإذا تغيرت القيمة عن الخط الأساسي بأكثر من 25% من حد المنطقة B/C (معيار التغير في ISO 20816-1) أو عبرت حدًا فانتقل إلى التحليل (الفصل 33) قبل أن تصل إلى المنطقة D.

الشكل 32-12: *مناطق تقييم الاهتزاز وفق ISO 20816-3 لاهتزاز الغلاف بالسرعة (rms) للمجموعتين 1 و2 على أساس صلب ومرن، وحدود اهتزاز العمود النسبي بدلالة السرعة وفق ISO 20816-3.*

32.11 حالة ميدانية: إيقاف كاذب من كابل

نوع الحالة: مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

الموقف: ضاغط غاز بمحرك كهربائي كبير أوقفه رف الحماية بسبب اهتزاز شعاعي مرتفع على محمل واحد (القناة X عند المحمل جهة الإدارة وصلت إلى 180 µm p-p خلال أقل من ثانية). قبل الفصل كانت القيم كلها في نطاق 20 إلى 30 µm. بعد التوقف لم يظهر أي عيب في المحمل ولا في الدوّار.

التحقيق: سجل الرف أظهر أن القناة Y عند المحمل نفسه بقيت عند 25 µm طوال الحدث، وأن جهد فجوة القناة X قفز من 9.8− إلى 16− V ثم عاد، وهذا حركة فجوة لا اهتزاز حقيقي: فالعمود لا يتحرك 0.8 mm في اتجاه واحد دون أن يراه المجس المجاور. الفحص أظهر كابل تمديد مثبتًا بربطة بلاستيكية تآكلت، فارتخى الكابل وصار يلامس أنبوب زيت يهتز، وحدث تقطع لحظي في وصلته. وكانت فلسفة الحماية تفصل من قناة واحدة (1oo2) بتأخير 1 s.

الحل والدرس: إعادة تثبيت الكابلات بمسار معدني، والانتقال إلى فصل بتصويت X وY معًا (2oo2) للاهتزاز الشعاعي مع إبقاء الإنذار من أي قناة، وإضافة إنذار على معدل تغير جهد الفجوة. الدرس: مراقبة OK لا تكشف كل أعطال الكابلات، والمجسان المتعامدان يقيسان الحركة نفسها من زاويتين، فالاهتزاز الحقيقي يظهر في كليهما.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
اختيار المجسات	نوع المجس لكل محمل (قرب أو تسارع أو سرعة)، وعدد مجسات السرعة الزائدة واستقلالها، وطول النظام المطابق ومادة الهدف	يطابق ملصقات المجس والكابل ووحدة التشغيل وأرقامها التسلسلية بالسجل قبل التركيب
الحدود والمنطق	عتبات الإنذار والفصل، والتأخير، والتصويت، ومضاعف الفصل، بالرجوع إلى API 670 وISO 20816 ووثائق الصانع	يضبط جهد الفجوة ويسجله، ويتحقق من معامل القياس على المنضدة (الإجراءان 1 و2 في القسم 32.9)

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
التأريض	نقطة تأريض الحجب لكل حلقة، ويثبّتها في مخطط الحلقة	يعزل الحجب في الميدان، ويقيس فرق الجهد والاستمرارية، ويتتبع أي توصيلة أرضي مضافة
الاختبار	إجراء اختبار الحلقات والسرعة الزائدة ومعايير قبوله	يحقن الإشارات، ويسجل القيم والأزمنة وأول سبب، ويزيل التجاوزات بعد الاختبار
بعد كل فصل	يحلل سجل الرف ويقرر: عطل قياس أم عطل في الآلة	يجمع جهد الفجوة والطيف وحالة الكابلات قبل أي إعادة ضبط

32.12 الأخطاء الشائعة

- استبدال كابل تمديد بطول مختلف أو قطعه، أو خلط مجس ووحدة تشغيل من نظامين مختلفي الطول أو المادة.
- ضبط جهد الفجوة قرب طرف المدى الخطي، أو عدم تسجيله عند التركيب.
- تركيب مجسي X وY على جانب واحد أو بغير 90° بينهما، أو الخطأ في تسمية الاتجاهات فيُقرأ المدار معكوسًا.
- مجس واحد للموضع المحوري، أو مجسان يقرآن السطح نفسه بحيث يعطي عيب السطح فصلًا كاذبًا.
- مقياس تسارع مثبت بمغناطيس على سطح مطلي أو منحنٍ ثم الوثوق بقراءاته فوق 1 kHz.
- مقارنة قيمة rms بقيمة القمة (peak) أو نطاق ترددي بآخر، أو مقارنة اهتزاز عمود (µm) بحدود اهتزاز غلاف (mm/s).
- تجاهل مضاعف الفصل فيفصل الرف عند عبور السرعة الحرجة، أو تركه مفعّلًا دائمًا فيعطل الحماية.

- تجاوز قنوات الحماية «مؤقتًا» دون سجل أو إنذار ظاهر.
- مجس سرعة سلبي لكشف السرعة الصفرية، أو عجلة مسننة واحدة للحاكم وللحماية بمجسات غير مستقلة.
- تمرير تلامسات الفصل عبر الشبكة أو عبر منطق يستطيع المشغل تعديله.

32.13 ملخص

قياس السرعة يقوم على عدّ نبضات عجلة مسننة: مجس مغناطيسي سلبي بسيط لا يقرأ السرعات المنخفضة، ومجس فعال يقرأ حتى الصفر، ومجس قرب للمرجع الطوري، وحماية سرعة زائدة مستقلة بثلاث قنوات 2oo3 تُختبر كل قناة فيها على حدة. والاهتزاز يُقاس إزاحةً للعمود بمجسات القرب ذات النظام المطابق ومعامل 7.87 V/mm وجهد فجوة 10− V، وسرعةً أو تسارعًا للغلاف بمقاييس التسارع IEPE التي يحدد تثبيتها نطاقها الترددي، مع تحويل بين الكميات يعتمد على التردد. ويُكمل ذلك الموضع المحوري والانحراف والتمدد والمرجع الطوري وحرارة المحامل. ورف الحماية وفق API 670 يعطي إنذارًا وفصلًا بتأخير وتصويت ومضاعف فصل وتجاوز مسجل وأول سبب، ويرسل الفصل مباشرة إلى نظام الإيقاف. والتركيب والمعايرة والاختبار خطوات مكتوبة، والقياس المحمول يُحكم عليه بمعايير ISO 20816 وبالاتجاه مع الزمن أكثر من الرقم.

وفي الفصل التالي: ينتقل الفصل 33 «تحليل الاهتزاز المتقدم وحالة الآلات» من قياس الاهتزاز والحماية منه إلى قراءته: فالإشارة الموثوقة التي تصل إلى الرف هي نقطة البدء لتحليل الطيف والطور والمدار ومعرفة العطل الذي وراءها.

32.14 أسئلة التقييم الذاتي

1. عجلة مسننة بـ 120 سنًا على عمود يدور 3600 rpm: ما تردد الإشارة؟ وما التردد عند فصل السرعة الزائدة 110%؟
2. لماذا لا يصلح المجس المغناطيسي السلبي لكشف السرعة الصفرية؟ وما البديل؟

3. اشرح لماذا يشترط API 670 ثلاثة مجسات مستقلة بتصويت 2oo3 لحماية السرعة الزائدة، وكيف تُختبر كل قناة دون إيقاف الآلة.
4. مروحة تدور 1480 rpm وتهتز 6 mm/s rms عند 1X. احسب الإزاحة (µm p-p) والتسارع (g) عند هذا التردد.
5. ما معنى «النظام المطابق» في مجسات القرب؟ وماذا يحدث إذا قُطع كابل التمديد؟
6. ما جهد الفجوة الذي يُضبط عليه مجس القرب عادة ولماذا؟ وكيف يتحقق الفني من معامل القياس على المنضدة؟
7. ما الفرق بين الجريان الكهربائي والميكانيكي؟ وكيف يؤثران في قراءة الاهتزاز؟
8. لماذا يقيس الرف المكوّن المستمر من إشارة مجسي الموضع المحوري لا المتردد؟ ولماذا مجسان؟
9. ما وظيفة مضاعف الفصل؟ وما خطر تركه مفعّلًا؟
10. مروحة سحب 200 kW على أساس صلب تقرأ 5.2 mm/s rms في الاتجاه الأفقي. في أي منطقة تقع وفق ISO 20816-3 وماذا يُفعل؟

مراجع الفصل: R19، وR6، وR18، وكتاب المؤلف «التوربينات الغازية» (R42) في نظم مراقبة الاهتزاز، وAPI 670 (الطبعة الخامسة)، وAPI 612 وAPI 617، وISO 20816-1 وISO-3 و5-، وISO 10816 وISO 7919 (السابقتان)، ووثائق أنظمة مراقبة الآلات (مثل VM600 وBently Nevada 3500) من الخبرة الميدانية؛ وR65 (عرض منع حلقات الأرضي، 32.8.1 إلى 32.8.7)؛ وIEEE Std 1100 (تغذية المعدات الإلكترونية وتأريضها)؛ وIEC 61000-5-2 (التأريض والتمديد لأغراض التوافق الكهرومغناطيسي).

الفصل 33: تحليل الاهتزاز المتقدم وحالة الآلات

لمن هذا الفصل: لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم ومهندس الصيانة التنبؤية الذي يملك قياسات الاهتزاز (من رف الحماية أو من جهاز محمول) ويريد أن يعرف ماذا تعني: هل المشكلة عدم اتزان أم عدم محاذاة أم محمل أم تروس أم تكهف أم رنين؟ ومتى يوقف الآلة ومتى ينتظر حتى التوقف المخطط؟ وهو امتداد مباشر للفصل 32: هناك حصلنا على إشارة اهتزاز موثوقة وحمينا بها الآلة، وهنا نقرأ ما تقوله هذه الإشارة. فمن لم يقرأ الفصل 32 فليراجع فيه المجسات والوحدات ورفوف الحماية أولًا.

الفكرة الأساسية: الاهتزاز الكلي رقم واحد يقول «هناك مشكلة» ولا يقول ما هي. التحليل يفكك الإشارة إلى مكوناتها: الطيف يقول عند أي تردد، والطور يقول في أي اتجاه وبأي علاقة، والمدار يقول كيف يتحرك العمود، ومخططات البدء والتوقف تقول أين السرعات الحرجة وكم التخميد. ولكل عطل ميكانيكي بصمة مميزة في هذه الأدوات، وعمل المحلل مطابقة البصمة بالعطل ثم التحقق بقياس إضافي قبل الحكم.

33.1 من القياس إلى التشخيص: أنواع البيانات

يبدأ التشخيص بمعرفة ما في يد المحلل من بيانات. فالقيمة الكلية التي انتهى إليها القياس المحمول في الفصل 32 (القسم 32.10) نوع واحد من ثمانية، لكل منها ما يكشفه:

نوع البيانات	ما هو	ما يعطيه
القيمة الكلية (Overall)	القيمة الفعالة (RMS) أو القمة (Peak) في نطاق ترددي	الشدة والاتجاه مع الزمن؛ الإنذار الأول
الموجة الزمنية (Time Waveform)	الإشارة كما هي بالزمن	الصدمات، والتقطع، والتشويه، والتضمين؛ ضرورية للمحامل والتروس والتلامس
الطيف (Spectrum / FFT)	السعة مقابل التردد	عند أي تردد تقع الطاقة: 1X، 2X، ترددات المحامل، تعشيق التروس، الأشرطة الجانبية
الطور (Phase)	زاوية الاهتزاز عند 1X نسبة إلى المرجع الطوري	التمييز بين الأعطال المتشابهة في الطيف (عدم الاتزان وعدم المحاذاة والانحناء)
المدار (Orbit)	مسار مركز العمود من مجسي X وY	شكل الحركة: دائرة، أو قطع ناقص، أو حلقات، أو مسار مسطح عند التلامس
الموضع المركزي للعمود (Shaft Centerline)	المكوّن المستمر من X وY	ارتفاع العمود في المحمل مع السرعة والحمل: التزييت والتآكل وعدم المحاذاة
مخططات البدء والتوقف (Bode، Polar، Waterfall)	السعة والطور والطيف مقابل السرعة	السرعات الحرجة، والتخميد، والرنين، وتغير الحالة مع السرعة
الاتجاه الزمني (Trend)	أي مما سبق مقابل الأيام والشهور	معدل التدهور وتقدير الوقت المتبقي

كيف أختار؟ ابدأ بالقيمة الكلية والاتجاه الزمني للإنذار وترتيب الآلات، ثم الطيف لتسمية التردد، ثم الموجة الزمنية إن كانت الآلة ذات تروس أو محامل دحرجة، ولا يُطلب الطور والمدار ومخططات البدء إلا حين يتشابه الطيف بين عطلين أو تكون الآلة على مجسات قرب. والجدول لا يبين شرط صحة كل نوع: إعدادات القياس (Fmax وعدد الخطوط)

والمرجع الطوري الواحد وثبات السرعة والحمل عند القياس. وأكثر الأخطاء كلفة الحكم بالقيمة الكلية وحدها على علبة تروس أو محمل دحرجة، فتبقى «ضمن الحدود» بينما البصمة الطيفية تعلن الفشل القادم.

33.2 تحليل الموجة الزمنية والطيف

التحويل إلى الطيف: تحويل فورييه السريع (FFT) يحوّل مقطعًا من الموجة الزمنية إلى مجموعة خطوط طيفية. والإعدادات التي يختارها المحلل تحدد ما يمكن أن يراه:

- **أقصى تردد (Fmax):** يجب أن يغطي أعلى تردد مهم في الآلة: نحو 10 أضعاف سرعة الدوران للأعطال العامة، وأكثر من 3 أضعاف تردد تعشيق التروس لعلب التروس، وعشرات الكيلوهرتز لمحامل الدحرجة في مراحل التلف المبكرة. ومعدل أخذ العينات يكون Fmax × 2.56 على الأقل (هامشًا لانحدار المرشح المضاد للتداخل (Anti-Aliasing))، وإلا ظهرت ترددات وهمية.
- **عدد الخطوط (Lines of Resolution):** يحدد دقة الفصل بين ترددين متجاورين: Δf = Fmax ÷ عدد الخطوط. فبـ Fmax = 1000 Hz و1600 خط تكون Δf = 0.625 Hz. ويلزم فصل الأشرطة الجانبية (Sidebands) الضيقة حول تردد التعشيق وفصل 2× تردد الخط الكهربائي (100 Hz) عن 2X لمحرك بسرعة 2980 rpm (99.3 Hz)؛ فهذان يختلفان بـ 0.7 Hz ويحتاجان إلى Δf ≤ 0.25 Hz أي 4000 خط على الأقل عند Fmax = 1000 Hz، أو تصغير Fmax.
- **زمن القياس:** = عدد الخطوط ÷ Fmax؛ فـ 4000 خط عند 1000 Hz تحتاج إلى 4 ثوانٍ لكل متوسط، والمتوسطات (Averages) الأربعة أو الثمانية تقلل الضوضاء العشوائية.
- **النافذة (Window):** نافذة هانينغ (Hanning) للقياس الدوري المعتاد، والمستطيلة للصدمات، وذات القمة المسطحة (Flat Top) لدقة السعة عند المعايرة.

- **المقياس:** الخطي يبرز القمم الكبيرة، واللوغاريتمي يكشف القمم الصغيرة (ترددات المحامل مبكرًا) بجانب الكبيرة.

قراءة الطيف: يُعبَّر عن الترددات بمضاعفات سرعة الدوران (Orders) حتى تنطبق القواعد على كل الآلات: 1X تردد الدوران، و2X ضعفه، وهكذا. ثم يبحث المحلل عن **عائلات**: التوافقيات (Harmonics: 1X، 2X، 3X...) تدل على تشويه أو صدم دوري، والأشرطة الجانبية (Sidebands) حول تردد مركزي بمسافات تساوي ترددًا آخر تدل على تضمين (عطل في التروس يضمّن تردد التعشيق بتردد دوران العجلة المعيبة)، والترددات غير المتزامنة (Non-Synchronous، ليست مضاعفات صحيحة) تدل على محامل دحرجة أو آلات مجاورة أو عدم استقرار.

الشكل 33-1: *من الموجة الزمنية إلى الطيف: إشارة تجمع عدم اتزان عند 1X وعدم محاذاة عند 2X وصدمات محمل غير متزامنة، وكيف يفصل الطيف هذه المكونات ويكشف اللوغاريتمي منها ما يخفيه الخطي.*

مثال محلول (إعدادات القياس لعلبة تروس): علبة تروس مدخلها 1480 rpm (24.7 Hz) بترس 23 سنًا، ومخرجها ترس 97 سنًا.

- **الحل:**
  - تردد تعشيق التروس (Gear Mesh Frequency – GMF) = عدد الأسنان × تردد الدوران = 24.7 × 23 = 568 Hz.
  - سرعة المخرج = (5.85 Hz) 351 rpm = 97 ÷ 23 × 1480.
  - لرؤية GMF × 3 نختار Fmax = 2000 Hz.
  - لفصل الأشرطة الجانبية حول GMF بمسافة 5.85 Hz (عطل في ترس المخرج) نحتاج إلى Δf ≤ 2 Hz تقريبًا، أي 1600 خط على الأقل (Δf = 2000 ÷ 1600 = 1.25 Hz).
  - زمن كل متوسط = عدد الخطوط ÷ Fmax = 1600 ÷ 2000 = 0.8 s.
  - وللمحامل قياس ثانٍ بـ Fmax = 10 kHz مع كشف الغلاف (Envelope).
- **المعنى ميدانيًا:** إعداد واحد لا يكفي لعلبة تروس: قياس بدقة فصل عالية للأشرطة الجانبية، وآخر بمدى ترددي واسع للمحامل.

33.3 الطور

الطور زاوية بين قمة الاهتزاز عند 1X ونبضة المرجع الطوري (أو ومضة ستروبوسكوب على علامة). لا يُقرأ الطور وحده، بل الفرق بين نقطتين:

- بين الاتجاهين الأفقي والرأسي على المحمل نفسه: نحو 90° في عدم الاتزان (الحركة دائرية)، ونحو 0° أو 180° في الرنين أو الارتخاء الاتجاهي.

- بين طرفي الآلة على المحور نفسه: °0 يعني عدم اتزان ساكن (Static)، و°180 يعني عدم اتزان ازدواجي (Couple) أو عمودًا منحنيًا.
- عبر القارنة (Coupling) في الاتجاه المحوري: نحو °180 يعني عدم محاذاة زاوية.
- ثبات الطور مع الزمن: عدم الاتزان ثابت الطور، والارتخاء والتلامس غير ثابتين.

ويلزم أن تكون قياسات الطور بمرجع واحد وسرعة ثابتة، وأن يُسجل اتجاه كل مجس.

33.4 المدار والموضع المركزي للعمود

المدار (Orbit): يُرسم من إشارتي مجسي X وY المتعامدين (الفصل 32)، مع نقطة المرجع الطوري عليه. أشكاله:

- **دائري أو بيضوي قليلًا مع نقطة مرجع واحدة:** حركة 1X سليمة أو عدم اتزان؛ والحركة أمامية (Forward) أي في اتجاه الدوران.
- **بيضوي مسطح جدًا:** قيد اتجاهي (Preload): عدم محاذاة، أو حمل جانبي، أو محمل مشدود.
- **شكل الموزة أو الرقم 8 مع نقطتين مرجعيتين:** مكوّن 2X قوي: عدم محاذاة شديد أو صدع.
- **حلقة داخلية أو حركة غير مستقرة مع نقاط مرجعية تدور:** اهتزاز دون التزامن (Subsynchronous) مثل دوامة الزيت (Oil Whirl) عند نحو 0.42 إلى 0.48X، أو سوط الزيت (Oil Whip) المقفل على سرعة حرجة.
- **مدار مقطوع أو مسطح من جهة:** تلامس (Rub) بين العمود وجزء ثابت.

الموضع المركزي للعمود (Shaft Centerline): يُرسم من المكوّن المستمر لجهدي X وY بالنسبة إلى وضع العمود ساكنًا في أسفل المحمل، داخل دائرة خلوص المحمل. مع رفع السرعة يصعد العمود على وتد الزيت إلى موضع يُتوقع أن يكون عند نسبة لامركزية (Eccentricity Ratio) من 0.6 إلى 0.8، أي على ارتفاع نحو 20 إلى 40% من الخلوص،

وبزاوية وضع (Attitude Angle) نحو 30 إلى 60° في المحامل الأسطوانية. فصعوده إلى قرب المركز يعني خطر دوامة الزيت، وبقاؤه في الأسفل يعني حملًا زائدًا، وانحرافه عن المتوقع بين محملين يعني عدم محاذاة أو انحناءً في الغلاف.

الشكل 33-2: *أشكال المدار الشائعة ودلالاتها، ومخطط الموضع المركزي للعمود داخل دائرة الخلوص من الوقوف إلى السرعة الكاملة.*

33.5 تشخيص الأعطال الشائعة من بصماتها

العطل	بصمة الطيف
عدم الاتزان (Unbalance)	قمة مهيمنة عند 1X شعاعيًا، تزداد قوتها المثيرة مع مربع السرعة
عدم المحاذاة (Misalignment)	2X (وأحيانًا 3X) شعاعيًا ومحوريًا مرتفع؛ 1X قد يكون عاليًا أيضًا
عمود منحنٍ (Bent Shaft)	1X و2X محوريًا
الارتخاء الميكانيكي (Looseness)	توافقيات كثيرة (1X إلى 10X) وأحيانًا 0.5X ومضاعفاته
محامل الدحرجة (Rolling Element Bearings)	ترددات غير متزامنة: BPFO وBPFI وBSF وFTF ومضاعفاتها، وأشرطة جانبية بـ 1X حول BPFI

العطل	بصمة الطيف
التروس (Gears)	تردد التعشيق GMF ومضاعفاته مع أشرطة جانبية بمسافة تساوي سرعة دوران العجلة المعيبة
دوامة الزيت (Oil Whirl)	مكوّن دون التزامن عند نحو 0.42 إلى 0.48X يتبع السرعة
سوط الزيت (Oil Whip)	مكوّن دون التزامن مقفل على السرعة الحرجة الأولى مهما زادت السرعة
التلامس (Rub)	توافقيات وكسور من 1X (1/2X)، (1/3X)، وأحيانًا ترددات طبيعية
الأعطال الكهربائية في المحركات	2× تردد الخط (100 Hz عند 50 Hz) لعدم انتظام الفجوة أو الجزء الثابت؛ 1X بأشرطة جانبية بتردد الانزلاق × عدد الأقطاب لقضبان الجزء الدوار المكسورة
تكهف المضخة (Cavitation)	ضوضاء عريضة النطاق عشوائية، مع تردد مرور الريش (عدد الريش × 1X)
مرور الريش / (Blade Vane Pass)	قمة عند عدد الريش × 1X
الرنين (Resonance)	قمة كبيرة عند تردد ثابت لا يتغير مع السرعة، وسعة تقفز عند سرعة معينة
السيور (Belts)	تردد السير ومضاعفاته (أقل من 1X) وأشرطة

جدول: بصمات الأعطال الشائعة (تابع): الطور والمدار والموجة الزمنية وفحوص التأكيد

العطل	الطور والمدار والموجة	ملاحظات للتأكيد
عدم الاتزان (Unbalance)	طور ثابت، فرق نحو 90° بين H و V، مدار دائري	يزول بالاتزان؛ إن كان 1X محوريًا كبيرًا فربما عمود منحنٍ أو عدم اتزان لدافعة معلقة (Overhung)

العطل	الطور والمدار والموجة	ملاحظات للتأكيد
عدم المحاذاة (Misalignment)	فرق نحو 180° عبر القارنة محوريًا؛ مدار بيضوي مسطح أو موزة	يتغير مع الحرارة (النمو الحراري)؛ يُحقق بقياس المحاذاة عند الحرارة التشغيلية
عمود منحنٍ (Bent Shaft)	180° بين طرفي الآلة محوريًا	يُقاس الجريان بمقياس ساعة
الارتخاء الميكانيكي (Looseness)	طور غير مستقر؛ موجة زمنية مقطوعة	مسامير القاعدة، أو خلوص المحمل الزائد، أو تشقق الإطار
محامل الدحرجة (Rolling Element Bearings)	صدمات دورية في الموجة الزمنية؛ تُكشف مبكرًا بطيف الغلاف (Envelope / Demodulation)	تتطور في مراحل: ضوضاء عالية التردد ← ترددات المحمل ← توافقيات وأشرطة ← ارتفاع 1X وضوضاء عريضة قبل الفشل
التروس (Gears)	تضمين واضح في الموجة الزمنية بمعدل دوران العجلة المعيبة	أشرطة جانبية متزايدة تعني تآكلًا أو سنًا مكسورًا؛ 2×GMF مرتفع يعني خلوصًا خلفيًا أو عدم محاذاة تروس
دوامة الزيت (Oil Whirl)	مدار غير مستقر بنقاط مرجع تدور؛ العمود قرب مركز المحمل	يُعالج بزيادة الحمل أو تغيير المحمل (Tilting Pad) أو الزيت
سوط الزيت (Oil Whip)	سعة عالية مدمرة	يجب خفض السرعة فورًا
التلامس (Rub)	موجة مقطوعة، مدار مسطح من جهة، طور يتغير	يترافق مع ارتفاع حرارة موضعي
الأعطال الكهربائية في المحركات	يختفي فورًا عند قطع التغذية (اختبار الإيقاف)	يُكمل بتحليل تيار المحرك (MCSA)
تكهف المضخة (Cavitation)	ضجيج كأنه حصى	يتغير مع NPSH وتدفق السحب

العطل	الطور والمدار والموجة	ملاحظات للتأكيد
مرور الريش (Blade / Vane Pass)	طبيعي بمقدار محدود	ارتفاعه يعني خلوصًا غير متساوٍ بين الدافعة واللسان أو انسدادًا
الرنين (Resonance)	طور يتغير 90° عند القمة و180° عبرها	يُحقق باختبار الطرق (Bump Test) ومخطط بود
السيور (Belts)	سعة تتقلب	تردد السير = π × قطر البكرة × سرعتها ÷ طول السير

كيف أختار؟ طابق أولًا مضاعف السرعة: 1X يرجّح عدم الاتزان، و2X عدم المحاذاة، والتوافقيات الكثيرة الارتخاء، والترددات غير المتزامنة محامل الدحرجة، والأشرطة الجانبية حول تردد التعشيق التروس؛ ثم احسم بين المتشابهات بالطور والمدار لا بالطيف وحده. والجدول يعطي البصمة النموذجية ولا يبين تداخل الأعطال: عدم المحاذاة يرفع 1X أيضًا، والارتخاء والتلامس يشتركان في التوافقيات، والرنين يضخم أي بصمة عند سرعة بعينها، فلا يُغلق التشخيص دون القياس الإضافي المذكور في العمود الأخير. وأكثر الأخطاء كلفة اتزان ميداني لآلة سببها رنين أو عدم محاذاة أو تلامس، فيُضاف وزن يزيد الاهتزاز ويُهدر توقف.

ترددات محامل الدحرجة: لعدد كرات n، وقطر الكرة d، والقطر الخطوي (Pitch Diameter) D (متوسط قطري الحلقتين)، وزاوية التلامس φ، وسرعة الدوران f (Hz):

- تردد عبور الحلقة الخارجية (BPFO) = (n ÷ 2) × f × (1 − (d ÷ D) cos φ).
- تردد عبور الحلقة الداخلية (BPFI) = (n ÷ 2) × f × (1 + (d ÷ D) cos φ).
- تردد دوران الكرة (BSF) = (D ÷ 2d) × f × (1 − ((d ÷ D) cos φ)²).
- تردد القفص (FTF) = (f ÷ 2) × (1 − (d ÷ D) cos φ).

وتقريبًا: BPFO ≈ 0.4 × n × f، وBPFI ≈ 0.6 × n × f، والمجموع BPFO + BPFI = n × f. وتنشر شركات المحامل هذه الترددات لكل طراز بدلالة السرعة.

مثال محلول (محمل مضخة): مضخة 2950 rpm (49.2 Hz) بمحمل كريات ذي أخدود عميق (8 كرات، d = 19.05 mm، D = 65 mm، φ = 0°).

- **الحل:** مع cos φ = 1 و$d \div D = 19.05 \div 65 = 0.293$:

- $BPFO = (n \div 2) \times f \times (1 - d \div D) = 4 \times 49.2 \times (1 - 0.293) = 139\ Hz.$
- $BPFI = (n \div 2) \times f \times (1 + d \div D) = 4 \times 49.2 \times 1.293 = 254\ Hz.$
- $BSF = (D \div 2d) \times f \times (1 - (d \div D)^2) = (65 \div 38.1) \times 49.2 \times (1 - 0.0859) = 76.7\ Hz.$
- $FTF = (f \div 2) \times (1 - d \div D) = 24.6 \times 0.707 = 17.4\ Hz.$

- **المعنى ميدانيًا:** ظهور قمة عند 139 Hz ومضاعفاتها (278، 417 Hz) دون أشرطة جانبية يدل على عيب في الحلقة الخارجية، وظهور 254 Hz مع أشرطة على مسافة 49.2 Hz يدل على عيب في الحلقة الداخلية (لأن العيب يدور مع العمود ويدخل منطقة الحمل ويخرج منها كل دورة).

الشكل 33-3: *بصمات طيفية لستة أعطال شائعة: عدم الاتزان عند 1X، وعدم المحاذاة عند 2X، والارتخاء بتوافقيات كثيرة، وعيب محمل دحرجة عند BPFO غير المتزامن ومضاعفاته، والتروس بتردد التعشيق وأشرطته الجانبية، ودوامة الزيت عند نحو 0.45X.*

الشكل 33-4: *رسم لمحمل دحرجة بمنظر أمامي ومقطع محوري يبين الحلقة الخارجية والداخلية والكرات والقفص، والأبعاد التي تدخل في حساب ترددات العيوب، وأين ينشأ كل تردد.*

33.6 تحليل البدء والإيقاف

الآلة أثناء تسارعها أو تباطؤها تعبر سرعاتها الحرجة، وهذا أغنى قياس لخصائصها الديناميكية:

- **مخطط بود:** سعة 1X (بعد طرح الجريان عند الدوران البطيء) وطوره مقابل السرعة. عند السرعة الحرجة تبلغ السعة قمة ويتغير الطور بنحو 90° (و180° عبر القمة كلها). ومن عرض القمة يُحسب عامل التضخيم (Amplification Fact AF = n (or الحرجة ÷ (n2 − n1) حيث n1 وn2 السرعتان اللتان تكون السعة عندهما 0.707 من القمة. وتشترط API 617 وAPI 612 هامش فصل بين سرعة التشغيل والسرعة الحرجة يعتمد على AF (كلما زاد AF، أي قل التخميد، لزم هامش أكبر: من صفر عند AF أقل من 2.5 إلى نحو 20% أو أكثر عند AF المرتفع).
- **المخطط القطبي (Polar / Nyquist):** السعة والطور معًا في مستوى قطبي؛ السرعة الحرجة حلقة كاملة، ويسهل فيه تمييز عدة أنماط (Modes).

- **الشلال (Waterfall / Cascade):** أطياف متتالية مقابل السرعة أو الزمن؛ فيه تظهر المكونات المتزامنة كخطوط مائلة (تتبع السرعة) والترددات الثابتة (رنين هيكلي، أو تردد كهربائي) كخطوط رأسية، ودوامة الزيت خطًا مائلًا بميل 0.45.
- **الطيف الكامل (Full Spectrum):** من X وY معًا، يفصل الحركة الأمامية (مع اتجاه الدوران) عن الخلفية؛ فعدم الاتزان أمامي، والتلامس والقيد يعطيان مكونات خلفية.

الشكل 33-5: *مخطط بود لبدء تشغيل: قمة السعة وتغير الطور عند السرعة الحرجة الأولى وحساب عامل التضخيم من عرض القمة، ومخطط شلال يبين المكونات المتزامنة كخطوط مائلة والرنين الهيكلي كخط ثابت.*

مثال محلول (عامل التضخيم): ضاغط سرعة تشغيله 11000 rpm، وأظهر بود قمة عند 4200 rpm بسعة 60 µm، والسرعتان عند 42 µm(60 × 0.707) m هما 3950 و4500 rpm.

- **الحل:**
  - عامل التضخيم: AF = n الحرجة ÷ (4500 − 3950) = 4200 ÷ (n2 − n1) = 7.6، وهو تخميد متوسط.
  - الهامش الفعلي بين 4200 و11000 rpm كبير؛ لكن لو كانت السرعة الحرجة الثانية عند 12500 rpm: الهامش = (12500 − 11000) ÷ 11000 = 13.6% فقط.
  - الهامش الذي تشترطه API 617 لسرعة حرجة فوق سرعة التشغيل القصوى عند عامل تضخيم 7.6: (7.6 − 1) ÷ (7.6 − 1) × 17 + 10 ≈ 24.2%).
- **المعنى ميدانيًا:** الهامش الفعلي 13.6% دون المطلوب 24.2%، فيلزم تعديل التصميم أو إثبات قبول الاستجابة بتحليل مفصل.

33.7 الاتزان الميداني

عدم الاتزان أكثر الأعطال شيوعًا وأسهلها علاجًا في الموقع بطريقة **معاملات التأثير (Influence Coefficients)** في مستوى واحد:

1. قِس سعة الاهتزاز 1X وطوره عند سرعة ثابتة: القراءة الأصلية O (مثلًا 80 µm عند 60°).
2. ركّب كتلة تجريبية (Trial Mass) معروفة m_t عند زاوية معروفة على مستوى التصحيح (بحجم يعطي قوة طرد نحو 10% من وزن الدوّار)، وأعد القياس: القراءة O + T (مثلًا 50 µm عند 120°).

3. أثر الكتلة التجريبية T = (O + T) − O متجهيًا. في المثال:

   - O = 80 ∠ 40.0° = (69.3، 60°).
   - O+T = 50 ∠ −25.0° = (43.3، 120°).
   - T = (−25.0 − 40.0، −65.0) = (43.3 − 69.3، −26.0)، أي 70.0 µm عند 201.8°.

4. الكتلة التصحيحية = (|T| ÷ |O|) × m_t عند زاوية = زاوية الكتلة التجريبية + (زاوية O − زاوية T. مع 180° + 20 g_m = t عند 0°:

   - المقدار = 22.9 g = 70 ÷ 80 × 20.
   - الزاوية = 38.2° = 180 + (60 − 201.8) + 0.

5. أزل الكتلة التجريبية أولًا، ثم ركّب 22.9 g عند 38° (الزوايا تُقاس بالاتجاه المعاكس للدوران من علامة الطور المرجعية نفسها التي قيس منها طور الاهتزاز، وهذا اتفاق يجب تثبيته في سجل الاتزان لأن عكسه يضع الكتلة في غير موضعها فقد يزيد الاهتزاز بدل أن يصححه)، وقِس مرة أخرى؛ الاهتزاز المتبقي يُصحح بتكرار الحساب نفسه بمعامل التأثير المعروف الآن m ÷ T)_t).

وللدوّارات الطويلة اتزان في مستويين بثلاثة تشغيلات وست قراءات تعطي أربعة معاملات تأثير، وتعطي أجهزة الاتزان الحديثة الحل مباشرة. ودرجات جودة الاتزان وفق ISO 21940-11: G6.3 للمضخات والمراوح والمحركات العامة، وG2.5 للتوربينات والضواغط، وG0.4 للمغازل الدقيقة؛ وعدم الاتزان المتبقي المسموح

Uper (g·mm) = 9549 × G × m ÷ n،

حيث m كتلة الدوّار (kg) وn السرعة (rpm). فدوّار 500 kg بسرعة 3000 rpm بدرجة G2.5:

Uper = 9549 × 2.5 × 500 ÷ 3000 = 3979 g·mm،

أي 4 g على نصف قطر 1 m أو 40 g على 100 mm.

الشكل 33-6: *الاتزان في مستوى واحد بطريقة معاملات التأثير: المتجه الأصلي، والمتجه مع الكتلة التجريبية، وأثر الكتلة التجريبية، وحساب الكتلة التصحيحية ومكانها.*

33.8 أنظمة مراقبة الحالة

المراقبة المستمرة (Online Condition Monitoring): تأخذ الإشارات من المخارج المخزّنة لرف الحماية (الفصل 32) أو من مجسات خاصة، وتحسب باستمرار الطيف والطور والمدار والاتجاهات، وتخزنها مع بيانات العملية (السرعة والحمل والحرارة) لأن الاهتزاز لا يُفسَّر بمعزل عن حالة التشغيل. وتُضبط فيها إنذارات على قيم مركبة: سعة 1X، ومكوّن دون التزامن، ومجموع ترددات المحمل، وتغير الطور، وتُطلق تسجيلًا سريعًا عند الحدث (Transient Capture) عند البدء والتوقف والإنذارات. وهذه هي الأنظمة (مثل

VM600 CMS و1 Bently System) التي يعتمد عليها مهندس الآلات في التوربينات والضواغط الحرجة.

المراقبة الدورية (Route-Based): جهاز محمول وجولة شهرية أو أسبوعية على مئات الآلات غير الحرجة (القسم 32.10)، مع برنامج يقارن بالخط الأساسي ويرتب الآلات حسب الخطر.

المجسات اللاسلكية: مقاييس تسارع ببطارية تُثبت على المضخات والمحركات والمراوح وترسل القيمة الكلية والطيف المبسط كل بضع دقائق أو ساعات عبر شبكات لاسلكية صناعية؛ سدّت الفجوة بين الجولات الدورية والمراقبة المستمرة بتكلفة منخفضة، وتُدمج مع أنظمة إدارة الأصول.

التقنيات المكملة: تحليل الزيت (المعادن البالية والتلوث والتحلل) يشير إلى المحامل والتروس قبل الاهتزاز أحيانًا؛ والتصوير الحراري للمحامل والقارنات والمحركات؛ وتحليل تيار المحرك (MCSA) لقضبان الجزء الدوار والفجوة الهوائية؛ والموجات فوق الصوتية للتزييت والتسريب؛ ومراقبة الأداء (الكفاءة والرأس) للتآكل الداخلي. والصيانة التنبؤية الفعالة تجمع هذه المصادر في حكم واحد، وتغذي نماذج الذكاء الاصطناعي في الفصل 42.

الشكل 33-7: *بنية مراقبة الحالة: من رف الحماية عبر المخارج المخزّنة إلى خادم مراقبة الحالة، والمجسات اللاسلكية والجولات المحمولة للآلات غير الحرجة، والتقنيات المكملة، وصولًا إلى إدارة الأصول وقرار الصيانة.*

33.9 تقييم الشدة ومعدل التدهور

الحكم على الاهتزاز ثلاثي المصادر: **المعيار المطلق** (ISO 20816 للغلاف والعمود، وحدود صانع الآلة، والفصل 32)، و**الاتجاه الزمني** (تغيُّر يتجاوز 25% من حد المنطقة B/C (معيار التغير في ISO 20816) يستحق تحليلًا، والمضاعفة تستحق تخطيط توقف)، و**نوع العطل** (عيب محمل دحرجة يتطور في أسابيع إلى أشهر، وسوط الزيت في ثوانٍ، وتلامس في دقائق). ولعيوب محامل الدحرجة يُتبع منحنى تطورها بمراحله الأربع (انظر القسم 33.5)؛ والزمن من المرحلة الثانية إلى الفشل يتراوح غالبًا بين أسابيع وشهور في الآلات متوسطة السرعة، ويقصر كثيرًا في السرعات العالية والأحمال الثقيلة.

33.10 خطوات تحليل الاهتزاز وتشخيصه

1. **اجمع السياق قبل الطيف:** نوع الآلة ومحاملها وقارنتها، وسرعة الدوران الدقيقة، وعدد الريش والأسنان والأقطاب، وتاريخ الصيانة والتغييرات الأخيرة، وظروف التشغيل الحالية مقارنة بالمعتاد.
2. **تحقق من القياس نفسه:** المجس وتثبيته واتجاهه ونطاقه، وجهد الفجوة أو الانحياز، والمقارنة مع مجس مجاور؛ فكثير من «الأعطال» أعطال قياس (الفصل 32).
3. **قارن بالخط الأساسي:** أي مكوّن ارتفع؟ وبأي نسبة؟ ومنذ متى؟ وهل يرتبط بتغير في التشغيل؟
4. **حدد الترددات بدقة بمضاعفات السرعة:** احسب 1X من المرجع الطوري أو من الطيف نفسه، وعبّر عن كل قمة بمضاعف السرعة (Order)، وصنّفها: متزامنة (مضاعف صحيح)، أو دون التزامن، أو غير متزامنة، أو ثابتة التردد.
5. **ابحث عن العائلات:** توافقيات، وأشرطة جانبية (قِس المسافة بينها فهي تسمي العطل)، وترددات مركبة (BPFO، GMF، عدد الريش × 1X).
6. **افحص الموجة الزمنية:** صدمات دورية (محامل وتروس)، أو تضمين (تروس)، أو قطع (ارتخاء وتلامس)، أو تشويه.
7. **أضف الطور والمدار:** ميّز بفروق الطور بين عدم الاتزان وعدم المحاذاة والانحناء والرنين، وافحص شكل المدار والموضع المركزي في آلات مجسات القرب.
8. **اختبر الفرضية بقياس إضافي:** تغيير السرعة (الرنين لا يتبعها)، أو قطع التغذية للمحرك (الكهربائي يختفي فورًا)، أو اختبار الطرق للترددات الطبيعية، أو قياس المحاذاة والجريان، أو قياس عند ظرف حمل مختلف.
9. **احكم على الشدة والاستعجال:** بالمعيار والاتجاه ونوع العطل، وحدد: استمرار مع مراقبة مكثفة، أو تخطيط توقف، أو إيقاف فوري.

10. **وثّق وتابع:** تقرير بالبصمة والفرضية والفعل الموصى به، ثم قياس بعد الإصلاح لتأكيد التشخيص وتحديث الخط الأساسي؛ فالتشخيص الذي لا يُغلق بقياس بعدي يبقى ظنًا.

33.11 حالة ميدانية: أشرطة جانبية تسبق كسر السن

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

الموقف: علبة تروس محرك مضخة مياه تبريد (مدخل 1490 rpm، ترس 29 سنًا؛ مخرج ترس 116 سنًا). القيمة الكلية على غلاف علبة التروس ارتفعت من 3.1 إلى 4.4 mm/s خلال شهرين، وهي ضمن المنطقة B للمجموعة 1، فلم تُثر انتباهًا في الجولات؛ مع أن الزيادة (1.3 mm/s)، أي نحو 29% من حد المنطقة B/C) تتجاوز معيار التغير 25% المذكور في القسم 33.9، وهذا بعينه ما فات فريق الجولات.

التحليل: الطيف أظهر تردد التعشيق

$$\mathrm{GMF} = 29 \times 24.83 = 720\ \mathrm{Hz}$$

بسعة شبه ثابتة، لكن ظهرت حوله أشرطة جانبية بمسافة 6.2 Hz، وهي سرعة عمود المخرج

(1490 × 29 ÷ 116 = 372.5 rpm = 6.2 Hz)،

وتزايد عددها وسعتها في ثلاثة قياسات متتالية. والموجة الزمنية أظهرت تضمينًا واضحًا بمعدل مرة كل (6.2 ÷ 1 =) 161 ms، أي نبضة كل دورة للعجلة الكبيرة. طيف الغلاف أظهر القمة نفسها عند 6.2 Hz. الفرضية: سن معيب (تشقق أو تآكل موضعي) في العجلة الكبيرة يدخل التعشيق مرة كل دورة.

الفعل: فحص بالمنظار خلال توقف قصير أكد شقًا في جذر سن واحد. استُبدلت العجلة في توقف مخطط بعد ثلاثة أسابيع بدل كسر سن مفاجئ كان سيتلف العجلتين والمحامل ويوقف الوحدة أسابيع.

الدرس: القيمة الكلية كانت «مقبولة» بينما كانت البصمة الطيفية صريحة؛ الأشرطة الجانبية وتردد تكرارها يسمّيان العجلة المعيبة، والموجة الزمنية تؤكد.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس (أو محلل الاهتزاز) يقرر	الفني ينفذ ويقيس
إعدادات القياس	Fmax وعدد الخطوط والنافذة والمتوسطات لكل آلة، ونقاط القياس واتجاهاتها وطريقة التثبيت	يثبت المجس بالطريقة نفسها في كل جولة، ويسجل السرعة والحمل والحرارة مع كل قياس
التشخيص	يطابق البصمة بالعطل، ويحدد القياس الإضافي الذي يؤكد الفرضية أو ينفيها	ينفذ اختبار تغيير السرعة أو قطع التغذية أو الطرق، ويجمع الطور والمدار والموجة الزمنية
الاتزان الميداني	يتحقق أن العطل عدم اتزان فعلًا، ويحسب الكتلة التصحيحية وزاويتها	يركّب الكتلة التجريبية ثم التصحيحية باتفاق الزوايا المسجل، ويعيد القياس
القرار والمتابعة	استمرار مع مراقبة مكثفة، أو توقف مخطط، أو إيقاف فوري	يقيس بعد الإصلاح ويحدّث الخط الأساسي

33.12 الأخطاء الشائعة

- الاكتفاء بالقيمة الكلية والحكم بها على آلات ذات تروس ومحامل دحرجة.
- Fmax صغير يخفي ترددات المحامل والتروس، أو عدد خطوط قليل يدمج الأشرطة الجانبية.

- تفسير 2X على أنه عدم محاذاة دائمًا دون طور محوري ودون التحقق من الارتخاء أو الصدع أو عدم انتظام الفجوة الهوائية في المحرك (100 Hz).
- الخلط بين 2X لمحرك 2980 rpm (99.3 Hz) وتردد 2× الخط (100 Hz) لعدم كفاية الفصل الطيفي.
- قياس الطور بمرجعين مختلفين أو بسرعتين مختلفتين ثم مقارنة النتائج.
- إجراء الاتزان الميداني لآلة سبب اهتزازها رنين أو عدم محاذاة أو تلامس؛ الاتزان يعالج عدم الاتزان فقط.
- تجاهل ظروف التشغيل: مقارنة قياس عند حمل 40% بخط أساسي عند 100%.
- الاعتماد على طيف الغلاف وحده للحكم على شدة عيب محمل دون الطيف العادي والاتجاه.
- الاتصال بالمخارج المخزّنة بكابلات طويلة غير مطابقة أو أجهزة ذات ممانعة دخل منخفضة تُحمِّل الإشارة.
- عدم إغلاق التشخيص بقياس بعد الإصلاح.

33.13 ملخص

تحليل الاهتزاز يفكك القيمة الكلية إلى طيف بإعدادات مدروسة (Fmax وعدد الخطوط والنافذة والمتوسطات)، ويقرأ الترددات بمضاعفات السرعة ويبحث عن التوافقيات والأشرطة الجانبية والمكونات غير المتزامنة، ثم يستعين بالطور (فروق بين الاتجاهات والنهايات وعبر القارنة) والمدار والموضع المركزي للعمود ومخططات بود والشلال. ولكل عطل بصمة: 1X لعدم الاتزان، و2X محوريًا لعدم المحاذاة، وتوافقيات للارتخاء، وترددات محسوبة غير متزامنة لمحامل الدحرجة، وGMF بأشرطة للتروس، و0.45X لدوامة الزيت، و100 Hz للأعطال الكهربائية. والاتزان الميداني يُجرى بطريقة معاملات التأثير، وتُحكم الشدة بالمعيار والاتجاه ونوع العطل، وتُبنى مراقبة الحالة على المخارج المخزّنة

والجولات والمجسات اللاسلكية والتقنيات المكملة، بخطوات تشخيص تنتهي دائمًا بقياس تأكيدي.

وفي الفصل التالي: ينتقل الفصل 34 «التحكم بالتوربينات الغازية» من مراقبة الآلة الدوارة إلى التحكم بها، في آلة تجتمع فيها قياسات السرعة والاهتزاز والحرارة في منظومة تحكم وحماية واحدة.

33.14 أسئلة التقييم الذاتي

1. مضخة 2980 rpm بمحرك ثنائي القطب: ما 1X و2X بالهرتز؟ إذا أردنا فصل 2X (نحو 99.3 Hz) عن مكوّن 100 Hz (ضعف تردد الشبكة، من مصدر كهرومغناطيسي) بحيث يقع بينهما خطان طيفيان على الأقل، فما دقة الفصل الطيفي اللازمة، وما Fmax وعدد الخطوط المناسبان؟ ولماذا لا تظهر المشكلة نفسها في مروحة 990 rpm؟
2. ما الفرق بين التوافقيات والأشرطة الجانبية في الطيف؟ وماذا يدل كل منهما؟
3. آلة تظهر 1X مرتفعًا شعاعيًا وفرق طور 90° بين الأفقي والرأسي وطورًا ثابتًا: ما التشخيص الأرجح؟ وما القياس الذي يستبعد الرنين؟
4. محمل بـ 12 كرة، d/D = 0.25، φ = 0، على عمود 1500 rpm. احسب BPFO و BPFI وFTF.
5. لماذا تظهر أشرطة جانبية بمسافة 1X حول BPFI ولا تظهر عادة حول BPFO؟
6. ما دلالة مكوّن عند 0.45X يتبع السرعة، وما الفرق بينه وبين سوط الزيت؟
7. من مخطط بود: قمة عند 3600 rpm والسعة 0.707 من القمة عند 3400 و 3850 rpm. احسب عامل التضخيم.
8. القراءة الأصلية 60 µm عند 30°، ومع كتلة تجريبية 15 g عند 0° صارت 45 µm عند 90°. احسب الكتلة التصحيحية وموضعها.

9. دوّار 200 kg بسرعة 6000 rpm بدرجة G2.5: ما عدم الاتزان المتبقي المسموح؟ وما مقداره بالغرام على نصف قطر 150 mm؟

10. صف أربع مراحل لتطور عيب محمل دحرجة في الطيف وما الإجراء المناسب في كل مرحلة.

مراجع الفصل: R6، وR18، وR19 في قياس الاهتزاز، وكتاب المؤلف «التوربينات الغازية» (R42)، وISO 20816-1/-3/-5، وISO 21940-11 (درجات الاتزان)، وAPI 670 (أنظمة حماية الآلات)، وAPI 617 وAPI 612 (السرعات الحرجة وعامل التضخيم)، وأدلة تشخيص الاهتزاز الميدانية وأنظمة VM600 CMS وBently Nevada System 1 من الخبرة الميدانية.

الفصل 34: التحكم بالتوربينات الغازية

لمن هذا الفصل: مهندس التحكم الذي يعمل في محطة توليد أو منشأة نفط وغاز فيها توربينات غازية تدير مولدات أو ضواغط، ومهندس الصيانة الذي يحتاج إلى فهم ما يجري داخل منظومة التحكم حين يتوقف التوربين أو يرفض البدء. يكفي لقراءته فهمُ حلقات التحكم (الفصل 3) وقياس الحرارة والسرعة (الفصلان 7 و32).

الفكرة الأساسية: التوربين الغازي آلة تُدار بمتغير واحد تقريبًا هو كمية الوقود. كل ما نريده منه، من بدء آمن وسرعة ثابتة وحمل مطلوب، وكل ما نخشاه، من حرارة زائدة أو تسارع مفرط، يتحول في النهاية إلى طلب وقود. لذلك تُبنى منظومة التحكم على عدة حلقات تحسب كل منها كمية الوقود التي تناسبها، ثم يمر الطلب الأصغر وحده. ومن يفهم هذه الفكرة يستطيع أن يقرأ أي منظومة تحكم بتوربين غازي، مهما اختلف الصانع أو أسماء الإشارات.

ملاحظة عن الأسماء: يستخدم هذا الفصل أسماء الإشارات الشائعة في أنظمة Speedtronic من GE (مثل FSR وTNH وTTXM) لأنها الأكثر انتشارًا في المنطقة، ولأن كثيرًا من المهندسين يتعلمون عليها. الأفكار نفسها موجودة في أنظمة Siemens وWoodward وSolar وغيرها بأسماء مختلفة. أما القيم الرقمية فنموذجية للتوضيح، والمرجع الملزم دائمًا هو مواصفات التحكم (Control Specification) الخاصة بالوحدة.

34.1 التوربين الغازي: تعريفه ومكوناته ومبدأ عمله

قبل الحديث عن التحكم، نحتاج إلى صورة واضحة للآلة نفسها: ما هي، وكيف تعمل، وأين تقع الأجزاء التي سنقيسها ونتحكم بها.

التعريف: التوربين الغازي (Gas Turbine) محرك حراري دوّار يحول الطاقة الكيميائية في الوقود إلى طاقة ميكانيكية على شكل دوران عمود. يُستخدم هذا الدوران في تشغيل مولد كهربائي في محطة توليد، أو ضاغط أو مضخة في منشأة نفط وغاز، أو في دفع طائرة أو سفينة. وهو من محركات الاحتراق الداخلي، لأن الوقود يحترق داخل الآلة نفسها، بخلاف التوربين البخاري الذي يأخذ طاقته من مرجل منفصل. وهذا الفرق يفسر كثيرًا من سلوكه العملي: استجابته السريعة، وحساسية أدائه لظروف الهواء المحيط.

الشكل 34-1: *المكونات الرئيسية الثلاثة للتوربين الغازي، الضاغط وغرفة الاحتراق والتوربين، ومسار الهواء والوقود والعادم إلى الحمل. من كتاب المؤلف «التوربينات الغازية».*

المراحل الثلاث:

- **السحب والضغط:** يدخل الهواء الجوي إلى الضاغط، فيرتفع ضغطه عبر مراحل متعاقبة من الريش الدوارة والثابتة. ونسبة الضغط في التوربينات الحديثة بين نحو 15:1 و40:1. ويستهلك الضاغط وحده بين 55% و65% من القدرة التي ينتجها قسم التوربين، فلو أنتج قسم التوربين 100 MW فإن نحو 60 MW تعود إلى الضاغط، ويبقى نحو 40 MW شغلًا صافيًا. ولهذا ينعكس أي تدهور صغير في الضاغط، مثل اتساخ مرشحات الهواء أو الريش، مباشرة على القدرة المتاحة.

- **الاحتراق:** يدخل الهواء المضغوط غرف الاحتراق، ويُحقن فيه الوقود الغازي أو السائل، ويحترق احتراقًا مستمرًا عند ضغط ثابت تقريبًا. وحرارة الغاز عند دخوله التوربين (Turbine Inlet Temperature)، ويقاربها ما يُسمى حرارة الاحتراق (Firing Temperature) بعد فوهات المرحلة الأولى، هي أهم رقم في الآلة: كلما ارتفعت زادت الكفاءة والقدرة، وزاد معها الإجهاد على الريش وقصر عمرها.
- **التمدد والعادم:** تتمدد الغازات الساخنة في مراحل التوربين فتديره، ويعود جزء من الشغل إلى الضاغط ويذهب الباقي إلى الحمل. ثم تخرج الغازات إلى العادم بحرارة لا تزال بين نحو 450 و650 °C في الوحدات الصناعية، وهذه الحرارة هي التي تستثمرها محطات الدورة المركبة في توليد البخار (الفصل 37).

دورة برايتون: المراحل الثلاث تطبيق عملي لدورة برايتون (Brayton Cycle). وعلى مخطط الحرارة مقابل الإنتروبي تظهر أربع مراحل: الضغط من 1 إلى 2، والاحتراق من 2 إلى 3، والتمدد من 3 إلى 4، ثم طرح الحرارة من 4 إلى 1، وهذه الأخيرة تحدث فعليًا في الجو لأن الدورة مفتوحة. والكفاءة النظرية للدورة المثالية دالة في نسبة الضغط فقط: η ≈ 1 − 1 ÷ PR^((k−1)/k)، حيث k نحو 1.4 للهواء.

الشكل 34-2: *دورة برايتون المثالية على مخطط الحرارة مقابل الإنتروبي: الضغط، والاحتراق، والتمدد، وطرح الحرارة في العادم. من كتاب المؤلف «التوربينات الغازية».*

مثال محلول (أثر نسبة الضغط):

- المعادلة: $\eta \approx 1 - 1 \div PR^{((k-1)/k)}$
- بنسبة ضغط 15: $\eta \approx 1 - 1 \div 15^{0.286} \approx 1 - 1 \div 2.17 \approx 54\%$
- بنسبة ضغط 30: $\eta \approx 1 - 1 \div 30^{0.286} \approx 1 - 1 \div 2.64 \approx 62\%$
- أي أن مضاعفة نسبة الضغط رفعت الكفاءة النظرية نحو ثماني نقاط فقط، لأن الفائدة تتناقص كلما ارتفعت النسبة. أما الكفاءة الفعلية فأقل بكثير، بسبب فواقد الضاغط والتوربين وهبوط الضغط في غرف الاحتراق والمداخل والعادم.

الشكل 34-3: *مقطع ثلاثي الأبعاد مبسط لتوربين غازي ثقيل أحادي العمود: أدلة التوجيه والضاغط المحوري وغرف الاحتراق ومراحل التوربين والعادم، مع مواضع أهم القياسات. الجزء المواجه للقارئ من الغلاف محذوف ليظهر الداخل.*

المكونات الرئيسية كما يراها مهندس التحكم:

- **الضاغط المحوري:** مراحل متعاقبة من ريش دوارة (Rotor) وأخرى ثابتة (Stator)، يسبقها صف من أدلة التوجيه المتغيرة (IGV). وفي الضواغط كثيرة المراحل، خاصة في التوربينات المشتقة من الطيران، تُضاف ريش ثابتة متغيرة الزاوية في المراحل الأولى (VSV) وصمامات نزف (Bleed Valves) لإبعاد الضاغط عن الانفصال الهوائي (Surge) أثناء البدء والتغيرات السريعة.

الشكل 34-4: *الضاغط المحوري بمراحله المتعاقبة من الريش الدوارة والثابتة، وأدلة التوجيه عند المدخل. من كتاب المؤلف «التوربينات الغازية».*

- **غرف الاحتراق:** أربعة تصاميم رئيسية: الأنبوبي (Can) بغرف منفصلة سهلة الفحص، والحلقي (Annular) بغرفة واحدة حول العمود وتوزيع حرارة أكثر انتظامًا، والمختلط (Can-Annular) الشائع في التوربينات الصناعية الثقيلة، والصومعي (Silo) بغرفة أو اثنتين كبيرتين خارج جسم التوربين في بعض العائلات الأوروبية القديمة. ويُقسم الهواء داخل الغرفة إلى هواء احتراق في المنطقة الأولى، وهواء تخفيف يخفض حرارة الغاز قبل التوربين، وهواء يبرد جدران الغرفة.

الشكل 34-5: *مقطع في غرفة احتراق حلقية: منطقة الاحتراق الأولى، وهواء التخفيف، والهواء المحيط الذي يبرد الجدار. من كتاب المؤلف «التوربينات الغازية».*

- **قسم التوربين:** فوهات ثابتة وريش دوارة تعمل في غاز تتجاوز حرارته نقطة انصهار سبائكها. وتعيش هذه الريش بفضل هواء تبريد يُسحب من الضاغط ويمر في قنوات داخلية، ثم يخرج من ثقوب دقيقة ليكوّن طبقة واقية على السطح (Film Cooling). وهذا ما يجعل حماية حرارة العادم وتوزيعها موضوعًا حرجًا في التحكم.

الشكل 34-6: *مقطع في ريشة توربين مبردة: هواء من الضاغط يمر في قنوات داخلية ثم يخرج من ثقوب السطح طبقة واقية. من كتاب المؤلف «التوربينات الغازية».*

- **العمود والمحامل:** عمود واحد أو أكثر على محامل انزلاقية تُزيَّت بزيت مضغوط، ومنها تُقاس الاهتزازات والموضع المحوري والحرارة.
- **الأنظمة المساعدة:** نظام التزييت، ونظام الوقود بصمامات الإيقاف والتحكم، ونظام البدء، ونظام الزيت الهيدروليكي وزيت الفصل، والتهوية وكشف الحريق والغاز في حجرة التوربين، والتغذية الكهربائية المستمرة. ولكل منها قياسات وحمايات يتولاها نظام التحكم.

أنواع التوربينات الغازية التي يصادفها المهندس:

البند	التوربين الصناعي الثقيل (Heavy Duty)	التوربين المشتق من الطيران (Aeroderivative)
أمثلة شائعة	GE Frame 5 وGE 6B وGE 9E وGE 7FA، وSiemens SGT5	GE LM2500 وGE LM6000، وRolls-Royce RB211

البند	التوربين الصناعي الثقيل (Heavy Duty)	التوربين المشتق من الطيران (Aeroderivative)
القدرة النموذجية	من نحو 25 MW إلى أكثر من 400 MW	من نحو 15 MW إلى 60 MW
العمود	غالبًا عمود واحد يدير الضاغط والمولد	غالبًا مولد غاز وتوربين قدرة حر على عمود منفصل
البدء	محرك كهربائي أو ديزل أو محول تردد ساكن (LCI) يستخدم المولد محركًا	محرك بدء هيدروليكي أو هوائي، والبدء أسرع بكثير
الاستجابة للحمل	أبطأ نسبيًا بسبب الكتلة الحرارية الكبيرة	سريعة، وتتحمل البدء والإيقاف المتكررين
الاستخدام الغالب	محطات التوليد والدورة المركبة	المنصات البحرية وضواغط خطوط الغاز ومحطات الذروة

كيف أختار؟ غالبًا لا يختار مهندس التحكم نوع التوربين، لكنه يختار ما يناسبه من فلسفة الأجهزة: الثقيل أحادي العمود يعني سرعة واحدة تُحمى وبدءًا بطيئًا بمحول تردد أو محرك، والمشتق من الطيران يعني سرعتين مستقلتين (مولد الغاز وتوربين القدرة) لكل منهما حماية سرعة زائدة، وأذونات ومؤقتات أكثر. والجدول لا يبين أن الأخير أشد حساسية لجودة الوقود وأكثر حاجة إلى VSV وVBV وإلى أجهزة أسرع. والخطأ الأكثر كلفة نقل فلسفة حماية أو مؤقتات بدء من عائلة إلى الأخرى، كأن تُقرأ حماية N25 بمنطق TNH، أو يُقصَّر تطهير وحدة يقودها HRSG على ما اعتاده فريق الدورة البسيطة.

العمود الواحد والعمودان: في تصميم العمود الواحد يدور الضاغط والتوربين والحمل معًا، وهو مناسب للمولدات التي تحتاج سرعة ثابتة. وفي تصميم العمودين يدير «توربين مولد الغاز» الضاغط وحده، ويدير «توربين القدرة الحر» المنفصل ميكانيكيًا الحمل بسرعة مستقلة، وهو الشائع في تشغيل الضواغط والمضخات. ومن مزاياه العملية أن مولد الغاز يتسارع وحده عند البدء دون أن يجر معه حملًا ثقيلًا. والفرق المهم للتحكم أن هناك سرعتين تُقاسان وتُحميان: سرعة مولد الغاز (NGG أو TNH) وسرعة توربين القدرة (NPT

أو TNL). وحين تكون سرعة الحمل أقل من سرعة التوربين، تُضاف علبة تروس للتخفيض.

ثلاث حقائق يبني عليها مهندس التحكم عمله:

- **الوقود هو المتغير المعدَّل (Manipulated Variable) الرئيسي.** زيادة الوقود ترفع حرارة الغازات فتزيد القدرة. أما الهواء فتحدده سرعة الضاغط وزاوية أدلة التوجيه، وهو متغير ثانوي يُضبط في نطاق محدود.
- **الحد الحاكم هو حرارة الاحتراق.** ولأن قياسها مباشرة غير عملي، تُستنتج من حرارة العادم وضغط الضاغط، كما سنرى في القسم 34.6.
- **الآلة سريعة.** يمكن أن ترتفع السرعة من 100% إلى حد الفصل خلال ثوانٍ إذا انفصل المولد عن الشبكة، فيجب أن تكون الحلقات والحمايات سريعة ومستقلة وموثوقة.

جدول مقارنة: الاحتراق الانتشاري مقابل الاحتراق المخلوط مسبقًا (DLN)

المعيار	احتراق انتشاري (Diffusion)	مخلوط مسبقًا جاف (DLN / Dry Low NOx)
كيف يلتقي الوقود بالهواء	يُحقن الوقود في قلب اللهب ويختلط أثناء الاحتراق	يُخلط الوقود بالهواء قبل منطقة اللهب بنسبة هزيلة (Lean)
حرارة اللهب	عالية (مناطق قريبة من النسبة الكيميائية)	أقل بمئات الدرجات
أكاسيد النيتروجين NOx	مرتفعة؛ تُخفض بحقن الماء أو البخار	منخفضة دون حقن (نحو 25 ppm أو أقل)
ثبات اللهب	واسع؛ يتحمل تغيرات الوقود والحمل	هامش ضيق: انطفاء هزيل (Lean Blow-Out) أو اهتزاز احتراق (Dynamics)

المعيار	احتراق انتشاري (Diffusion)	مخلوط مسبقًا جاف (DLN / Dry Low NOx)
ما يحتاجه التحكم	حلقة وقود واحدة تقريبًا	تقسيم الوقود على مراحل (Fuel Split)، وأنماط احتراق تتبدل مع الحمل، وحراسة IGV وحرارة الاحتراق
أجهزة إضافية	مرسلات حقن الماء/البخار	مرسلات ديناميكا الاحتراق (ضغط متذبذب)، مرسل CO/NOx، حراسة درجة حرارة الخلط
أثر جودة الوقود	متسامح	حساس لرقم ووبّه (Wobbe Index) ودرجة حرارة الغاز
الأخطاء الشائعة	إهمال جودة ماء الحقن	تبديل الأنماط عند حمل خاطئ، وإهمال إنذارات الديناميكا

كيف أختار؟ الاختيار بين الانتشاري وDLN تفرضه حدود الانبعاثات وتوافر الماء أو البخار للحقن، لا الأداء الحراري. فحيث تُطلب NOx منخفضة بلا حقن لا بديل عن DLN، ومعه تُشترى منظومة تحكم أثقل: تقسيم وقود وأنماط احتراق ومرسلات ديناميكا. والجدول لا يبين حساسية DLN لتغير رقم ووبّه وحرارة الغاز؛ فوقود متغير التركيب قد يستدعي تهيئة الغاز أو تسخينه قبل أن يستقر الاحتراق. والخطأ الأكثر كلفة تجاهل إنذارات ديناميكا الاحتراق أو تبديل الأنماط عند حمل خاطئ، فتتلف أجزاء المسار الساخن بصمت قبل أن يظهر أي فصل.

34.2 المتغيرات المقاسة ونقاط التحكم

لا تحتاج منظومة التحكم إلى عدد كبير من القياسات، لكنها تحتاج إلى قياسات موثوقة ومكررة. الجدول التالي يجمع أهمها في توربين أحادي العمود يدير مولدًا:

المتغير	الإشارة الشائعة	الحساس	التكرار النموذجي	ما تُستخدم فيه
سرعة العمود	TNH	لواقط مغناطيسية أمام عجلة مسننة من 60 سنًا	ثلاثة للتحكم وثلاثة للحماية المستقلة	البدء، والسرعة والحمل، والتسارع، والسرعة الزائدة
حرارة العادم	TTXD و TTXM	مزدوجات حرارية نوع K معزولة عن الأرض	من 13 إلى 27 مزدوجة موزعة على محيط العادم	تحكم الحرارة، والحماية، ومراقبة الاحتراق
ضغط تصريف الضاغط	CPD	مرسلات ضغط	ثلاثة	تحديد مرجع حرارة العادم
حرارة تصريف الضاغط	CTD	مزدوجات حرارية	اثنتان أو ثلاث	الحد المسموح لانتشار حرارة العادم
حرارة هواء الدخول	CTIM	مزدوجات أو RTD	اثنتان أو أكثر	تصحيح السرعة لجدول IGV
وجود اللهب	FD	كواشف أشعة فوق بنفسجية	من 2 إلى 8، وأربعة هو الشائع	تسلسل الإشعال، وحماية فقدان اللهب
الاهتزاز	BB	لواقط سرعة على جسم المحامل أو مجسات قرب على العمود	لكل محمل	إنذار وفصل
موضع أدلة التوجيه	CSGV	محولات LVDT	اثنان	حلقة موضع IGV

المتغير	الإشارة الشائعة	الحساس	التكرار النموذجي	ما تُستخدم فيه
ضغط ما بين صمامي الغاز	P2 أو FPG	مرسلات ضغط	اثنان أو ثلاثة	حلقة ضغط صمام SRV
موضع صمامات الوقود	FSG لموضع GCV، ونظيرتها لموضع SRV	محولات LVDT	اثنان لكل صمام	حلقات موضع SRV وGCV
القدرة الكهربائية	DWATT	محول قدرة (Transducer)	واحد أو اثنان	عرض الحمل، والتحكم بالحمل والانحدار، ومنحنى احتياطي لمرجع حرارة العادم في بعض الوحدات

كيف أختار؟ القاعدة في التكرار: ما يفصل التوربين (السرعة، وحرارة العادم، والاهتزاز، وضغط الزيت) بثلاثة حساسات على ثلاث بطاقات على ثلاث تغذيات مع تصويت، وما يُراقَب فقط قد يكون بسيطًا أو مزدوجًا. والجدول لا يبين استقلال لواقط الحماية عن لواقط التحكم في المسار والكابل والبطاقة، وهو شرط لا يظهر في عدد الحساسات وحده. والخطأ الأكثر كلفة الظن أن حساسًا واحدًا موزعًا على ثلاثة متحكمات حماية ثلاثية، فينحرف الحساس فتنحرف القنوات الثلاث معًا (القسم 34.9.1).

الشكل 34-7: *أهم نقاط القياس والتحكم في توربين غازي أحادي العمود.*

> **مثال محلول (قراءة السرعة من اللاقط المغناطيسي):** عجلة السرعة في توربين من طراز Frame 6B فيها 60 سنًا، والسرعة المقننة لعموده 5163 rpm. ولأن عدد الأسنان 60، فإن تردد اللاقط بالهرتز يساوي السرعة بالدورة في الدقيقة:

f = (عدد الأسنان × السرعة) ÷ 60 = (60 × 5163) ÷ 60 = 5163 Hz.

فإذا قرأ جهاز قياس التردد على أطراف اللاقط 5100 Hz، تكون السرعة 5100 rpm، أي 5100 ÷ 5163 = 98.8% من السرعة المقننة. وهذه الطريقة نفسها نستخدمها في الموقع للتحقق من قناة سرعة نشك فيها: نقيس التردد على الأطراف ونقارنه بما تعرضه الشاشة.

> **ملاحظة ميدانية عن اللواقط:** تتوقف قوة الإشارة على الفجوة بين طرف اللاقط ورأس السن، والقيمة النموذجية نحو 1.3 mm (نحو 50 mil)، والمرجع قيمة الصانع. الفجوة الكبيرة تُضعف الإشارة عند السرعات المنخفضة فتضيع النبضات أثناء البدء، والفجوة الصغيرة تعرّض اللاقط للاحتكاك بالعجلة مع التمدد الحراري أو الاهتزاز. ولا تُركّب اللواقط بعد الصيانة إلا بمقياس الفجوات (Feeler Gauge) وتُسجل القيم.

34.2.1 غرفة التحكم المحلية: ما تجده في اللوحات وما يتوقعه منك زميل التشغيل

لكل توربين غازي غرفة تحكم محلية (Local Control Room) أو حاوية (PCR) تضم منظومات متعددة تبدو للوهلة الأولى نظامًا واحدًا، ولكل منها مورّد ومنطق وصيانة مختلفة. الجدول التالي يجمع ما تجده فيها عادة، ويحدد ما يخص مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم منها:

اللوحة/النظام	وظيفته	ما يخصك فيه
واجهة الإنسان والآلة (HMI)	شاشات التشغيل والإنذارات والاتجاهات	تكوين الشاشات، إدارة الإنذارات (القسم 22.3)، أرشفة الاتجاهات
متحكمات الوحدة (Unit Controllers)	تسلسل البدء والإيقاف والمساعدات	المنطق التتابعي، الأذونات، المؤقتات
حاكم التوربين (Governor)	الوقود والسرعة والحمل والحدود	الحلقات والمحددات (القسم 34.5.1)، المعايرة
نظام مراقبة الاهتزاز	القرب والسرعة والتسارع، الإنذار والفصل	المجسات ووحدات التشغيل (الفصل 32)، حدود الفصل
لوحة الحريق والغاز (F&G)	الكشف والإطفاء داخل الحاوية	الكواشف والتصويت (الفصل 30)، تعشيق التهوية والوقود

اللوحة/النظام	وظيفته	ما يخصك فيه
مركز تحكم المحركات (MCC)	مضخات الزيت والمراوح والبادئ	إشارات الجاهزية والحالة، التعشيقات
شاحن البطاريات و UPS	تغذية DC للحماية والإيقاف	المراقبة، اختبار الحمل، سعة التفريغ
خزانة التجميع (Marshalling)	نقطة التقاء الكابلات الحقلية بالبطاقات	الوسم، العزل الجوهري، الحلقات الاحتياطية
مفاتيح الشبكة	ربط المتحكمات بالـ DCS وأنظمة المصنع	الفصل بين شبكة التحكم وشبكة المصنع (الفصل 24)
لوحة حماية المولد والمثير والمزامن (في محطات القدرة)	حماية كهربائية، تنظيم الجهد، التزامن	التنسيق مع مهندس الكهرباء: إشارات القاطع والتزامن

الشكل 34-8: *لوحات من غرفة تحكم محلية لتوربين غازي (صور من أرشيف المؤلف): (أ) رف حاكم التوربين ببطاقات السرعة والمشغلات والمزدوجات الحرارية وRTD والمداخل والمخارج؛ (ب) رف مراقبة الاهتزاز 3500؛ (ج) وحدتا حماية السرعة الزائدة المستقلتان؛ (د) وحدات تشغيل مجسات القرب (X وY والإزاحة المحورية والسرعة) وكابلات التمديد على الآلة.*

مستويات التكرار (Redundancy): يُحدد التكرار في أربع طبقات مستقلة: **الأجهزة الحقلية** (بسيطة، مزدوجة، ثلاثية TMR)، و**المتحكمات** (بسيطة، مزدوجة، ثلاثية)، و**شبكة المداخل والمخارج** (فردية، مزدوجة، ثلاثية)، و**حزم المداخل والمخارج I/O Packs)** (فردية، مزدوجة، ثلاثية). والخطأ الشائع أن يُظن أن ثلاثة متحكمات تعني حماية ثلاثية: **إشارة واحدة تُوزَّع على ثلاثة متحكمات هي تكرار في المعالجة لا في القياس، ولا تُصوَّت** (القسم 34.9.1). القاعدة العملية: ما يفصل التوربين (السرعة، حرارة العادم،

الاهتزاز، ضغط الزيت) يكون بثلاثة حساسات على ثلاث بطاقات على ثلاث تغذيات، وما يُراقَب فقط قد يكون بسيطًا.

34.3 بنية منظومة التحكم: حلقات تتنافس على الوقود

إشارة طلب الوقود في أنظمة GE اسمها FSR (Fuel Stroke Reference)، وهي نسبة مئوية تمثل كمية الوقود المطلوبة. تحسب المنظومة ست قيم مستقلة لهذه الإشارة، واحدة من كل وضع تحكم:

- **FSRSU:** من تحكم البدء، وهو تحكم بحلقة مفتوحة بمستويات وقود محددة مسبقًا.
- **FSRACC:** من تحكم التسارع، يحد معدل ارتفاع السرعة.
- **FSRN:** من تحكم السرعة والحمل.
- **FSRT:** من تحكم حرارة العادم.
- **FSRSD:** من تحكم الإيقاف، يخفض الوقود بتدرج عند الإيقاف العادي.
- **FSRMAN:** من التحكم اليدوي، ويستخدمه المشغل لتحديد سقف للوقود.

تدخل هذه القيم الست إلى بوابة القيمة الصغرى (Minimum Value Gate)، وتمر أصغرها لتصبح FSR الفعلية التي تذهب إلى نظام الوقود. وتعرض الشاشة دائمًا اسم الحلقة المسيطرة، مثل «SPEED CTRL» أو «TEMP CTRL».

الشكل 34-9: *بوابة القيمة الصغرى تختار أصغر طلب وقود من الحلقات الست.*

لماذا القيمة الصغرى؟ لأن كل حلقة هنا تمثل حدًا من حدود الآلة. حلقة الحرارة لا تريد وقودًا يرفع الحرارة فوق الحد، وحلقة التسارع لا تريد وقودًا يسرّع العمود بأكثر من المسموح، وحلقة السرعة تريد ما يكفي للحمل المطلوب فقط. فإذا مرّ الطلب الأصغر، احترمت الآلة جميع الحدود في وقت واحد. والنتيجة العملية التي يجب أن يتذكرها مهندس التشغيل: **أي حلقة تستطيع أن تخفض الوقود، ولا تستطيع أي حلقة وحدها أن ترفعه فوق ما تسمح به الحلقات الأخرى.**

وتنتهي كل هذه الحلقات بحد أدنى للوقود FSRMIN يمنع حلقة السرعة من خفض الوقود إلى درجة انطفاء اللهب عند رفض الحمل المفاجئ. وتستطيع حلقتا البدء والإيقاف وحدهما تجاوز هذا الحد والنزول إلى الصفر.

الأجهزة التي تنفذ ذلك: في أنظمة Mark V وMark VI وMark VIe تُنفذ حلقات التحكم في ثلاثة متحكمات متطابقة تُسمى <R> و<S> و<T>، ولكل منها مجموعته من الحساسات. تُصوّت المخرجات بطريقة اثنين من ثلاثة (2oo3)، فيستمر التوربين في العمل إذا تعطل متحكم واحد أو حساس واحد. وتُضاف وحدة حماية مستقلة <P>

بثلاث قنوات <X> و<Y> و<Z> لها لواقط سرعة خاصة بها، مسؤولة عن السرعة الزائدة الاحتياطية ومنطق الفصل ومزامنة المولد. ويأتي تفصيل هذه المنصات في القسم 34.9.2.

34.3.1 بوابة القيمة الصغرى بالتفصيل: كيف تنتقل السيطرة، وماذا يرى المشغل، وكيف تُشخَّص

ما هي؟ بوابة القيمة الصغرى (Minimum Value Gate)، وتُسمى أيضًا اختيار الإشارة الأدنى (Low Signal Selection – LSS)، **كتلة منطقية في برنامج التحكم** تقارن عدة طلبات للوقود وتمرر أصغرها. وكلمة «بوابة» هنا تعني بوابة اختيار في البرنامج، لا صمامًا ميكانيكيًا. وهدفها أن يسمح النظام للحاكم (Governor) بتنظيم السرعة أو الحمل **ضمن كمية الوقود التي تسمح بها محددات التشغيل**، كالحرارة والتسارع. والمبدأ نفسه مستعمل في منصات المصنعين المختلفة: FSR في أنظمة GE، ومسار LSS في متحكمات Woodward (مثل GTC100) التي تدخل إليه محددات الوقود للتسارع والحرارة (R76).

المقارنة تكون بين طلبات وقود، لا بين قياسات. لا تقارن البوابة السرعة (rpm) بالحرارة (°C) بالقدرة (MW). فكل متحكم يحوّل قياسه وخطأه إلى **طلب وقود أو حد وقود** على المقياس نفسه (نسبة مئوية من طلب الوقود مثلًا)، ثم تتم المقارنة:

$$\text{Fsel} = \min(\text{F1}, \text{F2}, \text{F3}, \ldots)$$

حيث F1 طلب الحاكم، وF2 حد الحرارة، وF3 حد التسارع، وFsel الطلب المختار.

> **مثال:** الحاكم يطلب 65%، ومحدد الحرارة يسمح بـ 52%، ومحدد التسارع يسمح بـ 80%، ومحدد آخر مفعّل يسمح بـ 90%. فيخرج من البوابة **52%**، ويكون محدد الحرارة هو المتحكم الفعلي في الوقود.

جدول: من يسيطر في أمثلة مختلفة (أرقام توضيحية لا إعدادات مقترحة)

الحالة	خرج الحاكم	حد الحرارة	حد التسارع	خرج البوابة	المتحكم الفعلي
تشغيل طبيعي	40%	75%	85%	**40%**	الحاكم
زيادة طلب الحمل	55%	75%	85%	**55%**	الحاكم
الوصول إلى حد الحرارة	70%	60%	85%	**60%**	حد الحرارة
حد تسارع أكثر تقييدًا	70%	75%	48%	**48%**	حد التسارع

الوضع المطلوب والمسار المسيطر: وجود النظام في «وضع الحاكم» (Governor Mode) لا يعني دائمًا أن خرج الحاكم هو المختار. فقد يبقى الوضع المطلوب «حاكم» بينما يتدخل محدد. وفي بعض الشاشات يتغير اسم وضع التحكم إلى «تحكم الحرارة» عند انتقال الاختيار، وفي شاشات أخرى يبقى الوضع العام كما هو ويظهر المحدد النشط (Active Limiter) منفصلًا. فيُفرَّق دائمًا بين:

- **الوضع المطلوب (Requested Mode):** ما اختاره المشغل أو التسلسل.
- **المسار المسيطر (Selected / In Control):** المتحكم الذي يمر خرجه فعلًا من البوابة الآن.

لماذا الأدنى؟ لأن الإشارات مرتبة بحيث تعني الزيادة **السماح بوقود أكثر**. فإذا طلب الحاكم وقودًا أكثر وسمح أحد المحددات بأقل، فرض الاختيار الأدنى الحد الأكثر تقييدًا. ويحدث هذا الاختيار عادة **قبل** تحويل طلب الوقود إلى موضع صمام. ولذلك في نظام فيه صمام تجاوز (Bypass) أو علاقة حركة عكسية، لا يعني أقل طلب للوقود أقل فتح لذلك الصمام (القسم 34.8.1).

كيف تنتقل السيطرة من الحاكم إلى الحرارة؟ افترض أن طلب الحمل يرتفع تدريجيًا، وأن حد الوقود الذي يسمح به متحكم الحرارة ثابت مؤقتًا عند 60% (الشكل 34-10):

جدول: انتقال السيطرة مع ارتفاع طلب الحاكم

اللحظة	طلب الحاكم	حد الحرارة	خرج البوابة
T1	40%	60%	40%
T2	50%	60%	50%
T3	60%	60%	60%
T4	70%	60%	60%
T5	75%	60%	60%

حتى T3 تزيد زيادةُ طلب الحاكم الخرجَ، وبعدها يبقى الخرج 60% رغم استمرار ارتفاع الطلب. **فعدم زيادة فتح الصمام هنا قد يكون استجابة صحيحة لبوابة القيمة الصغرى، لا عطلًا في المشغل الإلكتروني أو المشغل.**

الشكل 34-10: *انتقال السيطرة في بوابة القيمة الصغرى (قيم توضيحية): طلب الحاكم يرتفع من 40% إلى 75%، وحد الحرارة ثابت عند 60%، وحد التسارع عند 85%. فيتبع خرج البوابة الحاكم حتى T3، ثم يمسكه حد الحرارة عند 60% في T4 وT5.*

ماذا يحدث للمتحكم غير المختار؟ حين يطلب الحاكم وقودًا أكثر ويمنعه المحدد، يستمر تكامل الحاكم في التراكم إن لم يُعالج. وهذا **تشبع التكامل (Integrator Windup)**، ويسبب انتقالًا غير سلس حين يخرج المحدد من السيطرة. ولذلك تُستعمل وظائف **التتبع ومنع التشبع (Tracking / Anti-Windup)**، فيُبنى تكامل كل متحكم على الطلب الفعلي الخارج من البوابة. وفي كتل Woodward GAP يمكن أن تُغذى متحكمات PID بخرج الاختيار، مع حالة تبين أي متحكم هو المسيطر، لمنع تراكم التكامل (R76). وهذه التغذية الراجعة **ليست بالضرورة قراءة موضع الصمام**. وقد رأينا بمحاكاة عددية أن غياب هذه الوصلة يؤخر استلام محدد الحرارة للسيطرة عشرات الثواني ويسمح بتجاوز الحد (القسم 41.6).

بوابة القيمة الصغرى غير حد الوقود الأدنى:

المصطلح	الوظيفة
بوابة القيمة الصغرى (Minimum Gate / Low Select)	تختار أصغر قيمة بين عدة طلبات أو حدود
حد الوقود الأدنى (Minimum Fuel Limit)	يضع أرضية للوقود في ظروف تشغيل محددة، مثل FSRMIN الذي يمنع انطفاء اللهب عند رفض الحمل (القسم 34.3)

والحد الأدنى يُطبَّق حسابيًا باختيار الأعلى:

$$\text{Fout} = \max(\text{Freq}, \text{Fmin})$$

حيث Freq الطلب الداخل، وFmin الحد الأدنى، وFout الخارج. لكن ترتيب هذه الكتل وأولوية الإيقاف يعتمدان على برنامج التوربين. **وحد الوقود الأدنى أثناء التشغيل لا يمنع قطع الوقود عند الفصل (Trip)**، لأن الفصل يعمل في مسار الحماية لا في مسار طلب الوقود.

التشخيص بمنحنى الاتجاه: تُعرض على مرجع زمني واحد (القسم 39.4-أ): خرج الحاكم، وخرج محدد الحرارة، وخرج محدد التسارع، وخرج البوابة، والمتحكم المختار، ثم أمر الصمام وموضعه الفعلي.

جدول: قراءة منحنيات بوابة القيمة الصغرى

ما تراه	التفسير الذي تبدأ منه
خرج البوابة يطابق خرج الحاكم	الحاكم هو المسيطر
الحاكم يرتفع، وخرج البوابة يطابق محدد الحرارة	محدد الحرارة يمنع زيادة الوقود؛ افحص الحرارة الفعلية ومرجعها (القسم 34.6)
خرج البوابة يرتفع، لكن أمر الصمام لا يرتفع	راجع منطق التحويل والحدود وشروط التشغيل بعد البوابة
أمر الصمام يرتفع، لكن الموضع لا يتبعه	افحص المشغل الإلكتروني والمشغل والتغذية الراجعة (القسم 34.8.1)
الاختيار يتنقل بسرعة بين مسارين	قارن القياسات والضوضاء وضبط الحلقتين والتتبع قبل الحكم بوجود عطل

والسؤال التشخيصي الأساسي: **«أي إشارة هي الأدنى الآن؟ ولماذا صارت الأدنى؟»** وجوابه يحدد هل المشكلة في طلب الحاكم، أم في محدد تدخل، أم في تنفيذ الأمر بعد البوابة.

34.4 تسلسل البدء والتسارع والإيقاف

البدء أخطر مراحل تشغيل التوربين على المسار الساخن. فخلال دقائق تنتقل الأجزاء من حرارة الجو إلى مئات الدرجات، وكل بدء سيئ الضبط يستهلك من عمرها. لذلك يُبنى البدء تسلسلًا صارمًا من الخطوات، ولا تنتقل المنظومة إلى خطوة إلا بعد التحقق من شروط السماح (Permissives) الخاصة بها.

مرحلات السرعة: يعتمد التسلسل على أربع إشارات سرعة منطقية، قيمها النموذجية:

الإشارة	المعنى	القيمة النموذجية	دورها
L14HR	سرعة الصفر	نحو 0%	تشغيل آلية التدوير البطيء (Ratchet) أو التبريد بعد الإيقاف
L14HM	السرعة الدنيا	نحو 16%	بدء التطهير، والسماح بالوقود والإشعال
L14HA	سرعة التسارع	نحو 50%	تأكيد أن البدء يتقدم، وتفعيل بعض الحمايات
L14HS	سرعة التشغيل	نحو 95%	إيقاف المضخات المساعدة، وإنهاء التسلسل، والسماح بالتزامن

خطوات البدء النموذجية:

1. **الجاهزية:** يتحقق النظام من إعادة ضبط جميع الفصول، ومن ضغط زيت التزييت وزيت الفصل، ومن أن صمامات الوقود مغلقة وكواشف اللهب لا ترى لهبًا، ثم تظهر رسالة «READY TO START».
2. **التدوير:** يُشغّل جهاز البدء فيدير العمود. وعندما يبدأ العمود بالدوران (L14HR) تتوقف آلية التدوير البطيء.
3. **التطهير (Purge):** عند L14HM يبدأ مؤقت التطهير، ويُحسب زمنه ليمر حجم الهواء في مسار الغاز والعادم خمس مرات على الأقل وفق NFPA 85، فيطرد أي غاز متسرب. وهو إلزامي في كل بدء، ويطول زمنه حين يكون في مسار العادم مرجل أو HRSG يمكن أن يحتجز الغاز.
4. **الإشعال:** بعد انتهاء التطهير تُفتح صمامات الوقود على مستوى «FIRE» وتُشغّل شمعات الإشعال، ويبدأ مؤقت الإشعال. وفي بعض الوحدات الحديثة يجري التطهير عند سرعة أعلى (نحو 25% في بعض الطرازات، وفق المصنّع)، ثم يُترك العمود لتنخفض سرعته إلى سرعة الإشعال، نحو 14%. وإذا لم ترَ كواشف اللهب لهبًا خلال زمن محدد، نحو 60 ثانية، يُقطع الوقود ويُعاد التطهير قبل أي محاولة جديدة.

5. **التسخين (Warm-up):** بمجرد رصد اللهب ينخفض الوقود إلى مستوى «WARM-UP» مدة دقيقة تقريبًا، ليسخن المسار الساخن بتدرج.
6. **التسارع:** يرتفع FSR بمعدل مبرمج، ويتسارع العمود. وغالبًا تتسلم حلقة التسارع السيطرة هنا، فتحد معدل ارتفاع السرعة. وعندما تتجاوز سرعة التوربين سرعة جهاز البدء ينفصل القابض ويتوقف جهاز البدء.
7. **السرعة الكاملة بلا حمل (FSNL):** عند L14HS تنتهي مرحلة البدء، وتتسلم حلقة السرعة، ويستقر العمود على نحو 100.3% استعدادًا للتزامن.

الشكل 34-11: *مراحل بدء توربين غازي ثقيل، وتغير السرعة وطلب الوقود خلالها (قيم توضيحية).*

تحكم التسارع: يقارن النظام السرعة الحالية بقيمتها في دورة الحساب السابقة، والفرق مقياس للتسارع. فإذا تجاوز التسارع المرجع خُفض FSRACC. وأثناء البدء يكون مرجع التسارع دالة في السرعة، وبعد اكتمال التسلسل يصبح قيمة ثابتة، نحو 1% من السرعة في الثانية. وتظهر فائدته الكبرى بعد التزامن: إذا فُتح قاطع المولد تحت الحمل، ارتفعت السرعة بسرعة، فيتدخل تحكم التسارع قبل حلقة السرعة ليحد الارتفاع ويبعد الآلة عن حد السرعة الزائدة.

الإيقاف باللهب (Fired Shutdown): عند أمر الإيقاف العادي ينخفض مرجع السرعة فينخفض الحمل حتى يفتح مرحّل القدرة العكسية قاطع المولد. بعدها ينخفض الوقود إلى الحد الأدنى الذي يبقي اللهب، ثم يستمر في الانخفاض مع السرعة، حتى يُطفأ اللهب عند سرعة منخفضة ويُقطع الوقود. والهدف أن يبرد المسار الساخن مع بقاء اللهب أطول مدة ممكنة، لأن قطع الوقود عند السرعة الكاملة يحدث صدمة حرارية كبيرة. وبعد توقف العمود تعمل آلية التدوير البطيء ساعات حتى يبرد الدوّار بانتظام ولا ينحني.

34.4.1 بدء توربين ثنائي العمود مشتق من الطيران: الأذونات والمؤقتات واستكشاف فشل الإشعال

التوربين المشتق من الطيران (Aeroderivative) ثنائي العمود يتكون من **مولد غاز** (Gas Generator) سرعته N25 يدور بحرية، و**توربين قدرة** (Power Turbine) سرعته NSD يدفع المولد أو الضاغط عبر علبة تروس أو مباشرة. وتسلسل بدئه أكثر أذوناتٍ ومؤقتاتٍ من تسلسل التوربين الثقيل، لأن كل نظام مساعد (زيت التوربين، زيت التروس، زيت المولد، وقود الغاز، وقود السائل، الهواء والتهوية، بادئ التدوير) يجب أن يثبت جاهزيته قبل الدوران.

أذونات البدء (Start Permissives) مجمّعة: الجدول التالي يعيد ترتيب شاشة الأذونات في نظام تحكم فعلي (R58) بحسب النظام، وكل بند إما مفتاح حالة أو حد إنذار/فصل يُقارن به القياس:

النظام	أمثلة الأذونات (يجب أن تكون كلها «خضراء» قبل أمر التدوير)
الهواء والتهوية	فرق ضغط مرشحي هواء الاحتراق (مرحلتان) دون حد الفصل؛ أبواب المرشحات والحاوية مغلقة؛ مراوح تهوية الحاوية متاحة
زيت التوربين والتروس والمولد	حرارة الخزان بين حدي الإنذار والفصل؛ مستوى الخزان؛ ضغط الإمداد وضغط تصريف المضخة؛ فرق ضغط المرشح؛ مضخات الرفع (Jacking) والمضخات الميكانيكية متاحة؛ مستوى خزان التصريف (Rundown)

النظام	أمثلة الأذونات (يجب أن تكون كلها «خضراء» قبل أمر التدوير)
وقود الغاز	صمّامَا الإيقاف الأول والثاني مغلقان؛ صمام التنفيس بينهما مفتوح؛ حرارة وضغط الإمداد؛ مستوى مزيل الرذاذ دون HH
الوقود السائل	صمّامَا الإيقاف مغلقان؛ حرارة المشعبين؛ ضغط سحب وتصريف مضخة الوقود؛ المضخة متاحة
بادئ التدوير	بادئ الهواء متاح؛ زمن استخدامه في هذا البدء لم يتجاوز الحد
إشارات عامة	لا عطل مشترك في مراقب الاهتزاز أو F&G؛ لا إيقاف طارئ أو إنذار إيقاف نشط؛ قفل الأربع ساعات غير نشط؛ N25 دون 300 rpm؛ الوحدة ليست في وضع «خارج التشغيل»؛ المتحكم ليس في وضع المعايرة
حرارة القلب	حرارة مدخل توربين الضغط المنخفض T48 دون 93 °C لغسيل الماء، ودون 204 °C للبدء (مع رفض ثلاثة مجسات متجاورة أو أربعة مجسات)؛ حرارة تصريف الضاغط T3

القاعدة الميدانية: **أول ما تفعله عند امتناع البدء أن تقرأ شاشة الأذونات لا أن تفتش في الحقل**؛ البند الأحمر يقودك إلى الجهاز، وغالبًا يكون مفتاح باب أو مرسل فرق ضغط أو مؤقتًا لم ينقضِ.

فحوص البدء (Start Checks): بعد الأذونات تُجرى فحوص جماعية تُعرض على شكل مجموعات (Start Check 0 إلى 3): جهد قضيب DC، توافق مزدوجات حرارة المدخل، فحص بدء الحماية من الحريق، إذن العميل، قاطع البطارية مغلق، حرارة زيت التزييت طبيعية، كاشف اللهب سليم، وضع التحكم ليس «Off»، سرعة HP صفر، أبواب الحاوية مغلقة، لا تجاوز لمؤقت الانتظار، صمام تدفئة النزف سليم، IGV بلا عطل، محرك مضخة الزيت الطارئة بلا هبوط جهد، لا عطل في مرسل ضغط تصريف الضاغط، لا تثبيط للاهتزاز، لا عطل في حساسات الحرارة المحيطة، الوحدة متصلة بالشبكة، مداخل ومخارج VCMI في حالة سليمة، فحص المؤازرات. النظام يعرض الإشارات السليمة بالأخضر والمانعة بالأحمر، ويظهر «NOT READY TO START» ما دام أحمر واحد قائمًا.

تسلسل البدء بالمؤقتات: الشكل 34-12 يرسم تسلسلًا نموذجيًا لوحدة ثنائية العمود من أمر البدء إلى سرعة التزامن، بالقيم المستعملة في نظام فعلي (R58):

الشكل 34-12: *تسلسل بدء توربين ثنائي العمود مشتق من الطيران: مؤقتات كل مرحلة، وسرعة مولد الغاز N25 (تطهير 2,200؛ فصل البادئ 4,600؛ خمول 7,600 rpm)، وسرعة توربين القدرة NSD حتى التزامن (قيم مأخوذة من عرض المؤلف، R58).*

المرحلة	المؤقت النموذجي	ما يحدث	ما الذي يوقف التسلسل
تجهيز المساعدات	T43 = 900 s	مضخات الزيت، التسخين، التهوية، فتح صمامات الهواء	أي إذن يسقط
تسارع إلى سرعة التطهير	T6 = 60 s	بادئ التدوير يرفع N25 إلى 2,200 rpm	البادئ لا يبلغ السرعة (ضغط هواء البدء)

المرحلة	المؤقت النموذجي	ما يحدث	ما الذي يوقف التسلسل
التطهير (Purge)	T9 = 120 s	كسح الغازات من العادم ومولد البخار باستعادة الحرارة	نقص عدد تغييرات الهواء المحسوب
الإشعال	T11 = 10 s (نافذة) + T32 = 20 s	فتح صمامات الوقود، تشغيل المشعلات، تأكيد اللهب	لا لهب خلال النافذة ← فشل إشعال
تسارع HP	T13 = 90 s	الوقود يرفع N25؛ عند 4,600 rpm يُفصل البادئ ويُطفأ الإشعال	تسارع بطيء (Hung Start) أو حرارة عادم زائدة
إلى الخمول	T29 = 120 s	N25 إلى 7,600 rpm	تجاوز مؤقت الوصول
التسخين	T33 = 60 s	ثبات حراري قبل التحميل	—
تسارع LPR	—	توربين القدرة يبدأ الدوران (800: توقف مضخات الرفع؛ 1,250: تأكيد الانفكاك) إلى 90% سرعة التزامن (3,540)	اهتزاز، عدم تسارع NSD
تسخين قبل التزامن	T15 = 300 s، T28 = 90 s	ثبات عند 3,937 rpm ثم إذن المزامنة	خطأ تردد/جهد، رفض المزامن

مثال محلول (زمن البدء المتوقع):

- **المعطيات:** مؤقتات الجدول أعلاه؛ تسارع LPR نحو 200 s.
- **الافتراضات:** لا انتظار إضافي في الأذونات؛ لا إعادة إشعال.
- **الحل بالوحدات:** 900 + 60 + 120 + 10 + 20 + 90 + 120 + 60 + 200 + 300 ≈ 90 + 1,970 s ≈ **33 دقيقة** حتى الجاهزية للتزامن.
- **معنى النتيجة:** ثلثا الزمن تقريبًا في تجهيز المساعدات والتسخين لا في

التسارع؛ فمن يطلب «بدءًا أسرع» عليه أن يبحث في T43 وT15 (وهما مقيَّدان بحرارة المعادن وسلامة الزيت) لا في مؤقتات الإشعال. وأي بدء تجاوز الزمن المحسوب بأكثر من دقيقتين يستحق مراجعة سجل الأحداث.

استكشاف فشل الإشعال (Fail to Light) بخطوات مرقّمة:

1. اقرأ سجل الأحداث: هل فُتح صمّامَا الإيقاف وصمام التحكم فعلًا (تغذية راجعة الموضع) خلال نافذة الإشعال T11؟
2. تحقق من ضغط الوقود عند المشعب أثناء المحاولة (اتجاه مسجل لا قراءة لاحقة)؛ الضغط الذي ينهار عند الفتح يشير إلى منظم أو مرشح أو صمام مغلق أعلى المسار.
3. تحقق من دائرة الإشعال: المثير (Exciter) يتلقى الأمر؟ الكابلات ذات الجهد العالي سليمة وغير مبللة؟ شمعة الإشعال (Igniter Plug) نظيفة والفجوة صحيحة؟ اختبر الشرارة خارج الآلة بحذر.
4. تحقق من كاشف اللهب: زجاجه نظيف، ومحاذاته صحيحة، واختباره الذاتي سليم؛ لهب موجود وكاشف أعمى يعطي «فشل إشعال» زائفًا، وهذه الحالة الأكثر شيوعًا في الوحدات القديمة.
5. راجع جدول وقود البدء: طلب الوقود عند الإشعال (FSRSU) قد يكون منخفضًا جدًا لغاز بارد أو لتغير في رقم ووبّه.
6. راجع زمن التطهير وصمام التنفيس بين صمامي الإيقاف: تنفيس لم يغلق يفرغ المشعب من الضغط.
7. لا تكرر المحاولة قبل تطهير كامل؛ فالوقود غير المحترق في العادم ومولد البخار باستعادة الحرارة خطر انفجار، ولهذا يُقفل التسلسل تلقائيًا بعد عدد محاولات.

34.5 تحكم السرعة والحمل والتزامن

تقارن حلقة السرعة السرعةَ الفعلية TNH بمرجع السرعة TNR، وتغيّر FSR بما يتناسب مع الفرق. قبل التزامن تتحكم هذه الحلقة بالسرعة فعلًا. أما بعد إغلاق قاطع المولد على شبكة كبيرة، فالشبكة تفرض السرعة، وكل زيادة في الوقود فوق حاجة السرعة الكاملة بلا حمل تتحول إلى قدرة كهربائية. عندها تصبح حلقة السرعة حلقة حمل، ويصبح مرجع السرعة وسيلة المشغل لطلب الحمل.

التحكم بالانحدار (Droop): هو تحكم تناسبي؛ فالفرق بين المرجع والسرعة يُضرب بكسب ثابت ويُضاف إلى وقود السرعة الكاملة بلا حمل. ويُعبَّر عن الكسب بنسبة الانحدار، والشائع 4%: أي أن تغيّر السرعة بمقدار 4% يحرك الحمل من الصفر إلى الحمل الكامل. ويُضبط المرجع عادة بحيث يعطي TNR = 104% الحمل الأساسي عند الظروف التصميمية. ويتراوح مدى المرجع في توربينات المولدات من نحو 95% إلى 107%.

الشكل 34-13: *خطوط الانحدار 4%. عند سرعة الشبكة 100% يعطي المرجع 102% نصف الحمل، ويعطي 104% الحمل الكامل.*

فائدة الانحدار أنه يوزع الحمل بين الوحدات المتوازية توزيعًا مستقرًا. فإذا انخفض تردد الشبكة بسبب نقص التوليد، زادت كل وحدة حملها بنسبة انحدارها، فتشترك جميعها في دعم التردد. أما التحكم عديم الانحدار (Isochronous)، أي التحكم بسرعة ثابتة الذي يعيد السرعة إلى قيمتها تمامًا، فيناسب وحدة واحدة تغذي شبكة معزولة. فإذا عملت وحدتان بالتحكم عديم الانحدار على الشبكة نفسها تنازعتا الحمل. ولهذا تُشغَّل الوحدات على الشبكات الكبيرة بالانحدار، ويُترك التحكم عديم الانحدار لوحدة واحدة في الجزر الكهربائية، أو يُستخدم مع نظام مشاركة حمل يوزّع الحمل على الوحدات المتوازية بنسب محددة ويصحّح التردد، فلا تتنازع الوحدات (يُفصَّل في الفصل 90 من الجزء القادم).

مثال محلول (الانحدار): توربين قدرته المقننة 40 MW يعمل بانحدار 4% على شبكة 50 Hz.

- رفع المشغل المرجع إلى TNR = 102% والشبكة عند 50 Hz تمامًا.
  - المعادلة: الحمل = (TNR − السرعة) ÷ الانحدار × القدرة المقننة
  - التعويض: الحمل = (102 − 100) ÷ 4 × 40
  - النتيجة: الحمل = 20 MW
- انخفض تردد الشبكة إلى 49.8 Hz، أي أن السرعة صارت 99.6%.
  - الفرق الآن = 102 − 99.6 = 2.4%
  - الحمل = 2.4 ÷ 4 × 40 = 24 MW
  - زادت الوحدة حملها 4 MW دون تدخل المشغل.
- لو كانت الوحدة عند الحمل الأساسي وحلقة الحرارة هي المسيطرة، لما استطاعت أن تزيد حملها، لأن بوابة القيمة الصغرى ستمرر طلب حلقة الحرارة. وهذا مثال عملي على تنافس الحلقات.

التزامن (Synchronizing): يُرفع مرجع السرعة عند البدء إلى نحو 100.3%، ليكون المولد أسرع قليلًا من الشبكة فيأخذ حملًا صغيرًا لحظة الإغلاق بدل أن يُسحب إلى القدرة

العكسية. ويطابق نظام التزامن الآلي الجهد والتردد، ويحسب الانزلاق (Slip) والتسارع وزمن إغلاق القاطع، ويصدر أمر الإغلاق قبل تطابق الطورين بزمن يساوي زمن إغلاق القاطع. ويُضاف مرحّل فحص التزامن (25) على التوالي مع أمر الإغلاق الآلي واليدوي، ليمنع الإغلاق خارج الطور مهما كان مصدر الأمر. وأوضاع التزامن ثلاثة: إيقاف، ويدوي يغلق فيه المشغل القاطع حين يسمح مرحّل الفحص، وآلي.

34.5.1 حاكم توربين مشتق من الطيران: اختيار الأدنى ثم الأعلى، واختبارات الحاكم

في التوربين الثقيل رأينا بوابة القيمة الصغرى بين ست حلقات (الشكل 34-9). وفي الحاكم المشتق من الطيران تُعرض الفكرة نفسها على شاشة واحدة، ويُعبَّر فيها عن الطلب بالكيلوواط أو بالنسبة المئوية (الشكل 34-14): كل حلقة تُخرج «الوقود الذي تسمح به»، ثم **اختيار الأدنى (LSS)** يمرر أصغرها، ثم **اختيار الأعلى (HSS)** مع جداول الحد الأدنى للوقود يمنع الطلب من الهبوط تحت ما يبقي اللهب مشتعلًا.

الشكل 34-14: *بنية حاكم توربين ثنائي العمود كما تظهر على شاشته: متحكم وقود البدء، ومحدد حرارة العادم، وحاكما N1 وN2، وجداول الوقود الأقصى مقابل N1 وCDP، ومحدد CDP، ومحدد الوقود الأقصى تدخل بوابة الأدنى؛ ثم بوابة الأعلى مع جداول الوقود الأدنى تعطي طلب الصمام (قيم مثال من R58).*

الحلقة/المحدد	نقطة ضبط مثال	متى يمسك بالوقود
متحكم وقود البدء	جدول مقابل N1	من الإشعال حتى الخمول
حاكم سرعة مولد الغاز N1 (في وحدات أخرى N25)	3,650 rpm (قيم هذا الجدول من طراز غير طراز جدول البدء في 34.4.1، فلا تُقارن أرقامهما)	عند التحكم بالسرعة قبل التزامن أو عند الحد الأقصى لمولد الغاز
حاكم N2 (توربين القدرة، وفي وحدات أخرى NSD)	4,000 rpm (مع الانحدار بعد التزامن)	التشغيل الطبيعي على الشبكة أو الضاغط
محدد حرارة العادم EGT	590 °C	الحمل الأساسي وأيام الصيف
محدد ضغط تصريف الضاغط CDP	115 psig	حدود الغلاف والضاغط

الحلقة/المحدد	نقطة ضبط مثال	متى يمسك بالوقود
جدولا الوقود الأقصى (N1، CDP)	منحنيان	التسارع: منع الانفصال الهوائي (Surge) والحرارة الزائدة
محدد الوقود الأقصى	ثابت	حماية عليا للصمام
جدولا الوقود الأدنى (N1، CDP عبر HSS)	منحنيان	التباطؤ ورفض الحمل: منع الانطفاء الهزيل

في الشكل، قيمة الشاشة «0 kW» عند خرج متحكم البدء والوحدة متوقفة (N1 = 466 rpm بالدوران البطيء) تُبين أن الحلقة الفعالة هي التي يساوي خرجها خرج البوابة؛ وهذه هي طريقة تشخيص «من يحكم الوقود الآن» على أي حاكم: **قارن خرج كل حلقة بخرج البوابة**.

اختبارات الحاكم الرئيسية (تُجرى عند التكليف وبعد كل تعديل في معاملاته):

1. **اختبار رفض الحمل (Load Rejection):** يُفتح قاطع المولد عند حمل محدد (مثل 50% ثم 100%). المطلوب: ألا تبلغ السرعة حد الفصل بالسرعة الزائدة، وأن يعود الحاكم إلى الخمول أو سرعة التزامن دون انطفاء. سجّل الذروة وزمن الاستقرار؛ جدول الوقود الأدنى هو ما يمنع الانطفاء هنا.
2. **اختبار قبول الحمل (Load Acceptance):** خطوة رفع حمل بمقدار متفق عليه (مثل 25% في الوضع المعزول). المطلوب: هبوط تردد ضمن الحد المسموح واسترداده في الزمن المحدد؛ جداول الوقود الأقصى وحماية الاختناق تحدد السقف.
3. **اختبار التشغيل على الحمل الأساسي (Base Load Test):** تشغيل على محدد حرارة العادم لفترة كافية والتحقق من أن EGT لا يتجاوز نقطة ضبطه وأن الانتقال من حاكم السرعة إلى المحدد سلس.

4. لكل اختبار: سجل الاتجاهات عالية الدقة (سرعة، طلب وقود، موضع الصمام، EGT، CDP) قبل الاختبار ودوّن المعاملات التي غُيرت، ولا تُجرِ الاختبار دون إذن التشغيل وجاهزية حماية السرعة الزائدة المستقلة.

34.6 تحكم حرارة العادم

الحد الحقيقي الذي نريد حمايته هو حرارة الاحتراق (Firing Temperature)، أي حرارة الغاز عند خروجه من فوهات المرحلة الأولى. لكن قياسها مباشرة غير عملي، فالحساسات لا تعيش طويلًا في تلك البيئة. والحل أن تُستنتج من قياسين متاحين: حرارة العادم، ونسبة ضغط التوربين التي يمثلها ضغط تصريف الضاغط CPD. فمن حسابات أداء الدورة يمكن رسم خطوط حرارة احتراق ثابتة على مخطط حرارة العادم مقابل CPD. وكلما ارتفع الضغط زاد تمدد الغاز في التوربين وبرد أكثر قبل أن يصل إلى العادم، فيجب أن يكون حد حرارة العادم أقل.

الشكل 34-15: *مرجع حرارة العادم مقابل ضغط تصريف الضاغط: حد أفقي عند الضغوط المنخفضة يحمي منظومة العادم، وخط مائل يمثل حرارة احتراق ثابتة، مع هامشي الإنذار والفصل (قيم توضيحية).*

كيف يُحسب المرجع؟ يحسب البرنامج مرجع حرارة العادم TTRXB من خط مائل تحدده ثوابت في مواصفات التحكم: نقطة انطلاق وميل بالنسبة إلى CPD، مع حد أعلى أفقي (Isothermal) يحمي منظومة العادم عند الأحمال المنخفضة وأثناء البدء. وتوجد عادة منحنيات احتياطية تستخدم FSR أو القدرة الكهربائية بدل CPD، يُنتقل إليها إذا فُقدت إشارات الضغط. وفي الوحدات التي لها وضع ذروة (Peak) يوجد خط ثانٍ أعلى قليلًا، يُسمح به مقابل استهلاك أسرع لعمر المسار الساخن.

كيف تُحسب الحرارة الممثلة؟ لا يُستخدم متوسط بسيط لكل المزدوجات. فالبرنامج يرتب القراءات من الأعلى إلى الأدنى، ويستبعد أي مزدوجة تقرأ قيمة منخفضة جدًا تدل على عطل، ثم يستبعد أعلى قراءة وأدنى قراءة، ويحسب متوسط الباقي. هذا المتوسط TTXM هو القيمة التي تُقارن بالمرجع. والفكرة أنه لا ينبغي لمزدوجة معطلة واحدة أن تجرّ الآلة إلى خفض الحمل أو زيادته.

> **مثال محلول (TTXM والانتشار):** توربين (مثال مبسط، فالعدد الفعلي أكبر عادة) فيه 12 مزدوجة عادم، قراءاتها بالدرجة المئوية:
>
> 542، 545، 548، 540، 551، 547، 544، 520، 549، 546، 543، 550.

1. نستبعد الأعلى (551) والأدنى (520).
2. مجموع العشر الباقية = 5454، فيكون TTXM = 545.4 °C.
3. الانتشارات الثلاثة:
   - الانتشار الأول: S1 = الأعلى − الأدنى = 551 − 520 = 31 °C
   - الانتشار الثاني: S2 = الأعلى − ثاني أدنى قراءة = 551 − 540 = 11 °C
   - الانتشار الثالث: S3 = الأعلى − ثالث أدنى قراءة = 551 − 542 = 9 °C
4. إذا كان الانتشار المسموح عند هذه الحالة 25 °C، فإن S1 يتجاوزه فيظهر إنذار مشكلة احتراق، بينما S2 أقل من 0.8 × 25 = 20 °C فلا يتحقق شرط الفصل.

القراءة المنخفضة وحدها قد تكون مزدوجة معطلة أو غرفة احتراق ضعيفة. والتمييز بينهما يأتي من المزدوجات المجاورة: فإذا انخفضت معها قراءة مجاورة كان الاحتمال الأقوى مشكلة احتراق حقيقية. وتذكّر أن الغاز يدور في التوربين، فالمزدوجة المنخفضة لا تقع خلف الغرفة المعطلة مباشرة، بل مزاحة بزاوية تتغير مع الحمل.

34.7 أدلة التوجيه في مدخل الضاغط (IGV)

أدلة التوجيه ريش قابلة للدوران في مدخل الضاغط، تغيّر كمية الهواء الداخل. وتؤدي في التحكم ثلاث وظائف:

- **حماية الضاغط أثناء البدء والإيقاف:** تبقى مغلقة عند السرعات المنخفضة، فتقل كمية الهواء وتبتعد المراحل الأولى عن الانفصال الهوائي والاهتزاز.

- **الحفاظ على فرق ضغط كافٍ على فوهات الوقود** عند الأحمال المنخفضة، مما يحد من اضطرابات الاحتراق.
- **رفع حرارة العادم عند الأحمال الجزئية في الدورة المركبة:** فإغلاقها يقلل الهواء فترتفع حرارة العادم، ويستفيد مولد البخار.

الجدول النموذجي لتوربين ثقيل: تبقى الأدلة مغلقة عند نحو 34 درجة من الصفر حتى نحو 83.5% من السرعة المصححة، ثم تفتح بمعدل ثابت مع السرعة حتى تبلغ زاوية السرعة الكاملة الدنيا نحو 57 درجة. وتُستخدم السرعة المصححة (TNHCOR) لا الفعلية، لأن كثافة الهواء تتغير مع حرارة الدخول. وبعد التزامن ومع زيادة الحمل تبقى الأدلة عند 57 درجة حتى ترتفع حرارة العادم إلى قيمة معينة، ثم تفتح إلى الفتح الكامل، نحو 84 درجة في كثير من الطرازات:

- **في الدورة البسيطة:** تفتح عند حرارة عادم ثابتة مختارة، مثل 370 °C (700 °F).
- **في الدورة المركبة:** لا تبدأ بالفتح إلا عندما تقترب حرارة العادم من مرجع حلقة الحرارة، بنحو 17 °C (30 °F)، فتبقى حرارة العادم مرتفعة أطول مدى ممكن.

وتُفتح صمامات نزف الضاغط (Bleed Valves) أثناء البدء والإيقاف وعند الفصل، وتُغلق عند بلوغ سرعة التشغيل (المرحّل L14HS، نحو 95% من السرعة المقننة) أي قبل التزامن. وعند الفصل تُغلق الأدلة إغلاقًا كاملًا وتبقى مغلقة أثناء تباطؤ العمود.

ليست كل التوربينات متشابهة في أدوات التحكم بالهواء: التوربينات الصناعية الثقيلة ذات العمود الواحد تكتفي غالبًا بأدلة التوجيه وصمامات النزف. أما التوربينات المشتقة من الطيران بضواغطها كثيرة المراحل ومدى سرعاتها الواسع، فتحتاج إلى ثلاث أدوات معًا: أدلة التوجيه عند المدخل، وريش ثابتة متغيرة الزاوية في المراحل الأولى (VSV)، وصمامات نزف متغيرة أو سريعة الفتح (VBV أو Blow-off) تفتح عند الفصل ورفض الحمل لتحمي هامش الانفصال الهوائي (Surge Margin).

الشكل 34-16: *أدوات التحكم بالهواء على امتداد الضاغط: أدلة التوجيه المتغيرة عند المدخل (IGV)، والريش الثابتة المتغيرة (VSV)، وصمام النزف. من كتاب المؤلف «التوربينات الغازية».*

ما يراقبه مهندس التحكم في حلقة IGV: الفرق بين الموضع المطلوب والفعلي، إذ يُنذر عند تجاوزه حدًا معينًا ويفصل التوربين إذا استمر؛ واتفاق محولي LVDT؛ وسلامة المشغل الهيدروليكي والصمام المؤازر. وبعد أي صيانة للأدلة تُعاد معايرة LVDT بقياس الزاوية الفعلية بمنقلة على الريش نفسها، لا بالاكتفاء بقراءة الشاشة.

34.7.1 *VIGV* و*VSV* و*VBV* في الضاغط عالي النسبة، ونظام *IGV* الهيدروليكي

في الضواغط ذات نسب الضغط العالية لا تكفي أدلة المدخل وحدها لإبعاد الريش عن الانفصال الهوائي (Surge) أثناء التسارع، فتُضاف **ريش ثابتة متغيرة (VSV)** في المراحل الأولى، و**صمامات نزف متغيرة (VBV)** بين الضاغطين المنخفض والعالي تُلقي جزءًا من الهواء حين لا يستطيع الضاغط العالي ابتلاعه، فلا يدخل الضاغط الأمامي في الانفصال

الهوائي. الشكل 34-17 (ب) يعطي جداول وضعها مقابل حالة التشغيل في وحدة فعلية (R58):

حالة التشغيل	VIGV (% فتح)	VSV (%)	VBV (% فتح)
خمول القلب	29	34	90
تزامن الخمول	29	44	88
الحمل الأساسي الأقصى	93	87	0

القراءة العملية: عند الخمول تُفتح صمامات النزف على مصراعيها وتُغلق أدلة المدخل، فيعمل الضاغط الأمامي بعيدًا عن خط الانفصال الهوائي ولو بكفاءة أقل؛ ومع الحمل تُغلق VBV تدريجيًا وتُفتح VIGV وVSV. وأي انحراف في هذه الجداول (مثل VBV عالقة مفتوحة عند الحمل) يظهر أولًا **هبوطًا في القدرة وارتفاعًا في حرارة العادم عند حمل معين** لا إنذارًا صريحًا.

الشكل 34-17: *(أ) نظام IGV الهيدروليكي المؤازر: مرجع الزاوية من الحاكم، الصمام المؤازر، الأسطوانة المزدوجة، وLVDT مزدوج للتغذية الراجعة، مع صمام التفريغ (Dump) الذي يعيد الأدلة إلى الإغلاق عند الفصل؛ (ب) جداول VIGV وVSV وVBV مقابل حالة التشغيل (قيم من R58).*

نظام IGV الهيدروليكي: يُحرك الأدلة **مشغل هيدروليكي** يستقبل أمره من **صمام مؤازر (Servo Valve)** بإشارة تيار موجبة أو سالبة تفتح أو تغلق؛ ويقيس الموضع **LVDT مزدوج** (القسم 34.8) تُختار قيمته العليا أو متوسط القراءتين. وعند الفصل يُفرغ **صمام**

التفريغ (Dump Valve) زيت الفصل (Trip Oil) فيعود المشغل بالنابض أو ضغط الغلاف إلى الوضع الآمن دون اعتماد على الحاكم. خطوات المعايرة:

1. تأكد من جاهزية الزيت الهيدروليكي (ضغط ونظافة NAS/ISO 4406) وأن التوربين متوقف ومقفل.
2. من شاشة المعايرة، ادفع الأمر إلى الإغلاق الكامل وسجل قراءة LVDT عند المصد الميكانيكي للإغلاق ثم عند المصد الميكانيكي للفتح، وعاير الطرفين، ثم تحقق من مواضع الجدول أعلاه (29% عند الخمول و93% عند الحمل الأساسي)؛ ووحدة المعايرة المعتمدة هي وحدة الشهادة نفسها (النسبة المئوية من الشوط أو الزاوية بالدرجات) لا مليمترات الشوط.
3. قارن LVDT-1 وLVDT-2 عبر الشوط؛ فرق يزيد على نحو 5% من المدى يُعالج قبل التشغيل (تثبيت، توصيل، قلب مغناطيسي).
4. اختبر استجابة الخطوة (10% صعودًا وهبوطًا) وسجل الزمن؛ بطء غير معهود يشير إلى انسداد فوهة المؤازر أو زيت ملوث.
5. اختبر صمام التفريغ بأمر فصل مُحاكى وتحقق من عودة الأدلة إلى الإغلاق خلال الزمن المحدد.
6. وثّق القيم في سجل المعايرة وقارنها بالتكليف؛ انزياح تدريجي عبر السنوات يكشف تآكل الوصلات.

34.8 نظام الوقود والمشغلات الكهروهيدروليكية

الإشارة FSR لا تحرك الصمامات مباشرة. فهي تمر أولًا بمقسّم الوقود (Fuel Splitter) الذي يوزعها بين الوقود السائل FSR1 والغازي FSR2 في الوحدات مزدوجة الوقود، ثم تذهب كل منهما إلى حلقة موضع أو تدفق خاصة بها.

المشغل الكهروهيدروليكي: قلب نظام الوقود صمام مؤازر (Servo Valve) كهروهيدروليكي. يستقبل تيارًا صغيرًا بالمللي أمبير، فيوجه زيتًا عالي الضغط إلى

أسطوانة المشغل ليحركها في الاتجاه المطلوب وبالسرعة المطلوبة. وفي أنظمة TMR يحتوي محرك العزم (Torque Motor) في الصمام المؤازر على ثلاثة ملفات معزولة، كل ملف موصول بمتحكم، فلا يتوقف الصمام إذا تعطل متحكم أو ملف. ويُضاف انحياز ميكانيكي (Null Bias) يدفع المشغل إلى وضع الأمان المغلق إذا انقطعت كل الإشارات. ويقيس محول LVDT موضع ساق الصمام ويعيده إلى المتحكم لتُغلق حلقة الموضع.

الشكل 34-18: *حلقة التحكم بموضع صمام التحكم بالغاز: من مرجع الوقود FSR، إلى متحكم الموضع، فالصمام المؤازر، فالمشغل الهيدروليكي، مع تغذية راجعة من LVDT. من كتاب المؤلف «التوربينات الغازية».*

كيف يعمل محول LVDT؟ ملف ابتدائي في الوسط يُغذى بجهد متردد، وعلى جانبيه ملفان ثانويان موصولان بالتضاد، وبينهما قلب معدني مربوط بساق الصمام. حين يكون القلب في المنتصف يتساوى جهدا الثانويين فيكون الفرق صفرًا، وحين يتحرك يزداد جهد الملف القريب وينقص جهد البعيد، فيتناسب الفرق خطيًا مع الإزاحة ضمن مداه الخطي. ولأنه بلا تلامس بين القلب والملفات، لا يتآكل ويتحمل الحرارة والاهتزاز، ولهذا صار حساس الموضع الأول في حلقات التحكم الحرجة. وتوجد منه طرازات بملفات ثانوية مزدوجة للتكرار. ومعايرته تعني أن يُسجل في المتحكم جهده عند الإغلاق الكامل والفتح الكامل المقيسين ميكانيكيًا، كما سنرى في الحالة الميدانية (القسم 34.10).

الشكل 34-19: *مبدأ عمل محول LVDT: ملف ابتدائي بين ملفين ثانويين وقلب متحرك، ومنحنى الجهد التفاضلي مقابل الموضع مع نقطة الصفر والمدى الخطي. من كتاب المؤلف «التوربينات الغازية».*

نظام الغاز: صمامان متتاليان. يتكون خط الغاز الرئيسي من صمام نسبة السرعة والإيقاف (SRV) يليه صمام التحكم بالغاز (GCV):

- **صمام GCV** يحدد كمية الغاز. شكل سدادته ومقعده الفنتوري يجعلان التدفق مستقلًا تقريبًا عن الضغط بعد الصمام، فيصبح التدفق دالة في أمرين فقط: مساحة الفتح، والضغط قبله P2. ولهذا يكفي أن يكون موضعه متناسبًا مع FSR2.
- **صمام SRV** يؤدي وظيفتين. الأولى تنظيم الضغط P2 ليكون دالة خطية في سرعة التوربين، فيبقى التدفق متناسبًا مع FSR والسرعة معًا، وهذا يعطي دقة أفضل عند السرعات المنخفضة حيث الهواء قليل. والثانية الإيقاف: فهو صمام الإيقاف في منظومة الحماية، ويُغلق فورًا عند تفريغ زيت الفصل.
- **صمام التنفيس (Vent)** بين الصمامين يُفتح عند التوقف ليفرّغ الغاز المحبوس، ويُغلق قبل البدء.

ويُراقَب النظام بإنذارات تكشف معظم الأعطال قبل أن تسبب مشكلة: تدفق وقود زائد أثناء البدء، وفقدان تغذية LVDT الراجعة، وصمام مفتوح قبل السماح بفتحه، وتيار في ملف الصمام المؤازر قبل السماح، وانخفاض الضغط P2.

نظام الوقود السائل: تُدار مضخة الوقود بسرعة التوربين، ويعيد صمام تجاوز (Bypass Valve) الفائض إلى مدخلها، فكلما أُغلق هذا الصمام زاد الوقود المتجه إلى الغرف. ثم يقسم مقسّم التدفق (Flow Divider) الوقود بالتساوي على الغرف، وهو مجموعة مضخات تروس متطابقة على عمود واحد. وتقيس لواقط مغناطيسية على المقسّم سرعته، وهي متناسبة مع التدفق، فتُغلق حلقة التدفق. وتُضرب FSR1 بالسرعة، فيصبح الوقود المطلوب دالة في السرعة أثناء البدء كما في الغاز.

التحويل بين الوقودين: يجري التحويل بتدرج. تُفتح أولًا كمية صغيرة من الوقود الجديد لملء الخطوط، ثم بعد مهلة تبلغ نحو 30 ثانية يُرفع الوقود الجديد ويُخفض القديم بمعدل مبرمج، ويبقى مجموعهما مساويًا لـ FSR. وعند الانتقال الكامل إلى الغاز تُطهَّر فوهات الوقود السائل بالهواء لتبقى نظيفة ولا يتفحم فيها الوقود.

معايرة *LVDT* وصمام الوقود: خطوات

تُجرى في التوقف مع تفريغ خط الغاز وعزله، وبأداة الصيانة الخاصة بنظام التحكم:

1. تحقق من إحكام العزل وتفريغ الغاز وإقفال صمام العزل اليدوي، ومن أن الضغط الهيدروليكي متاح لتحريك الصمام دون وقود.
2. قِس جهد إثارة LVDT عند أطرافه (عادة 7 V rms عند 3 kHz تقريبًا) وتحقق من مطابقته للمواصفة، وقِس مقاومة الملفات وعزلها إلى الأرض.
3. من أداة الصيانة، حرّك الصمام إلى الإغلاق الكامل عبر تيار الصمام المؤازر، وتحقق ميكانيكيًا من أنه على المقعد (مؤشر الشوط أو القياس بمسطرة عمق)، وسجّل جهد LVDT عند هذا الموضع.
4. حرّك الصمام إلى الفتح الكامل، وتحقق من وصوله إلى الحد الميكانيكي، وسجّل جهد LVDT.

5. أدخل قيمتي الإغلاق والفتح في تهيئة النظام (معايرة الموضع) بحيث يقرأ 0% و100% على التوالي، وكرر المعايرة لكل LVDT من الزوج المكرر وتأكد من تطابق قراءتيهما ضمن نحو 1%.
6. أرسل مواضع 25 و50 و75% وقارن الموضع الفعلي بالقراءة؛ الخطية المقبولة عادة ضمن ±1% إلى ±2% من الشوط.
7. تحقق من الاتجاه الآمن: افصل تيار الصمام المؤازر (أو حاكِ فقد الإشارة) فيجب أن يعود الصمام إلى الإغلاق بالنابض في الزمن المحدد (أجزاء من الثانية للصمام SRV).
8. تحقق من إنذارات المراقبة: فقد إثارة LVDT، واختلاف القراءتين، وخطأ الموضع المستمر (فرق بين المرجع والقراءة يتجاوز الحد لزمن محدد)، بأن تحاكيها وتراقب ظهورها.
9. أعد الخط إلى وضعه، وارفع التجاوزات، وسجّل القيم القديمة والجديدة، ولا تغيّر ثوابت حلقة الموضع إلا بإدارة تغيير.

34.8.1 صمامات قياس الوقود ومشغلاتها: الصمام، والمشغل، والمشغل الإلكتروني، ونظام التحكم

صمامات التحكم بوقود التوربين الغازي / (Gas Turbine Fuel Control Metering Valves)، غازيًا كان الوقود أو سائلًا، تقدمها شركات متخصصة مثل (Woodward) و(Moog) إلى جانب صانعي التوربينات. ولفهم أي تركيب منها، يُفصل بين **أربعة أجزاء**: الصمام الذي يمر فيه الوقود، والمشغل (Actuator) الذي يحركه، والمشغل الإلكتروني (Driver) الذي يقود المشغل، ونظام التحكم الذي يحدد المطلوب. والرسوم هنا وظيفية مبسطة، وترتيب المعدات وطريقة الإغلاق يختلفان بحسب تصميم التوربين والطراز.

1. أين يقع الصمام وما وظيفته؟ في مسار غاز الوقود النموذجي: مصدر الغاز، ثم الترشيح وتهيئة الضغط، ثم صمام أو صمامات العزل (Shutoff / Stop)، ثم صمام قياس الوقود وتنظيمه (Fuel Metering Valve)، ثم مشعب الوقود (Fuel Manifold)، ثم الفوهات وغرفة الاحتراق. وهناك وظيفتان مختلفتان:

الوظيفة	ما تفعله
القياس والتنظيم (Metering / Control)	تغير كمية الوقود باستمرار بحسب حاجة التوربين
العزل والإيقاف (Shutoff / Stop)	تعزل الوقود عند التوقف أو الفصل وفق تصميم الحماية

وقد يجمع جهاز واحد الوظيفتين، كصمام SRV في (القسم 34.8). لكن **وصول قراءة الموضع إلى 0% لا يثبت وحده إحكام العزل ولا عدم التسريب**. ويقدم المصنعون صمامات تنظيم وصمامات إيقاف بتشغيل كهربائي أو هيدروليكي.

2. من يقرر كمية الوقود؟ نظام تحكم التوربين يأخذ طلب الحمل أو السرعة، ويطبق حدود التشغيل والحماية عبر بوابة القيمة الصغرى (القسم 34.3.1)، ثم يحسب طلب الوقود، ويحوّله إلى أمر موضع مناسب للصمام. فهنا **حلقتان مختلفتان**:

- **حلقة التوربين:** هل السرعة أو الحمل مطابقان للمطلوب؟
- **حلقة الصمام:** هل موضع الصمام الفعلي مطابق للأمر؟

وقد تكون حلقة الصمام سليمة تمامًا بينما الحمل منخفض، بسبب نقص ضغط الوقود أو مشكلة في مساره. وهذا هو التعاقبي نفسه (القسم 41.2): حلقة الموضع داخلية، وحلقة التوربين خارجية.

الشكل 34-20: *نوعان من تحريك صمام الوقود: (أ) مشغل كهربائي يقوده موضّع رقمي (DVP) يقارن الموضع المطلوب بقراءة حساس الموضع (Resolver) ويرسل الموضع والحالة إلى نظام التحكم؛ (ب) مشغل هيدروليكي يحركه صمام مؤازر كهروهيدروليكي بتيار من مضخم المؤازر، مع تغذية راجعة من محول LVDT. رسم وظيفي مبسط.*

3. المشغل الكهربائي والموضّع الرقمي (DVP): يعني (DVP) عند Woodward موضّع الصمام الرقمي (Digital Valve Positioner). ويؤدي عمليًا خمس وظائف:

1. يستقبل **الموضع المطلوب** من نظام التحكم.
2. يقرأ **الموضع الفعلي** من حساس المشغل.

3. يحسب الفرق بينهما.
4. يقود المحرك بالاتجاه والعزم المناسبين ليقلل الفرق.
5. يراقب الأعطال ويرسل حالة التشغيل والإنذارات.

فإذا كان الموضع المطلوب 60% والفعلي 45%، فخطأ الموضع 15 نقطة مئوية، ويقود الجهاز المشغل حتى يقترب الفعلي من 60%. وتوثق Woodward استعمال هذا الجهاز مع محركات تيار مستمر بلا فرش (BLDC) أو محركات عزم محدود الزاوية (Limited Angle Torque)، بتغذية راجعة من حساس (Resolver). وتختلف واجهات الطلب والتغذية بحسب النسخة: إشارات تناظرية، أو اتصال (CANopen) أو (Ethernet)، وتغذية 24 V أو 125 V تيار مستمر (R81). **وهذه خيارات لطرازات مختلفة، لا توصيلات قابلة للتبادل.**

جدول: المشغل الإلكتروني والموضّع وDVP

المصطلح	المعنى
المشغل الإلكتروني (Driver)	اسم عام لوحدة إلكترونية تقود محركًا أو ملف صمام مؤازر، وقد تتضمن تحكمًا وتشخيصًا
الموضّع (Positioner)	وحدة تتحكم في الموضع بالأمر والتغذية الراجعة
DVP من Woodward	جهاز محدد يجمع قيادة المشغل الكهربائي والتحكم في موضعه والمراقبة

وليس لكل صمام من Woodward جهاز DVP خارجي، فبعض العائلات فيها موضّع مدمج. ووجود مشغل من Moog لا يعني أنه متوافق مع DVP من Woodward. فالتوافق يُثبت من وثائق الطرازين، لا من تشابه الوظيفة.

4. المشغل الهيدروليكي والصمام المؤازر: في التركيب الهيدروليكي الشائع، يكون الصمام المؤازر (Servo Valve)، ومنه صمامات Moog الكهروهيدروليكية، **صمامًا صغيرًا**

يتحكم في زيت تشغيل المشغل، أما الوقود فيمر في الصمام الرئيسي. وسلسلة العمل في الصمام المؤازر ذي المرحلتين:

تيار كهربائي ← حركة محرك العزم (Torque Motor) ← فرق ضغط في المرحلة الأولى ← حركة البكرة (Spool) ← تدفق زيت ← حركة المكبس.

وفي تصميم الفوهة والصفيحة (Nozzle-Flapper) تغير حركة صغيرة للصفيحة الضغط على جانبي البكرة، فتتحرك لتوجه الزيت إلى منافذ المشغل. وليست كل الصمامات المؤازرة بهذا التصميم، فهناك تصاميم ذات قيادة مباشرة (R82) (Direct Drive). ويُقاس موضع المكبس بمحول LVDT كما في (القسم 34.8).

تمييز مهم: استعمال التوربين **وقودًا سائلًا** لا يعني أن مشغل صماماته **هيدروليكي**. فالأول يصف الوقود المحترق، والثاني يصف وسيلة تحريك الصمام. وتوجد أنظمة تشغيل كهربائية لصمامات الوقود السائل أيضًا.

5. ما الذي يختلف في الوقود السائل؟ في نظام بمضخة ثابتة الإزاحة: خزان الوقود، ثم مرشح ومضخة، ثم خط الوقود المضغوط، ثم صمام القياس، ثم منظومة التوزيع والعزل، ثم الفوهات، مع **صمام تجاوز أو إرجاع (Bypass / Spill)** يعيد الوقود الزائد. والترتيب الفعلي يختلف: بعض الأنظمة تنظم الوقود بصمام مباشر، وبعضها بمسار التجاوز، وبعضها بمضخة متغيرة الإزاحة تلبي الطلب دون إرجاع الفائض بالطريقة نفسها. ولدى Woodward مثلًا صمامات للوقود السائل منها صمامات تجاوز تقودها أجهزة DVP وتقيس موضعها بحساسات (Resolver).

ولذلك **زيادة فتح الصمام لا تعني دائمًا زيادة الوقود إلى التوربين.** فإذا كان الصمام على مسار التجاوز، فزيادة فتحه تزيد الراجع وتنقص الوقود المتجه إلى الحراقات، كما في نظام الوقود السائل في (القسم 34.8).

6. هل فتح الصمام 50% يعني تدفق وقود 50%؟ لا بالضرورة. فالموضع والتدفق متغيران مختلفان، والتدفق يعتمد على:

- مساحة الفتحة وشكلها وخاصية الصمام.
- ضغط الوقود قبل الصمام وبعده.
- كثافة الوقود وحرارته. وفي الغاز يدخل أثر الانضغاطية وحالة التدفق المختنق (Choked Flow).
- أوضاع بقية الصمامات والمضخة ومسارات التجاوز.

وللسائل غير المتبخر تُقرّب العلاقة تعليميًا إلى:

$$Cd \times A(x) \times \sqrt{(\Delta P \div \rho)} \propto Q$$

حيث A(x) مساحة الفتحة عند الموضع x، وCd معامل التصريف، وΔP فرق الضغط عبر الصمام، وρ الكثافة. وفي الغاز عند التدفق المختنق يصير التدفق الكتلي متناسبًا مع المساحة والضغط قبل الصمام، ولا يتأثر بالضغط بعده، وهذا ما يستغله تصميم صمام GCV في (القسم 34.8). **فقد يطابق الموضعُ الفعلي الأمرَ تمامًا، بينما يبقى التدفق منخفضًا لنقص الضغط.**

7. تشخيص صمام الوقود بمنحنيات الاتجاه: تُجمع الإشارات التالية على مرجع زمني واحد بحسب ما يتيحه الجهاز (القسم 39.4-أ):

جدول: إشارات تشخيص صمام الوقود وفائدتها

الإشارة	فائدتها
الموضع المطلوب داخل نظام التحكم (Position Demand)	ما الذي طلبه النظام؟
الطلب المستقبَل داخل المشغل الإلكتروني (Demand Received)	هل وصل الطلب صحيحًا؟
الموضع الفعلي (Actual Position)	هل تحرك الصمام؟
خطأ الموضع (Position Error)	ما مقدار التأخر أو عدم التطابق؟
تيار المحرك أو تيار الصمام المؤازر	هل توجد محاولة قيادة؟

الإشارة	فائدتها
حالات المشغل الإلكتروني: التغذية، والجاهزية (Ready)، والسماح (Enable)، والفصل (Trip)	هل الجهاز جاهز ومسموح له بالحركة؟
ضغط الوقود قبل الصمام وبعده، وتدفقه	هل ظروف الوقود تفسر المشكلة؟
ضغط الزيت الهيدروليكي (للمشغل الهيدروليكي)	هل توجد طاقة كافية لتحريك المكبس؟
حالة حساسات الموضع وأعطالها	هل قراءة الموضع موثوقة؟

الشكل 34-21: *منحنيات اتجاه لصمام الوقود (قيم توضيحية لا معيار قبول لأي طراز): (أ) الطلب يقفز من 20% إلى 60% والموضع الفعلي يلحقه تدريجيًا خلال ثانيتين؛ (ب) الموضع ثابت عند 55% كما طُلب، لكن ضغط الوقود قبل الصمام ينخفض إلى 65% من المعتاد فينخفض التدفق، والعطل في مسار الوقود لا في الصمام.*

جدول: قراءة منحنيات صمام الوقود

ما تراه	اتجاه الفحص
طلب نظام التحكم يتغير، والطلب المستقبَل في المشغل الإلكتروني ثابت	مسار الإشارة، والاتصال، واختيار مصدر الطلب، والتحجيم

ما تراه	اتجاه الفحص
الطلب يصل، والموضع ثابت، ولا قيادة ظاهرة	حالة السماح والفصل، والتغذية، وأعطال المشغل الإلكتروني، وصحة قراءة التيار
الطلب يصل، والموضع يتأخر، والتيار أو جهد القيادة مرتفع	مقاومة ميكانيكية، أو فرق ضغط مرتفع، أو مشكلة في المشغل؛ وفي الهيدروليكي ضغط الزيت والصمام المؤازر
الموضع يتبع الطلب، لكن الوقود أو الحمل منخفض	ضغط الوقود، والمرشحات، ومسار العزل أو التجاوز، ومعايرة التدفق
قراءة الموضع تقفز مع إنذار حساس	الحساس، والكابل والموصلات، والتشويش، أو حركة فعلية غير مستقرة
يبدأ الفصل ثم يغلق الصمام	قد يكون الإغلاق استجابة صحيحة للحماية؛ ابحث عن أول سبب للفصل

وهذه قرائن توجه الفحص، لا تشخيص نهائي. وأسماء الإنذارات ومعانيها تختلف بحسب الجهاز. فلا يصح مثلًا افتراض أن إنذار «خطأ التتبع (Tracking Error)» يعني دائمًا الفرق بين الموضع المطلوب والفعلي، فقد يعني في بعض تطبيقات Woodward اختلاف قناتي الطلب. فيُرجع إلى دليل الطراز قبل تفسير أي إنذار.

> **تنبيه سلامة:** الفحوص التي تحرك صمام الوقود، مثل اختبار الشوط (Stroke Test) أو المعايرة، تُجرى بعد عزل الوقود وتأمين المعدة وفق إجراء الصانع (الفصل 13). ولا تُجرب بإشارة خارجية على توربين عامل، ولا بتجاوز الفصل.

دور المهندس ودور الفني: المهندس يحدد نوع المشغل والمشغل الإلكتروني وتوافقهما من وثائق الطرازين، ويحدد الإشارات التي تُؤرشف وحدود إنذار خطأ الموضع، ويفصل في وصف التحكم بين وظيفة القياس ووظيفة العزل. والفني يجمع منحنيات الإشارات التسع قبل أي تدخل، ويقرأ حالات المشغل الإلكتروني وإنذاراته من دليل الطراز، وينفذ اختبار الشوط والمعايرة بعد العزل فقط، ويسجل قراءات الموضع والتيار في كل اختبار لتكون أساسًا للمقارنة.

34.9 الحمايات ومنطق الفصل

القاعدة الأولى في حماية التوربين الغازي أن الحماية مستقلة عن التحكم. فتعطل متحكم أو برنامج يجب ألا يعطل الحماية. والقاعدة الثانية أن هناك طريقين مستقلين لقطع الوقود: إغلاق صمام التحكم بإنزال FSR إلى الصفر، وإغلاق صمام الإيقاف بتفريغ زيت الفصل.

زيت الفصل (Trip Oil): زيت منخفض الضغط مأخوذ من خط التزييت عبر فتحة مقيدة، يُبقي صمامات الفصل الهيدروليكية مفتوحة. وعلى كل فرع وقود صمام تفريغ بملف كهربائي (20FG للغاز و20FL للسائل) يُغذّى أثناء التشغيل ويُفصل للإيقاف. هذه الفلسفة، أي قطع التغذية للفصل (De-Energize-to-Trip)، تعني أن انقطاع التغذية الكهربائية يوقف التوربين بأمان. وتصدر أوامر قطع هذه الملفات بتصويت اثنين من ثلاثة. ويقطع زر الفصل الطارئ التغذية عنها مباشرة دون المرور بالبرنامج.

الشكل 34-22: *الفصل بالسرعة الزائدة عبر قناتين مستقلتين: متحكمات التحكم الثلاثة، ووحدة الحماية المنفصلة بمجساتها ومعالجاتها.*

أهم الحمايات:

الحماية	المبدأ	القيم النموذجية	ملاحظات للمهندس
السرعة الزائدة الأساسية	برنامج في <R> و<S> و<T> بلواقط التحكم	الفصل عند نحو 110%	تُختبر دوريًا بطريقة يحددها الصانع
السرعة الزائدة الاحتياطية	وحدة الحماية <X> و<Y> و<Z> بلواقط مستقلة	نحو 110%	استقلال اللواقط والكابلات جزء من التصميم
السرعة الزائدة الميكانيكية	مسمار طارد مركزي في صندوق التروس يفرّغ زيت الفصل	أعلى قليلًا من الإلكترونية	موجودة في الوحدات القديمة، وأُلغيت في كثير من الحديثة
الحرارة الزائدة	مقارنة TTXM بمرجع حلقة الحرارة	إنذار عند المرجع + 14 °C (25 °F)، وفصل عند المرجع + 22 °C (40 °F) أو عند الحد الأفقي	لا تعمل إلا إذا فشلت حلقة الحرارة

الحماية	المبدأ	القيم النموذجية	ملاحظات للمهندس
فقدان اللهب	كواشف أشعة فوق بنفسجية تعد نبضات التأين	فصل إذا فقد أكثر من نصف الكواشف اللهب	كاشف واحد معطل يعطي إنذارًا فقط
الاهتزاز	لواقط سرعة على المحامل أو مجسات قرب	إنذار ثم فصل حسب الطراز	عطل اللاقط يعطي إنذار عطل لا فصلًا
انتشار حرارة العادم	مقارنة الانتشارات S1 وS2 وS3 بالمسموح	إنذار ثم فصل بشروط التجاور	تُعطَّل أثناء البدء والتغيرات السريعة في الوقود
ضغط زيت التزييت المنخفض	مفاتيح أو مرسلات مكررة	حسب الطراز	يُصوَّت عليها اثنان من ثلاثة

كيف أختار؟ لا يُختار من هذا الجدول ما يُركَّب، فكل صف فيه حماية دنيا يفرضها الصانع والمعايير؛ وإنما يُختار لكل حماية عدد الحساسات والتصويت والاستقلال، ثم يُقرر ما يُصنَّف وظيفة سلامة (السرعة الزائدة عادة) فيُشترى بشهادة SIL ويُختبر دوريًا. والجدول لا يبين ترتيب الأولوية حين تتزامن حمايتان، ولا القيم الفعلية التي تحددها مواصفة التحكم لكل وحدة. والخطأ الأكثر كلفة تعطيل حماية (تثبيط أو Force) لتسهيل البدء ثم نسيانها، أو تمرير أمر الفصل عبر منطق يستطيع المشغل تعديله بدل المسار المستقل لزيت الفصل.

كواشف اللهب: يحتوي الكاشف أنبوبًا غازيًا بمهبط نحاسي، يُغذّى بجهد مستمر يصل إلى نحو 350 V. فإذا وصلته أشعة فوق بنفسجية من اللهب تأين الغاز ومرّ تيار على شكل نبضات، يعدها المتحكم. وعند لهب قوي يصل العدد إلى نحو 300 نبضة في الثانية، وتُعد القناة «ترى لهبًا» إذا تجاوز العدد حدًا معينًا. والنظام يراقب نفسه: فتحت السرعة الدنيا يجب ألا يرى أي كاشف لهبًا، وإلا ظهر إنذار عطل الكاشف ومُنع البدء. وعند الإشعال يكفي

أن يرى نصف الكواشف اللهب ليستمر التسلسل. ويؤدي قصر الكاشف أو انقطاعه إلى إشارة «لا لهب»، فيكون العطل في الاتجاه الآمن.

مراقبة الاحتراق: تعتمد على أن الغاز لا يختلط تمامًا أثناء مروره في التوربين، فتظهر أي مشكلة في غرفة احتراق نمطًا غير منتظم في حرارة العادم. وتُحسب ثلاثة انتشارات كما في مثال القسم 34.6، ويُقارن كل منها بانتشار مسموح يتغير مع متوسط حرارة العادم وحرارة تصريف الضاغط، ويتراوح عادة بين نحو 17 و70 °C. ومنطق الفصل مصمم ليميز المزدوجة المعطلة من مشكلة الاحتراق الحقيقية. فالفصل لا يحدث بقراءة منخفضة واحدة، بل حين تنخفض قراءتان متجاورتان، أو حين يتجاوز الانتشار الثالث المسموح مدة طويلة. ولهذا فإن صيانة المزدوجات ليست عملًا ثانويًا: فكل مزدوجة معطلة تُضعف قدرة النظام على التمييز.

34.9.1 منطق المرحّلات الاحتياطي، والتصويت الثلاثي بالقيمة الوسطى، ومخرجات *2oo3*، وأدوات البرمجيات

منطق المرحّلات الاحتياطي (Backup Relay Logic): إلى جانب الحماية داخل الحاكم توجد في وحدات كثيرة سلسلة مرحّلات كهروميكانيكية مستقلة، تُعشَّق فيها صمامات إيقاف الوقود مباشرة: **إذا انقطع ملف أي مرحّل انغلقت صمامات الإيقاف فورًا وتوقفت الوحدة** بلا مرور على البرمجيات. وعند تفعيل هذا المنطق يعزل كهربائيًا أمرَ الإيقاف إلى متحكم الوقود (آمن عند الفشل)، ويعزل أوامرَ فتح صمامي إيقاف الغاز الأول والثاني وصمامي إيقاف الوقود السائل. والإشارات التي تُوصل سلكيًا إلى هذه السلسلة (من R58): إيقاف من متحكم الوقود؛ الإيقاف الطارئ من أنظمة المنصة/المصنع (ESD)؛ زر الإيقاف المحلي على لوحة الوحدة؛ زر إيقاف نظام إدارة القدرة؛ زرا إيقاف حاوية التوربين؛ زرا إيقاف حاوية المولد؛ حماية السرعة الزائدة الاحتياطية لـ N25 وNSD؛ إيقاف الحريق والغاز من لوحة F&G؛ إيقاف الاهتزاز من مراقب الاهتزاز. اختبار هذه السلسلة (تحريك كل مرحّل والتحقق من إغلاق الصمامات في الحقل) بند ثابت في الإيقاف السنوي، ولا يُستعاض عنه بمحاكاة برمجية.

التصويت الثلاثي بالقيمة الوسطى (Median Voting): في المنظومة الثلاثية (TMR) يُوصل كل حساس من الثلاثة إلى قناته (R وS وT) عبر بطاقة إشارة خاصة، ثم يتبادل المتحكمون القيم عبر شبكة المداخل والمخارج فيرى كل متحكم القيم الثلاث ويختار **الوسيط** لا المتوسط. الجدول من R58 يوضح لماذا الوسيط:

الحساس 1	الحساس 2	الحساس 3	المختار (الوسيط)	ماذا لو اخترنا المتوسط؟
981	985	978	**981**	981.3 (لا فرق يُذكر)
910	985	978	**978**	957.7 (انحراف 20 وحدة بسبب حساس واحد منخفض)
1020	985	978	**985**	994.3 (انحراف 9 وحدات بسبب حساس واحد مرتفع)

الوسيط يلغي أثر القيمة الشاذة الواحدة تمامًا مهما كان مقدارها، وهذا ما يجعل TMR تتحمل عطل حساس واحد دون فصل كاذب أو فقد حماية. وفي المقابل، **مدخل واحد يُغذى إلى ثلاثة متحكمات ليس مصوَّتًا**: إذا انحرف الحساس انحرفت القنوات الثلاث معًا. لذلك عند مراجعة قائمة المداخل اسأل عن كل إشارة حماية: **كم حساسًا، وعلى كم بطاقة، ومن يصوّت؟**

الشكل 34-23: *(أ) ثلاثة حساسات على ثلاث قنوات مع تبادل القيم واختيار الوسيط، مقابل مدخل واحد إلى ثلاثة متحكمات (غير مصوَّت)؛ (ب) أمثلة اختيار الوسيط؛ (ج) مخرجات المرحّلات عالية الاعتمادية: ثلاثة ملفات وتلامسات بتوصيل 2oo3 (مقتبس من R58).*

مخرجات المرحّلات عالية الاعتمادية: على لوحة الأطراف يقود كل قناة (R، S، T) مشغّل مرحّل وملفًا خاصًا (KR، KS، KT)، وتُوصل تلامساتها على شكل **2oo3**: (KR·KS) + (KS·KT) + (KT·KR). فقناة واحدة معطلة لا تسبب فصلًا كاذبًا (لأن الفرع الذي لا يضمها ما زال موصلًا)، وقناة واحدة عالقة لا تمنع الفصل (لأن كل فرع يضم إحدى القناتين السليمتين فينفتح). هذا هو التصويت في الأجهزة لا في البرمجيات، ويُختبر بتحريك قناة واحدة فقط والتحقق من عدم تغير الخرج، ثم قناتين والتحقق من تغيره.

أدوات برمجيات نظام التحكم التي يحتاجها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس يوميًا:

الأداة	استعمالها العملي	تحذير
محرر المنطق (RLD/FBD) وصندوق الأدوات	قراءة سلسلة الإيقاف ومعرفة أي شرط فصل الوحدة	التعديل يحتاج إدارة تغيير (MOC) وتوقيعًا

الأداة	استعمالها العملي	تحذير
نوافذ المراقبة (Watch Windows)	جمع الإشارات ذات الصلة على شاشة واحدة أثناء الاختبار	الأسماء الرمزية لا تكفي؛ افتح الوصف
التثبيت القسري (Force)	تجاوز إشارة أثناء المعايرة أو الاختبار	سجل كل Force بوقته ومن أمر به، وأزله قبل التشغيل؛ قائمة Forces النشطة تُراجع يوميًا
مسجل الاتجاهات عالي الدقة (Trend/Capture)	تحليل الفصل ثانية بثانية	ابدأ التسجيل قبل الاختبار لا بعده
كتل المؤقتات (Timer)	فهم لماذا «ينتظر» التسلسل	لا تُقصّر مؤقت تطهير لتسريع البدء
كتل HSS/LSS	تتبع الحلقة الفعالة على الوقود	خرج البوابة = خرج الحلقة المتحكمة
سجل الأحداث والإنذارات المختوم زمنيًا	أول ما يُقرأ بعد أي فصل	مزامنة الساعات بين الأنظمة (الفصل 23) وإلا اختلط الترتيب

مصفوفة الحريق والغاز للحاوية باختصار: كاشف غاز واحد عند مستوى منخفض ← إنذار وتهوية قصوى؛ 2oo3 عند مستوى عالٍ ← إيقاف الوقود وعزل الحاوية؛ كاشف لهب واحد ← إنذار؛ 2ooN لهب أو حرارة ← إيقاف طارئ وإطفاء بالغاز بعد تأخير إخلاء وإغلاق مخمدات التهوية. التفصيل والتصويت في الفصل 30.

34.9.2 منصات التحكم بالتوربينات وأدوات هندستها: *Mark VI* و*Mark VIe* و *Woodward MicroNet*

تُسلَّم أغلب التوربينات بمنظومة تحكم من مصنّعها أو من مورد متخصص، ولكل منصة أداة هندسة ولغة كتل ومنطق شاشات خاص بها. وسيقضي مهندس التحكم في محطة التوليد أو منشأة الضغط سنوات مع واحدة منها. لذلك نعرض هنا منصتين شائعتين من مواد تدريبية فعلية (R75 وR76 وR77): منظومة GE Mark VI وخليفتها Mark VIe، ومتحكمات Woodward MicroNet بلغة GAP. والهدف ليس تعليم الأداة، فذلك دور دورات المصنّع، بل فهم المفاهيم التي تتكرر في كل منصة ومواضع الخطأ فيها.

(أ) بنية منظومة Mark VI. المتحكم ثلاثي التكرار – Triple Modular Redundant) (TMR: ثلاثة معالجات تسمى R وS وT، يقرأ كل منها مداخله، وتُصوَّت القيم بالوسيط أو بصيغة 2 من 3 (القسم 34.9.1). وتتصل المعالجات ببطاقاتها عبر شبكة الإدخال والإخراج (IONet). وتربطها بخادم الشاشات ومنظومة الإثارة شبكة بيانات الوحدة (Unit Data Highway – UDH)، التي تتبادل البيانات بأسلوب EGD (Ethernet Global Data): كل جهاز ينشر «تبادلات» (Exchanges) دورية من الإشارات. وفوقها شبكة بيانات المحطة (Plant Data Highway – PDH) لشاشات العرض والمؤرخ وبوابة DCS (الشكل 34-24 أ). وفي Mark VIe صارت وحدات الإدخال والإخراج حزمًا موزعة على شبكة Ethernet، وصارت أداة الهندسة ToolboxST، وأضيف متحكم سلامة مصنف (Mark VIeS) لوظائف SIS.

الشكل 34-24: *(أ) منظومة تحكم توربين ثلاثية التكرار: معالجات R وS وT على شبكة الإدخال والإخراج، وشبكة بيانات الوحدة بتبادل EGD إلى خادم HMI والإثارة، وشبكة بيانات المحطة إلى الشاشات والمؤرخ وDCS. (ب) التأخير الإضافي حين تعبر إشارة بين مجموعات معدل تنفيذ مختلفة في برنامج كتل (مثال بمجموعتين 10 و80 ms).*

سلسلة التطابق: أكثر أعطال HMI شيوعًا. يعتمد خادم الشاشات على نسخ متعددة من المعلومة نفسها، ويجب أن تتطابق كلها (R75):

النسخة	أين توجد	ماذا يحدث إن لم تطابق
برنامج المتحكم وإشاراته	ملف التطبيق في المتحكم وفي أداة الهندسة	إشارات تظهر بلا قيمة أو بقيمة قديمة
قاعدة بيانات الإشارات (SDB)	خادم HMI	الأداة لا تجد الإشارة أو تجدها بعنوان قديم
تعريف تبادلات EGD	المتحكم وقاعدة الإشارات	الشاشة تعرض قيمًا مجمدة أو «###»
قاعدة نقاط برنامج الشاشات (CIMPLICITY)	خادم HMI	نقاط ناقصة في الشاشات والإنذارات
ملف العناوين (Hosts)	كل حاسوب على الشبكة	لا اتصال بين الخادم والمتحكم
قائمة نقاط DCS	بوابة DCS	DCS يقرأ سجلات خاطئة (القسم 23.8.2)

ولهذا تحتوي أداة الهندسة على ملف تهيئة لخادم HMI، يُنفَّذ عليه تسلسل ثابت بعد كل تعديل في المنطق: أخذ الإشارات من قاعدة البيانات، ثم التحقق (Validate)، ثم البناء (Build). ويبني ذلك ملف العناوين، وملف تهيئة EGD، ويستورد فئات الإنذارات والإشارات إلى قاعدة نقاط الشاشات، ويولد ملفات الإنذار وتسلسل الأحداث (SOE) والأحداث والإبقاء (Hold). ويُقرأ سجل البناء حتى آخر سطر، ولا يُقبل إلا بـ«صفر أخطاء». **وتنبيه من الميدان:** طريقتا تعريف الإنذارات في الإصدارات المختلفة (كتل مجموعات الإنذار القديمة، أو خانة «إنذار» على الإشارة نفسها في الإصدارات الأحدث) لا تُخلطان في ملف تطبيق واحد، ولا يُنتقل من إحداهما إلى الأخرى في منتصف مشروع.

خطة العناوين. تُحجز على شبكة المحطة نطاقات عناوين ثابتة لكل فئة من الأجهزة: خوادم الوحدات، ومحطات العمل، والعارضات، والمؤرخات، والطابعات، وحواسيب مهندسي الموقع، والموجه. ويُكتب ذلك في ملف عناوين قياسي موحد على كل

الحواسيب. والفائدة في التشخيص أن العنوان وحده يخبرك بنوع الجهاز، وأن الجهاز الغريب على الشبكة يظهر فورًا (القسم 24.6).

(ب) مكتبات الكتل في Mark VIe. يُكتب المنطق بكتل وظيفية تُوصل أطرافها (Pins) بمتغيرات، وتُنفذ الكتل بترتيبها في المهمة (Task). والمتغير العام (Global) منشور على EGD ويُستعمل في أي مهمة، والمحلي (Local) داخل مهمته فقط. وتُقسم الكتل في ثلاث مكتبات (R77):

المكتبة	محتواها	أمثلة	ملاحظة
المكتبة القياسية	رياضيات ومنطق ومرشحات وتحكم ومصفوفات	الجمع والضرب، وAND وOR وNOT، ومرشح التأخير، وPID، والمنحدر، ومولد الدالة، والمقارن بتخلف، وكشف القيم غير العددية، وكشف القيم المفروضة	الأساس لكل تطبيق
مكتبة DCS	كتل عملياتية جاهزة	خصائص البخار والماء (المحتوى الحراري وضغط التشبع)، والتدفق الكتلي للغاز والماء، ومشغل المحرك، والصمام الكهربائي، والقاطع، والسماح مع تجاوز لكل شرط، والاختيار بالوسيط وبالاثنين والأربعة، والتصويت	توفر هندسة التحكم بالمحطة كلها
مكتبة SIL	مجموعة مقيدة معتمدة لمتحكم السلامة	مرشح منطقي، وحاسبة، ومقارن، وعداد، وممسك، وبوابات منطقية، ووسيط بتمكين، ونبضة، وسطر سلّم، ومؤقت، وصحة المتغير، وحالة الحرارة	لا يُستعمل في SIS إلا ما في هذه المكتبة

والدرس الأهم من مكتبة SIL: متحكم السلامة لا يُبرمج بكل ما يتيحه متحكم التحكم، بل بمجموعة صغيرة من الكتل المختبرة والمعتمدة. وهذا تطبيق لمبدأ «اللغة محدودة التنوع» في IEC 61511، الذي يجعل البرنامج أبسط في التحقق وأقل عرضة للخطأ (الفصل 29).

أنواع البيانات والقيم غير العددية. للمتغيرات أنواع محددة: منطقي (B)، وصحيح 16 بت (I)، وصحيح 32 بت (DI)، وحقيقي 32 بت (R)، وحقيقي 64 بت (LR)، وصحيح موجب بطولين (UI وUDI). ولا يُوصل طرف إلا بمتغير من نوعه، إلا في الكتل التي تحوّل. والأعداد الحقيقية تتبع IEEE 754، وفيها قيم خاصة ناتجة عن القسمة على صفر مثلًا: اللانهاية و«ليس عددًا» (NaN). وهذه القيم تنتشر في كل حساب لاحق. لذلك تتضمن المكتبة كتلًا لكشفها وقطع انتشارها، ويُفحص بها كل حساب فيه قسمة على قياس قد يصبح صفرًا.

خطوات إضافة كتلة منطقية (R77):

1. اختر المهمة التي سيُضاف إليها المنطق، فيُفتح محرر المنطق وتظهر المكتبة إلى جانبه.
2. اسحب الكتلة من المكتبة إلى ورقة العمل.
3. افتح الكتلة واملأ كل طرف مستعمل بمتغيره: من المتغيرات العامة أو المحلية، أو بإدخال الاسم يدويًا.
4. ابنِ البرنامج ونزّله إلى المتحكم وفق إجراء التغيير المعتمد (MOC).
5. اختبر المنطق، بفرض قيمة مؤقتة على المدخل إن لزم.
6. أزل كل فرض بعد الاختبار، وتحقق من ذلك بكتلة كشف القيم المفروضة أو بشاشة التشخيص (القسم 39.10).

(ج) Woodward MicroNet ولغة GAP. متحكمات Woodward الرقمية شائعة في تحكم الوقود والسرعة للتوربينات الغازية والبخارية والضواغط. وتُبرمج بلغة GAP (Graphical Application Programmer)، وهي لغة كتل رسومية عالية المستوى تطورت من محرر قوائم في منتصف الثمانينيات إلى بيئة رسومية حديثة في إصدارها الثالث (R76). والمفاهيم الأساسية:

- **الكتل واسمها:** كل كتلة لها اسم فريد من جزأين: الفئة ثم اسم الكتلة (Category.Block)، ويشبه ذلك تسمية الوسوم في DCS.

- **المداخل القابلة للضبط (Tunables):** المدخل الذي يسبقه نجمة (*) قابل للتعديل أثناء التشغيل ضمن حدين يُكتبان معه، مثل 10.0* (−20, 100). وما سواه ثابت لا يتغير إلا بتنزيل جديد. والفصل بين الثابت والقابل للضبط قرار أمان: ما يمس الحماية لا يُترك قابلًا للضبط دون حدود وصلاحيات.
- **الأدوات المرافقة:** مترجم ينتج البرنامج التنفيذي، وقوالب تعرّف الكتل، ومحاكي (NetSim) يشغل التطبيق على الحاسوب دون عتاد لاختبار المنطق قبل الموقع، وأداة لقراءة القيم القابلة للضبط وتعديلها وحفظها ورسمها.
- **كتل نموذجية:** مدير التكرار التناظري (يأخذ وسيط ثلاث قراءات، ويمسك إنذارًا إذا ابتعدت إحداها عن الوسيط أكثر من فرق محدد)، ومقارن بتخلف يمنع الارتجاف، ومبدّل بين مدخلين، ومجمّع متعدد يختار مدخلًا برقم، وكتلة إنذار بمخارج للإنذار والبوق والمصباح والإقرار، وخطوة تسلسل (SFC Step) لبناء تسلسلات البدء.

مجموعات معدل التنفيذ (Rate Groups). لا تُنفذ كل الكتل بالسرعة نفسها. فالحلقات السريعة (السرعة والوقود) في مجموعة سريعة، والمنطق البطيء (الحرارة والتسلسل) في مجموعة أبطأ. وداخل المجموعة الواحدة تُنفذ الكتل بترتيب تدفق البيانات، فلا تُنفذ كتلة قبل أن تجهز مداخلها. **أما حين تعبر إشارة من مجموعة إلى أخرى فيُضاف تأخير** بسبب الجدولة (الشكل 34-24 ب). في مثال بمجموعة سريعة 10 ms وأخرى بطيئة 80 ms، يضيف العبور من السريعة إلى البطيئة بين 90 و160 ms، ويصل العبور بطيئة ثم سريعة ثم بطيئة إلى 240 ms، وفق أمثلة جدولة المصنّع (R76). وتختلف هذه القيم باختلاف طريقة الجدولة في كل منصة، فتُؤخذ من وثائقها.

مثال محلول (أين تضع كتلة الحماية؟):

- **المعطيات:** إشارة سرعة تُقرأ في مجموعة 10 ms، ومقارنة السرعة الزائدة التي تفصل صمام الوقود وُضعت خطأً في مجموعة 80 ms، وأمر الصمام يُكتب في مجموعة 10 ms. ومواصفة الحماية تطلب أن يبدأ الفصل خلال أقل من 50 ms من تجاوز الحد، دون زمن الصمام نفسه.
- **الافتراضات:** قيم التأخير من المثال السابق، وأسوأ حالة هي المعيار.
- **الحل:** المسار سريعة ثم بطيئة ثم سريعة، وأسوأ تأخير له نحو 170 ms، أي أكثر من ثلاثة أضعاف المسموح. ونقل المقارنة إلى مجموعة 10 ms يجعل المسار كله في مجموعة واحدة، فيبقى التأخير في حدود دورة واحدة (نحو 10 ms).
- **المعنى ميدانيًا:** المنطق «صحيح» في الحالتين، والاختبار الثابت لا يكشف الفرق. الذي يكشفه هو مراجعة مجموعات التنفيذ على مسار كل حماية سريعة، واختبار زمن الاستجابة بإشارة محقونة وتسجيل سريع. والحماية من السرعة الزائدة في التوربينات تنفذها أصلًا دائرة مستقلة مخصصة (القسم 34.9)، لكن القاعدة تنطبق على كل منطق زمني حرج.

جدول مقارنة: أدوات برمجة منصات التوربينات ولغات IEC 61131-3

المعيار	Woodward GAP	GE Toolbox و ToolboxST	لغة الكتل الوظيفية (FBD) في IEC 61131-3
أسلوب البرمجة	كتل رسومية بتدفق البيانات	كتل ووصلات في مهام، وسطور سلّم ضمن كتلة	كتل ووصلات
ترتيب التنفيذ	بتدفق البيانات داخل مجموعة المعدل	بترتيب الكتل في المهمة	من اليسار إلى اليمين ومن الأعلى إلى الأسفل غالبًا

المعيار	Woodward GAP	GE Toolbox و ToolboxST	لغة الكتل الوظيفية (FBD) في IEC 61131-3
الزمن	مجموعات معدل تنفيذ محددة	معدل لكل مهمة	مهام دورية أو مستمرة (القسم 19.7)
التكرار	بحسب طراز المتحكم	ثلاثي التكرار في المنظومات الكبيرة	يحدده العتاد
وظائف السلامة	بحسب الطراز والاعتماد	متحكم سلامة مستقل بمكتبة مقيدة	بلغة محدودة التنوع وفق IEC 61511
المحاكاة	محاكٍ يشغل التطبيق دون عتاد	أدوات محاكاة للمتحكم	بحسب المورد

أخطاء شائعة مع هذه المنصات: تنزيل برنامج إلى المتحكم دون إعادة بناء تهيئة خادم الشاشات، فتظهر نقاط بلا قيم. وترك فرض على إشارة بعد الاختبار. ووضع منطق زمني حرج في مجموعة تنفيذ بطيئة. وتعديل قيمة قابلة للضبط في المتحكم دون حفظها في ملف التطبيق، فتضيع عند أول تنزيل جديد. واستعمال كتلة من المكتبة القياسية في متحكم السلامة.

34.10 حالة ميدانية: تدفق وقود زائد بعد تبديل مشغل الصمام

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في محطة دورة بسيطة، بعد صيانة جرى فيها تبديل مشغل صمام التحكم بالغاز في توربين من الفئة E، فشل البدء مرتين متتاليتين بفصل «تدفق وقود زائد أثناء البدء» بعد ثوانٍ من الإشعال. كانت الشاشة تُظهر أن موضع الصمام يتبع FSR بدقة، وأن الضغط P2 ضمن حدود الإنذار ظاهريًا.

بدأ الفريق بالمقارنة: سُحبت منحنيات البدء الأخير الناجح قبل الصيانة، ووُضعت فوق منحنيات المحاولة الفاشلة. عند FSR نفسه كان P2 أقل بوضوح من خط الأساس في المحاولة الفاشلة (مع بقائه داخل حدود الإنذار، ولهذا لم يلتقطه المشغل)، وارتفعت حرارة العادم أسرع. معنى ذلك أن الغاز الخارج من GCV أكثر مما تقوله قراءة موضعه. وعند فحص الصمام مع إيقاف ضغط الغاز وتشغيل الزيت الهيدروليكي، تبين أن محول LVDT غُيِّر بعد التبديل على موضع صفر غير صحيح: فالصمام كان مفتوحًا فعليًا بنحو 4% من شوطه حين تقرأ الشاشة صفرًا. وسبب ذلك أن الفني اعتمد على قراءة الجهد عند توقف المشغل، ولم يتحقق من أن السدادة جالسة على المقعد.

أُعيدت المعايرة بقياس الشوط فعليًا بمؤشر قياس (Dial Indicator) على الساق عند الصفر والنقاط الوسطى والفتح الكامل، ثم أُجري اختبار شوط كامل وسُجلت القيم في سجل المعايرة، ونجح البدء التالي بمنحنيات مطابقة لما قبل الصيانة.

الدروس:

- قراءة الموضع على الشاشة هي ما يقوله LVDT، لا ما تفعله السدادة. المعايرة الصحيحة تبدأ بقياس ميكانيكي مستقل.
- منحنيات البدء المسجلة قبل الصيانة أداة تشخيص قوية، فاحفظها قبل كل توقف كبير.
- الإنذار الذي فصل التوربين كان يؤدي عمله؛ فالسؤال الصحيح ليس «كيف نتجاوز الإنذار؟» بل «لماذا يرى النظام وقودًا أكثر؟».

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
الحلقات والحدود	ثوابت مواصفة التحكم (مرجع حرارة العادم، ومعدلات التسارع، والانحدار)، ولا تُغيَّر إلا بإدارة تغيير وموافقة الصانع	يحدد الحلقة المسيطرة بمقارنة خرج كل حلقة بخرج البوابة، ويسجل الاتجاهات قبل أي اختبار

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
الحمايات والتكرار	عدد الحساسات والبطاقات والتصويت لكل إشارة فصل، واستقلال الحماية عن التحكم	يقيس فجوة اللواقط، ويتحقق من تطابق قنوات السرعة ومزدوجات العادم، ويستبدل المعطل بالنوع نفسه
المعايرة	معايير قبول LVDT وأدلة التوجيه وصمامات الوقود	يعاير بقياس ميكانيكي مستقل للشوط أو الزاوية لا بقراءة الشاشة، ويسجل القيم القديمة والجديدة
البدء والفصل	يحلل سجل الأحداث ويحدد السبب قبل إعادة المحاولة	يقرأ شاشة الأذونات أولًا، ويفحص دائرة الإشعال وكواشف اللهب بالتسلسل، ولا يترك Force بعد الاختبار

34.11 الأخطاء الشائعة

- تفسير سيطرة حلقة الحرارة عند الحمل الأساسي على أنها عطل، ومحاولة زيادة الحمل برفع مرجع السرعة.
- تركيب لواقط السرعة دون قياس الفجوة، أو تمرير كابلات لواقط التحكم والحماية في المسار نفسه فتفقد الحماية استقلالها.
- استبدال مزدوجة عادم بنوع أو قطر مختلف، فيتغير زمن استجابتها وتظهر انتشارات كاذبة.
- ترك مزدوجات عادم معطلة أشهرًا لأن «التوربين يعمل»، فيضعف تمييز مراقبة الاحتراق.
- معايرة LVDT لصمامات الوقود أو أدلة التوجيه بالاعتماد على قراءة الشاشة دون قياس ميكانيكي للشوط أو الزاوية.
- تنظيف نوافذ كواشف اللهب بمواد تترك طبقة تمتص الأشعة فوق البنفسجية، أو إهمال تبريدها فتقصر حياتها.

- تعديل ثوابت مواصفات التحكم، مثل حدود الحرارة أو معدلات التسارع، دون إدارة تغيير وموافقة الصانع.
- تجاوز حماية (Bypass/Force) لتسهيل البدء ثم نسيان إزالته.
- الخلط بين وضع الانحدار والتحكم عديم الانحدار (Isochronous) عند تشغيل وحدتين على شبكة معزولة.

34.12 ملخص

يُدار التوربين الغازي بالوقود، وتحسب منظومة التحكم طلب الوقود من ست حلقات: البدء والتسارع والسرعة والحرارة والإيقاف واليدوي، ويمر الأصغر وحده. البدء تسلسل صارم بمرحلات سرعة ومؤقتات للتطهير والإشعال والتسخين. وبعد التزامن تتحول حلقة السرعة إلى حلقة حمل بالانحدار. أما حرارة الاحتراق فتُحمى بطريق غير مباشر، بمرجع لحرارة العادم يتغير مع ضغط الضاغط، وبمتوسط مزدوجات يستبعد القيم الشاذة. وتضبط أدلة التوجيه الهواء، وتنفذ صمامات مؤازرة ومحولات LVDT أوامر الوقود. والحماية مستقلة عن التحكم، ولها طريقان لقطع الوقود، وتقوم على تصويت اثنين من ثلاثة وعلى مبدأ قطع التغذية للفصل.

وفي الفصل التالي: يتناول الفصل 35 «التحكم بالضواغط ومنع الانفصال الهوائي (Surge)»، لأن كثيرًا من التوربينات الغازية في النفط والغاز تدير ضواغط، ولأن الانفصال الهوائي الذي تحمي منه أدلة التوجيه وصمامات النزف هنا يصير هناك موضوع نظام حماية مستقل.

34.13 أسئلة التقييم الذاتي

1. لماذا تُستخدم بوابة القيمة الصغرى لاختيار طلب الوقود؟ اذكر مثالًا تمنع فيه حلقة الحرارة زيادة الحمل.

2. عجلة سرعة من 60 سنًا والسرعة المقننة 3000 rpm. ما التردد المتوقع عند 95% من السرعة؟
3. عدّد مرحلات السرعة الأربع ودور كل منها في تسلسل البدء.
4. لماذا يُطهَّر مسار الغاز قبل الإشعال؟ ومتى يكون التطهير أطول؟
5. توربين 60 MW بانحدار 4% يعمل بمرجع 103% والشبكة 50.0 Hz. احسب حمله، ثم حمله إذا ارتفع التردد إلى 50.1 Hz.
6. لماذا يجب أن ينخفض حد حرارة العادم كلما ارتفع ضغط تصريف الضاغط؟
7. قراءات 10 مزدوجات عادم: 560، 562، 558، 565، 530، 561، 559، 563، 557، 564 °C. احسب TTXM والانتشارات الثلاثة.
8. ما الفرق في جدول فتح أدلة التوجيه بين الدورة البسيطة والدورة المركبة؟ ولماذا؟
9. اشرح دور كل من SRV وGCV، ولماذا يُنظَّم الضغط P2 بدلالة السرعة.
10. في الحالة الميدانية (القسم 34.10)، ما الخطوات التي تمنع تكرار المشكلة بعد أي تبديل لمشغل صمام وقود؟

مراجع الفصل: R81 (Woodward: محدد الموضّع الرقمي (DVP) وR82 (Moog: الصمامات المؤازرة الكهروهيدروليكية) للقسم 34.8.1؛ مبادئ التحكم بالتوربينات الغازية وأنظمة GE Industrial & Power Systems، Gas Turbine) Speedtronic Mark V Controls Fundamentals، دورة تدريبية)؛ API 616 للتوربينات الغازية في الصناعات النفطية؛ API 670 لأنظمة حماية الآلات؛ NFPA 85 لمنع انفجارات المراجل وأنظمة الاحتراق؛ هاشم الخصاونة، «التوربينات الغازية: مرجع شامل في المكوّنات وأنظمة التحكم والحماية والتشغيل» (الفصول 1 و2 و5 و9، ومنه الأشكال 34-1 و34-2 و34-4 إلى 34-6 و34-16 و34-18 و34-19)؛ R58 (عرض المؤلف «Introduction to the Gas Turbine: Operation and Control»، نقابة المهندسين الأردنيين 2022: الأقسام 34.2.1 و34.4.1 و34.5.1 و34.7.1 و34.9.1 والأشكال 34-8 و34-12 و34-14 و

34-17 و34-23)؛ ISO 4406 (نظافة الزيت الهيدروليكي)؛ خبرة المؤلف في توربينات GE من طرازات Frame 6B وFrame 9E وFrame 7FA وأنظمة Mark VI وMark VIe؛ وR75 وR76 و R77 (منصات التحكم وأدوات هندستها، 34.9.2).

الفصل 35: التحكم بالضواغط ومنع الانفصال الهوائي (Surge)

لمن هذا الفصل: لمهندس التحكم والأجهزة الذي يعمل مع ضواغط طاردة مركزية أو محورية في الغاز والنفط والبتروكيماويات ومحطات الطاقة: ضواغط غاز الوقود، وضواغط إعادة الحقن والتصدير، وضواغط الهواء والتبريد، والضواغط الملحقة بالتوربينات الغازية. ولمن يشارك في تصميم أو تشغيل أو اختبار نظام منع الانفصال الهوائي أو يحقق في حادثة الانفصال الهوائي.

الفكرة الأساسية: الضاغط الديناميكي لا يستطيع أن يدفع الغاز إلى ضغط أعلى من قدرته عند تدفق منخفض؛ فإذا انخفض التدفق تحت حد معين انهار الجريان وارتد الغاز من التصريف إلى السحب في ظاهرة عنيفة تسمى الانفصال الهوائي (Surge)، وتتكرر دورتها مرة كل 0.3 إلى 3 ثوانٍ حتى تدمر المحامل والسدادات والريش. ونظام منع الانفصال الهوائي يقيس موقع الضاغط على خريطة أدائه لحظيًا، ويفتح صمام إعادة تدوير قبل أن يصل إلى الحد بمسافة أمان، ويفعل ذلك بسرعة تفوق أي حلقة تحكم أخرى في المصنع. وهذا الفصل يشرح الظاهرة، والإحداثيات التي تُرسم بها الخريطة، والخوارزمية، والصمام، والأجهزة، والتنسيق مع التحكم بالأداء، والاختبار خطوة بخطوة.

35.1 أنواع الضواغط ومنحنيات أدائها

تنقسم الضواغط الصناعية إلى عائلتين تختلفان في سلوكهما اختلافًا يحدد فلسفة التحكم:

العائلة	الأنواع	كيف يرتفع الضغط	سلوك التدفق مع الضغط	مشكلة التحكم الأساسية
الإزاحة الموجبة (Positive Displacement)	ترددي (Reciprocating)، لولبي (Screw)، دوار ذو فصوص	حبس حجم من الغاز وتقليصه	التدفق ثابت تقريبًا مهما ارتفع الضغط (حتى فتح صمام الأمان)	الضغط الزائد والنبض والحرارة؛ لا انفصال هوائي
الديناميكية (Dynamic)	طارد مركزي (Centrifugal)، محوري (Axial)	إكساب الغاز سرعة في الدافعة ثم تحويلها إلى ضغط في الناشر	التدفق يعتمد على نسبة الضغط؛ يوجد حد أدنى (Surge) وحد أعلى (Choke)	منع الانفصال الهوائي وتنسيقه مع تحكم الأداء

كيف أختار؟ العائلة تحددها العملية لا مهندس التحكم، لكن فلسفة الحماية تتبعها: الإزاحة الموجبة تعني حماية ضغط زائد ونبض وحرارة بلا نظام انفصال هوائي، والديناميكية تعني نظام منع انفصال هوائي سريعًا ومستقلًا مع تنسيق مع تحكم الأداء. والجدول لا يبين أن الضاغط المحوري أشد انحدارًا وخط انفصاله أقرب إلى نقطة التشغيل، فيلزمه أجهزة وصمام أسرع مما يكفي الطارد المركزي. والخطأ الأكثر كلفة معاملة ضاغط ديناميكي بأدوات ضاغط ترددي، كتقييد سعته بخنق التصريف أو الاكتفاء بصمام أمان، بينما الخطر الحقيقي في الجهة اليسرى من الخريطة.

الضاغط الطارد المركزي يمر فيه الغاز عبر دافعة (Impeller) تدور بسرعة عالية فتقذفه شعاعيًا إلى ناشر (Diffuser) يحوّل الطاقة الحركية إلى ضغط، ثم يعيده ممر الإرجاع (Return Channel) إلى مركز الدافعة التالية. ويصل عدد المراحل في الغلاف الواحد إلى ثماني مراحل أو أكثر، وقد تُوزَّع المراحل على أغلفة متعددة على عمود واحد يديره توربين غازي أو بخاري أو محرك كهربائي عبر علبة تروس. **الضاغط المحوري** يمرر الغاز موازيًا للمحور عبر صفوف متعاقبة من الريش الدوارة والثابتة، ويعطي تدفقات كبيرة جدًا بنسبة ضغط أقل لكل مرحلة، وهو ضاغط التوربين الغازي وضاغط هواء النفخ في أفران

الصهر ووحدات فصل الهواء الكبيرة. ومنحنى الضاغط المحوري أشد انحدارًا وخط الانفصال الهوائي فيه أقرب إلى نقطة التشغيل، فالتحكم فيه أدق وأسرع.

خريطة الأداء (Performance Map): تُرسم بارتفاع الضغط أو الرأس البوليتروبي (Polytropic Head) على المحور الرأسي والتدفق الحجمي عند السحب على المحور الأفقي، وعليها عائلة من المنحنيات كل منها عند سرعة ثابتة (أو زاوية ثابتة لأدلة التوجيه IGV في الضاغط ثابت السرعة). ولكل منحنى سرعة طرفان (الشكل 35-1):

- **الطرف الأيسر: خط الانفصال الهوائي (Surge Line).** أدنى تدفق يستطيع الضاغط عنده الحفاظ على جريان مستقر عند تلك السرعة. تحته يقع الانفصال الهوائي.
- **الطرف الأيمن: خط الاختناق (Choke أو Stonewall).** أقصى تدفق، حيث تبلغ سرعة الغاز في أضيق مقطع سرعة الصوت فلا يزيد التدفق مهما انخفض ضغط التصريف. ليس مدمرًا مثل الانفصال الهوائي، لكنه يعني فقدان الكفاءة والقدرة على رفع الضغط.
- بينهما **مدى التشغيل المستقر (Turndown)**، ويُقاس بنسبة الفرق بين تدفق نقطة التصميم وتدفق الانفصال الهوائي إلى تدفق التصميم، ويتراوح عادة بين 20% و40% للضواغط الطاردة المركزية عند سرعة ثابتة ويتسع مع السرعة المتغيرة، ويقل في المحورية.

ومنحنى المقاومة (Resistance Curve) للنظام الذي يدفع فيه الضاغط، أي العلاقة بين الضغط المطلوب والتدفق في الشبكة أو العملية، يتقاطع مع منحنى الضاغط في نقطة التشغيل. فحين ينخفض طلب العملية على الغاز يتحرك التقاطع يسارًا نحو الانفصال الهوائي، وهذا هو الوضع الذي يجب أن يتدخل فيه نظام الحماية.

الشكل 35-1: *خريطة أداء ضاغط طارد مركزي: منحنيات السرعة الثابتة، وخط الانفصال الهوائي على اليسار، وحد الاختناق على اليمين، وخط التحكم الذي يترك هامش أمان عن خط الانفصال الهوائي، ونقطة التشغيل عند تقاطع منحنى الضاغط مع منحنى مقاومة النظام.*

35.2 ظاهرة الانفصال الهوائي (Surge)

ما الذي يحدث فيزيائيًا؟ عند تدفق منخفض تزداد زاوية سقوط الغاز على ريش الدافعة حتى ينفصل الجريان عن سطحها، أولًا في عدد من الممرات (توقف دوراني، Rotating Stall) يدور حول محيط الدافعة بجزء من سرعتها، ثم في الدافعة كلها. وعندئذ لا يعود الضاغط قادرًا على توليد الضغط الذي يحبسه حجم التصريف (الأنابيب والأوعية بعد الضاغط)، فيرتد الغاز المضغوط عكسيًا عبر الضاغط نحو السحب في جزء من الثانية. وحين يفرغ حجم التصريف ينخفض ضغطه، فيستعيد الضاغط قدرته على الدفع ويعود الجريان الأمامي ويرتفع الضغط من جديد، ثم تتكرر الدورة. وتتراوح دورة الانفصال الهوائي بين نحو 0.3 و3 ثوانٍ حسب حجم النظام، فالحجم الكبير بعد الضاغط يعطي دورة أبطأ لكنها أعنف لأن الطاقة المخزنة أكبر.

العلامات: ضجيج شبيه بالانفجارات المتكررة، وتذبذب شديد في ضغط التصريف وتدفق السحب، وقفزات في الاهتزاز والإزاحة المحورية لأن قوة الدفع المحوري ينعكس اتجاهها مع انعكاس الجريان، وارتفاع سريع في حرارة السحب لأن الغاز الساخن يعود إلى المدخل، وتذبذب في تيار المحرك أو سرعة التوربين.

الأضرار: الإزاحة المحورية المتناوبة تحمّل محمل الدفع (Thrust Bearing) أحمالًا صدمية تتجاوز تصميمه، وقد تحتك الدافعة بالأجزاء الثابتة إذا تآكل المحمل. والسدادات الجافة تتضرر من انعكاس فرق الضغط وارتفاع الحرارة. والريش تتعرض لإجهادات تعب. وقد يكفي انفصال هوائي واحد شديد لإتلاف ضاغط كبير، وبضع دورات متتالية تكاد تجعل الضرر مؤكدًا. ولهذا تعامل معظم فلسفات التشغيل الانفصال الهوائي المتكرر (عادة 3 دورات في نافذة زمنية قصيرة) سببًا للإيقاف الطارئ.

الانفصال الهوائي ليس الاختناق: خلط شائع بين الحدين. الاختناق عند التدفق الأقصى مستقر ولا يدمر الآلة فورًا؛ والانفصال الهوائي عند التدفق الأدنى غير مستقر ومدمر. وحماية الانفصال الهوائي تنظر إلى الجهة اليسرى من الخريطة فقط.

الشكل 35-2: *دورة الانفصال الهوائي: على الخريطة تقفز نقطة التشغيل من خط الانفصال الهوائي إلى جريان عكسي ثم تعود، وفي الزمن يظهر ضغط التصريف نبضات متكررة كل نحو ثانية مع انعكاس التدفق.*

35.3 الإحداثيات الثابتة لخط الانفصال الهوائي

خريطة المصنّع مرسومة عند شروط سحب محددة: ضغط وحرارة وتركيب غاز (الوزن الجزيئي ومعامل الانضغاط ونسبة الحرارات النوعية). فإذا تغيرت هذه الشروط، كما يحدث كل يوم في ضاغط غاز حقل تتغير حرارة سحبه بين الليل والنهار ويتغير تركيبه مع الآبار، تحرك خط الانفصال الهوائي على الخريطة المرسومة بوحدات الضغط والتدفق الحجمي. ولو ضُبط النظام على خط ثابت بهذه الوحدات لكان إما محافظًا أكثر من اللازم في بعض الشروط (يعيد التدوير بلا داع فيهدر الطاقة) أو غير كافٍ في شروط أخرى (يترك الضاغط يدخل الانفصال الهوائي). والحل الذي تعتمده أنظمة منع الانفصال الهوائي

الحديثة رسم الخط في **إحداثيات ثابتة (Invariant Coordinates)** لا تتغير مع شروط السحب.

الأساس النظري: الرأس البوليتروبي يتناسب مع Ts × (Z ÷ MW) × ((نسبة الضغط)^(1 − σ) مقسومًا على σ، حيث σ تعتمد على خواص الغاز، ومربع التدفق الحجمي عند السحب يتناسب مع

ΔPo × Z × Ts ÷ (Ps × MW)

حيث ΔPo الضغط التفاضلي عبر عنصر التدفق في السحب. وبقسمة الرأس على مربع التدفق تختفي حرارة السحب Ts ومعها Z وMW من النسبة، ويبقى ما يعتمد على نسبة الضغط Pd/Ps وعلى ΔPo/Ps وعلى خواص الغاز فقط. ولهذا فإن رسم الخط بمحور أفقي **ΔPo/Ps** (الضغط التفاضلي لعنصر التدفق مقسومًا على الضغط المطلق عند السحب) ومحور رأسي **Pd/Ps** (نسبة ضغط التصريف المطلق إلى ضغط السحب المطلق) يجعل خط الانفصال الهوائي ثابتًا تقريبًا مع تغير الضغط والحرارة والوزن الجزيئي (فالأخير يُختصر من النسبة)، ويبقى حساسًا أساسًا لتغير نسبة الحرارات النوعية k عبر الأس البوليتروبي σ (أما Z فيُختصر تقريبًا كالوزن الجزيئي). وتعوّض الأنظمة الأكثر تطورًا تغيّر k بحساب مستمر من التركيب أو من قياس Td وTs.

المتغير الأساسي لنظام الحماية: كثير من الأنظمة تختصر الخريطة إلى متغير واحد يسمى **القرب من الانفصال الهوائي (Surge Proximity)** أو **S**: نسبة التدفق المكافئ الحالي إلى تدفق الانفصال الهوائي عند نسبة الضغط نفسها (أو نسبة مربعيهما). فإذا كانت S = 1 فالضاغط على خط الانفصال الهوائي، وإذا كانت S = 0.8 فالتدفق المكافئ الحالي 80% من تدفق الانفصال الهوائي أي أن الضاغط داخل منطقة الانفصال الهوائي، وإذا كانت S أكبر من 1 فهو في الجهة الآمنة. (تنبيه: بعض الموردين يعرّف المتغير معكوسًا بحيث تعني القيمة الأكبر من 1 الدخول في الانفصال الهوائي، فتُقرأ وثيقة المورد قبل تفسير الأرقام.) وبهذا يصبح متحكم منع الانفصال الهوائي حلقة تحكم عادية قيمتها المقاسة S وهدفها خط التحكم.

الخطوط على الخريطة (الشكل 35-3):

- **خط حد الانفصال الهوائي (Surge Limit Line – SLL):** من اختبارات المصنّع أو من اختبار الانفصال الهوائي في الموقع. لا يُشغَّل الضاغط عليه أبدًا في التشغيل العادي.
- **خط التحكم (Surge Control Line – SCL):** على يمين SLL بهامش يُعبَّر عنه عادة بنسبة من التدفق (10% من تدفق الانفصال الهوائي في الضواغط الطاردة المركزية، وقد يكون 5% في أنظمة سريعة الاستجابة أو 15% وأكثر في الأنظمة البطيئة أو ذات الأجهزة الرديئة). عليه يعمل المتحكم النسبي التكاملي: كلما اقتربت نقطة التشغيل من SCL بدأ الصمام يفتح.
- **خط الاستجابة المفتوحة (Recycle Trip Line – RTL) أو خط الانفصال الهوائي الوهمي:** بين SCL وSLL. إذا عبرته نقطة التشغيل رغم تصرف المتحكم (اضطراب سريع) نفّذ النظام قفزة فورية في فتح الصمام (Open-Loop Step) دون انتظار الحلقة المغلقة.
- **خط الأمان (Safety-On Line) أو مكتشف الانفصال الهوائي:** على SLL نفسه أو عنده؛ إذا عُبر عُدّ ذلك انفصالًا هوائيًا حقيقيًا، فيزاد الهامش تلقائيًا (إزاحة خط التحكم يمينًا بنسبة إضافية) ويُحصى الحدث، ويُطلق الإيقاف بعد عدد محدد من الأحداث.

الشكل 35-3: *خريطة منع الانفصال الهوائي في الإحداثيات الثابتة: المحور الأفقي ΔPo/Ps والرأسي Pd/Ps، وعليها خط حد الانفصال الهوائي وخط الاستجابة المفتوحة وخط التحكم بالهامش المعتاد، ومسار نقطة التشغيل أثناء اضطراب.*

مثال محلول (حساب الموقع على الخريطة): ضاغط غاز وقود: ضغط السحب 20 barg، وضغط التصريف 45 barg، وعنصر التدفق في السحب يعطي ΔPo = 180 mbar، والضغط الجوي 1.0 bar. من اختبار المصنّع، ΔPo/Ps عند خط الانفصال الهوائي لنسبة الضغط 2.19 يساوي 0.0060. هل الضاغط في أمان؟

- Ps المطلق = 21.0 bara، وPd المطلق = 46.0 bara، فنسبة الضغط Pd/Ps = 46 ÷ 21 = 2.19.
- $\Delta \mathrm{Po}/\mathrm{Ps} = 0.180 \div 21.0 = 0.00857$.
- تدفق الانفصال الهوائي المكافئ عند هذه النسبة يقابل ΔPo/Ps = 0.0060. وبما أن التدفق يتناسب مع الجذر التربيعي للضغط التفاضلي:
  - المعادلة: S الحالي ÷ √((ΔPo/Ps) عند الانفصال (ΔPo/Ps)

الهوائي)

- التعويض: $S = \sqrt{(0.00857 \div 0.0060)} = \sqrt{1.43}$
- النتيجة: $S = 1.195$

- أي أن التدفق الحالي أعلى من تدفق الانفصال الهوائي بنحو 19.5%. وبهامش تحكم 10% يقع خط التحكم عند $S = 1.10$، فالضاغط في أمان ويبعد عن خط التحكم بنحو 9.5% من التدفق.
  - ΔPo عند خط التحكم $= 0.0060 \times 1.10^2 \times 21\ bar \approx 152\ mbar$ (أي $S = 1.10$، وعنده يبدأ الصمام يفتح.
  - ΔPo عند خط الانفصال الهوائي $= = 0.0060 \times 21\ bar$ 126 mbar، أي على خط الانفصال الهوائي نفسه.

35.4 خوارزمية منع الانفصال الهوائي

نظام منع الانفصال الهوائي ليس متحكم PID عاديًا بل مجموعة استجابات مرتبة بحسب شدة الاضطراب وسرعته (الشكل 35-4):

1. **الاستجابة النسبية التكاملية (PI) على خط التحكم:** حين تقترب نقطة التشغيل من SCL يبدأ المتحكم بفتح صمام إعادة التدوير بمقدار يتناسب مع الانحراف وتكامله. وهو المسؤول عن التشغيل المستمر قرب الخط في الأحمال المنخفضة. وتُضبط ثوابته بحيث تكون الاستجابة سريعة (زمن تكامل بضع ثوانٍ لا دقائق) مع إجراء لمنع تراكم التكامل (Anti-Windup) حين يكون الصمام مغلقًا تمامًا في التشغيل العادي، وإلا احتاج المتحكم إلى وقت طويل حتى «يستيقظ».
2. **الاستجابة الاشتقاقية أو معدل الاقتراب (Derivative / Rate-of-Approach):** إذا كانت نقطة التشغيل تتحرك نحو الانفصال الهوائي بسرعة كبيرة (كما عند إغلاق صمام سريع في العملية)، يُزاح خط التحكم مؤقتًا يمينًا

بمقدار يتناسب مع سرعة الاقتراب، فيبدأ الصمام في الفتح مبكرًا. وهذه الاستجابة تعوّض تأخر الأجهزة والصمام.

3. **الاستجابة المفتوحة (Open-Loop Step / Recycle Trip):** إذا عبرت نقطة التشغيل خط RTL قفز خرج المتحكم فورًا بخطوة كبيرة (مثلًا 20% إلى 30% من فتحة الصمام، أو ما يكفي بحسب حجم النظام) دون انتظار الحلقة المغلقة، ثم يُترك الخرج ينحدر ببطء إلى قيمة PI عندما تعود النقطة إلى الأمان. وقد تُكرر الخطوة إذا لم تكفِ الأولى.
4. **مكتشف الانفصال الهوائي والهامش التكيفي:** إذا عُبر خط SLL فعلًا (ويُكشف من انعكاس مفاجئ في ΔPo أو هبوط في Pd)، يحصي النظام الحدث ويزيح خط التحكم يمينًا بمقدار ثابت (مثلًا 2% إلى 5% لكل حدث) لأن الخريطة المضبوطة كانت غير كافية، ويبقى الهامش الإضافي حتى يزيله مهندس بعد التحقيق.
5. **الإيقاف:** بعد عدد محدد من أحداث الانفصال الهوائي في زمن قصير (مثلًا ثلاثة في دقيقة) يُطلق إيقاف الضاغط عبر نظام السلامة، مع فتح الصمام كاملًا.

الحد الأدنى للفتح (Minimum Position) والقفل: في بعض الأنظمة يُفرض حد أدنى لفتح الصمام في ظروف محددة كالبدء والتوقف. ويوجد في كثير من الأنظمة قفل يمنع إغلاق الصمام بسرعة تزيد على معدل محدد (مثلًا 1% في الثانية عند الإغلاق) بينما لا حد لسرعة الفتح؛ فالفتح السريع يحمي والإغلاق السريع يخاطر. والصمام يُفتح تلقائيًا بالكامل عند: فقدان الإشارة، أو الإيقاف، أو فقدان أي قياس أساسي (Ps أو Pd أو ΔPo) إذا لم تتوافر استراتيجية احتياطية (Fallback) تحسب المتغير المفقود من غيره.

التفاعل مع تحكم الأداء: يوجد متحكمان يتصرفان في الآلة نفسها: متحكم الأداء (ضغط التصريف أو ضغط السحب أو التدفق) الذي يحرك السرعة أو الخنق أو IGV، ومتحكم منع الانفصال الهوائي الذي يحرك صمام إعادة التدوير. وكل منهما يؤثر في المتغير الذي يقيسه الآخر: فتح صمام إعادة التدوير يرفع التدفق عبر الضاغط ويخفض ضغط التصريف،

فيستجيب متحكم الأداء برفع السرعة، فيبتعد الضاغط عن الانفصال الهوائي فيغلق متحكم منع الانفصال الهوائي الصمام، فيرتفع الضغط فيخفض متحكم الأداء السرعة، فيقترب الضاغط من الانفصال الهوائي من جديد، وهكذا قد يتذبذب النظامان. والحلول: **فك الارتباط (Decoupling)** بإرسال إشارة من متحكم منع الانفصال الهوائي إلى متحكم الأداء تعدّل خرجه استباقيًا، وجعل حلقة الأداء أبطأ من حلقة الانفصال الهوائي بوضوح، وإعطاء أولوية منطقية لمنع الانفصال الهوائي (فحين يفتح الصمام تُجمَّد أو تُقيَّد استجابة متحكم الأداء في الاتجاه الذي يزيد الخطر). ويشرح القسم 35.7 هذا التنسيق بتفصيل أكثر.

الشكل 35-4: *استجابات نظام منع الانفصال الهوائي بالزمن أثناء اضطراب: تقترب نقطة التشغيل من خط التحكم فيبدأ المتحكم PI، ثم تعبر خط الاستجابة المفتوحة فيقفز الصمام خطوة كبيرة، ثم يعود ببطء إلى قيمة الحلقة المغلقة بعد زوال الاضطراب.*

35.5 صمام إعادة التدوير ومسار الإعادة

صمام منع الانفصال الهوائي (Anti-Surge Valve – ASV) هو المشغل الفعلي للحماية، ومواصفاته تختلف عن صمام تحكم عادي:

- **السعة:** يجب أن يمرر، وهو مفتوح بالكامل، تدفقًا يفوق تدفق الانفصال الهوائي عند أسوأ ظروف تشغيل (عادة ما بين 1.8 و2.2 ضعف تدفق الانفصال الهوائي عند نسبة الضغط القصوى)، وإلا لم يستطع إخراج الضاغط من الانفصال الهوائي حتى لو فُتح. ولا يُبالَغ في السعة أيضًا، فالصمام الضخم يكون تحكمه في الفتحات الصغيرة رديئًا ويُدخل الضاغط في الاختناق إذا فُتح كاملًا.
- **السرعة:** زمن الفتح الكامل عادة أقل من ثانية إلى ثانيتين للضواغط الكبيرة (وأقل من ذلك في المحورية)، وزمن الإغلاق أبطأ ومقيّد. ويتحقق ذلك بمشغل هوائي كبير مع معزز حجمي (Volume Booster) وصمام ملفي للفتح السريع، ومحدد سرعة في اتجاه الإغلاق، وموضّع سريع.
- **الخصائص:** غالبًا خطية أو متساوية النسبة (Equal Percentage) معدلة، مع أجزاء داخلية منخفضة الضوضاء (Multi-Stage Trim) لأن فرق الضغط عبره قد يكون عشرات البارات، والضوضاء بلا معالجة تتجاوز 110 dB.
- **الاتجاه الآمن:** يفتح عند فقد الهواء أو الإشارة (Fail-Open) في الغالبية العظمى من التطبيقات.
- **مسار الإعادة:** يأخذ الغاز من التصريف بعد مبرد الغاز (Hot Gas Recycle غير مقبول للتشغيل المستمر لأن الحرارة تتراكم في كل دورة) ويعيده إلى السحب قبل عنصر التدفق (حتى يقيس العنصر التدفق الكلي عبر الضاغط). ويُوضع صمام عدم رجوع (Check Valve) على التصريف بعد مأخذ الإعادة حتى لا يعود غاز الشبكة إلى الضاغط عند التوقف. وفي ضواغط الهواء يُستبدل الصمام بصمام نفخ إلى الجو (Blow-Off) مع كاتم صوت.

- **الحجم بين الضاغط والصمام:** كلما صغر الحجم المحبوس بين تصريف الضاغط وصمام الإعادة كانت استجابة النظام أسرع؛ فالحجم الكبير يخزن طاقة تتحول إلى انفصال هوائي أعنف ويُبطئ أثر فتح الصمام. لذلك يُقرَّب الصمام من الضاغط ما أمكن.

مثال محلول (زمن الاستجابة): ضاغط يقترب من الانفصال الهوائي بمعدل 5% من التدفق في الثانية بعد إغلاق مفاجئ في العملية. سلسلة الحماية: مرسل ضغط تفاضلي بزمن استجابة 100 ms، ودورة المتحكم 40 ms، وصمام يفتح 25% في 0.5 s.

- الزمن الكلي حتى يبدأ التدفق في الارتفاع: t = زمن المرسل + دورة المتحكم + زمن الصمام
- التعويض: $t \approx 0.1 + 0.04 + 0.5$
- النتيجة: $t \approx 0.64$ s
- هبوط التدفق خلالها = المعدل × الزمن = $5\% \times 0.64 \approx 3.2\%$
- فهامش 10% يكفي، لكن لو كان زمن الصمام 3 s (صمام تحكم عادي) لهبط التدفق نحو 16% قبل أن يتصرف، أي أن الضاغط يدخل الانفصال الهوائي رغم أن المتحكم «اكتشف» الخطر في وقته. وهذا هو السبب في أن صمام الانفصال الهوائي ومرسلاته تُشترى بمواصفات خاصة.

جدول مقارنة: صمام منع الانفصال الهوائي مقابل صمام تحكم عادي

المعيار	صمام منع الانفصال الهوائي (إعادة التدوير)	صمام تحكم عادي
زمن الشوط الكامل للفتح	أقل من 1 إلى 2 s	10 إلى 60 s
الإغلاق	بطيء ومنضبط (لا يجوز الإغلاق السريع)	حسب الخدمة

المعيار	صمام منع الانفصال الهوائي (إعادة التدوير)	صمام تحكم عادي
المشغل	مكبسي كبير أو هيدروليكي، مع معزز (Booster) وصمام تنفيس سريع	غشائي غالبًا
وضع الفشل	مفتوح (FO) في الغالبية العظمى من التطبيقات، مع خزان هواء	حسب دراسة العمليات
السعة	نحو 1.8 إلى 2.2 ضعف تدفق الانفصال الهوائي عند نسبة الضغط القصوى، دون مبالغة	تدفق العملية العادي
الخاصية	خطية أو متساوية النسبة مع ضوضاء منخفضة (قفص متعدد المراحل)	حسب الحلقة
الموضع	رقمي عالي السعة الهوائية، استجابة أقل من 100 ms	عادي
الاختبار	اختبار زمن الشوط بعد كل صيانة، ومسجل	حسب البرنامج

كيف أختار؟ القاعدة: مواصفة خاصة لا مواصفة صمام تحكم: سعة 1.8 إلى 2.2 ضعف تدفق الانفصال الهوائي عند نسبة الضغط القصوى، وفتح كامل في أقل من ثانية إلى ثانيتين، وإغلاق مقيد، وفتح عند فقد الهواء، وقفص منخفض الضوضاء، وموضّع سريع مع معزز. والجدول لا يعطي الحجم المحبوس بين الضاغط والصمام، وهو ما يحدد فعليًا هل تكفي هذه السرعة؛ فالصمام السريع البعيد عن الضاغط أبطأ أثرًا من صمام أقرب. والخطأ الأكثر كلفة شراء صمام إعادة التدوير من كتالوج صمامات التحكم العادية لأنه «صمام على خط»، ثم اكتشاف أن زمنه 3 s في أول اضطراب حقيقي (المثال المحلول أعلاه).

35.6 أجهزة القياس التي يحتاج إليها النظام

القياس	الجهاز والموقع	المتطلبات الخاصة
ضغط السحب Ps	مرسل ضغط مطلق (أو نسبي مع إضافة الجوي) قبل الضاغط	استجابة سريعة (أقل من 100 ms)، بلا تخميد
ضغط التصريف Pd	مرسل ضغط عند التصريف قبل صمام عدم الرجوع	كما سبق؛ المدى يغطي ضغط الاستقرار (Settle-Out)
التدفق ΔPo	عنصر ضغط تفاضلي (لوح فتحة أو فنتوري أو أنبوب متوسط سرعة) في السحب غالبًا، مع مرسل DP	مرسل بمدى مناسب لصغر ΔPo، سريع، بلا تخميد ولا جذر تربيعي في المرسل (يُحسب في المتحكم)؛ خطوط نبض قصيرة
حرارة السحب Ts والتصريف Td	RTD أو مزدوج حراري (Thermocouple) في غمد قصير	للتعويض وحساب الرأس والكفاءة؛ لا تحتاج إلى السرعة نفسها
السرعة	مجس مغناطيسي أو مجس تقارب على عجلة مسننة (الفصل 32)	لمعرفة منحنى السرعة الحالي وللتحكم بالأداء
موضع صمام ASV	مرسل موضع على الصمام	لتأكيد الاستجابة وللتشخيص
موضع IGV	مرسل موضع	للضواغط ثابتة السرعة

كيف أختار؟ القاعدة: مرسلات سريعة (أقل من 100 ms) بلا تخميد وبلا جذر تربيعي في المرسل، وبمدى يغطي ضغط الاستقرار، وخطوط نبض قصيرة؛ وحرارتا السحب والتصريف وحدهما لا تحتاجان إلى هذه السرعة. وما لا يظهر في الجدول أن العنصر الأولي للتدفق واحد غالبًا، فتكرار المرسلات 2oo3 لا يعالج انسداده أو خطأ تركيبه. والخطأ الأكثر كلفة مشاركة مرسل التدفق التجاري أو المرشَّح مع نظام الحماية، أو

«تهدئة» قراءة ΔPo بتخميد ثوانٍ فيرى النظام التدفق متأخرًا ويدخل الضاغط الانفصال الهوائي قبل أن يتصرف (القسم 35.13).

ملاحظات هندسية: لا يُستخدم للحماية مرسل التدفق نفسه الذي يُستخدم للقياس التجاري أو المتوسط؛ فمتطلباتهما متعاكسة (الأول سريع ولو كان أقل دقة، والثاني دقيق ولو كان مرشحًا). وتُراقب سلامة القياسات باستمرار: إذا فُقد ΔPo أو Ps أو Pd، أو خرجت قيمته عن المعقول، ينتقل النظام إلى استراتيجية احتياطية (مثل تثبيت الصمام على فتحة آمنة أو حساب التدفق من قياس آخر) ويُطلق إنذارًا. وفي التطبيقات الحرجة تُكرر المرسلات (2oo3 أو اختيار الأوسط)، مع أن التكرار لا يعالج العنصر الأولي إذا كان واحدًا.

35.7 التحكم بالأداء

ما الذي يُتحكم فيه؟ يعتمد على الخدمة: ضغط التصريف (ضاغط تغذية شبكة)، أو ضغط السحب (ضاغط يسحب من فاصل يجب أن يبقى ضغطه ثابتًا)، أو التدفق (ضاغط تصدير بحصة محددة)، أو فرق الضغط. ووسائل التغيير:

- **السرعة المتغيرة:** أفضل الوسائل كفاءةً؛ فقوانين التشابه تجعل الرأس يتناسب مع مربع السرعة والتدفق مع السرعة والقدرة مع مكعبها. تتحقق بتوربين غازي أو بخاري، أو بمحرك كهربائي مع محرك تردد متغير (VFD) أو قارنة هيدروليكية.
- **أدلة التوجيه عند المدخل (IGV):** ريش ثابتة قابلة لتغيير الزاوية أمام الدافعة الأولى تغيّر زاوية دخول الغاز، فتحرك منحنى الضاغط دون تغيير السرعة. كفاءتها جيدة في مدى محدود، وتُستخدم في الضواغط ذات السرعة الثابتة (المحرك الكهربائي المباشر) وضواغط الهواء الكبيرة.
- **خنق السحب (Suction Throttling):** صمام على السحب يخفض ضغط السحب فيقل التدفق الكتلي؛ بسيط لكنه يهدر طاقة، ويقرب نقطة التشغيل من الانفصال الهوائي إن لم يُدرس.
- **خنق التصريف:** أسوأ الوسائل كفاءةً ولا يُستخدم إلا في الضواغط الصغيرة.

- **الإزاحة الموجبة:** في الضواغط الترددية يُتحكم بالسعة بالخطوات (Unloaders) أو الجيوب المتغيرة (Clearance Pockets) أو الاسترجاع، ولا انفصال هوائي فيها.

التنسيق مع منع الانفصال الهوائي: الحلول الثلاثة (فك الارتباط، وإبطاء حلقة الأداء، وأولوية منع الانفصال الهوائي) شُرحت في القسم 35.4 (انظر القسم 35.4)، ويُضاف هنا أمران: أن يحدّ متحكم الأداء خرجه بحيث لا يقود الضاغط إلى ما بعد خط التحكم (Limiting Controller)، وأن فك الارتباط في الأنظمة المدمجة (المتحكمان في وحدة واحدة) يجري تلقائيًا بمعرفة نموذج الضاغط.

35.8 الضواغط المتوازية والمتسلسلة

التوازي (Parallel): ضاغطان أو أكثر يسحبان من مجمع مشترك ويصرفان إلى مجمع مشترك. المشكلة الكلاسيكية: الضاغطان لا يتقاسمان الحمل بالتساوي إلا إذا تطابقت منحنياتهما تمامًا، وعند خفض الحمل الكلي يميل الضاغط ذو المنحنى الأضعف إلى الوصول إلى الانفصال الهوائي قبل الآخر ثم يعيد التدوير بينما يعمل الآخر بكفاءة. والحل **تقاسم الحمل بالتساوي في البعد عن الانفصال الهوائي (Equal Distance to Surge)**: متحكم رئيسي يضبط ضغط المجمع، ومتحكمات تقاسم تعدّل سرعة كل ضاغط (أو IGV) بحيث تتساوى قيم S لكل الضواغط، فتصل كلها إلى خط التحكم في اللحظة نفسها، وبذلك يتأخر بدء إعادة التدوير في المجموعة كلها إلى أقل حمل ممكن. ولكل ضاغط صمام إعادة تدوير خاص وعنصر تدفق خاص، ولا يُتقاسم صمام واحد بين ضاغطين.

التسلسل (Series): أغلفة أو أقسام متتابعة (مثل ضاغط منخفض الضغط ثم عالي الضغط بينهما مبرد بيني وفاصل سوائل). لكل قسم خريطته وخط الانفصال الهوائي الخاص به، ولكل قسم صمام إعادة تدوير يعيد الغاز من تصريف القسم إلى سحبه، مع إمكانية صمام إعادة كلي حول القسمين. والتنسيق ضروري: فتح صمام القسم الثاني يغير ضغط السحب للقسم الثاني وهو ضغط التصريف للقسم الأول، فيتحرك القسم الأول على

خريطته. وتستخدم الأنظمة الحديثة فك ارتباط بين الأقسام أيضًا. والأقسام ذات التيار الجانبي (Sidestream) في ضواغط التبريد تحتاج إلى حساب التدفق لكل قسم بالجمع لأن عنصر التدفق لا يوضع بين الأقسام دائمًا.

الشكل 35-5: *ضاغطان متوازيان مع تقاسم الحمل بالتساوي في البعد عن الانفصال الهوائي: متحكم ضغط المجمع الرئيسي، ومتحكم تقاسم يوازن قيمتي S بتعديل سرعتي الضاغطين، ولكل ضاغط عنصر تدفق وصمام إعادة تدوير خاص.*

35.9 بنية الضاغط من منظور الأجهزة

يلخّص الشكل 35-6 ما يراه مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس حول ضاغط طارد مركزي متعدد المراحل: الدافعات على العمود داخل الغلاف، والمحامل الشعاعية عند طرفيه ومحمل الدفع في أحدهما، والسدادات الجافة بين الغلاف والمحامل، ومجسات القرب عند كل محمل ومجسا الإزاحة المحورية، وحساسات حرارة المعدن في المحامل،

وعنصر التدفق في السحب، ومرسلات الضغط والحرارة عند السحب والتصريف، وخط إعادة التدوير بصمامه من بعد المبرد إلى قبل عنصر التدفق. وتفصيل القياسات الميكانيكية (السرعة، والاهتزاز، والإزاحة المحورية، وحرارة المحامل) في الفصل 32، وحمايتها وفق API 670 في الفصل 32، وتحليلها في الفصل 33.

الشكل 35-6: *نموذج ثلاثي الأبعاد لضاغط طارد مركزي متعدد المراحل مقطوع طوليًا: الدافعات على العمود، والناشرات، والمحامل والسدادات الجافة عند الطرفين، ومواقع مجسات الاهتزاز والإزاحة المحورية والحرارة، وعنصر التدفق في السحب، وخط إعادة التدوير بصمامه.*

35.10 أنظمة الزيت والسدادات الجافة

نظام زيت التزييت: خزان، ومضختان (رئيسية واحتياطية، غالبًا إحداهما على العمود أو بتوربين والأخرى كهربائية) ومضخة طوارئ بتيار مستمر أحيانًا، ومبردات ومرشحات مزدوجة قابلة للتبديل أثناء التشغيل، ومجمع زيت بضغط منظم، ومركم (Accumulator) يحفظ الضغط أثناء تبديل المضخات. والقياسات: ضغط المجمع (إنذار عند الانخفاض،

وتشغيل المضخة الاحتياطية تلقائيًا، وإيقاف عند الانخفاض الشديد بثلاثة مرسلات (2oo3)، ويُتجنب التصويت 2oo2 لأن عطل مرسل واحد يمنع الإيقاف)، وفرق الضغط عبر المرشح، وحرارة الزيت بعد المبرد، ومستوى الخزان، وحرارة معدن المحامل (RTD مزدوج في كل محمل)، وحرارة الزيت الراجع من كل محمل. وعند الإيقاف بسبب الزيت يجب أن يبقى الزيت جاريًا حتى يتوقف العمود (مضخة الطوارئ أو المركم).

السدادات الجافة (Dry Gas Seals): بديل سدادات الزيت في معظم ضواغط الغاز الحديثة. حلقتان مصقولتان، إحداهما دوارة بأخاديد لولبية دقيقة والأخرى ثابتة مضغوطة بنابض، يفصل بينهما غشاء غاز بسمك ميكرونات يتكون بفعل الدوران. ويتسرب عبرهما تدفق صغير جدًا من غاز نظيف. ويشيع الترتيب الترادفي (Tandem): سدادة أولية تتحمل ضغط العملية كله وتصرّف تسربها إلى الشعلة أو التنفيس الأولي، وسدادة ثانوية احتياطية تتحمل الضغط كله لو تعطلت الأولى، وبينهما تنفيس أولي. وقبل السدادة من جهة العملية سدادة متاهية (Labyrinth) يُدفع أمامها **غاز السدادة (Seal Gas)** النظيف المرشح بضغط أعلى من ضغط العملية بفرق يحدده المصنّع (من نحو 0.3 bar إلى 1 bar أو أكثر)، أو بتدفق مضبوط عبر المتاهة، حتى لا يصل غاز العملية الملوث إلى الأوجه. وبين السدادة والمحمل سدادة فاصلة يُغذى إليها **غاز الفصل (Separation Gas)**، وهو نيتروجين عادة، يمنع وصول الزيت من جهة المحمل إلى السدادة والغاز من جهة السدادة إلى الزيت (الشكل 35-7).

أجهزة نظام السدادات الجافة وقياساته:

- فرق ضغط غاز السدادة عبر المتاهة الداخلية (أو تدفقه): إنذار عند الانخفاض، وإيقاف إذا انعكس أو انعدم؛ فهذا يعني دخول غاز ملوث إلى الأوجه.
- ضغط وتدفق تسرب التنفيس الأولي لكل جهة: ارتفاعه يعني تلف السدادة الأولية (إنذار عند نحو ضعف القيمة الطبيعية وإيقاف عند نحو أربعة أضعاف أو وفق المصنّع)، وانخفاضه الشديد يعني انسدادًا.

- ضغط غاز الفصل: إنذار وإيقاف عند الانخفاض، ومنع تشغيل مضخات الزيت قبل تأسيس غاز الفصل.
- فرق الضغط عبر مرشحات غاز السدادة المزدوجة.
- حرارة غاز السدادة (يُسخَّن أحيانًا لتفادي تكثفه عند انخفاض ضغطه وتمدده).

وأهم قاعدة تشغيلية: غاز السدادة قبل كل شيء وبعده؛ يُؤسَّس قبل ضغط الضاغط وقبل الدوران، ويبقى بعد التوقف حتى يُفرَّغ الضاغط. وغاز السدادة في البدء (حين يكون تصريف الضاغط بلا ضغط) يحتاج إلى مصدر خارجي أو معزز (Booster).

الشكل 35-7: *مخطط سدادة جافة ترادفية: غاز السدادة النظيف يُحقن قبل المتاهة الداخلية، والسدادة الأولية تصرّف تسربها إلى التنفيس الأولي، والسدادة الثانوية احتياطية، وغاز الفصل بين السدادة والمحمل، مع نقاط القياس والإنذار.*

35.11 تسلسل البدء والتوقف وضغط الاستقرار

ضغط الاستقرار (Settle-Out Pressure): عند توقف الضاغط وإغلاق صمامي السحب والتصريف يتساوى الضغط في الحجم المحبوس بين الصمامين عند قيمة بين ضغطي السحب والتصريف، تُحسب بالتقريب من حفظ الكتلة: P الاستقرار

$$\approx (\mathrm{Ps} \times \mathrm{Vs} + \mathrm{Pd} \times \mathrm{Vd}) \div (\mathrm{Vs} + \mathrm{Vd})$$

للحجمين Vs (جهة السحب حتى صمام السحب) وVd (جهة التصريف حتى صمام عدم الرجوع وصمام التصريف)، مع تصحيح للحرارة والانضغاط. وهذا الضغط يحدد مدى مرسل ضغط السحب، وتصنيف أنابيب السحب وصمام الأمان عليها، وضغط غاز السدادة اللازم عند التوقف.

مثال محلول: Ps = 21 bara و$Vs = 6\ m^3$، وPd = 46 bara و$Vd = 4\ m^3$.

- المعادلة: P الاستقرار ≈ (Ps × Vs + Pd × Vd) ÷ (Vs + Vd)
- التعويض: P الاستقرار ≈ (21 × 6 + 46 × 4) ÷ 10 = (126 + 184) ÷ 10
- النتيجة: P الاستقرار ≈ 31 bara
- فمرسل ضغط السحب بمدى 0–25 bar غير كافٍ، وأنابيب السحب يجب أن تتحمل 31 bara على الأقل (وأكثر مع هامش الحرارة)، وغاز السدادة في التوقف يحتاج إلى نحو 31.5 bara.

تسلسل البدء النموذجي:

1. تأسيس غاز السدادة بفرق ضغط صحيح أولًا، ثم غاز الفصل، ثم زيت التزييت (وتأكيد ضغوطها).
2. تفريغ الهواء أو تعبئة الضاغط بالغاز حتى ضغط السحب (Purge/Pressurize) وفتح صمام السحب.
3. صمام إعادة التدوير مفتوح بالكامل ومقفل مفتوحًا حتى يبلغ الضاغط السرعة الدنيا للتحكم (Minimum Governor Speed)؛ فعند السرعات المنخفضة تكون الخريطة غير معروفة جيدًا ومنحنيات السرعة قريبة من بعضها.
4. الدوران ورفع السرعة عبر نطاقات السرعة الحرجة بسرعة، ثم الاستقرار عند السرعة الدنيا.

5. تحويل صمام إعادة التدوير إلى التحكم الآلي، ثم فتح صمام التصريف تدريجيًا وتحميل الضاغط برفع السرعة، فيغلق الصمام تدريجيًا كلما ابتعدت نقطة التشغيل عن خط التحكم.

التوقف الطبيعي: خفض الحمل مع فتح الصمام تدريجيًا، ثم فتحه كاملًا، ثم خفض السرعة والتوقف، ثم إغلاق الصمامات وترك الغاز محبوسًا (ضغط الاستقرار) أو تفريغه حسب الفلسفة. **الإيقاف الطارئ (ESD):** فتح صمام إعادة التدوير فورًا وبالكامل، وإغلاق صمامي السحب والتصريف، وقطع الدافع، وتفريغ الغاز (Blowdown) إلى الشعلة إن اقتضت الفلسفة (حريق أو تسرب)، مع بقاء الزيت وغاز السدادة حتى يتوقف العمود ويُفرَّغ الضاغط. والقاعدة في كل توقف: صمام إعادة التدوير يفتح قبل أن تنخفض السرعة، لأن الضاغط أثناء تباطؤه يمر بخط الانفصال الهوائي إذا بقي حجم التصريف مضغوطًا.

35.12 اختبار الانفصال الهوائي وتشغيل نظام الحماية: خطوات

يُجرى اختبار الانفصال الهوائي في التشغيل التجريبي لتأكيد موقع خط الانفصال الهوائي الحقيقي (فخريطة المصنّع من اختبار بغاز وشروط مختلفة)، وبحضور ممثل المصنّع، وبأقل عدد ممكن من الأحداث (عادة نقطة أو نقطتان عند سرعات مختلفة):

1. **التحضير:** تأكيد معايرة كل مرسلات النظام (Ps وPd وΔPo وTs) وسرعة استجابتها، واختبار شوط صمام إعادة التدوير وتسجيل زمني فتحه وإغلاقه، وتشغيل مسجل بيانات سريع (عشرات العينات في الثانية على الأقل) لكل الإشارات، وتأكيد عمل حمايات الاهتزاز والإزاحة المحورية والحرارة، وضبط عدد أحداث الانفصال الهوائي الذي يُطلق الإيقاف التلقائي (على واحد عادة أثناء الاختبار).

2. **الوضع الابتدائي:** تشغيل الضاغط عند السرعة المحددة للاختبار ونقطة تشغيل بعيدة عن خط التحكم، وصمام إعادة التدوير في التحكم الآلي، ونظام الانفصال الهوائي بهامش تحكم مؤقت كبير.
3. **الاقتراب:** خفض التدفق تدريجيًا (بإغلاق صمام خنق في التصريف أو خفض طلب العملية) بخطوات صغيرة، مع مراقبة S، والاهتزاز، والإزاحة المحورية، وضغط التصريف. وعند كل خطوة انتظار الاستقرار وتسجيل النقطة.
4. **تجاوز خط التحكم يدويًا:** تحويل صمام إعادة التدوير إلى اليدوي في وضع الإغلاق (بتصريح خاص وبحضور المسؤول)، والاستمرار في خفض التدفق بخطوات أصغر (1% أو أقل).
5. **اكتشاف الانفصال الهوائي:** عند أول علامة (هبوط مفاجئ في ΔPo أو Pd، أو ضجيج، أو قفزة اهتزاز) فتح الصمام فورًا (يدويًا أو بمكتشف الانفصال الهوائي التلقائي) وتسجيل قيم Ps وPd وΔPo والسرعة عند لحظة بدء الانفصال الهوائي؛ هذه نقطة على خط الانفصال الهوائي الحقيقي.
6. **التكرار:** عند سرعة أو نسبة ضغط مختلفة إن سمحت الفلسفة، للحصول على نقطة ثانية تثبت ميل الخط.
7. **ضبط الخريطة:** مقارنة النقاط المقاسة بخط المصنّع، وضبط معاملات خط الانفصال الهوائي في المتحكم، ووضع خط التحكم بالهامش المعتمد (10% عادة)، وضبط خط الاستجابة المفتوحة.
8. **اختبار الاستجابة الآلية:** مع النظام في الوضع الآلي، إحداث اضطراب سريع (إغلاق جزئي سريع في التصريف) والتحقق من أن الصمام فتح قبل خط الانفصال الهوائي وأن الانفصال الهوائي لم يحدث، ومن تسجيل استجابتي PI والخطوة المفتوحة.
9. **اختبار الأعطال:** محاكاة فقد كل مرسل على حدة والتحقق من الاستجابة الاحتياطية والإنذار، ومحاكاة فقد الهواء عن الصمام والتحقق من فتحه الكامل.

10. **التوثيق:** تقرير الاختبار بالنقاط والمعاملات النهائية وسجل الإشارات، وحفظ نسخة من تهيئة المتحكم، وإعادة عدد أحداث الانفصال الهوائي المسموح إلى قيمته التشغيلية.

فحص دوري لصمام إعادة التدوير: خطوات

1. تحقق من ضغط هواء الأجهزة ومن سلامة المعزز الحجمي والموضّع بصريًا.
2. من نظام التحكم، وبتصريح، أرسل خطوة صغيرة (5%) في الفتح وتحقق من أن مرسل الموضع يتبع بلا تأخر ملحوظ ودون تجاوز للقيمة المطلوبة (Overshoot).
3. سجّل زمن الفتح الكامل عند أمر الفتح (يجب أن يطابق قيمة التشغيل التجريبي؛ زيادته قد تعني تسربًا أو انسدادًا في المعزز أو زيادة في الاحتكاك).
4. سجّل زمن الإغلاق وتحقق من أنه مقيّد بمحدد السرعة كما صُمم.
5. تحقق من إحكام الإغلاق (تسرب المقعد) من حرارة خط الإعادة أو من عداد تدفق إن وُجد؛ فتسرب الصمام المغلق يهدر الطاقة باستمرار.
6. وثّق النتائج وقارنها بالسابقة.

35.13 حالة ميدانية: انفصال هوائي كل صباح

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

الموقف: ضاغط تصدير غاز يديره توربين غازي يعاني انفصالًا هوائيًا واحدًا في الصباح الباكر مرتين أو ثلاثًا في الأسبوع، دائمًا بين الخامسة والسادسة، ولا يحدث نهارًا. نظام منع الانفصال الهوائي حديث بخريطة مضبوطة من التشغيل التجريبي (في الصيف).

التحقيق: سجل البيانات السريع أظهر أن نقطة التشغيل تقترب من خط التحكم ببطء شديد قبل الحدث ثم تقفز. وحرارة السحب في تلك الساعة أدنى ما تكون (الغاز يمر بمبرد

هوائي قبل الضاغط)، وتركيب الغاز يتغير قليلًا مع تبديل الآبار ليلًا نحو وزن جزيئي أعلى. الإحداثيات الثابتة تعوّض الحرارة، لكن تغير التركيب يغيّر أيضًا نسبة الحرارات النوعية، وهي ما لا تعوّضه هذه الإحداثيات، فيتحرك خط الانفصال الهوائي الحقيقي يمينًا أكثر مما تحسبه الخريطة. والأهم أن مرسل ΔPo في السحب كان مضبوطًا على تخميد ثانيتين «لتهدئة القراءة» بعد شكوى من ذبذبة، فكان النظام يرى التدفق متأخرًا ثانيتين.

الحل: إزالة التخميد من المرسل ونقل أي ترشيح إلى المتحكم بثابت زمني لا يتجاوز عشرات الملي ثانية، وزيادة هامش خط التحكم في ساعات الليل عبر تعويض بخواص الغاز (k أساسًا) المحسوبة من التركيب المقاس بمحلل الغاز في الخط (أو ببساطة هامش 12% بدل 10%)، وتعديل تحكم مبرد السحب ليضبط الحرارة بدل أن يبرد الغاز بأقصى ما يستطيع. توقف الانفصال الهوائي نهائيًا، وانخفض متوسط إعادة التدوير اليومي لأن الخريطة صارت أدق.

الدرس: الإعداد الذي «يهدئ» القراءة قد يعمي نظام الحماية. وخريطة ضُبطت في شرط واحد تحتاج إلى مراجعة في الشروط الأخرى.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
الخريطة والهامش	إحداثيات الخريطة، وخطوط SLL وSCL وRTL، وهامش التحكم، وعدد الأحداث الذي يطلق الإيقاف	يسجل نقاط اختبار الانفصال الهوائي، ويتحقق من أن معاملات المتحكم تطابق التقرير المعتمد
الأجهزة والصمام	مواصفة المرسلات (سريعة، بلا تخميد، والجذر في المتحكم) وصمام إعادة التدوير (السعة، وزمن الشوط، والفتح عند الفشل)	يتحقق من غياب التخميد في المرسلات، ويقيس زمن فتح الصمام وإغلاقه بعد كل صيانة
التنسيق	سرعة حلقة الأداء نسبةً إلى حلقة الانفصال الهوائي، وفك الارتباط والأولوية	يسجل الاتجاهات أثناء الاضطرابات ويبلغ عن أي تذبذب بين الحلقتين

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
السدادات والزيت	حدود الإنذار والإيقاف لغاز السدادة والتنفيس الأولي وضغط الزيت	يتحقق من تأسيس غاز السدادة قبل الضغط والدوران، ويقرأ فروق ضغط المرشحات ويبدّلها

35.14 الأخطاء الشائعة

- تخميد مرسلات الانفصال الهوائي أو وضع الجذر التربيعي في المرسل أو استخدام مرسل بطيء أو خطوط نبض طويلة.
- اختيار صمام إعادة التدوير كصمام تحكم عادي: بطيء، أو صغير السعة، أو يغلق عند فقد الهواء.
- هامش تحكم واحد ثابت لكل الشروط دون إحداثيات ثابتة أو تعويض لتغير خواص الغاز.
- حلقة أداء سريعة تتقاتل مع حلقة الانفصال الهوائي، ولا فك ارتباط بينهما.
- أخذ مسار الإعادة قبل المبرد (غاز ساخن) في تشغيل مستمر، أو إعادته بعد عنصر التدفق فلا يرى العنصر التدفق الكلي.
- الاعتماد على خريطة المصنّع دون اختبار الانفصال الهوائي في الموقع، أو إجراء الاختبار مرات كثيرة تُتلف الآلة.
- صمام إعادة تدوير مشترك بين ضاغطين متوازيين.
- تجاهل ضغط الاستقرار في اختيار مدى مرسل السحب وتصنيف الأنابيب.
- بدء الضاغط أو إيقافه بصمام إعادة التدوير مغلقًا، أو خفض السرعة قبل فتحه.
- تعطيل مكتشف الانفصال الهوائي أو الهامش التكيفي بعد حدث «لأنه يزعج».

35.15 ملخص

الضاغط الديناميكي يدخل الانفصال الهوائي حين ينخفض تدفقه تحت حد يعتمد على نسبة ضغطه وسرعته وخواص غازه، وهو حدث مدمر سريع الدورة. ونظام منع الانفصال الهوائي يرسم خط الحد في إحداثيات ثابتة (ΔPo/Ps مقابل Pd/Ps) ويعمل على خط تحكم بهامش عنه، بمتحكم PI يعززه معدل الاقتراب وخطوة مفتوحة ومكتشف الانفصال الهوائي بهامش تكيفي، ويحرك صمام إعادة تدوير سريع كبير السعة يفتح عند الأعطال. وتُنسَّق حلقة الأداء مع حلقة الانفصال الهوائي بفك الارتباط وبالأولوية، وتتقاسم الضواغط المتوازية الحمل بالتساوي في البعد عن الانفصال الهوائي. والأجهزة سريعة بلا تخميد، والسدادات الجافة وزيت التزييت لهما أنظمة قياس وحماية خاصة، والبدء والتوقف يجريان دائمًا بصمام إعادة التدوير مفتوحًا، ويؤكَّد خط الانفصال الهوائي باختبار محدود في التشغيل التجريبي.

وفي الفصل التالي: يتناول الفصل 36 «أنظمة التحكم في المراجل البخارية ومولدات البخار (HRSG)»، فننتقل من الآلات الدوارة إلى مصدر البخار الذي يدير التوربينات البخارية، وفيه تتكرر الأفكار نفسها: حلقات متنافسة، وتغذية أمامية، ونظام حماية مستقل.

35.16 أسئلة التقييم الذاتي

1. اشرح بلغتك ما يحدث داخل الضاغط أثناء دورة الانفصال الهوائي، ولماذا ينعكس اتجاه الإزاحة المحورية.
2. ما الفرق بين الانفصال الهوائي والاختناق (Choke)؟ وأيهما يحتاج إلى نظام حماية؟
3. لماذا تُرسم خريطة منع الانفصال الهوائي بالإحداثيات ΔPo/Ps وPd/Ps بدل التدفق الحجمي والضغط؟ وما المتغير الذي لا تعوّضه هذه الإحداثيات؟

4. ضاغط ΔPo = 250 mbar وPs = 30 bara، وخط الانفصال الهوائي عند نسبة ضغطه الحالية يقابل ΔPo/Ps = 0.0070. احسب S وقرر هل يفتح الصمام إذا كان خط التحكم عند S = 1.10.

5. اذكر الاستجابات الأربع لنظام منع الانفصال الهوائي بترتيب تفعيلها، ومتى يُطلق الإيقاف.

6. لماذا يُقيَّد إغلاق صمام إعادة التدوير في السرعة ولا يُقيَّد فتحه؟

7. ما مواصفات صمام إعادة التدوير التي تميزه عن صمام تحكم عادي؟ اذكر أربعًا.

8. Ps = 15 bara وVs = 10 m³، وPd = 60 bara وVd = 5 m³. احسب ضغط الاستقرار التقريبي، وما أثره على اختيار مرسل ضغط السحب؟

9. ما مبدأ تقاسم الحمل بالتساوي في البعد عن الانفصال الهوائي؟ ولماذا لا يُتقاسم صمام إعادة تدوير بين ضاغطين؟

10. اذكر قياسات نظام السدادات الجافة الترادفية ودلالة ارتفاع تدفق التنفيس الأولي.

مراجع الفصل: R19 (أقسام التحكم بالضواغط)، وR18، وAPI 617 (الضواغط الطاردة المركزية والمحورية في خدمات النفط والغاز)، وAPI 670 (أنظمة حماية الآلات)، وAPI 614 (أنظمة التزييت والسدادات)، وASME PTC 10 (اختبار أداء الضواغط)، وأدلة مصنّعي أنظمة منع الانفصال الهوائي (Anti-Surge).

الفصل 36: أنظمة التحكم في المراجل البخارية ومولدات البخار (HRSG)

لمن هذا الفصل: لمهندس التحكم والأجهزة في محطات الطاقة والمصافي والبتروكيماويات والمصانع التي تنتج بخارًا: من يصمم أو يشغّل أو يضبط حلقات التحكم في مرجل بخاري (أنبوبي الماء أو أنبوبي النار أو مولد بخار باستعادة الحرارة HRSG)، ومن يختبر نظام إدارة الحارقات (BMS) أو يحقق في إيقاف مرجل بسبب مستوى الدرم أو ضغط الفرن. ويمهّد للفصل 37 (التوربينات البخارية والدورة المركبة) الذي ينظر إلى المرجل من جهة التوربين، ويستفيد من المرجعين R43 و R44.

الفكرة الأساسية: المرجل آلة توازن: ماء يدخل ويجب أن يساوي البخار الذي يخرج، وهواء ووقود يجب أن يبقيا في نسبة آمنة تضمن الاحتراق الكامل دون خطر الانفجار، وضغط فرن يجب أن يبقى سالبًا قليلًا قرب الصفر حتى لا يخرج اللهب ولا ينهار الفرن، وحرارة بخار يجب أن تبقى ثابتة حتى لا يتضرر التوربين. ولهذا ينقسم التحكم في المرجل إلى أربعة أنظمة (الاحتراق، وسحب الفرن، ومستوى الدرم وماء التغذية، وحرارة البخار) يقودها طلب رئيسي واحد من ضغط البخار، ويحرسها نظام إدارة الحارقات الذي لا يسمح بوجود وقود في الفرن إلا في وجود شروط الأمان.

36.1 المرجل من منظور مهندس التحكم

الأنواع: المرجل أنبوبي النار (Fire-Tube): غازات الاحتراق تمر داخل أنابيب مغمورة في الماء داخل غلاف واحد؛ سعات صغيرة إلى متوسطة وضغوط حتى نحو 20 bar؛ تحكمه بسيط (مستوى بعنصر واحد، واحتراق بموضع متوازٍ). **المرجل أنبوبي الماء (Water-**

(Tube): الماء يمر داخل أنابيب تحيط بالفرن وتصله بدرم بخار علوي (وأحيانًا درم ماء سفلي)، بضغوط من بضعة بارات إلى ما دون الحرجة بقليل (أما المراجل فوق الحرجة فهي ذات مرور واحد بلا درم)؛ وهو موضوع الفصل الرئيسي. **المرجل ذو المرور الواحد (Once-Through)** بلا درم، يتحول الماء فيه إلى بخار محمّص على طول الأنابيب ويُتحكم فيه بنسبة الماء إلى الوقود لا بالمستوى. **مولد البخار باستعادة الحرارة (HRSG)** يستخدم عادم التوربين الغازي بدل الفرن، غالبًا بثلاثة مستويات ضغط (الفصل 37). **مراجل القاع المميع (CFB)** والفحم المسحوق لها أنظمة إضافية للمطاحن والهواء الأولي وحرارة القاع.

الأجزاء التي يتعامل معها التحكم: الفرن (Furnace) والحارقات (Burners) ومنظمات الهواء (Air Registers)، والدرم (Drum) بفواصل البخار، وأنابيب الهبوط والصعود (Downcomers / Risers) التي تدور فيها المياه بالحمل الطبيعي أو بمضخة، والمحمّص (Superheater) وأحيانًا معيد التسخين، والمقتصد (Economizer) الذي يسخّن ماء التغذية بالغازات، ومسخّن الهواء، ومروحة الهواء القسري (FD) ومروحة السحب (ID) في المراجل متوازنة السحب، وصمام أو مضخة ماء التغذية، وصمامات الوقود، ومرشات التبريد (Attemperators)، والمداخن. ويبين الشكل 36-1 الأنظمة الأربعة والطلب الرئيسي ونظام إدارة الحارقات.

الشكل 36-1: *بنية التحكم في المرجل: الطلب الرئيسي من ضغط البخار يقود نظام الاحتراق (الوقود والهواء) الذي يؤثر في سحب الفرن، ونظام مستوى الدرم وماء التغذية، ونظام حرارة البخار، ونظام إدارة الحارقات يحرس الجميع بالسماحية والإيقاف.*

الشكل 36-2: *نموذج ثلاثي الأبعاد مقطوع لمرجل أنبوبي الماء: الفرن والحارقات، وأنابيب الجدران والدرم، والمحمّص والمقتصد ومسخّن الهواء في مسار الغازات، ومروحتا FD وID، مع مواقع أهم أجهزة القياس (مستوى الدرم، ضغط الفرن، تدفقات البخار والماء والوقود والهواء، الأكسجين، حرارة البخار، كاشفات اللهب).*

36.2 أجهزة القياس على المرجل

القياس	الجهاز والتركيب النموذجي	ملاحظات حاسمة
مستوى الدرم	مرسل ضغط تفاضلي بساق رطبة (وعاء تكثيف على وصلة البخار) وتعويض كثافة بحسب ضغط الدرم؛ ثلاثة مرسلات (2oo3 للحماية) على وصلات مستقلة؛ زجاج مستوى أو مؤشر مغناطيسي مباشر للتحقق (يشترطه ASME)	المدى يُحسب من هندسة الساقين وكثافتي الماء والبخار عند ضغط التشغيل (المثال في القسم 36.14)؛ خطأ الكثافة بلا تعويض قد يبلغ عشرات المليمترات

القياس	الجهاز والتركيب النموذجي	ملاحظات حاسمة
تدفق البخار	لوح فتحة أو فوهة تدفق مع تعويض ضغط وحرارة (كتلي)	يجب أن يكون بالوحدة الكتلية نفسها التي يقاس بها ماء التغذية للتحكم ثلاثي العناصر
تدفق ماء التغذية	لوح فتحة أو فوهة تدفق (Flow Nozzle) أو عداد فوق صوتي بتعويض كثافة بالحرارة (ولا يصلح العداد الكهرومغناطيسي لانخفاض موصلية الماء منزوع المعادن)	بعد المقتصد أو قبله بحسب موقع صمام التحكم
تدفق الوقود	غاز: لوح فتحة أو كوريوليس مع تعويض؛ زيت: عداد إزاحة موجبة أو كوريوليس (الفرق بين الذاهب والعائد في الأنظمة الدائرة)؛ فحم: سرعة المغذيات أو موازين السيور	يُحوَّل إلى مكافئ حراري (BTU / MJ) عند تعدد الوقود
تدفق الهواء	فنتوري أو جناح قياس (Aerofoil) أو مصفوفة أنابيب بيتو في مجرى FD أو صندوق الهواء، مع تعويض حرارة الهواء (عند تغير أكثر من نحو 28 °C)	قابلية تكرار الإشارة أهم من دقتها المطلقة؛ تُخطَّط (Characterized) مقابل الوقود؛ لا يُقاس بالضغط التفاضلي على الحارقات وحدها
ضغط الفرن (السحب)	ثلاثة مرسلات ضغط منخفض جدًا (±0.5 إلى ±2.5 kPa) على مواقع مختلفة مع خطوط نبض واسعة ومزودة بتطهير	اختيار الأوسط (Median) للتحكم؛ بلا تخميد كبير حتى تراه حماية الانفجار الداخلي
الأكسجين في الغازات	خلية زركونيا موضعية عند مخرج المقتصد	تُقارن بمحلل ثانٍ أو عينة؛ تتأثر بتسرب الهواء بعد الفرن فتقرأ أعلى من أكسجين الفرن الفعلي

القياس	الجهاز والتركيب النموذجي	ملاحظات حاسمة
أول أكسيد الكربون	محلل تحت الأحمر أو خلية كهروكيميائية	مؤشر الاحتراق غير الكامل ويُستخدم لضبط الهواء الزائد إلى الحد الأدنى الآمن
حرارة البخار ومعدن الأنابيب	مزدوجات K أو RTD عند مخرج المحمّص وبين مراحله وعلى المعادن	الحرارة بين المراحل تسبق المخرج فتصلح للحلقة الداخلية
اللهب	كاشفات بصرية (UV وIR) لكل حارق ولكل مشعل، بتمييز (Discrimination) للحارقات المجاورة	جزء من BMS؛ زمن الاستجابة أقل من نحو 4 ثوانٍ
ضغط الوقود وهواء (أو بخار) الترذيذ وحرارة الزيت	مرسلات ومفاتيح لحدود BMS	مفاتيح مستقلة للإيقاف

كيف أختار؟ القاعدة في المرجل أن يُحسم لكل قياس قبل اختيار الجهاز: تحكم أم حماية؛ فما يدخل في الحماية (مستوى الدرم، وضغط الفرن، واللهب) يُقاس بمرسلات مستقلة على وصلات مستقلة وبتصويت، وما يدخل في التحكم فقط يكفيه جهاز واحد جيد التكرار. والجدول لا يبين أثر موقع التركيب، وهو ما يحدد صحة القراءة أكثر من نوع الجهاز: محلل أكسجين بعد تسرب هواء يقرأ هواء المدخنة لا الفرن، وخط نبض ضيق على ضغط الفرن يخفي الانفجار الداخلي. والخطأ الأكثر كلفة معايرة مرسل مستوى الدرم بكثافة ماء بارد أو من الرسم بدل الارتفاعات المقيسة، فتُبنى الحماية كلها على قراءة منزاحة بعشرات المليمترات.

36.3 الطلب الرئيسي وضغط البخار (Boiler Master)

الحمل على المرجل يأتي من مستهلكي البخار: التوربين أو المجمع. **متحكم ضغط المجمع** (Plant Master) يقيس ضغط البخار الرئيسي، وانخفاضه يعني أن الطلب أكبر من الإنتاج فيرفع **طلب معدل الإشعال (Firing Rate Demand)** الذي يُوزع على المراجل المتوازية

عبر **الطلب الرئيسي لكل مرجل (Boiler Master)** بنسب حمل قابلة للضبط (Bias) ووضع يدوي/آلي لكل مرجل. ويُعزز بتغذية أمامية من تدفق البخار حتى يستجيب قبل أن يهبط الضغط كثيرًا. ومن الطلب الرئيسي تتفرع إشارتان: طلب الوقود وطلب الهواء (القسم 36.5)، وتُقيَّد سرعة تغيره بحدود معدل (Rate Limits) تحمي الفرن والمعدن من التغيرات المفاجئة. وفي محطات التوليد يعمل المرجل والتوربين معًا في **التحكم المنسق (Coordinated Control)**: طلب القدرة الكهربائية يوزَّع بين صمامات التوربين (استجابة سريعة من الطاقة المخزنة في المرجل) ومعدل الإشعال (استجابة أبطأ)، بأوضاع «المرجل يتبع» أو «التوربين يتبع» أو «منسق»، ويُشرح في القسم 37.5.

الشكل 36-3: *الطلب الرئيسي: متحكم ضغط المجمع مع تغذية أمامية من تدفق البخار يعطي طلب معدل الإشعال، ويوزعه على المراجل بنسب حمل ووضع لكل مرجل، ومنه يتفرع طلب الوقود وطلب الهواء بحدود معدل.*

36.4 استراتيجيات التحكم الخمس في المرجل

يجمع التحكم في المرجل الاستراتيجيات الخمس الأساسية (R44): **التغذية الراجعة البسيطة** (ضغط الفرن على مروحة ID في أبسط صورة)، و**التغذية الأمامية مع الراجعة** (تدفق البخار يُضاف إلى مستوى الدرم)، و**التعاقب (Cascade)** (المستوى يعطي نقطة ضبط لحلقة تدفق الماء الأسرع؛ ويُفضَّل أن يكون ثابت زمن الحلقة الخارجية 5 إلى 10

أضعاف ثابت الداخلية)، و**النسبة (Ratio)** (الهواء إلى الوقود)، و**التغذية الأمامية** الخالصة (طلب الإشعال إلى سحب الفرن). ومن المتطلبات المعتادة في التحكم بالمراجل **الانتقال بلا صدمة (Bumpless Transfer)** بين اليدوي والآلي، ويحققه تتبع نقطة الضبط للقيمة المقاسة في أنظمة DCS. وتُرسم استراتيجيات المراجل تقليديًا برموز SAMA (رموز جمعية مصنّعي أجهزة القياس العلمية: رموز وظيفية للكتل والمجمعات والمحددات تُكمّل رموز ISA-5.1 التي يشرحها الفصل 5) التي تبين المتحكمات والمحددات والمجمعات بوضوح أكبر من رموز ISA للحلقات المتشابكة.

36.5 التحكم في الاحتراق: الوقود والهواء

الهدف: تلبية طلب الإشعال بوقود يكفي، مع هواء زائد يضمن الاحتراق الكامل ولا يزيد على الحاجة لأن الهواء الزائد يحمل حرارة إلى المدخنة ويخفض الكفاءة)، وبحيث لا يكون الفرن غنيًا بالوقود في أي لحظة، حتى أثناء التغيرات.

التموضع المتوازي (Parallel / Jackshaft Positioning): في المراجل الصغيرة ومراجل الوقود غير القابل للقياس، يحرك طلب الإشعال صمام الوقود ومصراع الهواء معًا بعلاقة موضعية مخططة (كامة ميكانيكية أو منحنى في المتحكم)، دون قياس تدفق. بسيط ورخيص وسريع، لكنه محدود نسبة المدى (Turndown) وغير دقيق: تغير حرارة الوقود أو ضغطه أو كثافة الهواء أو عدد الحارقات العاملة يغير النسبة الحقيقية دون أن يعلم النظام، ويُصحح ذلك بضبط نسبة يدوي محدود أو بضبط الأكسجين.

التحكم المقاس (Metered / Fully Metered): يُقاس تدفق الوقود وتدفق الهواء، وتُغلق حلقة على كل منهما: متحكم تدفق الوقود نقطة ضبطه طلب الوقود، ومتحكم تدفق الهواء نقطة ضبطه طلب الهواء (تدفق الوقود × النسبة). وهو الأساس في المراجل الصناعية والمرافق.

التقييد المتقاطع (Cross-Limiting / Lead-Lag): الحماية من الفرن الغني بالوقود أثناء التغيرات: عند **زيادة الحمل** يجب أن يسبق الهواء الوقود، وعند **خفضه** يجب أن يسبق الوقود الهواء (أي يتأخر الهواء). يتحقق ذلك بمحددين (الشكل 36-4):

- **طلب الهواء = المختار الأعلى (High Select)** بين طلب الإشعال وتدفق الوقود المقاس (مضروبًا في النسبة): فإذا زاد الطلب ارتفع طلب الهواء فورًا، وإذا انخفض الطلب بقي طلب الهواء عند تدفق الوقود الفعلي حتى ينخفض الوقود فعلًا.
- **طلب الوقود = المختار الأدنى (Low Select)** بين طلب الإشعال وتدفق الهواء المقاس (مقسومًا على النسبة): فإذا زاد الطلب بقي طلب الوقود عند ما يسمح به الهواء الفعلي حتى يزيد الهواء، وإذا انخفض الطلب انخفض الوقود فورًا.

وهكذا لا يستطيع الوقود أن يتجاوز ما يدعمه الهواء في أي اتجاه. وتُضاف حدود دنيا: تدفق هواء لا يقل عن نحو 25% من الأقصى (حد التطهير)، ووقود لا يقل عن الحد الأدنى المستقر للحارقات.

ضبط الأكسجين (O_2 Trim): النسبة المثالية تتغير مع الحمل: عند الأحمال المنخفضة يحتاج المرجل إلى هواء زائد أكبر (خلط أضعف)، وعند الأحمال العالية أقل. تُعطى لمتحكم الأكسجين نقطة ضبط تعتمد على الحمل (منحنى: مثلًا 5% O_2 عند 25% حمل و2.5% عند 100% حمل للغاز)، ويعدّل خرجه نسبة الهواء إلى الوقود ضمن حدود ضيقة (±10 إلى 15%) بحيث لا يستطيع محلل معطوب أن يخنق الهواء. وتُكمل بعض الأنظمة الضبط بأول أكسيد الكربون (CO Trim) للوصول إلى أقل هواء زائد آمن (حيث يبدأ CO في الارتفاع). والعلاقة بين الأكسجين في الغازات الجافة والهواء الزائد تقريبًا: الهواء الزائد % ≈ 100 × (O_2 − 20.9) ÷ O_2؛ فـ 3% أكسجين تعني نحو 17% هواء زائدًا.

تعدد الوقود: حين يحترق غاز وزيت أو غاز بمصدرين، تُحوَّل التدفقات إلى مكافئ حراري وتُجمع، وتُحسب نسبة الهواء لكل وقود على حدة (الهواء النظري لكل وحدة حرارة يختلف

قليلًا بين الوقودين) ثم تُجمع طلبات الهواء. وفي الحارقات منخفضة أكاسيد النيتروجين قد يُشغَّل جزء من الاحتراق بهواء أقل من المتكافئ (Sub-Stoichiometric) مع هواء تكميلي لاحق (Overfire Air)، ويحتاج ذلك إلى قياس دقيق للهواء الأولي والثانوي.

الشكل 36-4: *التحكم المقاس في الاحتراق مع التقييد المتقاطع: طلب الهواء من المختار الأعلى وطلب الوقود من المختار الأدنى، فيسبق الهواء عند الزيادة ويتأخر عند النقصان، وضبط الأكسجين بنقطة ضبط تعتمد على الحمل يعدّل النسبة ضمن حدود.*

مثال محلول (التقييد المتقاطع): مرجل عند 60% حمل، النسبة المضبوطة تجعل تدفق الهواء = 1.0 × تدفق الوقود بالوحدات النسبية. يقفز طلب الإشعال من 60 إلى 80%.

- طلب الهواء = المختار الأعلى بين طلب الإشعال وتدفق الوقود المقاس
- طلب الهواء = الأعلى بين 80 (الطلب) و60 (الوقود المقاس) = 80% فورًا.
- طلب الوقود = المختار الأدنى بين طلب الإشعال وتدفق الهواء المقاس
- طلب الوقود = الأدنى بين 80 و60 (الهواء المقاس) = 60%، ولا يرتفع إلا مع ارتفاع الهواء الفعلي؛ فإذا صار الهواء 70% صار طلب الوقود 70%، وهكذا حتى 80%.
- عند خفض الطلب إلى 40%: طلب الوقود = الأدنى بين 40 و80 (الهواء) = 40% فورًا.
- طلب الهواء = الأعلى بين 40 و80 (الوقود المقاس) = 80% حتى ينخفض الوقود فعلًا.
- التفسير: في الحالتين لم يسبق الوقود الهواء.

36.6 سحب الفرن

في المراجل **متوازنة السحب (Balanced Draft)** تدفع مروحة FD الهواء وتسحب مروحة ID الغازات، ويُضبط ضغط الفرن على قيمة سالبة قليلًا (نحو 25− إلى 75− Pa، أي 0.1− إلى 0.3− inH_2O في المراجل الصناعية، وأكثر سلبية في المرافق الكبيرة) حتى لا تخرج الغازات واللهب من فتحات الفرن، ويُبقى السالب صغيرًا حتى لا يزيد تسرب الهواء غير المقاس إلى الداخل. تُقاس بثلاثة مرسلات ويُختار الأوسط، ويتحكم متحكم واحد (PI) في مصراع أو ريش مروحة ID أو سرعتها، مع **تغذية أمامية من خرج متحكم**

الهواء (FD): كل تغير في الهواء الداخل يُتوقع أثره في الضغط قبل أن يحدث. وحين تتوافر السرعة والمصراع معًا يُستخدم **المدى المقسوم (Split Range)**: المصراع يفتح بالكامل عبر 0 إلى نحو 60% من الإشارة والسرعة ترتفع عبر نحو 40 إلى 100% مع تداخل في الوسط حيث الاستجابة أفضل.

حماية الانفجار الداخلي (Implosion): عند الإيقاف الرئيسي للوقود (MFT) يختفي اللهب فجأة فتنكمش الغازات ويهبط ضغط الفرن هبوطًا حادًا قد يهدم جدران الفرن. لذلك تشمل فلسفة NFPA 85 للمراجل الكبيرة: تحكمًا انتقائيًا فوريًا (Override) عند MFT يغلق مصراع ID جزئيًا أو يثبّت وضعه مع إبقاء FD عند معدل التطهير، ومحددات اتجاهية على معدل تغير طلب ID، وحدودًا عليا ودنيا لضغط الفرن تُطلق إنذارًا ثم إيقافًا (ضغط مرتفع جدًا يوقف الوقود، وضغط منخفض جدًا يقيد ID ثم يوقف الوقود).

الشكل 36-5: *التحكم في سحب الفرن: متحكم ضغط الفرن من الأوسط بين ثلاثة مرسلات، بتغذية أمامية من خرج متحكم الهواء، يقود مصراع وسرعة مروحة ID بمدى مقسوم، مع تحكم انتقائي (Override) لحماية الانفجار الداخلي عند الإيقاف الرئيسي للوقود.*

36.7 مستوى الدرم وماء التغذية

لماذا المستوى صعب؟ مستوى الدرم ليس مستوى ماء ساكن بل خليط ماء وفقاعات بخار. عند زيادة الطلب على البخار ينخفض ضغط الدرم فتتمدد الفقاعات ويرتفع المستوى ظاهريًا **(الانتفاخ، Swell)** مع أن الماء يقل؛ وعند انخفاض الطلب يرتفع الضغط فتنكمش الفقاعات ويهبط المستوى **(الانكماش، Shrink)** مع أن الماء يزيد. فالمتحكم البسيط الذي يرى المستوى وحده يتصرف عكس ما يجب في اللحظات الأولى: يغلق الماء عند زيادة

الحمل فيصل الدرم إلى مستوى منخفض جدًا ويُوقف المرجل. وحدود التشغيل ضيقة: مستوى مرتفع يحمل الماء إلى المحمّص والتوربين (Carryover)، ومستوى منخفض يكشف أنابيب الصعود فتحترق.

التحكم أحادي العنصر (Single-Element): المستوى فقط → صمام ماء التغذية. يكفي للأحمال الثابتة والمراجل الصغيرة، ويُستخدم في البدء والأحمال المنخفضة (تحت نحو 25 إلى 30%) حيث تكون قياسات التدفق غير موثوقة.

التحكم ثنائي العنصر (Two-Element): تدفق البخار يُضاف تغذيةً أمامية إلى خرج متحكم المستوى، فيفتح صمام الماء فور زيادة البخار متجاهلًا الانتفاخ. يعالج الانتفاخ والانكماش لكنه لا يعالج تغير ضغط مجمع ماء التغذية (التدفق يتغير عند الفتحة نفسها).

التحكم ثلاثي العناصر (Three-Element): الأشهر في المراجل الصناعية والمرافق: تدفق البخار (كتلي) + تصحيح من متحكم المستوى = نقطة ضبط لمتحكم تدفق ماء التغذية، الذي يحرك الصمام أو سرعة المضخة. فالماء يلاحق البخار كتلة بكتلة، ويصحح متحكم المستوى الفروق البطيئة (النفخ والتسرب وأخطاء القياس). ويجب أن يكون التدفقان بالوحدة الكتلية نفسها ومعايرين معًا، وإلا حمل متحكم المستوى انحيازًا دائمًا. ويجري الانتقال التلقائي من أحادي إلى ثلاثي العناصر عند تجاوز الحمل حدًا (ويُعكس عند انخفاضه).

ماء التغذية: يُتحكم بالتدفق بصمام تحكم مع صمام بدء صغير للأحمال المنخفضة، أو بسرعة مضخة ماء التغذية (توفير كبير في الطاقة) مع ضبط فرق الضغط عبر الصمام عند حد أدنى، وتُحمى المضخة بإعادة تدوير عند التدفق الأدنى.

الشكل 36-6: *مستوى الدرم: استجابة المستوى للانتفاخ والانكماش عند تغير الحمل، ومخطط التحكم ثلاثي العناصر: تدفق البخار مع تصحيح متحكم المستوى يعطي نقطة ضبط متحكم تدفق ماء التغذية، مع الانتقال إلى أحادي العنصر في الأحمال المنخفضة.*

مثال محلول (ثلاثي العناصر): مرجل 100 t/h. عند حمل ثابت يقيس تدفق البخار 80 t/h ويخرج متحكم المستوى تصحيحًا +2 t/h (لتعويض النفخ المستمر).

- نقطة ضبط تدفق الماء = تدفق البخار + تصحيح المستوى
- في الحالة المستقرة: 80 + 2 = 82 t/h.
- يقفز الحمل إلى 95 t/h فيرتفع المستوى مؤقتًا بالانتفاخ 30 mm، ويهبط خرج متحكم المستوى إلى 3− t/h.
- نقطة الضبط الجديدة = 95 − 3 = 92 t/h.
- التفسير: الماء زاد رغم ارتفاع المستوى، وهذا الصواب؛ ثم يعود التصحيح إلى نحو +2 بعد زوال الانتفاخ فتصبح نقطة الضبط 97 t/h. في النظام أحادي العنصر كان الصمام سيغلق مع الانتفاخ ثم يفتح متأخرًا بعد أن يهبط المستوى، وتعرض الحالة الميدانية في القسم 37.12 أثر هذا السلوك في البدء الساخن.

36.7.1 ثلاثي العناصر خطوة بخطوة: البنية والمعادلة وما يُخطئ فيه الناس

ثلاثة متغيرات لا ثلاثة حساسات: «ثلاثي العناصر» يعني ثلاث كميات مقاسة مختلفة (مستوى الدرم LT، وتدفق البخار الخارج FT-S، وتدفق ماء التغذية الداخل FT-W) تجتمع لتحريك صمام ماء التغذية، لا ثلاثة مرسلات مستوى تصوّت 2oo3. قد تُركَّب عدة مرسلات مستوى للاعتمادية، لكنها تعطي متغيرًا واحدًا. والفكرة في جملة: **تدفق البخار يحدد كمية التعويض، وتدفق ماء التغذية يؤكد ما دخل فعلًا، ومستوى الدرم يصحح ما تبقى من فرق.**

البنية: تعاقب + تغذية أمامية (الشكل 36-7 أ): حلقتان لا ثلاث: متحكم المستوى LIC (الرئيسي) يقارن المستوى بنقطة ضبطه ويُخرج **تصحيح المستوى (Level Trim)** بوحدة تدفق؛ يُجمع هذا التصحيح مع تدفق البخار (وتعويض النفخ إن أُفرد) ليعطي نقطة ضبط متحكم تدفق ماء التغذية FIC (التابع)، الذي يقارنها بالتدفق الفعلي ويحرك الصمام. مواضع كتل الجمع والتحجيم تختلف بين الشركات، والوظيفة واحدة.

المعادلة والتحجيم:

$$F_FW,SP = F_S + F_BD + \Delta F_L$$

حيث F_FW,SP نقطة ضبط تدفق ماء التغذية، وF_S تدفق البخار، وF_BD تعويض النفخ (Blowdown؛ قد يُدمج ضمن خرج LIC بدل إفراده)، وΔF_L تصحيح المستوى. القاعدة الحاكمة: **الجمع بالتدفق الكتلي (t/h) بعد تصحيح الكثافة بالضغط والحرارة لكل عداد**؛ فخرج متحكم مستوى قدره 60% لا يعني 60 t/h، ولا تُجمع النسب المئوية الخام؛ يُحدد لكل إشارة مداها ونقطة تعادلها وانحيازها (Bias) بما يوافق مديات الأجهزة.

مثال محلول (الجمع بالأرقام):

- **المعطيات:** نقطة ضبط المستوى 50%، تدفق البخار 100 t/h، النفخ 2 t/h.
- **الافتراضات:** قيم التصحيح افتراضية لشرح الجمع، لا معاملات PID.
- **الحل بالوحدات:**

الحالة	تدفق البخار	تعويض النفخ	تصحيح المستوى	نقطة ضبط ماء التغذية
مستقرة	100	2	0	**102 t/h**
قفز الحمل إلى 120، قبل أي تصحيح	120	2	0	**122 t/h**
الحمل نفسه والمستوى يحتاج رفعًا	120	2	+3	**125 t/h**
الحمل نفسه والمستوى يحتاج خفضًا	120	2	−3	**119 t/h**

- **معنى النتيجة:** إشارة البخار وحدها رفعت الطلب من 102 إلى 122 t/h فورًا دون انتظار هبوط المستوى (هذا هو دور التغذية الأمامية)؛ وقد يتساوى البخار والماء ومع ذلك يبقى المستوى منزاحًا، فيعيده تصحيح LIC البطيء.

لماذا يلزم قياس ماء التغذية فعلًا؟ لأن **فتحة الصمام ليست قياسًا للتدفق**: عند الفتحة نفسها يتغير التدفق مع ضغط مجمع التغذية، خاصة حين تتشارك عدة مراجل مضخات ومجمعًا واحدًا. المطلوب 102 t/h فيهبط ضغط التغذية ويصير الفعلي 95 t/h: مع FT-W يرى FIC الخطأ ويفتح الصمام حتى يعود 102 (ما دام الضغط والسعة يسمحان)؛ وبدونه لا يضمن تغيير الفتحة وصول الكمية (الشكل 36-7 ب). هذه هي إضافة العنصر الثالث.

> **تنبيه في التسمية:** الشائع أن «ثنائي العناصر» = مستوى + تدفق بخار، لكن بعض المراجع تسمي (مستوى + تدفق ماء التغذية) ثنائيًا أيضًا؛ عند مراجعة مخطط قائم انظر إلى الإشارات الداخلة فعلًا لا إلى الاسم.

البدء والأحمال المنخفضة: تحت مدى القياس الموثوق للعدادين تصير إشارات التدفق ضجيجًا يزعزع الحلقة، فتُشغَّل الحلقة أحادية العنصر (LIC مباشرة إلى الصمام أو إلى صمام البدء). حدّ الانتقال ليس «30%» ثابتًا لكل المراجل بل يُحدد من مدى العدادات

وتصميم الوحدة، ويجب أن يكون الانتقال في الاتجاهين **سلسًا (Bumpless)**: تتبّع خرج المتحكم غير الفعال لخرج الفعال، ومنع تشبع التكامل (القسم 18.9).

ما يُخطئ فيه الناس: (1) ضبط LIC بسرعة كأنه حلقة تدفق؛ حلقة FIC هي السريعة وLIC يُضبط لديناميكا الدرم والانتفاخ والانكماش، ولا توجد معاملات واحدة تصلح لكل المراجل. (2) الظن أن تعويض كثافة قياس المستوى بالضغط يلغي ظاهرة الانتفاخ والانكماش؛ التعويض يصحح القراءة، والظاهرة فيزيائية تبقى. (3) عداد بخار وعداد ماء بمعايرتين مختلفتين، فيحمل LIC انحيازًا دائمًا. (4) اعتبار الحلقة بديلًا عن الحماية: حدود المستوى الخطرة (LSLL/LSHH) وإيقاف الوقود واختبار أجهزتها تبقى في BMS/SIS المعتمد (القسم 36.10)، لا في متحكم المستوى.

الشكل 36-7: *(أ) مسار الإشارات في التحكم ثلاثي العناصر بالأرقام: LIC الرئيسي يعطي تصحيح المستوى، ويُجمع مع تدفق البخار وتعويض النفخ ليعطي نقطة ضبط FIC التابع الذي يحرك صمام ماء التغذية؛ (ب) فتحة الصمام ليست قياسًا للتدفق: هبوط ضغط التغذية يخفض التدفق عند الفتحة نفسها، وFIC يعوّضه بفتح الصمام.*

جدول مقارنة: استراتيجيات التحكم في مستوى الدرم

المعيار	أحادي العنصر	ثنائي العناصر	ثلاثي العناصر
الإشارات	المستوى فقط	المستوى + تدفق البخار (تغذية أمامية)	المستوى + تدفق البخار + تدفق ماء التغذية
الاستجابة للانتفاخ والانكماش	سيئة (يتحرك عكس الاتجاه الصحيح)	جيدة	الأفضل
تأثير تغير ضغط ماء التغذية	لا يُعوَّض	لا يُعوَّض	يُعوَّض بحلقة التدفق الداخلية
متى يكفي	الأحمال المنخفضة والبدء (أقل من نحو 25 إلى 30%)	مراجل صغيرة بحمل شبه ثابت	المراجل والـ HRSG الصناعية عند الحمل
التبديل	يدوي أو آلي حسب الحمل	—	يعود آليًا إلى الأحادي تحت حد التدفق
مصادر الخطأ	كثافة الماء مع الضغط (تعويض المستوى)	خطأ تدفق البخار عند الأحمال المنخفضة	عدم تطابق معايرة عدادي البخار والماء

كيف أختار؟ ابدأ من الحمل وقياس التدفق: إن كان الحمل شبه ثابت أو المرجل صغيرًا فأحادي العنصر يكفي، وإن تغير الحمل ووُجد عداد بخار موثوق فثنائي على الأقل، وإن كانت مضخات التغذية مشتركة أو ضغط المجمع متغيرًا فلا بديل عن ثلاثي العناصر. والجدول لا يبين أن الاختيار ليس ثابتًا في المرجل الواحد: البدء والأحمال المنخفضة أحادية دائمًا مهما كان التصميم، فالانتقال السلس بين الوضعين جزء من الاختيار لا تفصيل لاحق. والخطأ الأكثر كلفة تركيب ثلاثي العناصر بعدادي بخار وماء بوحدتين أو معايرتين مختلفتين، فيحمل متحكم المستوى انحيازًا دائمًا ويُتهم الضبط، والعيب في القياس.

36.7.2 التحكم الضبابي ثلاثي العناصر بمستوى الدرم ومضخة التغذية متغيرة السرعة: خلاصة دراسة للمؤلف

هذا القسم يلخص دراسة أعدها المؤلف (R59) على مولد بخار باستعادة الحرارة (HRSG) في محطة دورة مركبة بقدرة 300 MW، تعمل بتحكم ثلاثي العناصر تقليدي (PID) مع صمام تحكم عنصرًا نهائيًا، وقُورن به **متحكم منطق ضبابي (Fuzzy Logic Controller)** ثلاثي العناصر يُخرج **سرعة مضخة التغذية** بدل فتحة الصمام. الغرض هنا عملي: متى يستحق الضبابي التجربة، وكيف يُبنى، وماذا ينتظر منه المهندس.

لماذا يُفكَّر في غير PID أصلًا؟ لأن ديناميكا الدرم تتغير مع الحمل (ظاهرة الانتفاخ والانكماش، القسم 36.7)، فمعاملات PID التي تُضبط عند حمل معين تكون بطيئة أو متذبذبة عند غيره، ولا يوجد ضبط واحد يحسن تتبع نقطة الضبط ورفض الاضطراب معًا. المنطق الضبابي لا يحتاج نموذجًا رياضيًا؛ يصوغ خبرة المشغل («إذا كان المستوى منخفضًا قليلًا والبخار يزيد على الماء، فارفع سرعة المضخة كثيرًا») في قواعد IF–THEN.

بناء المتحكم خطوة بخطوة (الشكل 36-8 أ، ب):

1. **الدخلان والخرج:** الدخل 1 خطأ المستوى dml = SP − DML_sp (نقطة الضبط ناقص المستوى المقاس)؛ الدخل 2 فرق التدفق fwf = MSF − MFWF_sf (تدفق البخار المقاس ناقص تدفق ماء التغذية المقاس)؛ الخرج PS سرعة المضخة. لاحظ أن الدخل 2 هو جوهر «ثلاثي العناصر»: فرق كتلي فوري لا ينتظر المستوى.
2. **التضبيب (Fuzzification):** خمس مجموعات لغوية لكل دخل (سالب، سالب صغير، صفر، موجب صغير، موجب) بدوال انتماء غاوسية متداخلة، وخمس للخرج (سرعة منخفضة جدًا، منخفضة، عادية، عالية، عالية جدًا) على مدى تشغيلي محدود يبقى فيه ضغط طرد المضخة أعلى من ضغط الدرم وفوق حد التدفق الأدنى الآمن (نحو 2,400 إلى 3,000 rpm).

3. **قاعدة القواعد:** 5 × 5 = 25 قاعدة، منها مثلًا: إذا كان خطأ المستوى سالبًا (المستوى فوق نقطة الضبط) وفرق التدفق سالبًا (الماء أكثر من البخار) ← سرعة منخفضة جدًا؛ إذا كان خطأ المستوى سالبًا وفرق التدفق موجبًا ← سرعة عادية؛ إذا كان خطأ المستوى موجبًا صغيرًا وفرق التدفق صفرًا ← سرعة عالية.
4. **الاستدلال وإزالة التضبيب:** استدلال ممداني (Mamdani)، وإزالة التضبيب بمركز الثقل (Center of Gravity) لإخراج قيمة سرعة واحدة تُرسل إلى محول التردد (VFD).
5. **الاختبار على النموذج:** نموذج الدرم من موازنتي الكتلة والطاقة للدرم والأنابيب الصاعدة (Risers) بمتغيرات حالة: حجم الماء الكلي، ضغط الدرم، كسر البخار في الصاعد، حجم البخار تحت المستوى؛ ومداخل: الحرارة المضافة، وتدفق ماء التغذية، وتدفق البخار. الاختباران القياسيان: خطوة نقطة ضبط (0 ← 5 cm)، وخطوة طلب بخار (10% ← 20%).

الشكل 36-8: *التحكم الضبابي ثلاثي العناصر بمستوى الدرم (خلاصة دراسة المؤلف، R59): (أ) دوال الانتماء للدخلين والخرج؛ (ب) بنية المتحكم وخرجه سرعة المضخة؛ (ج) و(د) استجابة المستوى لخطوة نقطة ضبط ولاضطراب حمل البخار، PID مقابل الضبابي (إعادة رسم نوعية لنتائج المحاكاة)؛ (هـ) قدرة محرك المضخة بالصمام مقابل السرعة المتغيرة؛ (و) خلاصة المقارنة.*

النتائج وما تعنيه للمهندس:

الاختبار	PID ثلاثي العناصر (صمام)	ضبابي ثلاثي العناصر (سرعة المضخة)	الخلاصة
خطوة نقطة ضبط 0 ← 5 cm	تجاوز صغير واستقرار أسرع	تجاوز أكبر وتذبذب قبل الاستقرار	**PID أفضل في تتبع نقطة الضبط**
خطوة طلب بخار %20 ← %10	تذبذب ±10 cm لعدة دورات	انحراف واحد نحو 9− cm ثم استقرار	**الضبابي أفضل في رفض الاضطراب**
تدرج (Ramp) في تدفق البخار	انحراف مستمر أثناء التدرج	انحراف أقل	الضبابي يستفيد من دخل فرق التدفق مباشرة

الدرس العملي: في مرجل توليد تتغير أحماله كثيرًا، رفض الاضطراب هو ما يهم (نقطة ضبط المستوى نادرًا ما تتغير)، فالضبابي أو أي متحكم يستعمل فرق التدفق مباشرة يستحق النظر؛ وفي مرجل ثابت الحمل يكفي PID مضبوط جيدًا. والقاعدة الحاكمة في الحالين: **حدود المستوى الخطرة وإيقاف الوقود تبقى في BMS/SIS** (القسم 36.10) بمعزل عن أي متحكم، ضبابيًا كان أو تقليديًا.

المضخة متغيرة السرعة بدل الصمام: حساب التوفير

في المحطة المدروسة ثلاث مضخات تغذية طاردة مركزية كبيرة، اثنتان تعملان والثالثة احتياط، وتعمل كل مضخة بسرعتها المقننة على الدوام بينما يخنق صمام التحكم التدفق. تغيير السرعة بمحول تردد (مقوّم + عاكس) يخفض القدرة الممتصة بشدة (قوانين التشابه للمضخات الطاردة: التدفق $\propto N$، والرأس $\propto N^2$، والقدرة $\propto N^3$، وذلك في غياب رأس ساكن؛ ويقل التوفير الفعلي في مضخات التغذية لأن ضغط الدرم رأس ساكن كبير)، فيُوفَّر ما كان يُبدد في الصمام.

مثال محلول (تكلفة الطاقة السنوية):

- **المعطيات:** نقطة تشغيل محرك كل مضخة عند السرعة المقننة 500 kW؛ متوسط القدرة بالسرعة المتغيرة 328 kW؛ ساعات التشغيل 8,640 h/yr لكل مضخة؛ تعرفة 0.028 دينار/kWh؛ مضختان في الخدمة.
- **الافتراضات:** المتوسط 328 kW يمثل توزيع الأحمال على السنة؛ كفاءة المحول ضمن الرقم؛ لا تغيير في ساعات التشغيل.
- **الحل بالوحدات:**
  - بالصمام: التكلفة = الساعات × التعرفة × القدرة = 8,640 × 500 × 0.028 = 120,960 دينار/سنة لكل مضخة، أي **241,920 دينار/سنة** لمضختين.
  - بالسرعة المتغيرة: 8,640 × 328 × 0.028 = 79,349.76 دينار/سنة لكل مضخة، أي **158,699.52 دينار/سنة** لمضختين.
  - التوفير = 241,920 − 158,699.52 = **83,220.48 دينار/سنة** (نحو 34%).
- **معنى النتيجة:** التوفير يأتي من العنصر النهائي (السرعة بدل الخنق) لا من نوع المتحكم؛ فيمكن الجمع بين PID ومحول تردد أيضًا. وعند دراسة الجدوى أضف تكلفة المحول والحرارة في غرفة الكهرباء والتوافقيات التي يحقنها المحول في الشبكة وقد تستلزم مرشحات (يُفصَّل في الفصل 92 من الجزء القادم)، واحسب فترة الاسترداد؛ وتذكر أن المضخة عند سرعة منخفضة يجب أن تبقى فوق الحد الأدنى للتدفق الآمن (Minimum Flow) وأن ضغط التغذية يجب أن يظل أعلى من ضغط الدرم بهامش يكفي لهبوط الضغط عبر الصمام.

حدود التعميم: النتائج من محاكاة نموذج مُعاير على محطة واحدة؛ قبل تطبيق متحكم ضبابي على مرجل فعلي: (1) ابدأ به في وضع «مراقبة» بالتوازي مع PID وقارن خرجيهما؛

(2) حدد سلوكه عند فشل أي دخل (تجميد أو عودة إلى PID)؛ (3) وثّق القواعد كأنها معاملات ضبط تخضع لإدارة التغيير (MOC)؛ (4) لا تعتمد على أي متحكم في تجاوز حدود المستوى الخطرة.

36.8 حرارة البخار

الهدف ثبات حرارة البخار المحمّص عند مخرج المرجل (مثلًا 540 °C) ضمن ±5 °C عبر مدى الحمل، لأن كل ارتفاع يقصّر عمر أنابيب المحمّص وصمامات التوربين، وكل انخفاض يزيد رطوبة المراحل الأخيرة في التوربين ويخفض الكفاءة. والوسيلة الرئيسية **الرش (Attemperation / Desuperheating)**: حقن ماء مغذٍ نقي في البخار بين مراحل المحمّص عبر صمام رش، فتنخفض الحرارة بالتبخر. ووسائل أخرى: إمالة الحارقات (Burner Tilt) في مراجل الفحم، وإعادة تدوير غازات المدخنة، وتجاوز جزء من الغازات، وتقسيم المرور في المحمّص.

- **أحادي العنصر:** حرارة المخرج → صمام الرش. بطيء (ثوابت زمنية دقائق) ولا يصلح إلا للأحمال الثابتة.
- **ثنائي العنصر:** حلقة تعاقبية: حرارة المخرج (خارجية) تعطي نقطة ضبط حرارة ما بعد الرش مباشرة (داخلية سريعة)، فيُصحح اضطراب الرش قبل أن يصل إلى المخرج.
- **ثلاثي العناصر:** تعاقبية مع تغذية أمامية من الحمل (تدفق البخار أو الهواء أو طلب الإشعال) لأن الحرارة ترتفع مع الحمل في المحمّصات الحملية (Convective) وتنخفض في الإشعاعية؛ وهذا الترتيب المعتمد في محطات التوليد.

قيود التصميم: حرارة ما بعد الرش يجب أن تبقى فوق التشبع بهامش (نحو 10 إلى 20 °C) وإلا حُملت قطرات ماء إلى المحمّص التالي، وصمام الرش ينبغي ألا يعمل عند أقل من 5 إلى 10% فتحة، ويُحد الرش في الأحمال المنخفضة. وفي معيد التسخين يُفضَّل ضبط

الحرارة بالغازات (الإمالة أو إعادة التدوير) والرش للطوارئ فقط لأن رش معيد التسخين يخفض كفاءة الدورة.

الشكل 36-9: *التحكم في حرارة البخار المحمّص: ترتيب المحمّص بمرحلتين وبينهما مرش، والحلقة التعاقبية ثنائية العناصر بحرارة ما بعد الرش حلقةً داخلية، مع تغذية أمامية من الحمل في الترتيب ثلاثي العناصر.*

36.9 نظام إدارة الحارقات (BMS) وفق NFPA 85

نظام إدارة الحارقات (Burner Management System) نظام سلامة مستقل عن التحكم بالاحتراق، وظيفته أن يمنع وجود وقود في الفرن إلا بشروط، وأن يوقف الوقود كله (Master Fuel Trip – MFT) عند أي خطر، وأن يدير تسلسل الإشعال والإيقاف. تحكمه NFPA 85 (مخاطر المراجل وأنظمة الاحتراق) مع NFPA 86 للأفران والمعايير الأوروبية EN 12952/12953 وEN 50156، ويُحدَّد مستوى سلامته من تحليل المخاطر، وهو غالبًا SIL 1 أو SIL 2 وقد يبلغ SIL 3 وتنطبق عليه دورة حياة الفصل 29، ويُنفَّذ في محلل منطقي معتمد للسلامة ومنفصل عن DCS.

التطهير (Purge): قبل أي إشعال يجب طرد أي وقود متراكم من الفرن ومسارات الغازات. للمراجل متعددة الحارقات: تدفق هواء لا يقل عن 25% ولا يزيد على 40% من هواء الحمل الأقصى، لمدة لا تقل عن 5 دقائق أو 5 تغيرات حجمية للفرن ومسارات الغازات حتى المدخنة أيهما أطول (R44 عن NFPA 85). للمرجل أحادي الحارق: تدفق لا يقل عن 70% من هواء الحمل الأقصى ولمدة لا تقل عن 8 تغيرات حجمية، وللمرجل أنبوبي النار 4 تغيرات على الأقل (القيم من R44، وتُطابَق مع طبعة NFPA 85 المعتمدة في المشروع لأنها تتغير بين الطبعات) مع المصراع مفتوحًا بالكامل. ولمولدات HRSG: سرعة كافية في مجرى الوصل بعدد تغيرات محدد، وقد تُعفى الوحدات ذات التصميم المناسب من إعادة التطهير عند إعادة البدء السريع وفق شروط. وأثناء التطهير يُتحقق من شروط: صمامات الوقود مغلقة ومثبتة، ومصاريع الهواء في وضع التطهير، ولا لهب مكشوف، وتدفق الهواء فوق الحد.

تسلسل الإشعال: بعد التطهير تُغلق مصاريع الهواء إلى وضع الإشعال، ويُسمح بالمشعل (Igniter) بشرارة و**زمن تجربة الإشعال** محدود (عادة 10 ثوانٍ للمشعل)، فإذا لم يُكشف اللهب أُغلق الوقود وحُظرت المحاولة لمدة دقيقة على الأقل قبل إعادة التجربة دون إعادة تطهير ما دام الهواء عند معدل التطهير، وبعد عدد محدود من المحاولات تلزم إعادة التطهير. ثم يُفتح وقود الحارق الرئيسي مع مشعله في زمن تجربة محدود، ويُثبت اللهب الرئيسي، ويُطفأ المشعل (في الفئة 1 من المشاعل قد يبقى)، ويُنقل التحكم بالاحتراق إلى الآلي عند النار الدنيا (Low Fire). والإيقاف الطبيعي يتم بعكس التسلسل مع **تطهير لاحق (Post-Purge).**

أسباب الإيقاف الرئيسي للوقود (MFT) النموذجية: فقد اللهب في كل الحارقات (أو في أي حارق في الفئات الأدنى)، وتدفق هواء أقل من الحد (نحو 25%)، وضغط فرن مرتفع جدًا أو منخفض جدًا، ومستوى درم منخفض جدًا (2oo3) أو مرتفع جدًا، وفقد مروحة ID أو FD، وضغط وقود منخفض أو مرتفع خارج حدود التشغيل، وفقد هواء (أو بخار) الترذيذ لزيت الوقود، وفقد التغذية أو هواء الأجهزة لنظام BMS، وزر الإيقاف اليدوي،

وفقد مضخات ماء التغذية، وإيقاف التوربين في بعض الفلسفات. وعند MFT تُغلق صمامات الإغلاق الرئيسية والفردية ويُفتح صمام التنفيس بينهما (Double Block and Bleed) خلال ثانية، ويُفعَّل الإجراء الانتقائي لحماية الانفجار الداخلي (Override)، ويثبت الإيقاف حتى يُعاد يدويًا بعد تطهير جديد.

التحقق من التسرب: قبل الإشعال يُختبر إحكام صمامات الوقود (Valve Proving / Leak Test) بحبس ضغط بين الصمامين ومراقبته لزمن محدد.

الشكل 36-10: *تسلسل نظام إدارة الحارقات: شروط ما قبل التطهير، والتطهير بتدفق ومدة محددين، وتجربة إشعال المشعل ثم الحارق الرئيسي بأزمنة محدودة، والتشغيل، والإيقاف الرئيسي للوقود بأسبابه، والتطهير اللاحق.*

36.10 الحمايات والإيقافات: جدول نموذجي

الحماية	القياس والبنية	القيمة النموذجية	الفعل
مستوى درم منخفض جدًا	3 مرسلات DP 2oo3 (+ مفتاح مستقل أحيانًا)	نحو −150 إلى −250 mm من المركز بحسب الدرم	MFT
مستوى درم مرتفع جدًا	كما سبق	+150 إلى +250 mm	MFT أو إيقاف التوربين وفتح التصريف
ضغط فرن مرتفع	3 مرسلات 2oo3	نحو +0.5 إلى +1.0 kPa في المراجل الصناعية، وأعلى في مراجل المرافق وفق المصنّع	MFT
ضغط فرن منخفض	كما سبق	نحو −1.0 إلى −2.0 kPa، وفق تصميم الفرن والمصنّع	تقييد ID ثم MFT
تدفق هواء منخفض	مرسل تدفق الهواء (2oo3 أو 1oo1 مع مفتاح)	أقل من 25%	MFT
فقد اللهب	كاشفات لكل حارق	زمن استجابة ≤ 4 s	إيقاف الحارق أو MFT
ضغط غاز وقود منخفض/مرتفع	مفتاح مستقل 1oo1 أو 1oo2، أو مرسلات 2oo3	حسب الحارق	MFT
فقد المروحة	تلامسات القاطع ومفتاح ضغط	—	MFT
حرارة بخار مرتفعة جدًا	مزدوجات	+ 15 إلى 25 °C فوق التصميم	إنذار ثم خفض الحمل / MFT

الحماية	القياس والبنية	القيمة النموذجية	الفعل
ضغط بخار مرتفع جدًا	مرسلات	قبل صمام الأمان	خفض الإشعال ثم MFT

36.11 مولدات البخار باستعادة الحرارة (HRSG) والمراجل ذات الدرم المتعدد

لا احتراق في HRSG غير المشتعل، فيغيب التحكم في الوقود والهواء وسحب الفرن، ويبقى: مستوى كل درم (HP وIP وLP) بتحكم ثلاثي العناصر مستقل، وحرارة البخار المحمّص ومعاد التسخين بالرش، وضغط البخار (ضغط منزلق يتبع الحمل، أو ثابت بصمامات التوربين)، ومصراع التحويل (Diverter Damper) في الوحدات ذات مدخنة التجاوز. وحين توجد **حارقات مجرى (Duct Burners)** للإشعال التكميلي يعود نظام إدارة الحارقات كاملًا: تطهير بعادم التوربين، وتجربة إشعال، وفقد لهب، مع تقييد الوقود بتدفق عادم كافٍ وحرارة معدن المحمّص. وضغط ماء التغذية في HRSG ثلاثي الضغط يأتي غالبًا من مضخة واحدة بسحب من درم LP وتفريعات لمستويي IP وHP، ولكل مستوى صمامه. والتفاصيل في القسم 36.12، وتكامله مع التوربين البخاري في القسمين 37.10 و37.11.

36.12 المراجل ومولدات البخار باستعادة الحرارة (HRSG)

بنية مولد البخار باستعادة الحرارة (HRSG) وحلقاته في القسم 36.11؛ وما يضيفه هذا القسم هو الفرق الجوهري للتحكم: المرجل التقليدي يملك وقوده، فيتحكم بإنتاجه، بينما يتبع مولد البخار HRSG غير المحروق التوربينَ الغازي، فلا يملك إلا أن يستقبل ما يصله من حرارة. ولكل مستوى من مستويات الضغط (عالٍ ومتوسط ومنخفض) مقتصد (Economizer) ودرم ومبخر ومحمص (Superheater)، فتتكرر الحلقات بعدد المستويات.

مستوى الدرم في HRSG: الاستراتيجية ثلاثية العناصر نفسها التي ذكرها القسم 36.11 وشرحها القسمان 36.7 و36.7.1، بمنطق الانتفاخ والانكماش نفسه وبالانتقال إلى أحادي العنصر عند الأحمال المنخفضة (نحو 20 إلى 30% من المقنن). والفارق أن الاضطراب يأتي هنا من تغيّر حمل التوربين الغازي ومن فتح صمامات التجاوز (الحالة في القسم 37.12)، لا من تغيّر الإشعال.

الشكل 36-11: *التحكم ثلاثي العناصر بمستوى الدرم: خرج متحكم المستوى يُجمع مع تدفق البخار ليصبح نقطة ضبط متحكم تدفق ماء التغذية.*

مثال محلول (تعويض كثافة قياس مستوى الدرم): يُقاس مستوى الدرم بمرسل ضغط تفاضلي مع عمود مرجعي مملوء بماء مكثف بارد، والمسافة بين المأخذين H = 0.8 m. ضغط الدرم 100 bar، وعنده كثافة الماء المشبع نحو 688 kg/m³ وكثافة البخار المشبع نحو 55 kg/m³، وكثافة ماء العمود المرجعي نحو 992 kg/m³. المستوى الحقيقي h = 0.40 m من المأخذ السفلي.

1. ضغط العمود المرجعي = 0.8 × 9.81 × 992 = 7785 Pa.
2. ضغط جانب الدرم = 0.40 × 9.81 × 688 + (0.8 − 0.40) × 9.81 × 55 = 2700 + 216 = 2916 Pa.
3. الضغط التفاضلي المقاس = 7785 − 2916 = 4869 Pa.
4. لو كان المرسل معايرًا على افتراض ماء بارد في الدرم (992 kg/m³) وعدم وجود بخار، لحسب المستوى هكذا: (7785 − 4869) ÷ (9.81 × 992) = 0.30 m.

يقرأ المرسل 0.30 m بينما المستوى الحقيقي 0.40 m، أي أقل بعشرة سنتيمترات، وهو فرق يكفي لتشغيل حماية المستوى المنخفض خطأً أو لإخفاء مستوى مرتفع حقيقي. لذلك يُحسب المستوى في نظام التحكم بتعويض الكثافة بدلالة ضغط الدرم، ويُقارن دوريًا بزجاج المستوى ومقاييس الأقطاب (الفصل 9).

الشكل 36-12: *مقطع ثلاثي الأبعاد لدرم مولد بخار: سطح الماء وفيه فقاعات البخار التي تسبب الانتفاخ، وأنابيب الصعود والهبوط، وخطا البخار وماء التغذية، ومرسل المستوى بساقه المرجعية، وزجاج المستوى المحلي.*

حرارة البخار في HRSG: تُضبط بالرش بين مرحلتي المحمّص بالحلقة التعاقبية التي شرحها القسم 36.8، ويُقيَّد الحد الأدنى لنقطة ضبط ما بعد الرش فوق حرارة التشبع بهامش حتى لا ينتقل ماء غير متبخر إلى الأنابيب والتوربين. ويُغلق صمام الرش وصمام عزله تلقائيًا عند الفصل أو عند انخفاض تدفق البخار.

الاحتراق في حارقات المجرى: يعود معها نظام إدارة الحارقات بشروطه (انظر القسم 36.11)، ويُطبَّق على وقودها التقييد المتقاطع وضبط الأكسجين (القسم 36.5).

أنظمة التجاوز (Bypass): في الدورة المركبة ينتج مولد البخار HRSG بخارًا بمجرد تشغيل التوربين الغازي، قبل أن يكون التوربين البخاري جاهزًا لاستقباله. فيُحوَّل البخار من خط الضغط العالي إلى خط إعادة التسخين البارد، ومن خط إعادة التسخين الساخن إلى المكثف، عبر صمامات تجاوز مع رش ماء لخفض حرارته. وتؤدي هذه الصمامات ثلاث مهام: تنظيم ضغط كل مستوى أثناء البدء، وتسخين الخطوط حتى تطابق حرارة البخار

متطلبات التوربين، والانفتاح السريع عند فصل التوربين البخاري حتى يستمر التوربين الغازي ومولد البخار HRSG دون فتح صمامات الأمان. ويُحمى المكثف بمنع فتح التجاوز إليه إذا كان الفراغ غير كافٍ أو ماء الرش غير متاح.

36.13 البدء والتوقف والتشغيل عند الأحمال المنخفضة

- في البدء البارد يُحد معدل رفع الضغط والحرارة بفرق حرارة معدن الدرم بين أعلاه وأسفله (نحو 40 إلى 55 °C كحد نموذجي) وبمعدل ارتفاع حرارة البخار المشبع (نحو 1 إلى 2 °C في الدقيقة)، وتُراقب حرارات معدن المحمّص الذي لا يبرده تدفق كافٍ من البخار قبل التزامن.
- مستوى الدرم بعنصر واحد حتى يصبح تدفق البخار مقيسًا بثقة (نحو 20 إلى 30% حمل) ثم يُحوَّل تلقائيًا إلى ثلاثي العناصر؛ ويُملأ الدرم قبل الإشعال إلى مستوى أدنى من الطبيعي لأن التسخين يرفع المستوى بالتمدد.
- الاحتراق يدويًا أو بنار دنيا ثابتة حتى استقرار الضغط، ثم الآلي؛ وضبط الأكسجين يُفعَّل بعد استقرار الحمل.
- الرش لا يُستخدم قبل وجود تدفق بخار كافٍ، وتُحمى المحمّصات بتنفيس البدء.
- عند التوقف: خفض الحمل، وإطفاء الحارقات بالتسلسل، وMFT طبيعي، وتطهير لاحق، وإبقاء الماء في الدرم عند مستوى محدد، وتبريد بمعدل محدود.

36.14 أمثلة محلولة

مثال 1 (مدى مرسل مستوى الدرم بساق رطبة): درم بضغط تشغيل 60 bara (حرارة تشبع 275.6 °C)، وصلة المرسل العليا (البخار) عبر وعاء تكثيف على ارتفاع 800 mm فوق وصلة الماء السفلية، والمستوى الطبيعي في منتصف المسافة (400 mm فوق الوصلة السفلية)، والمدى المطلوب من 100 إلى 700 mm فوق الوصلة السفلية. الساق الرطبة مملوءة بمكثفات باردة (كثافة $\rho_c \approx 1000$ kg/m³ تقريبًا عند 40 °C–20)، وكثافة الماء في الدرم عند التشبع $\rho_w = 758$ kg/m³، وكثافة البخار $\rho_s = 30.8$ kg/m³.

- الضغط على جهة الساق الرطبة (العليا) ثابت: $P_{ref} = \rho_c \times g \times 0.8$.
- الضغط على جهة الدرم عند مستوى h: $P = \rho_{drum} \times g \times h + \rho_s \times g \times (0.8 - h)$.
- الضغط التفاضلي (الجهة العليا − جهة الدرم): $\Delta P = P_{ref} - P$.
- عند $h = 0.1$ m: $\Delta P = 1000 \times 9.81 \times 0.8 - (758 \times 9.81 \times 0.1 + 30.8 \times 9.81 \times 0.7)$
- $$\Delta P = 7848 - (743.6 + 211.5) = 6893 \text{ Pa}.$$
- عند $h = 0.7$ m: $\Delta P = 7848 - (758 \times 9.81 \times 0.7 + 30.8 \times 9.81 \times 0.1)$
- $$\Delta P = 7848 - (5205 + 30.2) = 2613 \text{ Pa}.$$
- المعايرة معكوسة: 4 mA عند $\Delta P = 6.893$ kPa (مستوى 100 mm) و20 mA عند 2.613 kPa (مستوى 700 mm)، أي مدى 4.28 kPa.
- التفسير: لو عُوير المرسل بكثافة ماء بارد (1000 بدل 758) لاختلف المدى بنحو الثلث (5.70 kPa بدل 4.28 kPa، أي أكبر بنحو 33%) وأخطأت القراءة عند التشغيل بعشرات المليمترات؛ ولهذا تُحسب المعايرة بكثافات التشغيل ويُعوَّض التغير مع الضغط في النظام إذا كان الضغط يتغير كثيرًا

(البدء).

مثال 2 (الأكسجين والهواء الزائد): مرجل غاز يقرأ 4.2% O_2 عند 50% حمل.

- الهواء الزائد % ≈ $(20.9 - O_2) \times 100 \div O_2$
- الهواء الزائد ≈ $(20.9 - 4.2) \times 100 = 25\% \div 4.2$.
- نقطة الضبط عند هذا الحمل 3.0% (نحو 17% هواء زائدًا).
- التفسير: خفض الهواء الزائد من 25 إلى 17% يقلل فقد المدخنة بنحو 0.4 إلى 0.5% من كفاءة المرجل (بحسب حرارة الغازات)، وهو ما يعنيه ضبط الأكسجين اقتصاديًا. لكن قبل خفض نقطة الضبط يُتحقق من تسرب الهواء بعد الفرن: فإذا كان محلل CO يقرأ ارتفاعًا مع O_2 مرتفع فالهواء «الزائد» ليس في الفرن بل يتسرب إلى مسار الغازات ويجب إصلاح التسرب لا خفض هواء الاحتراق.

مثال 3 (زمن التطهير): فرن ومسارات غازات حجمها الكلي 900 m^3، وهواء الحمل الأقصى 60 m^3/s (عند شروط الفرن).

- معدل التطهير = 30% × هواء الحمل الأقصى = 18 m^3/s.
- زمن 5 تغيرات حجمية = 5 × الحجم ÷ معدل التطهير
- $= 5 \times 900 \div 18 = 250\ \text{s} = 4.2\ \text{min}.$
- التفسير: وهو أقل من 5 دقائق، فالتطهير 5 دقائق (الأطول). ولو كان المعدل 25% (15 m^3/s) لكان زمن 5 تغيرات 5 × 300 s = 25 دقائق بالضبط.

36.15 اختبار نظام التحكم والحماية في المرجل: خطوات

معايرة مرسل مستوى الدرم: خطوات

1. احسب المدى بكثافات التشغيل كما في المثال 1، ووثّق الحساب مع ارتفاع الوصلات المقيس فعليًا لا من الرسم.
2. اعزل المرسل بالمانيفولد الخماسي (القسم 14.12)، ونفّس الضغط، وتأكد من امتلاء الساق الرطبة بالمكثفات وعدم وجود هواء (املأها إن لزم).
3. طبّق الضغط التفاضلي المحسوب للمستوى الأدنى والأعلى بمعاير ضغط، وسجّل القراءة كما وُجدت (As-Found) واضبط ثم سجّل القراءة كما تُركت (As-Left)، مع اتجاه المدى المعكوس.
4. تأكد من أن النظام يطبق تعويض الكثافة بضغط الدرم إن كان مبرمجًا، وأن المرسلات الثلاثة تُعطي القراءة نفسها ضمن ±10 mm عند إعادة الخدمة.
5. قارن قراءة النظام بزجاج المستوى عند حالة مستقرة؛ الفرق الثابت يعني خطأ كثافة أو ارتفاع وصلة.

اختبار إيقاف المستوى المنخفض: خطوات

1. بتصريح وبالمرجل في حالة تسمح (أو في التوقف بمحاكاة)، اخفض إشارة مرسل واحد بمحاكاة إلى ما تحت الحد؛ يجب أن يظهر إنذار دون إيقاف (2oo3).
2. اخفض مرسلًا ثانيًا؛ يجب أن يقع MFT خلال الزمن المحدد وتُغلق صمامات الوقود ويُسجل أول سبب.
3. أعد الإشارات وتحقق من عدم إعادة الضبط تلقائيًا، ثم أعد الضبط يدويًا وتحقق من طلب التطهير.
4. كرر لكل مرسل حتى تُختبر كل الأزواج، ووثّق.

اختبار التقييد المتقاطع: خطوات

1. في المحاكاة أو عند حمل مستقر آمن، غيّر طلب الإشعال بخطوة زيادة وسجّل الاتجاه الزمني لطلب الهواء وطلب الوقود؛ يجب أن يرتفع طلب الهواء أولًا والوقود بعده متبعًا الهواء المقاس.
2. كرر بخطوة نقصان؛ يجب أن ينخفض الوقود أولًا.

3. حاكِ فقد إشارة تدفق الهواء (قيمة منخفضة)؛ يجب أن ينخفض طلب الوقود تبعًا لها (لا العكس) ويصدر إنذار.
4. تحقق من حدود ضبط الأكسجين: أدخل قيمة أكسجين خاطئة كبيرة وتأكد من أن التعديل لا يتجاوز الحد المضبوط.

اختبار نظام إدارة الحارقات: خطوات

1. تحقق من كل شرط تطهير على حدة بمنع أحدها (مثلًا صمام وقود غير مثبت مغلقًا) وتأكد من عدم بدء التطهير مع رسالة واضحة.
2. ابدأ التطهير وقِس مدته وتدفق الهواء خلاله، وتحقق من إلغائه إذا انخفض الهواء تحت الحد.
3. اختبر تجربة إشعال المشعل بكاشف لهب محجوب: يجب أن يُغلق الوقود خلال الزمن المحدد ويُطلب انتظار دقيقة قبل المحاولة التالية.
4. اختبر كل سبب MFT بمحاكاة (مستوى، ضغط فرن، هواء، لهب، ضغط وقود، مروحة) وسجّل زمن إغلاق الصمامات وأول سبب.
5. اختبر إحكام صمامات الوقود (اختبار التسرب) بالطريقة المبرمجة.
6. وثّق كل ذلك في سجل اختبار الإثبات للنظام (الفصل 29).

معايرة محلل الأكسجين: بالخطوات في القسم 10.8 مع غاز معايرة منخفض (نحو 0.4 إلى 2% O_2 في نيتروجين، لا نيتروجين نقي لأن خلية الزركونيا لا تعمل عند الصفر المطلق) وغاز مدى (نحو 8% O_2 في نيتروجين)، وتأكيد حرارة خلية الزركونيا.

36.16 حالة ميدانية: تطهير طويل وإيقافات متكررة عند البدء

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

الموقف: مرجل صناعي متعدد الحارقات يتعطل عند البدء مرات متكررة بإيقاف «فشل إشعال المشعل» ثم يحتاج إلى تطهير جديد (5 دقائق) كلما استُنفدت المحاولات المسموحة، فيتأخر البدء ساعة أحيانًا. فريق التشغيل طلب تقصير زمن التطهير.

التحقيق: سجل الأحداث أظهر أن كاشف لهب المشعل يرى اللهب متأخرًا 7 إلى 9 ثوانٍ بعد فتح صمام المشعل، وزمن تجربة الإشعال 10 ثوانٍ، فأي تأخر إضافي يسبب الفشل. السبب ضغط غاز المشعل منخفض عند البدء البارد لأن منظمه يشترك مع خط آخر، وزاوية الكاشف لا ترى جذر اللهب. وتقصير التطهير ممنوع وفق NFPA 85 وليس هو المشكلة.

الحل: منظم مستقل لغاز المشعل مع مفتاح ضغط منخفض في السماحيات (Permissives)، وإعادة توجيه الكاشف، فصار اللهب يُكشف خلال ثانيتين. وأُبقي التطهير 5 دقائق. **الدرس:** أزمنة NFPA 85 ليست مكان التوفير؛ الحل في الأسباب الجذرية لفشل الإشعال.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
استراتيجية التحكم	بنية الاحتراق (موضعي أم مقاس) والتقييد المتقاطع وحدود ضبط الأكسجين، وحد الانتقال بين أحادي العنصر وثلاثي العناصر	يتحقق باختبار الخطوة من أن الهواء يسبق الوقود عند الزيادة ويتأخر عند النقصان
قياس مستوى الدرم	مدى المرسلات بكثافات التشغيل وتعويض الكثافة بضغط الدرم	يقيس ارتفاعات الوصلات فعليًا، ويملأ الساق الرطبة، ويعاير كما وُجد وكما تُرك، ويقارن بزجاج المستوى
BMS والحمايات	أسباب MFT وبنية قياس كل منها، وأزمنة التطهير وتجربة الإشعال وفق NFPA 85	يختبر كل سبب MFT بالمحاكاة، ويسجل زمن إغلاق الصمامات وأول سبب، ويختبر إحكام صمامات الوقود

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
المحللات والكاشفات	موقع محلل الأكسجين، واختيار كاشفات اللهب وتمييزها للحارقات المجاورة	يعاير محلل الأكسجين بغازي الصفر والمدى، وينظف الكاشفات ويعيد توجيهها

36.17 الأخطاء الشائعة

- معايرة مرسل مستوى الدرم بكثافة ماء بارد أو بالرسم بدل الارتفاعات المقيسة.
- تحكم أحادي العنصر في مرجل ذي أحمال متغيرة، أو ثلاثي العناصر بتدفقين بوحدات مختلفة أو غير معايرين معًا.
- تخميد مرسلات ضغط الفرن حتى لا يرى النظام الانفجار الداخلي.
- ضبط أكسجين بلا حدود، أو نقطة ضبط ثابتة لا تتبع الحمل، أو الاعتماد على محلل يقرأ تسرب الهواء.
- تحكم مقاس بلا تقييد متقاطع، أو تقييد معكوس الاتجاه.
- تنفيذ BMS في متحكم التحكم بالاحتراق نفسه دون فصل أو بلا شهادة، أو السماح للمشغل بتجاوز التطهير.
- كاشفات لهب ترى لهب الحارق المجاور (بلا تمييز) فتخفي فقد اللهب.
- رش يعمل عند فتحات صغيرة جدًا أو يهبط بحرارة ما بعد الرش قرب التشبع.
- حدود معدل غير كافية على طلب الإشعال فتتذبذب حلقات الهواء والسحب.
- تجاهل اختبار الإيقافات دوريًا لأن «المرجل يعمل جيدًا».

36.18 ملخص

يقود ضغط البخار طلب الإشعال الذي يتفرع إلى وقود وهواء بتقييد متقاطع يضمن أن يسبق الهواء عند الزيادة ويتأخر عند النقصان، ويصحح ضبط الأكسجين النسبة ضمن

حدود بنقطة ضبط تتبع الحمل. وسحب الفرن يُضبط بمروحة ID بتغذية أمامية من الهواء وحماية من الانفجار الداخلي. ومستوى الدرم، الذي يخدع بالانتفاخ والانكماش، يُضبط بثلاثة عناصر تجعل الماء يلاحق البخار كتلةً بكتلة ويصحح المستوى الفروق. وحرارة البخار تُضبط بالرش في حلقة تعاقبية بتغذية أمامية من الحمل. ونظام إدارة الحارقات المستقل يطهّر الفرن بتدفق ومدة محددين، ويجرب الإشعال بأزمنة محدودة، ويوقف الوقود كله عند أي خطر بإيقاف رئيسي مثبت. وكل مرسل مستوى يُعاير بكثافات التشغيل، وكل حماية تُختبر بخطوات موثقة.

وفي الفصل التالي: يتناول الفصل 37 «التحكم بالتوربينات البخارية والتكامل في الدورة المركبة»، أي الطرف الآخر من خط البخار: فصمامات التوربين هي التي تسحب ما ينتجه المرجل، ولا يكتمل فهم أحدهما دون الآخر.

36.19 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الأنظمة الأربعة للتحكم في المرجل، وما الذي يقودها جميعًا؟
2. اشرح الانتفاخ والانكماش، ولماذا يفشل التحكم أحادي العنصر عند زيادة الحمل المفاجئة.
3. ارسم منطق التقييد المتقاطع وبيّن أي مختار يعطي طلب الهواء وأيهما طلب الوقود، ولماذا.
4. مرجل يقرأ 6% O_2 عند 100% حمل. احسب الهواء الزائد، وما الذي تشك فيه قبل خفض نقطة ضبط الأكسجين؟
5. لماذا يُضبط ضغط الفرن سالبًا قليلًا؟ وما الانفجار الداخلي ومتى يحدث؟
6. أعد حساب مدى مرسل مستوى الدرم في المثال 1 عند ضغط 40 bara (ρ_w = 799 و ρ_s = 20.1 kg/m³).
7. ما الفرق بين التحكم ثنائي وثلاثي العناصر في حرارة البخار؟ ولماذا يُقيَّد الرش عند الأحمال المنخفضة؟

8. فرن حجمه 1200 m^3 وهواؤه الأقصى 80 m^3/s: ما أقل زمن تطهير عند معدل 30% وفق قاعدة 5 دقائق أو 5 تغيرات؟

9. اذكر ثمانية أسباب للإيقاف الرئيسي للوقود وبنية القياس المناسبة لكل منها.

10. ما الذي يختلف في التحكم في HRSG عن المرجل المشتعل، وما الذي يعود عند وجود حارقات مجرى؟

مراجع الفصل: R43 (مقدمة أنظمة التحكم في المراجل، SANMAX)، وR44 (Boiler Control Systems Engineering، ISA، الفصول 2 إلى 8)، وR30 وR29 (الفصل 37)، و NFPA 85 (مخاطر المراجل وأنظمة الاحتراق)، وسلسلة ISA-77 (التحكم في محطات الوقود الأحفوري: 77.41 لتحكم الاحتراق (الوقود والهواء)، و77.42 لتحكم ماء التغذية ومستوى الدرم، و77.43 لتطوير طلب الوحدة، و77.44 لحرارة البخار)، وASME Boiler and Pressure Vessel Code القسم I، وR57 (مذكرة المؤلف في التحكم ثلاثي العناصر، 36.7.1)، وR59 (رسالة الماجستير للمؤلف في التحكم الضبابي ثلاثي العناصر والمضخة متغيرة السرعة، 36.7.2)، وخبرة المؤلف في الدورة المركبة.

الفصل 37: التحكم بالتوربينات البخارية والتكامل في الدورة المركبة

لمن هذا الفصل: مهندس التحكم في محطة بخارية تقليدية أو محطة دورة مركبة، ومهندس المنشآت الصناعية التي تستخدم توربينات بخارية لتوليد الكهرباء أو لإدارة الضواغط والمضخات مع استخلاص البخار للعمليات. ويفيد من قرأ الفصل 34، لأن كثيرًا من أفكار الحاكم والحماية مشتركة بين النوعين.

الفكرة الأساسية: التوربين البخاري لا يصنع طاقته بنفسه، بل يأخذها جاهزة من المرجل أو مولد البخار. لذلك لا يُفهم التحكم به منفصلًا: فالصمامات التي تحدد سرعته وحمله هي نفسها التي تحدد ضغط البخار في المرجل، وكل حركة سريعة في أحدهما يشعر بها الآخر. وفوق ذلك فالتوربين البخاري آلة ثقيلة سميكة الجدران، حدودها الحقيقية في البدء والتحميل هي الإجهاد الحراري والتمدد، لا القدرة وحدها. من يضع هذين الأمرين أمامه، الترابط مع المرجل والحدود الحرارية، يفهم لماذا صُممت حاكمات التوربينات البخارية ومنطق مولدات البخار على هذا النحو.

37.1 التوربين البخاري من منظور مهندس التحكم

يتكون التوربين من مراحل، في كل مرحلة فوهات ثابتة تسرّع البخار، وريش متحركة تحول سرعته إلى دوران. وتُصنف التوربينات بحسب ما يحدث للبخار بعد خروجه، وهذا التصنيف هو ما يحدد المتغيرات التي نتحكم بها:

النوع	ما يميزه	المتغيرات المتحكَّم بها عادة
تكثيفي مباشر (Condensing)	العادم إلى مكثف بضغط دون الضغط الجوي (فراغ)	السرعة قبل التزامن، ثم الحمل أو ضغط الدخول
ضغط خلفي (Back Pressure)	العادم إلى شبكة بخار منخفض الضغط للعمليات	الحمل أو ضغط العادم، وأحدهما يقيد الآخر
استخلاص غير منظم	يُسحب بخار من مراحل وسطى دون تحكم بضغطه، لتسخين ماء التغذية	السرعة والحمل فقط
استخلاص منظم (Automatic Extraction)	صمامات داخلية تنظم ضغط البخار المستخلص للعمليات	السرعة أو الحمل مع ضغط الاستخلاص معًا
إعادة التسخين (Reheat)	يعود البخار بعد مرحلة الضغط العالي إلى المرجل ليُسخَّن ثانية	السرعة والحمل، مع صمامات إضافية على خط إعادة التسخين

كيف أختار؟ نوع التوربين يقرره مهندس العملية، لكن الجدول يحدد ما سيُتحكم به: في التكثيفي وإعادة التسخين المتغير الحمل أو الضغط، وفي الضغط الخلفي والاستخلاص المنظم يدخل ضغط بخار العملية طرفًا ثانيًا يقيد الأول. والجدول لا يبين أن الحاكم في الاستخلاص المنظم متعدد المتغيرات ويحتاج خريطة بخار وفك ترابط (القسم 37.7)، ولا أن توربين الإدارة الميكانيكية تكون سرعته متغير العملية لا ثابتًا (القسم 37.3.1). والخطأ الأكثر كلفة معاملة توربين ضغط خلفي كأنه مولد يتبع الحمل الكهربائي، فيتأرجح ضغط شبكة العمليات ويُلام الحاكم.

وتُرتب أجسام التوربين في وحدات التوليد الكبيرة على عمود واحد (Tandem Compound): جسم ضغط عالٍ (HP)، ثم متوسط (IP)، ثم جسم أو أكثر للضغط المنخفض (LP)، ثم المولد. وفي بعض الوحدات القديمة الكبيرة تُوزَّع الأجسام على عمودين لكل منهما مولد (Cross Compound). ويهم مهندس التحكم من هذا الترتيب أن مجسات الاهتزاز والتمدد والموضع المحوري موزعة على امتداد عمود طويل، وأن حجم

البخار المحبوس بين صمامات الدخول وآخر مرحلة كبير، وهذه النقطة سنعود إليها في حماية السرعة الزائدة.

37.2 الصمامات ومشغلاتها

كل تحكم بالتوربين البخاري يمر عبر صماماته، ولكل صمام وظيفة محددة:

- **صمام الإيقاف الرئيسي (MSV):** صمام قطع سريع بين المرجل والتوربين. وظيفته الأساسية الإغلاق الكامل خلال جزء من الثانية عند الفصل. وفي بعض التصاميم يحتوي على صمام داخلي صغير يُستخدم للتحكم بالسرعة أثناء البدء.
- **صمامات التحكم أو الحاكمة (CV أو GV):** تنظم تدفق البخار إلى جسم الضغط العالي، وبها يُتحكم بالسرعة والحمل أثناء التشغيل العادي.
- **صمام إيقاف إعادة التسخين (RSV):** صمام قطع على خط البخار العائد من معيد التسخين قبل جسم الضغط المتوسط.
- **صمام الاعتراض (IV أو ICV):** صمام تحكم على الخط نفسه. يبقى مفتوحًا كاملًا في التشغيل العادي، ويُغلق بسرعة عند رفض الحمل ليمنع البخار المخزن في معيد التسخين من دفع التوربين إلى السرعة الزائدة.
- **صمامات الاستخلاص وصمامات عدم الرجوع:** تمنع عودة البخار من مسخنات ماء التغذية إلى التوربين عند الفصل، وهي جزء من الحماية من دخول الماء.

الشكل 37-1: *صمامات توربين بخاري بإعادة التسخين: الإيقاف الرئيسي والتحكم على خط الضغط العالي، والإيقاف والاعتراض على خط إعادة التسخين، مع خط التجاوز ونقطتي قياس ضغط المرحلة الأولى والسرعة.*

المشغلات الكهروهيدروليكية: تُحرك الصمامات بمشغلات هيدروليكية تعمل غالبًا بسائل مقاوم للحريق من نوع استرات الفوسفات (Phosphate Ester)، بضغط يتراوح في كثير من الوحدات بين نحو 100 و160 bar، ويُفصل نظامه عن زيت التزييت. وتُستخدم مع كل صمام تحكم حلقة موضع: أمر من الحاكم ← مضخم ← صمام مؤازر ← أسطوانة ← محول LVDT يعيد الموضع. أما صمامات الإيقاف فتُفتح هيدروليكيًا وتُغلق بنوابض قوية حين يُفرَّغ الزيت تحت مكابسها بصمامات تفريغ سريعة (Dump Valves) تعمل بملفات كهربائية أو بزيت الفصل.

والسائل المقاوم للحريق حساس للرطوبة والحموضة، وتلوثه أول أسباب التصاق الصمامات المؤازرة. لذلك تُراقب حموضته ونظافته دوريًا وفق معيار نظافة مثل ISO 4406، ويُعد ذلك من صميم عمل فريق التحكم لا الميكانيك وحده.

37.3 الحاكم: من الميكانيكي الهيدروليكي إلى الرقمي

كان حاكم التوربين القديم ميكانيكيًا هيدروليكيًا: كرات طاردة أو مضخة سرعة تولد ضغط زيت يتناسب مع مربع السرعة، ويحرك هذا الضغط صمامات التحكم عبر روافع ومكابس. وحلّ محله الحاكم الكهروهيدروليكي ثم الرقمي، المعروف في محطات كثيرة باسم DEH أو DEHC (Digital Electro-Hydraulic Control). وتوجد منه منصات كثيرة، مثل Speedtronic من GE، وSiemens T3000، ومنصات Alstom، وWoodward، و Ovation.

مهام الحاكم الحديث:

- البدء ورفع السرعة وفق برنامج، والإيقاف.
- التزامن مع الشبكة بالتنسيق مع نظام التزامن.
- التحميل والتفريغ بمعدلات محدودة، والمشاركة في تنظيم تردد الشبكة.
- تثبيت ضغط البخار أو المشاركة في التحكم به مع المرجل.
- تحديد الحمل الأقصى، والتشغيل في شبكة معزولة.
- التعامل مع رفض الحمل ومنع السرعة الزائدة.
- المراقبة واختبار الصمامات والحمايات أثناء التشغيل.

بنية الأجهزة: يجب أن تكون استجابة الحاكم سريعة جدًا، ودورة حلقات السرعة فيه بعشرات الملي ثانية أو أقل. ولذلك تُبنى متحكماته بتكرار ثنائي أو ثلاثي (TMR) مع تصويت على الإشارات الحرجة، ويُصوَّت على مخرجات الصمامات المؤازرة إما بملفات متعددة كما في الفصل 34 وإما بتجميع تيارات المتحكمات. ويُحتفظ في غرفة التحكم بأزرار سلكية مباشرة للفصل وللعمليات الدنيا اللازمة إذا فُقدت الشاشات.

37.3.1 حواكم توربينات الإدارة الميكانيكية ومحركات الديزل: السرعة متغيرًا للعملية

ما سبق يخص توربينات التوليد حيث يثبّت الحاكم السرعة على تردد الشبكة. وفي النفط والغاز والكيماويات غالب التوربينات البخارية **تدير آلة** لا مولدًا: مضخة ماء تغذية، ضاغط غاز، منفاخ هواء. هنا السرعة ليست ثابتة بل **متغير التحكم بالعملية**: متحكم ضغط تصريف الضاغط (أو تدفق المضخة) يعطي نقطة ضبط السرعة، والحاكم يحققها بصمام البخار (الشكل 37-2). هذه حلقة تعاقبية: الحلقة الخارجية حلقة عملية بطيئة، والداخلية حلقة سرعة سريعة، وقواعد ضبطها في القسم 18.8 (و).

الشكل 37-2: *توربين بخاري يدير ضاغطًا: متحكم العملية PIC-301 يعطي نقطة ضبط السرعة للحاكم، والحاكم يحرك صمام البخار عبر المشغل، ولواقط مغناطيسية على عجلة السرعة: ثلاثة للحاكم وثلاثة مخصصة لحماية السرعة الزائدة المستقلة؛ وفئات الحاكم وفق NEMA SM 23 (قيم اسمية).*

(أ) أجيال الحاكم التي تجدها معًا في وحدة واحدة

الجيل	البنية	أين تراه اليوم	ما يهم مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس
ميكانيكي هيدروليكي (مثل Woodward TG أو PG)	كرات طاردة أو مضخة زيت تحرك مكبس الحاكم مباشرة	مضخات احتياطية بخارية قديمة، توربينات صغيرة أقل من 1 MW	لا إشارة كهربائية؛ الضبط بمسمار السرعة؛ يُختبر بمقياس سرعة يدوي (Tachometer)
كهروهيدروليكي تناظري	لاقط سرعة ← وحدة إلكترونية ← مشغل هيدروليكي أو محول I/P	توربينات السبعينيات والثمانينيات	قد يكون الحاكم الوحيد بلا تكرار؛ نقطة الضبط بجهد أو تيار
رقمي (مثل Woodward 505، أو حاكم داخل PLC/DCS مؤهل؛ أما ProTech فوحدة حماية سرعة زائدة مستقلة لا حاكم)	متحكم رقمي بحلقة سرعة PID، ومدخلات تعاقبية، وتسلسل بدء آلي، وتسجيل أحداث	المعيار الحالي في أي تجديد	يقبل نقطة ضبط 4–20 mA من DCS، ويرسل السرعة والحالة عبر Modbus، وله حدود تسارع ومعدل تغير

كيف أختار؟ عند التجديد لا يُختار الجيل بحسب عمر التوربين بل بحسب فئة الحاكم المطلوبة (الجدول التالي) وما يحتاجه النظام من واجهة: نقطة ضبط من DCS وتسجيل أحداث وحلقة تعاقبية مع العملية تعني حاكمًا رقميًا، وتوربين صغير لمضخة احتياطية قد يكفيه الميكانيكي إن كان يُختبر دوريًا. والجدول لا يبين أن الحاكم الرقمي لا يغني عن مشغل هيدروليكي سليم وصمام بزمن إغلاق مقبول، فأغلب مشكلات «الحاكم الجديد» تكون في الصمام القديم. والخطأ الأكثر كلفة الاستغناء عن حماية السرعة الزائدة المستقلة بحجة أن الحاكم الرقمي «يحمي بنفسه».

(ب) فئات الحاكم وفق NEMA SM 23 (ولها مقابل في API 611/612)

الفئة	تنظيم السرعة (Droop)	تغير السرعة (استقرار)	أقصى ارتفاع عند رفض الحمل	الخدمة النموذجية
A	10%	0.75%	13%	مضخات ومراوح غير حرجة
B	6%	0.50%	7%	مضخات عملية
C	4%	0.25%	7%	ضواغط
D	0.5%	0.25%	7%	توليد ومحركات تحتاج سرعة شبه ثابتة

الفئة تُكتب في ورقة بيانات التوربين، ومنها يُعرف ما إذا كان الحاكم الميكانيكي القديم يكفي (A أو B) أو يلزم حاكم رقمي (C وD). ورفض الحمل (Load Rejection) هو الاختبار الحاسم: فصل الآلة المدارة فجأة (فتح القابض أو فصل المولد) ويجب ألا تتجاوز السرعة الحد المذكور، وأن تبقى دون ضبط فصل السرعة الزائدة (عادة 110 إلى 115% من السرعة المقننة).

مثال محلول (هامش السرعة الزائدة):

- **المعطيات:** توربين يدير ضاغطًا بسرعة مقننة 9,000 rpm وحاكم من الفئة C، وضبط فصل السرعة الزائدة 110%.
- **الافتراضات:** قيم الفئة وفق الجدول، وسرعة التشغيل عند المقننة لحظة رفض الحمل.
- **الحل بالوحدات:**
  - أقصى ارتفاع مسموح = نسبة الفئة × السرعة المقننة
  - الذروة ← 7% × 9,000 = 630 rpm = 9,630 rpm.
  - ضبط الفصل = 9,900 rpm = 9,000 × 1.10.
  - الهامش = ضبط الفصل − الذروة = = 9,900 − 9,630

.270 rpm (3%)

- التفسير: الهامش لا يتجاوز ثلاثة في المئة من السرعة المقننة، ومعناه العملي في البند التالي.

- **معنى النتيجة:** هامش 3% يعني أن أي بطء في المشغل (زمن شوط أطول بعد صيانة الصمام المؤازر) أو تسرب بخار من صمام الإيقاف قد يجعل رفض الحمل يصل إلى الفصل. لذلك يُقاس زمن إغلاق صمام الحاكم بعد كل صيانة، ويُوثق مع اختبار السرعة الزائدة.

(ج) الانحدار والتحكم عديم الانحدار في الإدارة الميكانيكية

في الإدارة الميكانيكية تعمل الآلة وحدها على عمودها، فيُشغَّل الحاكم عادة **عديم الانحدار (Isochronous)**: يعيد السرعة إلى نقطة الضبط تمامًا بفعل تكاملي، لأن الانحدار هنا بلا فائدة (لا يوجد توزيع حمل بين وحدات). أما إذا كان توربينان يديران ضاغطين متوازيين على مجمع واحد، فتوزيع الحمل يتم بالعملية (متحكم الضغط يوزع نقاط ضبط السرعة) لا بانحدار الحاكم. وفي محرك الديزل للمولد الاحتياطي: عديم الانحدار حين يغذي حمل الطوارئ وحده، وانحدار (نحو 3 إلى 5%) عند التزامن مع الشبكة أو مع مولدات أخرى، ويُبدَّل الوضع آليًا تبعًا لحالة القاطع.

(د) صمام الحاكم ومشغله

صمام الحاكم (Governor Valve) صمام بخار بمشغل هيدروليكي أو هوائي بموضع، شوطه بضع عشرات المليمترات وزمن إغلاقه أقل من ثانية في الخدمات الحرجة؛ وخاصيته غير خطية (تدفق البخار يتشبع مع الرفع) فيُدخل الحاكم الرقمي منحنى تخطيط (Valve Linearization) من اختبار الشوط. ويظل صمام الإيقاف & (Trip Throttle) مستقلًا يغلقه نظام الحماية بتفريغ زيت الفصل، ولا يُستخدم للتحكم الاعتيادي إلا أثناء البدء في بعض الوحدات (القسم 37.4).

(هـ) اختبار الحاكم والسرعة الزائدة: خطوات

1. راجع ورقة البيانات: السرعة المقننة، والحدود الدنيا والقصوى للحاكم، وضبط الفصل (%)، وفئة الحاكم، وزمن إغلاق الصمام المقبول.
2. تحقق من إشارات السرعة الثلاث على شاشة الحاكم عند سرعة التدوير: تطابق ضمن 0.5%، وفجوة اللاقط عن العجلة حسب المصنّع (نحو 0.5 إلى 1.0 mm) وجهد الإشارة عند أدنى سرعة.
3. اختبر تسلسل البدء الآلي: سرعة الاحتكاك، ثم التسخين، ثم عبور السرعات الحرجة بالمعدل المبرمج دون توقف.
4. عند سرعة التشغيل الدنيا: غيّر نقطة الضبط بخطوة 2% وسجّل الاستجابة (زمن الاستقرار والتجاوز) وقارنها بالفئة؛ استجابة متذبذبة تعني كسبًا عاليًا أو خلوصًا في الوصلات.
5. اختبار السرعة الزائدة الفعلي (حين يقرره إجراء المصنّع، عادة سنويًا أو بعد صيانة الحماية): ارفع نقطة ضبط الحاكم تدريجيًا نحو ضبط الفصل مع فصل الآلة المدارة أو بلا حمل، وسجّل سرعة الفصل المقاسة وزمن إغلاق الصمامات؛ يجب أن تقع ضمن ±1% من الضبط.
6. اختبار الفصل الإلكتروني بالمحاكاة (حين لا يُسمح برفع السرعة): حقن تردد على مداخل الحماية من مولد إشارة واختبار تصويت 2oo3 مع رسائل الأحداث.
7. اختبار رفض الحمل (عند التشغيل التجريبي أو بعد تعديل جوهري): فصل الحمل فجأة وتسجيل الذروة؛ يجب ألا تتجاوز حد الفئة وألا تفصل الوحدة.
8. سجّل: القيم المقاسة، وزمن الإغلاق، وإصدار برنامج الحاكم ومعاملاته (Kp/Ki/Kd للسرعة)، وأي تغيير في المنحنى؛ ثم أعد نقطة الضبط إلى العملية وسلّم الحلقة التعاقبية إلى الآلي.

(و) تشخيص سريع

العَرَض	السبب المرجح	الفحص	الإجراء
تذبذب السرعة ±1 (Hunting) إلى 2% بدورة ثوانٍ	كسب حاكم عالٍ، أو خلوص في وصلات الصمام، أو التصاق مؤازر	اختبار الخطوة في اليدوي؛ فحص الخلوص بالحركة اليدوية	خفض الكسب، تبديل مسامير الوصلات، تنظيف الزيت الهيدروليكي (ISO 4406)
السرعة تنزلق ببطء عن الضبط	حاكم بانحدار في تطبيق يحتاج تحكمًا عديم الانحدار، أو تسرب بخار عبر صمام الإيقاف	مقارنة SP/PV على الاتجاه مع الحمل	تحويل إلى عديم الانحدار؛ فحص صمام الإيقاف
فصل سرعة زائدة كاذب	لاقط واحد بإشارة ضجيج (كابل غير محمي، فجوة كبيرة) وتصويت 1oo2	سجل الأحداث: أي قناة فصلت؛ راسم على الإشارة	تصويت 2oo3، تأريض وحماية الكابل، ضبط الفجوة
نقطة ضبط DCS لا تصل إلى الحاكم	مدى 4–20 mA غير متطابق (مثلًا 0–10,000 مقابل 6,000–10,000 rpm)	قراءة القيمة عند 4 و 12 و20 mA على شاشة الحاكم	توحيد المدى في الطرفين وتوثيقه في سجل الحلقة

37.4 تحكم السرعة والبدء

تُقاس السرعة بثلاثة لواقط مغناطيسية أو أكثر أمام عجلة مسننة، ويُصوَّت عليها بطريقة اثنين من ثلاثة أو يُختار الوسيط. وحلقة السرعة قبل التزامن هي المسيطرة، وتحدد الصمامات التي تمرر البخار.

> **مثال محلول (نبضات السرعة):** توربين على شبكة 50 Hz بسرعة مقننة 3000 rpm، وعجلة السرعة من 60 سنًا.
>
> - عدد النبضات في الدقيقة = 3000 × 60 = 180,000 نبضة.
> - التردد = 180,000 ÷ 60 = 3000 Hz. أي أن التردد بالهرتز يساوي السرعة بالدورة في الدقيقة متى كانت العجلة من 60 سنًا، وإلا ضُرب في (عدد الأسنان ÷ 60)، كما في التوربين الغازي.
> - وسرعة التزامن هنا مرتبطة بتردد الشبكة: 50 Hz × 60 ثانية = 3000 دورة في الدقيقة لمولد بقطبين. أما على شبكة 60 Hz فتصبح 3600 rpm.

برنامج رفع السرعة: لا يُرفع التوربين البخاري إلى السرعة المقننة دفعة واحدة. يختار المشغل أو البرنامج سرعة مستهدفة ومعدل تغير، مثل:

- **السرعات المستهدفة:** نحو 400 rpm لفحص الاحتكاك، ونحو 2200 rpm للتسخين عند سرعة ثابتة، ثم 3000 rpm.
- **معدلات التغير:** مثل 75 أو 150 أو 300 rpm/min، ويُختار المعدل حسب حالة التوربين الحرارية.
- **السرعات الحرجة:** يمنع البرنامج التوقف داخل نطاقات السرعة الحرجة التي يرتفع فيها الاهتزاز بالرنين، ويعبرها بمعدل مرتفع. وإذا طلب المشغل التوقف داخل نطاق حرج استمر البرنامج إلى حده الأعلى.

فحص الاحتكاك (Rub Check): بعد رفع العمود عن آلية التدوير إلى سرعة منخفضة، تُغلق الصمامات ويُترك العمود يتباطأ، ويستمع الفريق ويراقب الاهتزاز والانحراف المركزي (Eccentricity) للتأكد من عدم وجود احتكاك بين الأجزاء الدوارة والثابتة، ثم يُستأنف الرفع.

الشكل 37-3: *منحنى بدء نموذجي لتوربين بخاري على شبكة 50 هرتز: إعادة ضبط الفصل، وفحص الاحتكاك، والتسخين عند سرعة ثابتة، ونقل الصمامات، ثم التزامن والتحميل (قيم توضيحية).*

نقل الصمامات (Valve Transfer): في كثير من الوحدات يُتحكم بالسرعة أثناء البدء بصمامات الإيقاف الرئيسية أو بصماماتها الداخلية، بينما تبقى صمامات التحكم مفتوحة كاملًا. والسبب أن هذا يُدخل البخار إلى كامل محيط المرحلة الأولى فيسخن الجسم بانتظام. وبعد بلوغ السرعة المقننة ينتقل التحكم إلى صمامات التحكم: تبدأ بالإغلاق تدريجيًا حتى تتسلم السيطرة على السرعة، ثم تُفتح صمامات الإيقاف كاملًا. وبعد اكتمال النقل يُسمح بالتزامن.

الإعداد قبل الدوران: قبل إدخال البخار يُتحقق من مجموعة شروط، أهمها: نظاما زيت التزييت والسائل الهيدروليكي جاهزان، والتوربين على آلية التدوير والانحراف المركزي ضمن الحد، والفراغ في المكثف كافٍ، وبخار السدادات يعمل، وصمامات التصريف مفتوحة، وضغط البخار الرئيسي وحرارته ضمن الحدود، وجميع مغلقات الفصل مُعاد ضبطها، وأجهزة المراقبة (TSI) والحاكم مُغذاة قبل ذلك بوقت كافٍ.

37.5 تحكم الحمل والتنسيق مع المرجل

بعد التزامن تتحول حلقة السرعة إلى حلقة حمل كما في التوربين الغازي. يحدد المشغل أو نظام التحكم المنسق مرجع الحمل، ويُضاف إليه تصحيح من فرق السرعة بنسبة الانحدار، ثم يمر الطلب بمحدد الحمل وبوابة قيمة صغرى قبل أن يصل إلى إدارة الصمامات.

الشكل 37-4: *مخطط مبسط لتحكم السرعة والحمل في حاكم DEH. مرجع الحمل مع تصحيح الانحدار، ومحدد الحمل، وإدارة الصمامات، وتجاوزات الحماية OPC وIPR.*

> **مثال محلول (الانحدار في وحدة بخارية):** وحدة قدرتها 735 MW تعمل بانحدار 5% على شبكة 50 Hz. انخفض التردد 0.1 Hz، أي 0.2% من السرعة.

الزيادة المطلوبة في الحمل

$$= (0.2 \div 5) \times 735 = 29.4 \text{ MW}.$$

لكن التوربين لا يستطيع أن يسلّم هذه الزيادة إلا بقدر ما يخزنه المرجل من طاقة. فحين تفتح صمامات التحكم يرتفع التدفق فورًا وينخفض ضغط البخار، ثم يحتاج المرجل دقائق ليرفع الحرق ويعيد الضغط. ولهذا تُحدد استجابة الوحدات البخارية بمعدل تحميل (Response Rate) بوحدة MW/min، ويختلف كثيرًا بين وحدة تعمل بالفحم وأخرى في دورة مركبة.

أنماط التنسيق بين التوربين والمرجل:

النمط	من يتحكم بالحمل	من يتحكم بضغط البخار	الميزة والعيب
المرجل يتبع (Boiler Follow)	صمامات التوربين	الحرق في المرجل	استجابة حمل سريعة، مع تذبذب أكبر في الضغط
التوربين يتبع (Turbine Follow)	الحرق في المرجل	صمامات التوربين	ضغط مستقر، مع استجابة حمل بطيئة
التحكم المنسق (Coordinated)	الاثنان معًا بتغذية أمامية متبادلة	الاثنان معًا	يجمع الميزتين، ويحتاج ضبطًا دقيقًا
الضغط المنزلق (Sliding Pressure)	الحرق أو حمل التوربين الغازي	يُترك الضغط يتغير مع الحمل والصمامات شبه مفتوحة	خسائر خنق أقل عند الأحمال الجزئية، واستجابة أبطأ

كيف أختار؟ القاعدة من الجدول: من يملك الطاقة المخزنة يستجيب أسرع؛ فإن كانت الأولوية لاستجابة الحمل والتردد اخترت «المرجل يتبع»، وإن كانت لاستقرار الضغط وحماية المرجل اخترت «التوربين يتبع»، والمنسق يجمعهما بثمن ضبط دقيق لا يُنجز في يوم. والجدول لا يبين حالة الدورة المركبة: هناك لا يملك التوربين البخاري وقودًا، فالضغط المنزلق هو الوضع الطبيعي لا خيارًا بين خيارات (القسم 37.11). والخطأ الأكثر كلفة تشغيل «المرجل يتبع» على مرجل بطيء أو صغير السعة الحرارية، فتُسحب الطاقة المخزنة حتى يهبط الضغط ويتدخل منظم الضغط الابتدائي (IPR) بخفض الحمل فجأة.

تحكم ضغط المرحلة الأولى (IMP): ضغط البخار بعد المرحلة الأولى في جسم الضغط العالي يتناسب تقريبًا مع تدفق البخار ومع الحمل. لذلك تستخدمه بعض الحاكمات حلقةً داخلية: يُترجم طلب الحمل إلى ضغط مرحلة أولى مطلوب، وتُعدَّل الصمامات لتحقيقه. وفائدته الواضحة أثناء اختبار الصمامات: فحين يُغلق صمام للاختبار تفتح الصمامات الأخرى تلقائيًا ليبقى الضغط، ومعه الحمل، ثابتًا.

منظم الضغط الابتدائي (IPR): يحمي المرجل والتوربين من هبوط ضغط البخار الرئيسي. فإذا انخفض الضغط عن نقطة ضبطه بفرق كبير، مثل 25 bar، خُفض مرجع الحمل بمعدل سريع، مثل 200% في الدقيقة (والقيمتان توضيحيتان تختلفان بين المصنّعين)، حتى يستعيد الضغط أو تصل صمامات التحكم إلى حد أدنى. والهدف منع سحب البخار من مرجل عاجز عن تعويضه، وهو ما قد ينتهي بانخفاض الحرارة ودخول بخار رطب أو ماء إلى التوربين.

37.6 إدارة الصمامات: القوس الجزئي والقوس الكامل

في التوربينات التي لها عدة صمامات تحكم، يغذي كل صمام قطاعًا من فوهات المرحلة الأولى. وتقرر إدارة الصمامات (Valve Management) كيف يُترجم طلب البخار الواحد إلى فتحات للصمامات:

- **القوس الجزئي (Partial Arc) أو التحكم بالفوهات:** تفتح الصمامات بالتتابع، فلا يبدأ صمام بالفتح قبل أن يقترب سابقه من الفتح الكامل. يبقى ضغط البخار أمام الفوهات المفتوحة مرتفعًا، وتقل خسائر الخنق، فتتحسن الكفاءة عند الأحمال الجزئية. لكن المرحلة الأولى تسخن بشكل غير متجانس، وتتعرض الريش لأحمال متقطعة.
- **القوس الكامل (Full Arc) أو التحكم بالخنق:** تفتح الصمامات كلها معًا بالنسبة نفسها، فيدخل البخار إلى كامل المحيط بضغط أقل. التسخين متجانس والإجهاد الحراري أقل، لذلك يُفضل أثناء البدء والتحميل الأولي وبعد التوقفات الطويلة، على حساب كفاءة أقل.

الشكل 37-5: *فتح صمامات التحكم مقابل طلب البخار في القوس الجزئي، حيث تفتح بالتتابع، وفي القوس الكامل، حيث تفتح معًا.*

وتسمح الحاكمات الحديثة بالانتقال بين النمطين أثناء الحمل بتدرج، دون تغيير في القدرة. ولأن العلاقة بين فتحة الصمام وتدفق البخار ليست خطية، يحتوي برنامج إدارة الصمامات على منحنيات تخطيط (Linearization) تُعدَّل عند التشغيل التجريبي بقياس الحمل عند فتحات مختلفة. وإذا أُهملت هذه المنحنيات ظهرت مناطق تتغير فيها القدرة بسرعة مع تغير صغير في الطلب، ومناطق أخرى لا تكاد تتغير، فيتذبذب الحمل ويصعب ضبط حلقة التردد.

اختبار الصمامات أثناء التشغيل: تُختبر صمامات الإيقاف والتحكم دوريًا بإغلاقها واحدًا بعد آخر تحت الحمل، للتأكد من أنها لم تلتصق. وأثناء الاختبار يُثبَّت الحمل بتحكم ضغط المرحلة الأولى أو بخفض محدود للحمل. والصمام الذي لا يُختبر شهورًا قد يلتصق بسبب ترسبات البخار، فيفشل في الإغلاق عند الحاجة الحقيقية.

37.7 توربينات الاستخلاص والضغط الخلفي

في المصانع ومحطات التحلية والمصافي تُستخدم توربينات تزود العملية ببخار منخفض أو متوسط الضغط إلى جانب الكهرباء. وهنا يصبح التحكم متعدد المتغيرات:

- **توربين الضغط الخلفي:** كل البخار الداخل يخرج إلى شبكة العمليات. فإذا تحكمنا بالحمل الكهربائي تغير البخار المرسل للعملية، وإذا تحكمنا بضغط شبكة العمليات صار الحمل تابعًا لحاجتها. لذلك يُختار أحد الوضعين، والشائع أن يتبع التوربين ضغط العادم، وتُعوّض الشبكة الكهربائية الفرق.
- **توربين الاستخلاص المنظم:** له صمامات دخول تحدد البخار الكلي، وصمامات داخلية بين قسمي الضغط العالي والمنخفض تحدد ما يستمر إلى المكثف. فالمتغيران المتحكَّم بهما، الحمل وضغط الاستخلاص، يتأثران معًا بكل صمام. وتستخدم الحاكمات مصفوفة فك ترابط (Decoupling) مبنية على خريطة البخار (Steam Map) للتوربين: فإذا طُلبت زيادة الحمل وحده، فُتحت صمامات الدخول والصمامات الداخلية بنسب تجعل ضغط الاستخلاص ثابتًا، والعكس.

مثال توضيحي (فك الترابط): توربين استخلاص تكون فيه القدرة تقريبًا $P = a \times Q1 + b \times Q2$، حيث Q1 تدفق البخار الداخل وQ2 التدفق المستمر إلى قسم الضغط المنخفض، والاستخلاص $E = Q1 - Q2$. إذا طلبت العملية زيادة الاستخلاص 10 t/h مع بقاء القدرة ثابتة، فلا يكفي أن نغلق الصمامات الداخلية 10 t/h، لأن القدرة ستنخفض بمقدار $b \times 10$. بل يجب أن نزيد Q1 أيضًا بمقدار يعوض ذلك:

- المعطيات: $a = 0.08$ و$b = 0.12$ MW لكل t/h؛ الزيادة في Q1 مقدارها x، والتخفيض في Q2 مقداره y.
- شرط الاستخلاص: $x + y = 10$
- شرط ثبات القدرة: $0.08x - 0.12y = 0$
- الحل: $y = 4$ t/h و$x = 6$ t/h.
- التفسير: هذا بالضبط ما تحسبه مصفوفة فك الترابط في الحاكم، مستخدمة معاملات الخريطة الفعلية لا القيم التقريبية.

الشكل 37-6: *فك الترابط في توربين الاستخلاص المنظم: لزيادة الاستخلاص 10 t/h مع ثبات القدرة يزيد الحاكم تدفق الدخول Q1 بمقدار 6 t/h ويخفض التدفق إلى قسم الضغط المنخفض Q2 بمقدار 4 t/h (بمعاملين a = 0.08 و b = 0.12 MW لكل t/h)، ولو أُغلقت الصمامات الداخلية وحدها لانخفضت القدرة 1.2 MW.*

37.8 الحمايات ومراقبة التوربين

تُقسم حماية التوربين البخاري إلى ثلاث طبقات: حمايات الحاكم التي تمنع الوصول إلى الخطر، ونظام الفصل الذي يغلق الصمامات، وأجهزة مراقبة التوربين (Turbine Supervisory Instrumentation – TSI) التي تقيس الحالة الميكانيكية.

حماية السرعة الزائدة بثلاثة مستويات:

- **التحكم بمنع السرعة الزائدة (OPC):** عند رفض الحمل المفاجئ يظل البخار المخزن في الأجسام ومعيد التسخين يدفع التوربين. لذلك تغلق وظيفة OPC صمامات التحكم والاعتراض لحظيًا إذا تجاوزت السرعة حدًا، يتراوح بين نحو 103% و107.5% حسب الصانع، ثم تعيد فتحها حين تنخفض السرعة. وفي كثير من الحاكمات تُضاف وظيفة استباقية: إذا انفصل المولد عن الشبكة أو ظهر فرق كبير بين القدرة الميكانيكية، المستنتجة من ضغط دخول جسم الضغط المتوسط، والقدرة الكهربائية المقاسة من محولات التيار، تُغلق صمامات الاعتراض قبل أن ترتفع السرعة أصلًا.
- **الفصل الكهربائي بالسرعة الزائدة (EOST):** يفصل التوربين إذا تجاوزت السرعة نحو 110% إلى 111%، بتصويت اثنين من ثلاثة على قنوات مستقلة.
- **الفصل الميكانيكي بالسرعة الزائدة (MOST):** في الوحدات التي تحتوي عليه، مسمار طارد مركزي في طرف العمود يفرّغ زيت الفصل عند نحو 110%. ويُختبر قبل التزامن برفع حد الفصل الكهربائي مؤقتًا، مثلًا إلى 115%، وتعطيل OPC، ثم رفع السرعة ببطء حتى يعمل المسمار وتُسجل سرعته. وهو اختبار حساس يحتاج إجراءً مكتوبًا وحضور المسؤولين.

الشكل 37-7: *مستويات حماية السرعة الزائدة للتوربين البخاري: وظيفة منع السرعة الزائدة (OPC) بين نحو 103 و107.5% تغلق صمامات التحكم والاعتراض لحظيًا، والفصل الكهربائي (EOST) عند نحو 110 إلى 111% بتصويت 2oo3، والمسمار الميكانيكي (MOST) عند نحو 110%، ويُرفع حد الفصل الكهربائي مؤقتًا إلى 115% أثناء اختبار المسمار فقط مع تعطيل OPC.*

حمايات الفصل الأخرى النموذجية:

الحماية	القياس	ملاحظات
انخفاض ضغط زيت التزييت	مفاتيح أو مرسلات ضغط مكررة	تشغيل المضخة الاحتياطية ومضخة التيار المستمر قبل الفصل
انخفاض ضغط السائل الهيدروليكي	مرسلات ضغط	فقدانه يعني فقدان التحكم بالصمامات

الحماية	القياس	ملاحظات
انخفاض الفراغ في المكثف	مرسلات ضغط مطلق	الفراغ المنخفض يرفع حرارة العادم ويجهد ريش الضغط المنخفض الطويلة
ارتفاع حرارة غلاف العادم	مزدوجات حرارية	يُفعِّل رش ماء التبريد قبل الفصل
الإزاحة المحورية (Thrust)	مجسات قرب على طوق العمود	تكشف تآكل محمل الدفع قبل الاحتكاك المحوري
الاهتزاز	مجسات قرب على العمود ولواقط على المحامل	إنذار ثم فصل، وفق API 670 ومتطلبات الصانع
التمدد التفاضلي	مجسات قرب طويلة المدى	الفرق بين تمدد الدوّار والغلاف (القسم 37.9)
دخول الماء (Water Induction)	مزدوجات أعلى وأسفل الأنابيب ومستوى المسخنات	إغلاق صمامات الاستخلاص وفتح التصريفات وفق ASME TDP-1

أجهزة مراقبة التوربين (TSI): تقيس الاهتزاز والانحراف المركزي والموضع المحوري والتمدد التفاضلي وتمدد الغلاف والسرعة الصفرية. وهي منظومة مستقلة غالبًا، مثل Bently Nevada 3500 أو VM600، تُرسل مرحلات الفصل إلى نظام الحماية وإشارات تناظرية إلى الحاكم والتحكم الموزع. ويأتي تفصيل مجسات القرب ومعايرتها في الفصل 32.

37.9 الإجهاد الحراري والتمدد التفاضلي

الدوّار والأغلفة في التوربين البخاري قطع معدنية سميكة. فحين يدخل بخار أسخن من المعدن، يسخن السطح بسرعة ويتأخر القلب، فينشأ فرق حرارة داخل المعدن يولد إجهادًا. وتكرار هذه الدورات يستهلك عمر الدوّار بالكلل الحراري منخفض الدورات. لذلك تُراقب الحاكمات الحديثة الإجهاد بنموذج حسابي (Turbine Stress Evaluator – TSE)، يقدّر

حرارة سطح الدوّار وقلبه من حرارة البخار والمعدن المقاسة، ويحدد تبعًا لذلك معدل رفع السرعة ومعدل التحميل المسموحين.

التمدد التفاضلي: يسخن الدوّار أسرع من الأغلفة لأنه أخف نسبيًا ومحاط بالبخار، فيتمدد محوريًا أكثر منها أثناء البدء والتحميل. وإذا زاد الفرق عن الخلوص المحوري بين الريش والأجزاء الثابتة حدث احتكاك. والعكس يحدث عند التبريد السريع أو التفريغ المفاجئ. ولهذا يُعد التمدد التفاضلي من أهم قيود البدء، وأحيانًا هو الذي يفرض التوقف عند سرعة ثابتة أو حمل ثابت حتى تلحق الأغلفة بالدوّار.

تصنيف البدء: يُصنف البدء باردًا أو دافئًا أو ساخنًا حسب حرارة معدن المرحلة الأولى أو الغلاف الداخلي لجسم الضغط العالي، لا حسب مدة التوقف وحدها، ولكل صنف منحنى بدء ومعدلات مختلفة يحددها الصانع.

> **مثال توضيحي (مطابقة حرارة البخار مع المعدن):** حرارة معدن المرحلة الأولى 380 °C بعد توقف ليلة، ومنحنى الصانع يطلب أن تكون حرارة البخار عند الدخول أعلى من حرارة المعدن بما لا يقل عن 30 °C ولا يزيد على 110 °C تقريبًا. فالنطاق المقبول لحرارة البخار الرئيسي هنا بين 410 و490 °C. فإذا كان المرجل ينتج بخارًا عند 540 °C، فإن الإدخال المباشر يعرّض الدوّار لفرق يبلغ 160 °C وإجهاد مرتفع، والحل خفض حرارة البخار بالرش أو بتعديل الحرق قبل الدوران. وإذا كان البخار عند 360 °C، فهو أبرد من المعدن، فسيبرّد السطح ويولد إجهادًا عكسيًا وقد يتكثف، والحل رفع حرارته أولًا. والقيم هنا للتوضيح، والمرجع منحنيات الصانع.

الشكل 37-8: *مطابقة حرارة البخار مع حرارة معدن المرحلة الأولى قبل الدوران: المعدن عند 380 °C والنطاق المقبول للبخار من 410 إلى 490 °C (أعلى من المعدن بـ 30 إلى 110 °C)، فالبخار عند 540 °C يُخفض أولًا والبخار عند 360 °C يُرفع أولًا؛ والقيم للتوضيح والمرجع منحنى الصانع.*

37.10 المرجل ومولد البخار من منظور التوربين

يُشرح تحكم المرجل ومولد البخار باستعادة الحرارة (HRSG)، ومستوى الدرم ثلاثي العناصر، وظاهرة الانتفاخ والانكماش، في الفصل 36 (القسمان 36.7 و36.12). وما يهم هذا الفصل منه أن المرجل مصدر البخار الذي يحدد ضغطه حدود حركة صمامات التوربين، وأن مولد البخار في الدورة المركبة يتبع التوربين الغازي، فلا يملك وقوده إلا بالحرق الإضافي (القسم 36.11).

37.11 التنسيق بين التوربين الغازي والبخاري في الدورة المركبة

في محطة الدورة المركبة غير المحروقة يحدد التوربين الغازي الطاقة المتاحة، ويستثمرها التوربين البخاري بأفضل كفاءة. لذلك يختلف دور الحاكم البخاري عنه في المحطة التقليدية:

- **بعد البدء والتحميل الأولي** يعمل التوربين البخاري عادة في وضع التحكم بضغط الدخول: تفتح صماماته تدريجيًا بينما تُغلق صمامات التجاوز، حتى تُغلق هذه كاملًا.
- **في التشغيل العادي** تبقى صمامات التوربين مفتوحة كاملًا تقريبًا، ويتبع الضغط حمل التوربين الغازي انزلاقًا، ويُمنع من الانخفاض تحت حد أدنى يحمي الدرم والتوربين.
- **يأتي الحمل الإضافي** من التوربين الغازي، ويتبعه البخاري بعد تأخر مولد البخار HRSG الحراري، الذي قد يبلغ دقائق. وعند طلب استجابة تردد سريعة يجب أن تتحملها التوربينات الغازية.
- **عند فصل التوربين البخاري** تفتح صمامات التجاوز فورًا، ويخفض التوربين الغازي حمله إذا لزم إلى ما يتحمله نظام التجاوز والمكثف.
- **عند فصل التوربين الغازي** ينخفض البخار سريعًا، فيجب أن يتبع الحاكم البخاري الانخفاض دون أن يسحب الضغط تحت حده الأدنى، ويحمي منطق المستوى الدرم من الانكماش.

جدول مقارنة: التوربين الغازي مقابل البخاري من منظور مهندس التحكم

المعيار	التوربين الغازي	التوربين البخاري
المتغير المتحكم به أساسًا	تدفق الوقود (FSR)	فتح صمامات البخار (الحاكم)
الحلقات المتنافسة	سرعة/حمل، حرارة العادم، التسارع، IGV	سرعة/حمل، ضغط البخار (مع المرجل)، الاستخلاص
قيد البدء	التطهير والإشعال والتسارع الحراري	التسخين والتمدد التفاضلي والسرعات الحرجة
زمن البدء	دقائق (10 إلى 30)	ساعات (بارد) إلى دقائق (ساخن)

المعيار	التوربين الغازي	التوربين البخاري
الحمايات الحاسمة	فقد اللهب، حرارة العادم وانتشارها، الاهتزاز، السرعة الزائدة	السرعة الزائدة، الإزاحة المحورية، التمدد التفاضلي، الفراغ، مستوى الدرم
العنصر النهائي	صمامات وقود مؤازرة، IGV	صمامات إيقاف وتحكم هيدروليكية بسائل مقاوم للحريق
رفض الحمل	يحتاج تحكمًا سريعًا بالوقود لمنع السرعة الزائدة	يحتاج إغلاق الصمامات في أقل من ثانية وتجاوز البخار (Bypass)
الفصول في هذا الكتاب	34، و32 و33 للاهتزاز	37، و36 للمرجل ومولد البخار

37.12 حالة ميدانية: فصل بارتفاع مستوى الدرم عند فتح التجاوز

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في محطة دورة مركبة، تكرر فصل التوربين الغازي أثناء البدء الساخن بحماية ارتفاع مستوى درم الضغط العالي. كان الفصل يحدث دائمًا في الدقائق الأولى بعد أن يبدأ صمام التجاوز عالي الضغط بالفتح لتنظيم الضغط.

أظهرت المنحنيات أن الصمام انتقل خلال ثوانٍ من الإغلاق إلى فتحة كبيرة، لأن متحكم ضغط التجاوز كان مضبوطًا بكسب مرتفع ونقطة ضبط ضغط أقل من ضغط الدرم المحفوظ من التوقف. فانخفض ضغط الدرم بسرعة، وانتفخ الماء، وقفز المستوى الظاهر فوق حد الفصل. وفي الوقت نفسه كانت حلقة المستوى في الوضع أحادي العنصر، لأن تدفق البخار أقل من حد الانتقال، فخفضت ماء التغذية وزادت الانكماش اللاحق حدة.

الشكل 37-9: *تسلسل الحالة الميدانية لفصل الوحدة بارتفاع مستوى الدرم: فتح صمام التجاوز عالي الضغط بسرعة يخفض ضغط الدرم فينتفخ الماء ويقفز المستوى فوق حد الفصل؛ وبعد الإصلاح يبدأ مرجع ضغط التجاوز من ضغط الدرم الفعلي وينخفض بمعدل محدود (Ramp)، مع تجميد مؤقت لخفض ماء التغذية وخفض نقطة ضبط المستوى قبل البدء، فتمر البداية الساخنة دون فصل.*

عولجت المشكلة من ثلاث جهات: جُعلت نقطة ضبط ضغط التجاوز تبدأ من الضغط الفعلي للدرم لحظة تفعيله ثم تنخفض بمعدل محدود (Ramp)، وخُفض معدل فتح الصمام في مرحلة البدء، وأُضيف إلى حلقة المستوى أحادية العنصر تجميد مؤقت لخفض ماء التغذية أثناء الانتفاخ الناتج عن هبوط الضغط، مع خفض نقطة ضبط المستوى قليلًا قبل البدء الساخن لإتاحة هامش للانتفاخ. وبعدها مرت البدايات الساخنة دون فصل.

الدروس:

- الانتفاخ والانكماش ليسا عطلًا في القياس، بل سلوك فيزيائي يجب أن يُصمم له منطق التحكم.
- حلقات الضغط والمستوى في الدرم مترابطة؛ ضبط إحداهما بمعزل عن الأخرى ينقل المشكلة ولا يحلها.
- مرجع يبدأ من القيمة الفعلية ويتغير بمعدل محدود يمنع كثيرًا من القفزات عند تفعيل الحلقات.

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
البدء والحدود الحرارية	برنامج رفع السرعة والتحميل، ونطاقات السرعة الحرجة، ومطابقة حرارة البخار مع المعدن وفق منحنيات الصانع	يقرأ حرارة المعدن والانحراف المركزي والتمدد التفاضلي قبل الدوران ويسجلها
الحاكم والصمامات	فئة الحاكم، ونمط إدارة الصمامات ومنحنيات التخطيط، وثوابت حلقة السرعة	يقيس زمن شوط الصمامات بعد كل صيانة، ويأخذ عينات السائل الهيدروليكي، ويعاير LVDT
السرعة الزائدة	إجراء اختبار OPC وEOST وMOST ومعايير قبوله	ينفذ الاختبار بالإجراء المكتوب، ويسجل سرعة الفصل وزمن الإغلاق، ويعيد الحدود بعد الاختبار
الدورة المركبة	تنسيق التجاوز وضغط الدخول مع مولد البخار وحلقات الدرم	يراقب تسلسل فتح التجاوز ومستوى الدرم في البدء الساخن ويسجل الاتجاهات

37.13 الأخطاء الشائعة

- إدخال بخار أسخن أو أبرد كثيرًا من معدن التوربين دون الرجوع إلى منحنيات الصانع.

- التوقف عند سرعة داخل نطاق حرج، أو تعطيل منع ذلك في برنامج رفع السرعة.
- ترك صمامات الإيقاف والتحكم دون اختبار دوري حتى تلتصق.
- إهمال تحليل السائل الهيدروليكي المقاوم للحريق، ثم معالجة التصاق الصمامات المؤازرة بتبديلها المتكرر.
- قياس مستوى الدرم دون تعويض كثافة، أو تعبئة الأعمدة المرجعية بشكل ناقص بعد الصيانة.
- الانتقال بين التحكم أحادي العنصر وثلاثي العناصر بقفزة في خرج صمام ماء التغذية.
- جعل نقطة ضبط حرارة ما بعد الرش قريبة من حرارة التشبع، فينتقل الماء إلى المحمص.
- إجراء اختبار الفصل الميكانيكي بالسرعة الزائدة دون إجراء مكتوب يحدد رفع الحد الكهربائي وتعطيل OPC وإعادتهما بعد الاختبار.
- معاملة التوربين البخاري في الدورة المركبة كأنه في محطة تقليدية، ومحاولة دفعه لتحمل استجابة تردد سريعة لا يملك طاقتها.

37.14 ملخص

يُتحكم بالتوربين البخاري عبر صماماته: الإيقاف والتحكم على خط الضغط العالي، والإيقاف والاعتراض على خط إعادة التسخين، وتحركها مشغلات كهروهيدروليكية بسائل مقاوم للحريق. ويرفع الحاكم الرقمي السرعة ببرنامج يراعي فحص الاحتكاك والتسخين والسرعات الحرجة، ثم ينقل التحكم إلى صمامات التحكم، ويتزامن ويحمّل بالانحدار ضمن معدلات يسمح بها المرجل والإجهاد الحراري. وتحمي وظائف OPC وEOST وMOST من السرعة الزائدة، وتراقب أجهزة TSI الحالة الميكانيكية. ومن جهة المرجل ومولد البخار (الفصل 36) يهم التوربين ضغط البخار وحرارته، وسلوك الدرم عند فتح التجاوز. وفي الدورة المركبة يتبع التوربين البخاري التوربين الغازي بضغط منزلق.

وفي الفصل التالي: يتناول الفصل 38 «أنظمة التحكم والسلامة لرؤوس الآبار ومنشآت الإنتاج»، فننتقل من محطات الطاقة إلى أقرب نقطة في المنشأة النفطية إلى ضغط المكمن، حيث تقوم الحماية على منطق هوائي وهيدروليكي يعمل ولو انقطعت الكهرباء.

37.15 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق بين وظيفة صمام الإيقاف الرئيسي وصمام التحكم؟ ولماذا يوجد صمام اعتراض على خط إعادة التسخين؟
2. توربين على شبكة 60 Hz بمولد ثنائي الأقطاب وعجلة سرعة من 60 سنًا. ما تردد اللاقط عند السرعة المقننة؟
3. لماذا يُتحكم بالسرعة أحيانًا بصمامات الإيقاف أثناء البدء؟ وما المقصود بنقل الصمامات؟
4. وحدة 300 MW بانحدار 4% على شبكة 50 Hz. كم يتغير حملها إذا ارتفع التردد 0.15 Hz؟
5. قارن بين نمطي «المرجل يتبع» و«التوربين يتبع» من حيث استجابة الحمل واستقرار الضغط.
6. متى يُفضل القوس الكامل على القوس الجزئي؟ ولماذا؟
7. اشرح الفرق بين OPC وEOST، وكيف يُختبر الفصل الميكانيكي بالسرعة الزائدة.
8. ما سبب ظاهرة الانتفاخ في الدرم؟ ولماذا يعالجها التحكم ثلاثي العناصر؟
9. أعد المثال المحلول في القسم 36.12 لضغط 60 bar، حيث كثافة الماء المشبع نحو 758 kg/m³ وكثافة البخار نحو 31 kg/m³، والمستوى الحقيقي 0.40 m.
10. في الحالة الميدانية (القسم 37.12)، لماذا زاد الوضع أحادي العنصر حدة المشكلة؟ وما أثر بدء نقطة ضبط الضغط من القيمة الفعلية؟

مراجع الفصل: التحكم بالتوربينات البخارية وحاكمات DEHC ووظائف OPC وIPR وإدارة الصمامات (Steam Turbine Control، عرض تدريبي لمحطة حرارية)؛ مبادئ

(GE، Gas Turbine Controls المشتركة مع التوربينات الغازية Speedtronic، Fundamentals)؛ ASME TDP-1 لمنع تلف التوربينات بدخول الماء؛ API 612 للتوربينات البخارية في الصناعات النفطية؛ API 670 لأنظمة حماية الآلات؛ NFPA 85 لأنظمة المراجل والحارقات؛ ISA-77 لأنظمة التحكم في محطات التوليد بالوقود الأحفوري؛ خبرة المؤلف في محطات الدورة المركبة ورسالته في التحكم الضبابي بمستوى الدرم ثلاثي العناصر (R59، القسم 36.7.2)؛ NEMA SM 23 وAPI 611/612 (فئات الحاكم وتوربينات الإدارة الميكانيكية).

الفصل 38: أنظمة التحكم والسلامة لرؤوس الآبار ومنشآت الإنتاج

لمن هذا الفصل: لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في حقول النفط والغاز البرية والبحرية الذي يصمم لوحة تحكم رأس بئر أو يراجعها، ولمهندس التشغيل الذي يعيد فتح بئر بعد إيقاف، ولفني الأجهزة الذي يختبر الطيارات والصمامات دوريًا.

الفكرة الأساسية: رأس البئر أقرب نقطة في المنشأة إلى مصدر الطاقة كلها: ضغط المكمن. ولذلك يُحمى بحواجز متتالية تُغلق بترتيب محدد، وبمنطق هوائي أو هيدروليكي يعمل وإن انقطعت الكهرباء، وبقاعدة لا تعود فيها البئر إلى الإنتاج إلا بأمر يدوي بعد زوال السبب. ويتناول هذا الفصل بالترتيب: صمامات رأس البئر وترتيب إغلاقها، وحساسات خط التدفق، ولوحة التحكم ومنظومتها الهيدروليكية، ومستويات الإيقاف وإعادة التشغيل، والتجاوز والاختبار الدوري، ومنهج API RP 14C في اختيار الحمايات، والحلقة الهوائية للإيقاف الطارئ والوصلات القابلة للانصهار. ويكمّله الفصل 31 بالحمايات النموذجية لبقية معدات الإنتاج والمعالجة.

38.1 منظومة إيقاف رأس البئر: الصمامات وترتيب الإغلاق

تبدأ حماية البئر من صماماتها. ولذلك يحتاج من يراجع لوحة تحكم رأس بئر (Wellhead Control Panel – WHCP) من مورّد، أو يعيد بئرًا إلى الإنتاج بعد إيقاف، إلى فهم ترتيب هذه الصمامات قبل أي شيء آخر.

رأس البئر ليس «صمامًا واحدًا يُغلق»، بل ثلاثة حواجز متتالية بين المكمن والمنشأة، لكل منها زمنُ إغلاق مختلف وكلفةُ صيانة مختلفة، ومن هذا الاختلاف يُشتقّ كل منطق اللوحة.

الحواجز الثلاثة

(أ) الصمام تحت السطحي (Subsurface Safety Valve). يقع داخل أنبوب الإنتاج (Tubing) على عمق عشرات إلى مئات الأمتار تحت السطح، ووظيفته احتواء البئر إذا فُقد رأس البئر نفسه: حريق يلتهم شجرة الميلاد، أو اصطدام، أو تمزّق في خط التدفق. وهو نوعان:

- **الصمام المتحكَّم به من تحت السطح (Subsurface-Controlled Subsurface Valve – SSCSV)**، ويسمّى ميدانيًا **خانق العاصفة (Storm Choke)**: صمام يعمل بالسرعة، يُغلق ذاتيًا حين تتجاوز سرعة المائع حدًّا يدل على انفلات عند السطح. لا يحتاج أي وصلة إلى السطح ولا إلى اللوحة، وهذه ميزته وعيبه معًا: لا يمكن إغلاقه بأمر، ولا اختباره إلا بإحداث الظرف الذي يُغلقه.
- **الصمام تحت السطحي المتحكَّم به من السطح (Surface-Controlled Subsurface Safety Valve – SCSSV)**، ويسمّى **صمام الأمان في قعر البئر (Downhole Safety Valve)**: كرة أو رفراف (Flapper) يُبقيه مفتوحًا ضغطٌ هيدروليكي قادم من السطح عبر خط تحكم دقيق (Control Line) مثبّت على أنبوب الإنتاج. وفقدُ الضغط — بقطع الخط أو بأمر من اللوحة — يُغلقه، ولا يُفتح إلا بإعادة الضغط. هذا هو **الفشل إلى الإغلاق (Fail-Closed)** في أنقى صوره، وهو النوع الذي يعني مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس.

جدول مقارنة: نوعا الصمام تحت السطحي

المعيار	خانق العاصفة (SSCSV)	المتحكَّم به من السطح (SCSSV)
مبدأ الإغلاق	سرعة المائع تتجاوز حدًّا	فقد الضغط الهيدروليكي من السطح
واجهة مع لوحة التحكم	لا توجد	خط تحكم هيدروليكي واحد لكل بئر
الإغلاق بأمر (ESD أو حريق)	غير ممكن	ممكن وهو الغرض الأساس
الاختبار الدوري	صعب؛ يتطلب إحداث الظرف	إغلاق بأمر ثم اختبار تسرب المقعد
الحساسية للتغيّر في معدل الإنتاج	عالية؛ يحتاج إعادة ضبط مع تدهور البئر	لا يتأثر
أين يُستعمل عادة	آبار قديمة أو بعيدة بلا لوحة	كل بئر مربوط بمنشأة ذات نظام إيقاف

كيف أختار؟ القاعدة: كل بئر مربوطة بمنشأة ذات نظام إيقاف تأخذ صمامًا متحكَّمًا به من السطح (SCSSV)، لأنه الوحيد الذي يستجيب لأمر الإيقاف الطارئ والحريق ويُختبر دوريًا؛ ولا يبقى خانق العاصفة إلا في بئر بعيدة بلا لوحة. والجدول لا يبين ما يستتبعه اختيار SCSSV في اللوحة: منظومة هيدروليكية وخزانًا محسوبًا لعمق الصمام (القسم 38.3) وتأخيرًا زمنيًا في ترتيب الإغلاق. والخطأ الأكثر كلفة اختيار الصمام وحده وترك ترتيب إغلاقه للإجراء لا للدائرة، فيُغلق قبل السطحيين ويتفرّغ ما فوق الرفراف، وتصبح البئر بئرًا لا تُفتح.

(ب) شجرة الميلاد (Christmas Tree) وصماماتها السطحية. ترتيبها من الأسفل إلى الأعلى:

الصمام	الموضع	يُؤتمت؟	لماذا
الرئيسي السفلي (Lower Master)	أول صمام فوق رأس التغليف	لا عادة	لا يمكن عزله للصيانة، فأتمتته تعني إيقاف البئر لكل عطل في مشغّله
الرئيسي العلوي (Upper Master)	فوقه	نعم	هو **الصمام السطحي الآمن (Surface Safety Valve – SSV)** في التركيب المعتاد: ثاني صمام سطحي في مسار المائع الخارج من البئر
التاج / (Crown Swab)	أعلى الشجرة	لا	يُفتح فقط للوصول الرأسي إلى أنبوب الإنتاج (تسجيل، تثقيب، عمليات السلك)
الجناح رقم 1 (Wing #1)	على مخرج الجناح	أحيانًا	إن أُتمت فهو **صمام الإيقاف (Shutdown Valve – SDV)**، أي احتياطي للـ SSV
الجناح رقم 2	مخرج جناح ثانٍ	أحيانًا	احتياطي أو مسار اختبار
الخانق (Choke)	بعد صمام الجناح	يدوي أو مؤتمت	يحدد معدل الإنتاج ويسقط الضغط؛ ليس صمام إيقاف

نقطتان عمليتان يُخطئ فيهما كثيرون:

1. **التمييز بين SSV وSDV ليس تمييزًا في التصميم بل في المكانة التنظيمية.** الصمام الذي يُعدّ صمام الأمان السطحي تخضع أجزاؤه لتتبّع المصدر (Traceability) ولسجلّ صيانة موسّع بموجب لوائح كثيرة، أما الصمام الاحتياطي فلا. ولذلك يجب أن تُحسم هوية كل صمام في وثائق المشروع قبل الشراء لا بعده.
2. **إن لم يكن في الشجرة إلا صمام رئيسي واحد**، صار صمام الجناح رقم 1 هو SSV بالضرورة، ولزمه ما يلزم SSV من تتبّع وسجلّات.

الشكل 38-1: *الحواجز الثلاثة في رأس البئر: الصمام تحت السطحي المتحكَّم به من السطح (SCSSV) داخل أنبوب الإنتاج، والرئيسي العلوي بوصفه الصمام السطحي الآمن (SSV)، والجناح رقم 1 بوصفه صمام الإيقاف (SDV)؛ ثم الخانق (Choke) وطيارا الضغط العالي والمنخفض (PSH/PSL) والصمام اللارجعي على خط التدفق (Flowline).*

(ج) خط التدفق (Flowline) وحمايته. خط التدفق هو الوصلة بين صمام الجناح والمجمع أو الفاصل، وهو المكان الذي تقع فيه أغلب التسريبات. والقاعدة الحاكمة: **إمّا أن يكون خط التدفق مقنّنًا لضغط إغلاق أنبوب الإنتاج – (Shut-In Tubing Pressure (SITP بأكمله، وإمّا أن يُحمى بصمام تنفيس و/أو نظام إيقاف.** فإن لم يكن مقنّنًا للضغط الكامل ولا صمام تنفيس عليه، وجب أن تحوي اللوحة **دائرتي إيقاف مستقلتين تمامًا**

لصمامي أمان سطحيين مستقلين؛ وحتى في هذه الحالة يبقى تركيب صمام التنفيس هو الموصى به، لأن مرحّلًا واحدًا فاشلًا أو تجاوزًا منسيًّا يُبطل الدائرتين معًا.

ترتيب الإغلاق ولماذا يُغلق تحت السطحي أخيرًا

المُطلِق	الجناح (SDV)	الرئيسي (SSV)	تحت السطحي (SCSSV)	الإنذار
PSH أو PSL على خط التدفق	يُغلق أولًا	يُغلق بعد تأخير	لا يُغلق	نعم
مسبار الرمل (Sand Probe)	لا	لا	لا	نعم فقط
ESD من المنشأة	يُغلق	يُغلق	يُغلق بعد إغلاق السطحيين	نعم
حلقة الوصلات القابلة للانصهار (حريق)	يُغلق	يُغلق	يُغلق بعد إغلاق السطحيين	نعم
فقد ضغط اللوحة (هواء/غاز أو هيدروليك)	يُغلق	يُغلق	يُغلق	نعم

وراء هذا الترتيب ثلاثة أسباب، كلها عملية:

1. **حفظ الصمام الأغلى.** إغلاق صمام على تدفق كامل يُتلف الأجزاء الداخلية (Trim) والمقعد. فيُغلق الجناح أولًا ليتوقف الجريان، ثم يُغلق الرئيسي بعد تأخير زمني على مائع ساكن. وكلفة استبدال الصمام الرئيسي وزمنه أضعاف كلفة الجناح.
2. **حفظ عمر الصمام تحت السطحي.** عمره دالّة مباشرة في عدد دوراته، وإصلاحه يعني تدخّلًا في البئر بكلفة كبيرة. فلا يُغلق إلا عند حدث جسيم: ESD أو حريق أو فقد المرافق.
3. **وهذا أهمها هندسيًا: حبس الضغط فوق الرفراف.** إغلاق الصمامين السطحيين أولًا يحبس ضغط أنبوب الإنتاج فوق الصمام تحت السطحي، فيبقى الفرق في

الضغط عبر الرفراف صغيرًا. أما لو أُغلق تحت السطحي أولًا والجناح ما زال مفتوحًا، لاستمر تفريغ ما فوقه إلى خط التدفق فينشأ فرق ضغط كبير عبر الرفراف، ويصير فتحه عند إعادة التشغيل صعبًا أو مستحيلًا بالمنظومة الهيدروليكية المتاحة، فتحتاج البئر إلى عملية ضغط مُعادلة أو إلى تدخّل. **هذا التأخير الزمني بين إغلاق السطحيين وإغلاق تحت السطحي ليس ترفًا بل شرط إعادة التشغيل.**

وعند الفتح ينعكس الترتيب بالضبط: **تحت السطحي أولًا، ثم الرئيسي، ثم الجناح.** ويُبنى هذا في العتاد لا في التعليمات: مرحّل إعادة ضبط الجناح يأخذ تغذيته من مرحّل إعادة ضبط الرئيسي، ومرحّل الرئيسي لا يُغذّى إلا بعد أن يُثبت مفتاح الضغط الهيدروليكي المنخفض أن الصمام تحت السطحي مفتوح. فلا يستطيع المشغّل عكس الترتيب ولو أراد.

الشكل 38-2: *ترتيب الإغلاق والفتح في رأس البئر: عند الإيقاف الطارئ أو الحريق يُغلق الجناح (SDV) أولًا، ثم الرئيسي (SSV) بعد 5 إلى 15 s، ثم الصمام تحت السطحي (SCSSV) بعد السطحيين فيبقى ضغط الأنبوب محبوسًا فوق الرفراف؛ وعند إعادة التشغيل ينعكس الترتيب وتفرضه سماحيات مبنية في العتاد.*

◆ ◆ ◆

38.2 حساسات خط التدفق ووسائط بدء الإيقاف

بعد الصمامات التي تُغلق البئر، ننتقل إلى ما يأمرها بالإغلاق: طيارات الضغط على خط التدفق، ومسبار الرمل، وحلقة الوصلات القابلة للانصهار، وأزرار الإيقاف اليدوي.

الطيارات عالية ومنخفضة الضغط *(HP/LP Pilots)*

الطيار (Pilot) مفتاح ضغط هوائي: يستشعر ضغط العملية مباشرة، ويمرّر ضغط خرج هوائي (أو غازي) أو يقطعه من دون أي كهرباء. والمنظومة تحتاج طيارين على خط تدفق كل بئر: **PSH** لكشف ارتفاع الضغط (خانق انسدّ، صمام مصبّ أُغلق) و**PSL** لكشف انخفاضه (تسريب أو تمزّق أو نضوب البئر). ويُركّبان عادة متجاورين على مشعب واحد (Manifold) يسمّى **مجموعة الطيار العالي–المنخفض (High-Low Pilot)**؛ فالتسميتان تصفان طريقة التوصيل لا تصميمين مختلفين.

لماذا طيّار لا مرسل؟ ليس تخلّفًا تقنيًا بل قرار هندسي له شروطه:

- **لا يحتاج طاقة كهربائية ولا حاجزًا ولا تصنيف منطقة لدائرة كهربائية.** في رأس بئر بري بعيد لا كهرباء فيه، الطيار هو الحل الوحيد الذي لا يستدعي مصدرًا ولا ألواحًا شمسية ولا بطاريات.
- **يعمل داخل المنطق نفسه بلا واجهة.** خرج الطيار هوائي، ومنطق اللوحة هوائي، فلا حاجة إلى ملف كهربائي ولا مرحّل ولا محوّل إشارة؛ وكل واجهة إضافية نقطةُ فشل إضافية في وظيفة حماية.
- **متين ويُصلَح في الموقع.** الطيار المكبسي (Stick Pilot) يقاوم الاهتزاز والصدمة، وقطع غياره قليلة، ويُضبط بمفك في الميدان.
- **لكنه يدفع ثمن ذلك:** لا قراءة مستمرة ولا تشخيص ولا تسجيل اتجاهي، ومنطقة ميتة أوسع من المفتاح الإلكتروني، وزمن استجابة أطول لأن العمل يجري بتفريغ حجم.

فالقاعدة العملية: **الطيارات في المواقع البعيدة وغير المأهولة وفي اللوحات الهوائية الخالصة؛ والمرسلات مع حلّال منطق حيث توجد كهرباء موثوقة ومراقبة مركزية ورغبة في اتجاهات الضغط.** ويشيع الحل المزدوج: مرسل للمراقبة والاتجاه، وطيار مستقل للحماية.

جدول مقارنة: عناصر استشعار ضغط خط التدفق

المعيار	طيار مكبسي (Stick)	طيار بأنبوب بوردون	مفتاح ضغط إلكتروني	مرسل + حلّال منطق
مصدر الطاقة	هواء أو غاز فقط	هواء أو غاز فقط	كهرباء	كهرباء
الضبط في الميدان	سهل بمفك	سهل بمفك	سهل	من الشاشة أو المتصفح
المنطقة الميتة	واسعة نسبيًا	واسعة نسبيًا	ضيقة	برمجية، تُختار
مقاومة الاهتزاز	ممتازة	جيدة	جيدة إلى ممتازة	جيدة
التشخيص والاتجاه	لا شيء	لا شيء	محدود	كامل
الكلفة الأولية للحلقة	الأدنى	الأدنى	متوسطة	الأعلى
أين يُختار	رؤوس آبار بعيدة، لوحات هوائية	كما سبق، مع حاجة إلى مؤشر	لوحة كهربائية/هيدروليكية	منشأة مأهولة بمراقبة مركزية

كيف أختار؟ ابدأ من مصدر الطاقة والمراقبة: موقع بلا كهرباء موثوقة أو لوحة هوائية خالصة يأخذ طيارًا مكبسيًا، ومنشأة مأهولة بمراقبة مركزية تأخذ مرسلًا مع حلّال منطق، والوسط الشائع طيار مستقل للحماية ومرسل للاتجاه. والجدول لا يبين المواد والخدمة الحامضة، وهي التي قد تحسم الاختيار قبل أي معيار آخر، ولا أثر موضع التركيب (على الخط أم داخل اللوحة) في زمن الاستجابة. والخطأ الأكثر كلفة الاعتماد على PSL واحد في المصبّ لخط طويل قبل الخانق، فيبقى تسريب عالي الضغط جاريًا والحماية «سليمة» على الورق.

المواد: الأجزاء المبللة في الطيارات من الفولاذ المقاوم للصدأ 316 عادة، وحلقات الإحكام من Viton في الغالب لمقاومته مكوّنات تيار البئر (وBuna-N في الخدمات الخفيفة).

وفي التيارات ذات المحتوى العالي من كبريتيد الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون تُراجع المواد كلها وفق NACE MR0175/ISO 15156 قبل الشراء (القسم 25.10.5)، ويُستشار المصنّع لا الكتالوج.

أين توضع الطيارات ولماذا أكثر من *PSL* واحد

الممارسة المعتادة أن يكون على كل خط تدفق **PSH واحد وPSL واحد على الأقل**، مع صمام لا رجعي (Check Valve) يمنع الارتداد من المجمع. ويُضاف **PSL ثانٍ** حين تزيد المسافة بين رأس البئر والخانق الأول، أو بين الخانق الأول والثاني، على نحو 10 3 m (ft).

والسبب واضح عند التأمل: الخانق يفصل ضغطين. فتسريبٌ في أنبوب أو وصلة أو صمام **قبل** الخانق قد لا يُنقص الضغط بعده بما يكفي ليراه PSL المركّب في المصبّ، لأن الخانق نفسه هو الذي يحدد الضغط في المصبّ لا معدل التسريب. فيبقى التسريب عالي الضغط جاريًا بلا إيقاف. ولذلك يُغطّى كل مقطع بين خانقين بحساس ضغط منخفض خاص به إن طال.

الشكل 38-3: *لماذا يلزم طيار ضغط منخفض (PSL) لكل مقطع طويل قبل الخانق: التسريب قبل الخانق يُنقص ضغط مقطعه ولا يكاد يغيّر ضغط المصبّ الذي يحدده الخانق، فلا يراه PSL المصبّ؛ ولذلك يُضاف PSL إذا زاد طول المقطع على نحو 3 m (10 ft). المنحنيات نسبية توضيحية.*

موضع التركيب — على الخط أم داخل اللوحة؟ في التركيبات البحرية جرت العادة على وضع الطيارات **داخل اللوحة** ومدّ أنبوب استشعار من خط التدفق إليها، مع مقياس ضغط على وجه اللوحة يبيّن ضغط الخط، وكل صمامات التجاوز على الوجه نفسه بترميز لوني. والمكسب: الضبط والاختبار والمراقبة في موضع واحد محميّ، ولا يُحتاج إلى نزول إلى المنصة الفرعية لكل اختبار. والثمن: أنبوب استشعار طويل يحوي مائع العملية إلى داخل اللوحة (تجمّد، هيدرات، انسداد، وخطر في خدمة كبريتيد الهيدروجين)، وزمن استجابة أطول. وفي التركيبات البرية القريبة يُفضَّل كثيرًا وضع الطيارات على الخط نفسه.

مسبار الرمل وقسيمة التآكل

مسبار الرمل (Sand Probe) أنبوب رفيع يُدخل طرفه في مجرى المائع عبر وصلة 25 mm (1 in) ملحومة على مقطع مستقيم، على بعد قطرين إلى ثلاثة أقطار على الأقل قبل أي تغيّر في اتجاه الجريان لأن الانحناء يُقنّي الرمل فيمرّ بعيدًا عن طرف المسبار فلا يراه). فإذا أكل الرملُ الطرفَ حتى ثقبه دخل ضغط الخط إلى تجويف المسبار فرفع مكبسًا يحجب التغذية ويُنفّس الخرج.

وثلاث حقائق تحدد كيف يُستعمل:

1. **لا يعطي معدل إنتاج الرمل**، بل يقول «حدث تآكل بمقدار سُمك الطرف». فقد يتآكل جدار الأنبوب قبله أو يتآكل هو مرارًا وجدار الأنبوب سليم.
2. **مادته يجب أن تكون أقلّ مقاومة للتآكل من مادة الأنبوب** وإلا فقد معناه، ومقاومة للتآكل الكيميائي في الوقت نفسه.
3. **خرجه إنذار لا إيقاف.** لأن تآكل المسبار لا يدل على وشوك فشل الخط بل على وجوب فحصه. وإدخاله في دائرة الإيقاف يولّد إيقافات لا مبرر لها.

ويُزوَّد عادة بمقبض يدوي للاختبار. أما **قسائم التآكل (Corrosion Coupons)** فلا تُوصل بنظام الإيقاف أصلًا، وتُقرأ بالفحص البصري والوزني؛ ويُنصح بتوفير موضع لها في كل تركيب رأس بئر، وخصوصًا في الخدمات الحاوية على ثاني أكسيد الكربون أو كبريتيد الهيدروجين.

حلقة الوصلات القابلة للانصهار وأزرار الإيقاف

الوصلة القابلة للانصهار (Fusible Plug) وصلة T تُدرج في حلقة أنابيب دقيقة مضغوطة، مخرجها مسدود بمركّب يذوب عند حرارة محددة — شائعًا **74 °C (165 °F)** و **107 °C (225 °F)**. فإذا ارتفعت الحرارة حولها ذاب المركّب ونُفِّست الحلقة كلها، فأُطلق الإيقاف. وهي كاشف حريق ميكانيكي خالص لا يحتاج طاقة ولا معايرة، وميزته أنه يعمل ولو فُقدت الكهرباء وهواء الأجهزة معًا.

قواعد استعمالها:

- **74 °C هي الافتراضية** لعموم المواضع، لأنها تكشف مبكرًا.
- **107 °C حول المُسخّنات والمحركات والتوربينات** وكل ما له سطح ساخن مشروع، وإلا فالإيقافات الكاذبة مسألة وقت (وشمس الظهيرة على أنبوب أسود في منطقة حارة تقترب من 70 °C).
- **توزّع الحلقة على مسارات الخطر لا بالتساوي:** فوق شجرة الميلاد، وعند صندوق الحشوة، وعند مشعب الخانق، وعند أي وصلة مفكوكة أو مضخة حقن كيماوي.
- **الحلقة تتسرّب حتمًا** لكثرة وصلاتها، فتُبنى دائمًا بصمام شحن سريع محمّل بنابض (لا يمكن تركه مفتوحًا سهوًا) و**ثقب معايرة ثابت (Fixed Orifice)** يمرّر تعويضًا صغيرًا مستمرًا. ومن دون هذين تهبط الحلقة تدريجيًا وتُوقف البئر ليلًا بلا سبب.
- **حلقة الانصهار وحلقة ESD لا يجوز تجاوزهما** ضمن ترتيبات التجاوز العادية للاختبار.

و**أزرار الإيقاف اليدوي** على حلقة ESD صمامات سحب (Pull-to-Activate) تبقى في الوضع الذي تُترك فيه: السحب يحجب الدخل ويصل المخرج بمنفذ التنفيس فتُفرّغ الحلقة. وتوضع عند مخرج موقع البئر وعلى مسار الهروب وعند نقطة يصلها الشخص من دون أن يمرّ قرب رأس البئر نفسه.

◆ ◆ ◆

38.3 لوحة تحكم رأس البئر: الوسيط والمعمارية والمنظومة الهيدروليكية

تلتقي إشارات الحساسات كلها في لوحة تحكم رأس البئر، ومنها تخرج أوامر الإغلاق. وفي هذا القسم قرارات تصميمها: عدد الآبار، والوسيط، والمنطق، والمنظومة الهيدروليكية.

بئر واحدة أم عدة آبار؟ لوحة محلية أم لوحة رئيسية؟

القرار الأول في التصميم: عدد الآبار ومواضعها. فمن ذلك يُشتق ما إذا كانت لكل رأس بئر لوحته القريبة، أم تُجمع الآبار في **لوحة تحكم رئيسية (Master Control Panel)** تحوي منطق الإغلاق لكلها. وفي التكوين متعدد الآبار تُجمَّع الآبار في كتل تتقاسم منظومة هيدروليكية واحدة، **ويبقى منطق كل بئر منفصلًا عن منطق غيرها** حتى يمكن إضافة بئر أو سحبها من الخدمة بلا مساس بالباقي. وهذه ليست أناقة تصميم بل شرط تشغيلي: البئر تُوقف للصيانة والتنظيف والقياس أكثر مما تتصور.

الوسيط: هواء أم غاز عملية؟ هوائي أم كهربائي؟

ضغوط التشغيل النموذجية: تغذية اللوحة بين **690 و1030 kPa (100 إلى 150 psig)** لتكفي تشغيل الصمامين الرئيسي والجناح وتشغيل المضخة الهيدروليكية؛ وتُخفَّض تغذية الحساسات والمنطق إلى **140 إلى 345 kPa (20 إلى 50 psig)**.

وحين لا يتوفر هواء أجهزة يُستعمل **غاز العملية (Instrument Gas)** وسيطًا، وهو أمر شائع في رؤوس الآبار البعيدة (تفصيله في القسم 25.8.3). والمطلوب هنا أمران: أن يُرشَّح ويُجفَّف، وأن **تُنفَّس كل الأغلفة والخزانات** لمنع تراكم خليط قابل للاشتعال داخلها. وإن مُدّت وصلة تنفيس بعيدًا عن الغلاف وجب ألا تُدخل فقد ضغط كبيرًا في الدائرة، وإلا زاد زمن الاستجابة وذلك عكس الغاية.

جدول مقارنة: لوحة هوائية/هيدروليكية مقابل كهربائية/هيدروليكية

المعيار	هوائية/هيدروليكية	كهربائية/هيدروليكية
زمن الاستجابة	أبطأ؛ يعتمد على تفريغ حجم وطول الأنبوب	أسرع بكثير، ولا يتأثر بالمسافة
التشغيل عن بعد	صعب؛ الإشارة الهوائية لا تُمدّ بعيدًا	سهل ومباشر

المعيار	هوائية/هيدروليكية	كهربائية/هيدروليكية
الحاجة إلى كهرباء موثوقة	لا	نعم، مع مصدر ثابت غير منقطع
الحاجة إلى هواء/غاز	نعم	نعم أيضًا؛ الصمامات تبقى هوائية/هيدروليكية
المرونة في تعديل المنطق	منخفضة؛ تعديل أنابيب	عالية
الحيّز المطلوب	أكبر	أصغر
الفهم والإصلاح ميدانيًا	متانة عالية وفهم أسهل لفنّي الميدان	يتطلب مهارة كهربائية وتصنيف منطقة
الكلفة الأولية	أقل عادة في اللوحات الصغيرة قليلة الآبار	أقل عادة في اللوحات الكبيرة متعددة الآبار

ويبقى معيار ثالث كثيرًا ما يُهمل وهو الأثقل عمليًا: **ما المستعمل في مواقع الشركة الأخرى؟** فاختلاف الأنظمة بين مواقع يتناوب عليها الفنيون أنفسهم يولّد أخطاء تشغيل وصيانة تفوق ما وفّره «الخيار الأفضل تقنيًا».

وفي الحالتين المنطق **واحد لا يتغيّر**: المدخلات نفسها تُنتج المخرجات نفسها بالترتيب نفسه؛ ولا يختلف إلا تنفيذ الدائرة (مرحّلات هوائية ومرحّلات إعادة ضبط يدوية مقابل صمامات ملفية ومرحّلات كهربائية). ومن قال إن المنطق يتغير بتغير التقنية فقد أخطأ في أحد التصميمين.

مبدأ «مضغوط ليعمل» ومعنى الفشل الآمن هنا

الدائرة الهوائية/الهيدروليكية **مضغوطة ليعمل (Pressured to Run)**، والكهربائية **مُغذّاة لتعمل (Energized to Run)**. وأي حالة غير طبيعية تحجب مصدر الضغط أو التيار وتُنفّس ما بعدها، فترتد كل الصمامات إلى وضع الإغلاق. ومن هنا: **انقطاع أنبوب، أو قطع**

سلك، أو فقد التغذية، كلها تُوقف البئر. وهذا ليس عيبًا يُلتمس له علاج بـ«صمام حابس» أو «مرحّل يُبقي الحالة»، بل هو الوظيفة.

مكوّنات المنطق التي يراجعها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس

- **مرحّل الحجب والتنفيس (Block-and-Bleed Relay):** حجر البناء. في الخدمة يكون منفذا التغذية والخرج موصولين ومنفذ التنفيس مغلقًا؛ وعند فقد التغذية أو المدخل يرتفع المِغزل فيُغلق التغذية ويصل الخرج بالتنفيس، فيسمّى «خارج الخدمة». **تنبيه في التسمية:** «مغلق طبيعيًا» في المرحّل الكهروميكانيكي تعني أن التلامس موصول والدائرة مهيّأة من دون تغذية؛ أما في المرحّل الهوائي فالمرحّل «المغلق طبيعيًا» **يُعطّل** الدائرة من دون تغذية هوائية. وقد بُنيت لوحات على هذا الالتباس.
- **مرحّل الطيار بإعادة ضبط يدوية** مع مجموعة قفل مغلق ومجموعة قفل مفتوح: الأولى تمنع وصول إشارة إلى العنصر النهائي بعد عودة التغذية ما لم يُعَد الضبط يدويًا؛ والثانية تُبقي المرحّل مفتوحًا مؤقتًا إلى أن يبلغ ضغط الاستشعار قيمة محددة ثم يعود تلقائيًا إلى وضع التحكم بضغط الجهاز (وهي التي تسمح بإعادة تشغيل بئر ضغطها الآن تحت نقطة ضبط PSL).
- **صمام التنفيس السريع (Quick Exhaust)** على مسار كل عنصر نهائي: خرج المرحّل يذهب إلى مدخل التحكم في صمام التنفيس السريع، ومخرجه هو الموصول بالمشغّل. فعند فصل المرحّل (Trip) يهبط ضغط الإشارة فينفصل الغشاء عن منفذ التنفيس الكبير ويُفرَّغ المشغّل مباشرة بدل أن يُفرَّغ عبر مسار الإشارة الطويل. وهذا وحده يقصّر زمن الإغلاق كثيرًا، وإن كان لا يبلغ سرعة النظام الكهربائي. ويفيد أيضًا وضعُ صمامات لا رجعية في المقاطع التي لا يلزم تفريغها لإطلاق مرحّل أو صمام بعينه.
- **دوائر التوقيت:** في الهوائي تُنجَز بـ**زجاجة حجم (Volume Bottle)** مع **مقيّد (Restrictor)** وصمام لا رجعي مدمج: المقيّد في خط التغذية إلى الزجاجة

يعطي تأخير تشغيل، وفي خط التنفيس يعطي تأخير إطلاق. ودقتها أقل من دقة المؤقتات الكهروميكانيكية، ولذلك تُذكر في المواصفة **حدود زمن** لا قيمة واحدة («يُغلق الرئيسي بعد 5 إلى 15 ثانية من إغلاق الجناح»).

- **مؤشرات الحالة و«أول سبب» (First-Out):** مؤشر هوائي يُدمج مع مرحّل بحيث يظهر أحمر عند فقد الضغط وأخضر عند وجوده، ويُصمَّم المنطق بحيث **يحمرّ أول عنصر فَصَل وحده** ويبقى الباقي أخضر. فمن دون هذه الخاصية يضيع سبب الإيقاف: البئر تُفصَل على LSH في وعاء مثلًا، ثم يهبط الضغط تدريجيًا فينطلق PSL بعده، فيصل المشغّل بعد ساعة فيرى PSL ويعالج المشكلة الخطأ.
- **مفتاح اختيار الوضع** بثلاثة أوضاع (خدمة / تجاوز / إطلاق): وضع الإطلاق يُنفّس خط الخرج إلى العنصر النهائي للتحقق من أنه يستلم أمر الإيقاف فعلًا، ويُستعمل أيضًا لإغلاق الصمام يدويًا من اللوحة. ويجب أن يمرّ المفتاح عبر وضع الإطلاق **بسرعة** عند الانتقال بين الخدمة والتجاوز، وإلا أوقف البئر. ويُختار ترتيب المفاتيح بحيث يستحيل الوصول إلى التجاوز من دون قصد.

المنظومة الهيدروليكية للصمام تحت السطحي

منظومة صغيرة مغلقة داخل اللوحة: خزان، ومضخة آلية مدفوعة بالهواء أو الغاز، ومضخة يدوية احتياطية، وصمامات تنفيس، ومفتاح ضغط منخفض (PSL)، وصمام إعادة تدوير. ووظيفتها واحدة: إبقاء ضغط كافٍ على خط التحكم لإبقاء الصمام تحت السطحي مفتوحًا. وأي فقد لهذا الضغط يُغلق البئر في جوفه.

الشكل 38-4: *معمارية لوحة تحكم رأس بئر هوائية/هيدروليكية مضغوطة لتعمل (Pressured to Run). تغذية 690–1030 kPa (100–150 psig) للمرحّلات والمشغّلات والمضخة، وتغذية مخفّضة 140–345 kPa (20–50 psig) لحلقتي الإيقاف الطارئ والانصهار والطيارات، ومرحّلات بإعادة ضبط يدوية وسماحيات متسلسلة، وصمامات تنفيس سريع (Quick Exhaust)، والمنظومة الهيدروليكية للصمام تحت السطحي.*

- **مفتاح الضغط المنخفض الهيدروليكي** يقطع الهواء عن المضخة الآلية إذا هبط ضغط الإبقاء تحت نقطة الضبط؛ وهو أيضًا الإذن الذي تنتظره دائرة فتح الصمامين السطحيين.

- **إشارة الإيقاف** توقف المضخات وتفتح صمام إعادة التدوير، فيُفقد الضغط ويُغلق الصمام تحت السطحي.
- **المضخة** إزاحة موجبة، ذات ضغط تصريف عالٍ وتدفق منخفض، مدفوعة بالهواء أو الغاز. وضغط تصريفها عند انعدام الجريان يساوي تقريبًا **ضغط الوسيط الدافع × نسبة مساحة طرف القدرة إلى مساحة طرف الضخ**. فإذا تعادلت القوى **توقفت المضخة (Stall)** وبقيت ساكنة، ثم أعادت التشغيل تلقائيًا إذا هبط الضغط الهيدروليكي إلى نحو **97%** من ضغط التوقف. **ولا تُحجَّم المضخة بالتدفق بل بضغط التصريف الأقصى ووسيط القدرة وضغطه.** والمواد نادرًا ما تكون قيدًا لأن المائع الهيدروليكي غير أكّال.
- **الخزان:** يُحسب حجمه بجمع حجم مشغّل الصمام تحت السطحي وحجم أنبوب خط التحكم لكل بئر، وضرب المجموع في عدد الآبار، ثم **مضاعفة الناتج**؛ ولا يقلّ عن نحو 19 لترًا (5 غالونات) في كل الأحوال. ويُنظر عند الاختيار إلى احتمال إضافة آبار لاحقًا، فتوسيع الخزان بعد التركيب أصعب بكثير من شرائه أكبر.

مثال محلول 1: الضغط السطحي اللازم لفتح صمام تحت سطحي، وضبط المضخة

- **المعطيات:** صمام تحت سطحي من نوع الرفراف على عمق 1200 م. ضغط أنبوب الإنتاج عند عمق الصمام وقت إعادة التشغيل 250 barg. فرق الضغط الذي تشترطه ورقة بيانات الصمام لفتح الرفراف 35 bar فوق ضغط الأنبوب عنده. المائع الهيدروليكي كثافته $870\ kg/m^3$. تغذية اللوحة الهوائية 6 barg.
- **الافتراضات:** عمود المائع الهيدروليكي في خط التحكم متصل وساكن، فيُحسب ضغطه الهيدروستاتيكي كاملًا؛ ويُهمل فقد الاحتكاك لأن الجريان شبه معدوم عند الإبقاء؛ وتُهمل حرارة البئر في تغيّر الكثافة (تُراجع في التصميم التفصيلي).

- **الحل بالوحدات:**
  - الضغط المطلوب عند الصمام = ضغط الأنبوب + فرق الفتح = 250 + 35 = **285 bar**.
  - الضغط الهيدروستاتيكي لعمود المائع = ρ g h = 870 × 9.81 × 1200 = 10.24 × 10^6 Pa = **102.4 bar**، وهو يُضاف إلى ما نطبّقه في السطح.
  - الضغط السطحي المطلوب = 285 − 102.4 = **182.6 barg**، ويُقرَّب إلى **183 barg**.
  - بهامش 15% لتغيّر ضغط البئر واحتكاك الخط يُضبط توقف المضخة عند نحو **210 barg**.
  - نسبة المساحات المطلوبة = ضغط التوقف ÷ ضغط التغذية الهوائية = 210 ÷ 6 = **35:1**.
  - إن كانت المضخة المتاحة بنسبة **60:1** فضغط توقفها عند 6 barg هوائي يبلغ 360 barg وهو زائد كثيرًا.
  - ضبط **منظّم الهواء الخاص بالمضخة** = 210 ÷ 60 = **3.5 barg**، فيصير ضغط التوقف 210 barg.
  - إعادة تشغيل المضخة عند نحو 210 × 0.97 = **204 barg**.
  - التفسير: يوضع مفتاح الضغط الهيدروليكي المنخفض دون ذلك بهامش واضح، عند نحو **190 barg**، بحيث يكون فوق 183 barg اللازمة للإبقاء.
- **معنى النتيجة:** ضغط تصريف المضخة لا يُضبط بالمضخة بل **بمنظّم الهواء الذي يغذّيها**؛ وهذه أشيع نقطة تُغفل في التشغيل التجريبي، فتُترك المضخة على ضغط التغذية الكامل فتُحمّل خط التحكم ومشغّل الصمام فوق اللازم. ولاحظ أن عمود المائع نفسه يوفّر أكثر من ثلث الضغط المطلوب: ولذلك

يختلف الضبط اختلافًا كبيرًا بين بئر عمق صمامها 300 م وأخرى عمق صمامها 1500 م، ولا يُنسخ ضبط من بئر إلى أخرى.

الشكل 38-5: *ميزانية الضغط في المثال المحلول 1: الضغط المطلوب عند الصمام تحت السطحي 285 bar يوفّر منه عمود المائع الهيدروليكي 102.4 bar والضغط السطحي 183 barg تقريبًا؛ وفوقه تُرتَّب قيم الضبط: مفتاح الضغط الهيدروليكي المنخفض 190 barg، وإعادة تشغيل المضخة 204 barg، وتوقفها 210 barg (Stall) الذي يُضبط بمنظّم هواء المضخة على 3.5 barg.*

مثال محلول 2: تحجيم الخزان الهيدروليكي

- **المعطيات:** ثلاث آبار على منظومة واحدة. عمق الصمام تحت السطحي 1200 م لكل منها. خط التحكم ¼ بوصة بسماكة جدار 0.049 بوصة. حجم مشغّل الصمام تحت السطحي 0.4 لتر لكل صمام.
- **الافتراضات:** خطوط التحكم متساوية الطول تقريبًا؛ ويُهمل حجم الأنابيب داخل اللوحة لصغره؛ ويُضاعف الناتج وفق الممارسة المعتادة لتغطية التمدد الحراري والتسرب البطيء وعمليات إعادة الملء.
- **الحل بالوحدات:**
  - القطر الداخلي = القطر الخارجي − 2 × السماكة = 0.25 − (2 × 0.049) = 0.152 بوصة = 3.86 mm.
  - مساحة المقطع = $\pi/4 \times (3.86 \times 10^{-3})^2 = 1.170 \times 10^{-5}$ m².
  - حجم خط التحكم للبئر الواحدة = المساحة × العمق = $1.170 \times 10^{-5} \times 1200 = 0.01404$ m³ = **14.0 لترًا**.
  - مع المشغّل: 14.0 + 0.4 = **14.4 لترًا للبئر**.
  - للآبار الثلاث: 14.4 × 3 = **43.2 لترًا**.
  - بالمضاعفة: **86.4 لترًا**.
  - التفسير: يُختار خزان **100 لتر** قياسي (وهو فوق الحد الأدنى 19 لترًا بكثير).
- **معنى النتيجة: حجم خط التحكم هو الذي يحكم، لا حجم المشغّل** (14.0 مقابل 0.4 لتر، أي 97% من الحجم). ولذلك يتضاعف الخزان تقريبًا بمضاعفة عمق الصمام، ولا معنى لاختيار خزان بناءً على عدد الآبار وحده. ولو خُطط لاحقًا لإضافة بئرين بالعمق نفسه لصار المطلوب نحو 144 لترًا، وهو سبب كافٍ لاختيار 150 لترًا من البداية إن كان توسّع الحقل مرجَّحًا.

◆ ◆ ◆

38.4 مستويات الإيقاف وإعادة التشغيل

بعد أن عرفنا ما يُغلق البئر ومن يأمره بذلك، يبقى سؤالان: ما حجم الإيقاف المطلوب في كل حدث، وكيف تعود البئر إلى الإنتاج بأمان؟

المستويات ومن يطلق ماذا

هرمية الإيقاف العامة في المنشأة مشروحة في القسم 29.7، وما يخص رأس البئر هنا هو **كيف تتنزّل هذه الهرمية على البئر نفسها**:

المستوى	ما يُطلقه	ما يحدث لرأس البئر	العودة
إنذار فقط	مسبار الرمل، اقتراب من حدّ	لا شيء؛ صوت بوق ومؤشر	لا تحتاج إعادة ضبط
إيقاف منتقى (معدة بعينها)	حماية وعاء اختبار أو مسار فرعي	تُغلق البئر المغذّية لذلك المسار فقط	إعادة ضبط محلية
إيقاف مسار عملية	خلل في فاصل متوسط الضغط مثلًا	تُغلق الآبار المغذّية لهذا المسار (SDV ثم SSV)	إعادة ضبط محلية
إيقاف المنشأة	خلل في معدة تستقبل من كل المسارات	تُغلق كل الآبار (SDV ثم SSV)	إعادة ضبط لكل بئر
ESD / حريق	حريق مؤكد، تسرّب كبير، قرار المشغّل	تُغلق كل الآبار سطحيًا ثم **يُغلق تحت السطحي** وتُعزل المنشأة	تسلسل كامل لكل بئر

وكل مستوى يُطلق ما تحته، ومستوى الإنذار وحده منفصل لا يُطلق شيئًا.

القفل: لماذا لا يُعاد الفتح تلقائيًا

الإيقاف على رأس البئر **يجب أن يكون قافلًا (Lockout)**: إذا فَصَلت الدائرة بقيت في وضع الفصل، وزوالُ السبب لا يعيد فتح الصمام. والمثال الذي يشرح ذلك أوضح من أي

تعليل: انطلق PSH لأن صمام تحكم في المصبّ انسدّ جزئيًا؛ فأُغلق مدخل الوعاء؛ فانخفض الضغط؛ فعاد PSH إلى وضعه. فمن دون قفل يُعاد فتح الصمام تلقائيًا فتندفع الآبار في الوعاء، ويرتفع الضغط، وينطلق PSH ثانية… وتظل المنظومة تتأرجح والسبب الجذري قائم، حتى يتلف شيء أو يتدخّل إنسان.

والقفل يضمن أمرين معًا: أن يُصحَّح السبب، وأن **يكون المشغّل حاضرًا عند البئر** لحظة إعادتها إلى الإنتاج. ولذلك إن كان الصمام السطحي الآمن بعيدًا عن اللوحة، يُستحسن تركيب إعادة ضبط يدوية عند الصمام نفسه لإلزام المشغّل بالذهاب إليه. أما إعادة الضبط عن بُعد فتُقبل بشرط أن تكون **محمّلة بنابض أو محدّدة بزمن** فلا يمكن تركها في وضع إعادة الضبط، لأن تركها كذلك يعني تجاوز الحساسات كلها من دون أن يعلم أحد.

تسلسل إعادة التشغيل بعد إيقاف كامل: خطوات

1. **تحقق من زوال السبب وثبّت ذلك.** اقرأ مؤشر «أول سبب» في اللوحة (وفي اللوحة الرئيسية إن وُجدت لوحات محلية) وسجّل أي عنصر فَصَل أولًا قبل أن تعيد أي شيء — فإعادة الضبط تمحو هذه المعلومة.
2. **افحص كل صمامات التجاوز وأعدها إلى وضع الخدمة**، وتحقق بالنظر على وجه اللوحة أن لا شيء متروك في التجاوز.
3. **تحقق من مرافق اللوحة:** ضغط التغذية ضمن المدى، ضغط حلقة ESD موجود، ضغط حلقة الانصهار موجود، مستوى المائع الهيدروليكي مقبول.
4. **اشحن حلقة ESD وحلقة الانصهار** بصمام الشحن السريع وأطلقه، وتأكد من أن الثقب المعوّض يحافظ على الضغط (هبوط مستمر يعني تسريبًا يجب أن يُعالَج قبل التشغيل لا بعده).
5. **أعد ضبط دائرة الصمام تحت السطحي أولًا.** يمرّ الهواء إلى المضخة الهيدروليكية فترتفع الضغوط. انتظر حتى **ينتقل مفتاح الضغط الهيدروليكي المنخفض إلى وضع السماح**؛ وهذا دليل على أن ضغط خط التحكم بلغ ضغط

الإبقاء واستقر، لا على مجرد عمل المضخة؛ أما انفتاح الرفراف فعلًا فلا يثبت إلا بعد التحقق في الخطوة 6.

6. **تحقق من ضغط أنبوب الإنتاج فوق الصمام تحت السطحي** قبل أي محاولة فتح. إن كان الفرق عبر الرفراف أكبر مما تسمح به ورقة البيانات فلا تُجبر المنظومة: اضغط ما فوق الصمام من مصدر معتمد (وصلة معادلة إن وُجدت في تصميم الصمام، أو ضغط بطيء من المصبّ عبر مسار معتمد) حتى ينخفض الفرق إلى الحد المسموح، ثم أعد المحاولة.
7. **أعد ضبط دائرة الصمام الرئيسي.** يفتح SSV. والمنظومة مصمَّمة بحيث لا يُمكن هذا قبل الخطوة 5.
8. **أعد ضبط دائرة الجناح.** يفتح SDV — ولا يمكن فتحه قبل الرئيسي لأن تغذية مرحّله تأتي من مرحّل الرئيسي.
9. **افتح الخانق تدريجيًا** وارقب صعود ضغط خط التدفق.
10. **حين يبلغ ضغط الخط المدى الطبيعي يستقر طيارا PSH وPSL في وضع السماح**، فيمرّ الضغط عبر مرحّل الإمساك (Holding Relay) فيقفل مرحّلي الرئيسي والجناح في وضع الفتح. **المنظومة الآن في الخدمة فعلًا**، وقبل هذه اللحظة كانت تعمل بإمساك يدوي.
11. **راقب 15 دقيقة على الأقل** وسجّل: ضغط الخط، ضغط اللوحة، ضغط الهيدروليك، حالة المؤشرات كلها خضراء.
12. **وثّق:** زمن الإيقاف، أول عنصر فَصَل، السبب، ما نُفّذ، زمن العودة، وأي تجاوز استُعمل ومن أزاله.

الشكل 38-6: *تسلسل إعادة تشغيل البئر بعد إيقاف كامل: قراءة «أول سبب» (First-Out) قبل أي إعادة ضبط، ثم التجاوزات والمرافق والحلقتان، ثم الصمام تحت السطحي مع التحقق من فرق الضغط عبر الرفراف، ثم الرئيسي فالجناح فالخانق، حتى يقفل مرحّل الإمساك (Holding Relay) الدائرة في الخدمة.*

الأخطاء الشائعة في إعادة التشغيل

- **إعادة الضبط قبل قراءة «أول سبب»** فيضيع سبب الإيقاف إلى الأبد ويتكرر بعد يوم.

- **محاولة فتح الصمام تحت السطحي على فرق ضغط كبير**، ثم رفع ضغط المضخة لإجباره: هذا يُتلف خط التحكم أو الصمام، والمشكلة ليست في المضخة بل في أن ما فوق الرفراف فُرّغ.
- **ترك صمام تجاوز في وضعه** بعد اختبار سابق، فيبدو كل شيء طبيعيًا وحماية واحدة معطّلة. وهذا ما يجعل موضع صمامات التجاوز على وجه اللوحة بترميز لوني قرارًا هندسيًا لا تجميليًا.
- **عدّ عمل المضخة الهيدروليكية دليلًا على فتح الصمام تحت السطحي.** المضخة قد تعمل بلا نهاية على خط تحكم مقطوع. الدليل هو بلوغ الضغط واستقراره وانتقال مفتاح الضغط المنخفض إلى وضع السماح.
- **فتح الخانق بسرعة** بعد الإغلاق، فتنطلق موجة ضغط ترفع PSH أو تجرف رملًا.

◆ ◆ ◆

38.5 التجاوز والاختبار الدوري ومراجعة تصميم اللوحة

لا تبقى الحماية سليمة إلا إذا ضُبط تجاوزها، واختُبرت دوريًا، وراجع المهندس تصميم اللوحة قبل الشراء. وهذه موضوعات هذا القسم.

التجاوز: الأنواع والتكوين

لا يمكن اختبار حماية من دون تعطيلها مؤقتًا، ولا بدء تشغيل من دون تجاوز حمايات «المنخفض» التي تكون في وضع الفصل بطبيعتها عند الصفر. فالتجاوز ضرورة، لكنه **إبطال متعمّد لطبقة حماية**، وموضعه وتكوينه يقرران هل يُنسى أم لا.

نوع التجاوز	كيف يعمل	متى يُستعمل
يدوي (صمام ثلاثي على وجه اللوحة)	يبقى حيث يُترك	الأشيع؛ لاختبار حساس مفرد أو صيانته
تلقائي العودة بإمساك يدوي	يعود للخدمة فور تركه	دوائر ESD والحريق: «اضغط للاختبار»

نوع التجاوز	كيف يعمل	متى يُستعمل
تلقائي العودة بمؤقت	يعود بعد زمن مضبوط	تجاوز بدء التشغيل لحمايات الضغط والمستوى المنخفض

كيف أختار؟ القاعدة: التجاوز الذي يبقى حيث يُترك لا يُستعمل إلا لحساس مفرد وعلى وجه اللوحة، وكل ما يمس ESD أو الحريق يأخذ تجاوزًا يعود بمجرد تركه، وبدء التشغيل يأخذ مؤقتًا يعيد حمايات «المنخفض» دون تدخل. والجدول لا يبين مستوى التجاوز (حساس مفرد أم عنصر نهائي أم مسار كامل)، وهو الذي يحدد كم طبقة حماية تُبطل معًا. والخطأ الأكثر كلفة تجاوز يدوي لحماية «منخفض» عند البدء ثم نسيانه، فتعمل البئر أسابيع بحماية أقل ولا يعرف أحد.

وفي التكوين ثلاثة خيارات:

1. **تجاوز الحساس المفرد** (الأشيع والأفضل): يمكن صيانة PSH وحده مع بقاء PSL وLSH في الخدمة.
2. **تجاوز كل الحساسات التي تحرّك عنصرًا نهائيًا بعينه**: أرخص، لكن صيانة حساس واحد تعني تعطيل الباقي معه — وهذه مقايضة تُتخذ بوعي لا مصادفةً.
3. **تجاوز مسار عملية كامل**: لا يُستعمل إلا بإذن مكتوب وفي نافذة زمنية محددة.

وثلاث قواعد لا تُساوَم:

- **كل صمامات التجاوز على وجه اللوحة**، مرئية بنظرة واحدة، مرمّزة بالألوان. والتجاوز الذي لا يُرى تجاوزٌ يُنسى. وإن كان التجاوز في لوحة محلية بعيدة، وجب مؤشر حالته في اللوحة الرئيسية.
- **حلقة ESD وحلقة الانصهار خارج ترتيبات التجاوز.**
- **يُفضَّل فصل دائرة الإنذار عن دائرة الإيقاف بتجاوزين مستقلين**، فيبقى الإنذار عاملًا حين يُتجاوز الإيقاف للاختبار — وهذا يعطي المشغّل عينًا في اللحظة التي تكون فيها الحماية معطّلة.

الاختبار الدوري: خطوات وقيم مرجعية

الدورية تحددها لوائح المنطقة أو سياسة الشركة؛ وفي غيابهما تُتبع الممارسة الصناعية المعتادة. والقيم التالية **مرجعية شائعة تُتحقَّق من مطابقتها للّائحة السارية وورقة بيانات الصمام قبل اعتمادها**.

(أ) اختبار زمن إغلاق الصمام السطحي الآمن (SSV)

1. أبلغ غرفة التحكم والمشغّل، وتأكد من أن البئر في وضع مستقر، وحدد من سيراقب التدفق في المصبّ.
2. ركّب مؤشر ضغط على خط الإشارة إلى مشغّل الصمام إن لم يكن موجودًا، وجهّز موقّتًا (أو استعمل تسجيل النظام إن كان الصمام مزوَّدًا بمفتاح موضع).
3. أطلق الإيقاف من **وضع الإطلاق في مفتاح الاختيار** أو من الحساس المعني نفسه؛ وابدأ التوقيت **عند لحظة انخفاض ضغط الإشارة** لا عند لمس المفتاح.
4. أوقف التوقيت عند إغلاق الصمام تمامًا (مفتاح الموضع، أو توقف الجريان في المصبّ مؤكَّدًا بمقياسي ضغط على جانبي الصمام).
5. قارن الزمن المقيس بالحد المقبول. والقيمة المرجعية الشائعة في اللوائح والممارسة: **الإغلاق خلال 45 ثانية**؛ وكثير من المواصفات تشترط أقل من ذلك على خطوط قصيرة.
6. إن تجاوز الزمن الحد، افحص بالترتيب: صمام التنفيس السريع (أشيع سبب)، ثم انسداد أو تضيّق في أنبوب الإشارة، ثم منظّم الضغط، ثم المشغّل نفسه. ولا تُعدّل نقطة ضبط شيء لتحسين الزمن قبل أن تعرف السبب.
7. سجّل: الزمن، وضغط الإشارة قبل الإطلاق، والحالة كما وُجدت وكما تُركت.

(ب) اختبار تسرّب المقعد (Seat Leakage)

1. أغلق الصمام المختبَر بالطريقة العادية لا بالإجبار الميكانيكي).
2. اعزل ما بعده وفرّغه إلى مسار آمن معتمد.

3. راقب ضغط ما بعد الصمام أو صرّف عبر مسار قياس إلى وعاء أو عدّاد.
4. قِس المعدّل بعد استقراره لا لحظة الفتح. والقيم المرجعية الشائعة: **سائل لا يزيد على نحو 400 cm^3 في الدقيقة**، و**غاز لا يزيد على نحو 0.42 m^3 في الدقيقة (15 قدمًا مكعبة قياسية في الدقيقة)**.
5. إن تجاوز المعدّل الحد، **لا يُعدّ الصمام صالحًا** ويجب إصلاحه أو إبدال أجزائه الداخلية (Trim)؛ وفي الأثناء تُعتمد إجراءات بديلة مكتوبة.
6. أعد تأهيل الصمام واختبره ثانية قبل إعادة البئر إلى الإنتاج.

(ج) دورية اختبار الصمام تحت السطحي

- الدورية الشائعة **كل ستة أشهر** لصمام تحت سطحي متحكَّم به من السطح، ومعيار القبول هو الإغلاق ضمن الزمن المسموح وتسرّب المقعد ضمن الحدود أعلاه.
- والاختبار يعني **إغلاق البئر فعلًا**، فيُنسَّق مع خطة الإنتاج، ولا يُؤجَّل لأن الإنتاج جيد — فتأجيله المتكرر هو الطريق المعتاد إلى اكتشاف أن الصمام لا يغلق يوم الحاجة إليه.
- عند الاختبار يُراقب **زمن استعادة الضغط** فوق الصمام بعد الإغلاق: ارتفاع ضغط الأنبوب فوق الرفراف بعد إغلاقه وتنفيس ما فوقه يعني تسريبًا عبر المقعد، وهبوطه يعني تسريبًا في صمامات الشجرة أو وصلاتها.
- تُوثَّق كل نتيجة في سجلّ الصمام؛ وسجلّ الاتجاه عبر السنوات أنفع من نتيجة واحدة.

قائمة تحقق لمراجعة تصميم لوحة تحكم رأس بئر

يُراجع **كل حلقة على حدة** لا اللوحة جملةً، ويُسأل عن كل منها:

1. هل تؤدي الوظيفة الموصوفة في وثيقة المتطلبات؟

2. هل **فشلها آمن** فعلًا: ماذا يحدث لو انقطع الأنبوب هنا؟ ولو سقطت التغذية؟ ولو تعطّل المرحّل في وضع وسيط؟
3. هل المكوّنات **متسقة**: مرحّلات من عائلة واحدة، منطق تسمية واحد، مواد واحدة للأجزاء المبللة؟
4. هل زمن الاستجابة محسوب من **أقطار الأنابيب وأطوالها ومعدلات التنفيس** للمكوّنات المحددة، لا مفترضًا؟
5. هل يُغلق الجناح قبل الرئيسي، والرئيسي قبل تحت السطحي، بتأخيرات معلومة؟
6. هل يستحيل فتح الرئيسي قبل تحت السطحي، والجناح قبل الرئيسي، **بحكم الدائرة** لا بحكم الإجراء؟
7. هل ESD والانصهار يُغلقان تحت السطحي يقينًا؟
8. هل دائرة الإنذار موجودة ومنفصلة عن دائرة الإيقاف؟
9. هل مؤشر «أول سبب» فعّال، وهل جُرّب بإطلاق حساسين متتاليين؟
10. هل كل صمامات التجاوز على الوجه ومرمّزة، وهل ESD والانصهار خارجها؟
11. هل يمكن اختبار كل حساس بلا إيقاف البئر، وهل وُثّق كيف؟
12. هل الخزان الهيدروليكي محسوب لعدد الآبار الحالي **ولخطة التوسع**؟
13. هل مقاييس الضغط على الوجه تكفي للتشخيص: التغذية، حلقة ESD، حلقة الانصهار، كل خرج، وضغط الخط إن كانت الطيارات داخل اللوحة؟
14. إن كان الوسيط غاز عملية: هل كل غلاف منفَّس، وهل التنفيس لا يُدخل فقد ضغط يبطئ الاستجابة؟
15. هل خط التدفق مقنَّن لضغط إغلاق الأنبوب؟ فإن لا، هل يوجد صمام تنفيس **و/أو** دائرتان مستقلتان لصمامين مستقلين؟

حالة ميدانية: بئر فُصلت ثم رفضت أن تُفتح

- **العَرَض:** بعد إيقاف طارئ من المنشأة (تسرّب في المصبّ عولج خلال ساعتين)، أُعيد ضبط لوحة رأس البئر بالتسلسل المعتاد، فبلغت المضخة الهيدروليكية ضغط توقفها وسكنت وانتقل مفتاح الضغط الهيدروليكي المنخفض إلى وضع السماح، لكن الصمام تحت السطحي لم ينفتح: بقي ضغط الأنبوب في رأس البئر منخفضًا ولم تعد البئر إلى الإنتاج. والآبار الثلاث الأخرى على اللوحة نفسها عادت طبيعية.
- **الفرضيات:** (1) خط التحكم الهيدروليكي مقطوع أو مثقوب؛ (2) المضخة عاجزة أو صمام إعادة التدوير مفتوح؛ (3) الصمام تحت السطحي عالق؛ (4) فرق الضغط عبر الرفراف أكبر من قدرة المنظومة.
- **الفحوص:** قياس معدل استهلاك المائع من الخزان: كان شبه معدوم، فالخط ليس مقطوعًا ولا صمام إعادة التدوير مفتوحًا (الفرضيتان 1 و2 مستبعدتان). قراءة ضغط أنبوب الإنتاج في رأس البئر: **منخفض جدًا مقارنة بالآبار الثلاث الأخرى المغلقة**. مراجعة تسجيل ضغوط الإيقاف: عند حدث الإيقاف هبط ضغط الأنبوب فوق الرفراف خلال ثوانٍ ثم استقر عند ضغط خط التدفق.
- **الدليل الحاسم:** مراجعة دائرة التوقيت في هذه البئر: كان **المقيّد مركّبًا في خط التغذية إلى زجاجة الحجم بدل خط التنفيس**، فانقلب التأخير من «تأخير إغلاق» إلى «تأخير فتح». فعند ESD نُفِّست دائرة الصمام تحت السطحي فورًا وأُغلق الرفراف، بينما بقي الجناح مفتوحًا بضع ثوانٍ أخرى، فتفرّغ ما فوق الرفراف إلى خط التدفق.
- **السبب الجذري:** خطأ تركيب في دائرة التوقيت الهوائية لبئر واحدة من الآبار الأربع على اللوحة، مرّ في التشغيل التجريبي لأن اختبار القبول أثبت **أن الصمامات تُغلق**، ولم يقِس **ترتيب** إغلاقها ولا الفاصل الزمني بينها.

- **الإجراء:** نُقل المقيّد إلى خط التنفيس وأُعيد الاختبار بقياس زمن إغلاق كل صمام على حدة من لحظة الإطلاق؛ ضُغط ما فوق الرفراف من مسار معتمد حتى انخفض الفرق إلى حد ورقة البيانات فانفتح الصمام تحت السطحي. وأُضيف إلى بروتوكول اختبار القبول بند صريح: «**يُسجَّل زمن إغلاق كل من الجناح والرئيسي وتحت السطحي من لحظة واحدة، ويُثبَت الترتيب جناح ← رئيسي ← تحت سطحي**»؛ وأُضيفت الملاحظة نفسها إلى قائمة مراجعة لوحات الموردين.

> - **نوع الحالة:** خطأ تركيب في منطق التسلسل، أخفاه اختبار قبول يقيس النتيجة ولا يقيس الترتيب.

الشكل 38-7: *دائرة التوقيت الهوائية (زجاجة حجم ومقيّد مع صمام لارجعي) في وضعيها: المقيّد في خط التنفيس يؤخّر الإطلاق فيُغلق الصمام تحت السطحي بعد السطحيين، والمقيّد في خط التغذية ينقل التأخير إلى إعادة الفتح فيُغلق الصمام تحت السطحي فورًا؛ وهذا هو السبب الجذري في الحالة الميدانية. المحور الزمني توضيحي.*

◆ ◆ ◆

38.6 منهج API RP 14C في اختيار الحمايات: من شجرة الخطر إلى مخطط SAFE

قوائم الحمايات النموذجية في الفصل 31 تقول **ماذا** يُركَّب على كل معدة. وهذا القسم يقول **كيف وُصِل إلى تلك القوائم**، وهو ما يحتاجه المهندس حين تواجهه معدة ليست في أي قائمة، أو حين يُطلب منه حذف حماية من قائمة وتبرير الحذف.

شجرة الخطر: من الحادثة إلى المتغيّر القابل للقياس

شجرة الخطر (Hazard Tree) ترتيب هرمي: الخطر في الأعلى، وتحته الظروف اللازمة لوقوعه، وتحت كل ظرف مصادرُه. وفي منشأة إنتاج هيدروكربوني تكون الأخطار الثلاثة: **التلوث بالزيت، والحريق أو الانفجار، والإصابة**. والحريق يحتاج وقودًا ومصدر إشعال وأكسجين وزمنًا لتفاعلها؛ والتلوث يحتاج انسكابًا **مع** احتواء غير كافٍ؛ والإصابة قد تنتج عن الأولين أو مباشرة.

وفائدة الشجرة عملية جدًا: **تفرز ما يمكن لنظام الإيقاف أن يفعله عمّا لا يستطيعه.** فلا حساس يمنع عاملًا من التعثّر، ولا حساس يمنع البرق من إشعال منفس خزان. ومن هنا القيد الذي يجب أن يُقال بصراحة في كل مشروع: **منشأة مجهّزة بنظام إيقاف مكتمل ليست بالضرورة «آمنة»**؛ فمسارات الهروب والإضاءة والتصميم الكهربائي ومانعات اللهب وتخطيط الموقع وكفاءة المشغّلين كلها خارج النظام وداخل السلامة. ونظام الإيقاف يغطّي فقط **ما يمكن استباقه باستشعار تغيّر في ظرف عملية**.

وما يمكن استشعاره يُرتَّب بحسب شدّته:

المصدر	يؤدي إلى	لماذا هذا الترتيب
الضغط الزائد (Overpressure)	إصابة مباشرة + حريق + تلوث	يؤدي إلى الأخطار الثلاثة معًا وبسرعة؛ فيلزم أعلى مستوى ضمان
أنابيب اللهب (Fire Tubes)	حريق/انفجار	تسرّب زيت إلى الأنبوب أو فشل تحكم الحارق: انفجار مفاجئ بلا إنذار
الحرارة الزائدة	تسرّب ← حريق أو تلوث	تُضعف المعدن فيفشل تحت ضغط التصميم؛ لكنه فشل تدريجي مع إنذار
التسرّب	حريق (مع إشعال) أو تلوث (مع احتواء ناقص)	لا يصيب مباشرة؛ أبطأ وأصغر أثرًا من الضغط الزائد

المصدر	يؤدي إلى	لماذا هذا الترتيب
الدخل يفوق الخرج	تلوث، وربما حريق	الأبطأ والأقل أثرًا؛ يقبل أدنى مستوى ضمان

تحليل أنماط الفشل وآثارها ونسخته المعدّلة

تحليل أنماط الفشل وآثارها (Failure Mode and Effect Analysis – FMEA) يفحص كل نبيطة في العملية في كل نمط من أنماط فشلها، ويبحث عن حماية احتياطية تقطع سلسلة الخطر لكل نمط. وأنماط الفشل معرّفة بأسماء مختصرة: الحساس يفشل في الاستشعار أو يعمل قبل أوانه؛ والصمام اللارجعي يفشل في الإغلاق أو يسرّب داخليًا أو خارجيًا؛ والصمام يفشل مفتوحًا أو مغلقًا أو يفشل في الفتح أو في الإغلاق أو يسرّب؛ وللمتحكم أنماط فشل أكثر تُسرد كاملة في جداول المعيار.

والتحليل الكامل بهذه الصورة **غير عملي لمنشأة إنتاج**: يتطلب معدل فشل وكلفة فشل لكل نمط لكل نبيطة، ونتائجه شديدة الذاتية (فريقان يخرجان بنتيجتين مختلفتين للتصميم نفسه)، وكلفته الهندسية وزمنه لا يحتملهما مشروع إنتاج، ولا تكفي كلفة الفشل — في غير المفاعلات النووية والصواريخ — لتبريره.

و**النسخة المعدّلة** هي التي صنعت القوائم:

1. **تُحلَّل كل معدة وحدها** (فاصل، خط تدفق، مسخّن، ضاغط) بافتراض أسوأ ظروف دخل وخرج، لا كل نبيطة على حدة.
2. **لكل اضطراب يمكن استشعاره يُوفَّر حساس** يكشفه ويوقف العملية قبل أن ينشأ المصدر: فشل متحكم الضغط ← حساس ضغط عالٍ؛ تسرّب ← حساس ضغط منخفض.
3. **يُوفَّر مستوى دفاع ثانٍ مستقل**، وتُختار موثوقيته بحسب شدّة الخطر: حساس الضغط العالي يُسنَد بصمام تنفيس (وهو في الواقع أوثق منه)، أما تسرّب الزيت الصغير فقد يكفيه حوض تجميع.

4. **يُكتفى بمستويي حماية.** فالتجربة تدل على أن مستوى واحدًا يكفي في كثير من الحالات، لكن **توثيق أن مستوى واحدًا يكفي أغلى هندسيًا من تركيب المستوى الثاني وصيانته** — وهذه مفاضلة اقتصادية صريحة لا مبدأ سلامة.
5. **تُجمَّع المعدات في منظومة** ثم يُعاد الفحص لمعرفة أي الحمايات صارت مكرّرة: وعاءان على التوالي بالضغط نفسه لا يمكن عزل أحدهما، فحمايات أحدهما من الضغط الزائد تحمي الآخر.

والمبدأ الذي يجعل هذا سليمًا: **إذا كانت كل معدة محميّة بالكامل وحدها، فالمنظومة المكوّنة منها محميّة بالكامل؛ وضمّ المعدات لا يُنشئ خطرًا جديدًا بل قد يُلغي حاجة إلى حمايات.**

الوثائق الثلاث: *SAT* و*SAC* و*SAFE*

الوثيقة	ما تحويه	متى تُستعمل
جدول تحليل السلامة (Safety Analysis Table – SAT)	لكل معدة: الحدث غير المرغوب، وسببه، والظرف القابل للكشف، والحماية الأولية والثانوية	في التصميم: من أين جاءت القائمة
قائمة تحقق تحليل السلامة (Safety Analysis Checklist – SAC)	لكل جهاز: إمّا «مركَّب»، وإمّا سبب معتمَد من قائمة مغلقة يبرّر عدم تركيبه	عند الحذف: لا يُحذف جهاز إلا بسبب من القائمة
مخطط تقييم وظائف تحليل السلامة (Safety Analysis Function Evaluation – SAFE)	مصفوفة: كل جهاز مركَّب × ما يفعله (إنذار، إغلاق أي صمام، أي مستوى) مع إحالة إلى بند SAC	في التنفيذ والاختبار: هي المرجع الذي يُختبر عليه النظام

وقوة هذا الترتيب في **قائمة التحقق**: لا يُترك الحذف لاجتهاد المراجع، بل لا يُقبل إلا بسبب من قائمة مغلقة. فمثلًا، يجوز الاستغناء عن حساس الضغط العالي على وعاء إن كان مصدر الدخل مضخة أو ضاغطًا لا يستطيع تجاوز أقصى ضغط تشغيل مسموح للوعاء؛ أو إن كان مخرج الغاز موصولًا بأنابيب كافية القطر بلا صمام حاجز ولا منظّم إلى

معدة مصبّ محميّة بحساس ضغط عالٍ يحميه هو أيضًا؛ أو إن كان الوعاء هو الفاصل النهائي في منظومة الشعلة ومصمَّمًا لتحمّل أقصى ضغط خلفي متراكم. **ولاحظ الشرط المتكرر في كل هذه الأسباب: «بلا صمام حاجز ولا منظّم بين الاثنين»** — فصمام عزل واحد يُغلق يُبطل التبرير كله. وهذه هي النقطة التي يجب على مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس أن يتحقق منها في المخطط لا في الجدول.

مقارنة بنهج القوائم في الفصل 31: القوائم المعتمدة هناك (وفق OISD-STD-152) تصل إلى النتيجة نفسها تقريبًا بطريق آخر: نصّ معياري يفرض الحماية بحسب نوع المعدة، من دون أن يُلزم المصمم ببناء الجدول. والمنطق نفسه (حدث غير مرغوب ← ظرف قابل للكشف ← حماية أولية ← حماية ثانوية) قائم في الحالتين، وقد يختلف التفصيل قليلًا لأن الجدول وليد إجماع صناعي لا اشتقاق رياضي. **والعمل الصحيح أن تُستعمل القوائم للتسليم السريع، وتُستعمل هذه المنهجية حين تخرج المعدة عن القوائم، أو حين يُطلب حذف حماية فيلزم تبرير مكتوب.** أما التقدير الكمي لموثوقية وظيفة السلامة (SIL و LOPA) فمسار آخر يُبنى فوق هذا لا بدلًا منه (الفصل 29)، ودراسات تحديد المخاطر التي تُغذّيه في الفصل 28.

يُراجع مع هذا القسم: الفصل 28 (HAZOP وHAZID)، والفصل 29 (SIS وSIL وLOPA)، والقسم 29.7 (هرمية ESD).

◆ ◆ ◆

38.7 الحلقة الهوائية للإيقاف الطارئ والوصلات القابلة للانصهار في منشآت الإنتاج

كل ما في القسم 29.7 يفترض حلّال منطق كهربائيًا وكابلات وتغذية غير منقطعة. وفي منشآت الإنتاج الصغيرة — البرية النائية والبحرية غير المأهولة — كثيرًا ما يُنفَّذ النظام نفسه **هوائيًا بالكامل**، وهو ما يقابله مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس في الحقول القديمة وفي الوحدات المتنقلة. ومنطقه واحد؛ والمختلف تنفيذه وأمراضه.

المعمارية: لوحة مركزية واحدة أم لوحات محلية تغذّي لوحة رئيسية؟

المعيار	لوحة مركزية واحدة	لوحات محلية + لوحة رئيسية
طول أنابيب الإشارة	كبير؛ كل حساس يُمدّ إلى المركز	صغير؛ الحساسات تُجمَّع محليًا
زمن الاستجابة	أبطأ مع الطول	أفضل
الكلفة في منشأة متعددة المستويات	أعلى	أقل، وخصوصًا من خمس لوحات محلية فأكثر
التوسّع وتغيير العملية	صعب	سهل
تشخيص سبب الإيقاف	مؤشر واحد لكل حساس	مؤشران: أي لوحة، ثم أي حساس فيها
أين يُفضَّل	منشأة صغيرة بمستوى واحد	منشأة متعددة المستويات أو موزّعة

كيف أختار؟ القاعدة: منشأة صغيرة بمستوى واحد تكفيها لوحة مركزية، ومنشأة متعددة المستويات أو موزّعة تُبنى بلوحات محلية تغذّي لوحة رئيسية، وتبقى حلقتا ESD والانصهار في الرئيسية دائمًا. والجدول لا يبين زمن الاستجابة رقمًا، وهو ما يجب أن يُحسب من الأقطار والأطوال ومعدلات التنفيس للتكوين المختار لا أن يُفترض. والخطأ الأكثر كلفة توزيع اللوحات دون مرحّل قفل في دائرة التغذية لمؤشر «أول سبب»، فيصل المشغّل إلى لوحة يقرأ فيها سببًا كاذبًا ويعالج المشكلة الخطأ.

وفي التكوين الثاني يذهب المشغّل إلى اللوحة الرئيسية ليعرف **أي لوحة محلية** بدأت الإيقاف، ثم إلى تلك اللوحة ليعرف **أي عنصر** فَصَل أولًا. ويبقى منطق ESD وحلقة الانصهار في اللوحة الرئيسية دائمًا.

مبدأ «أول سبب» في المنظومة الهوائية

المؤشر الهوائي قرص لوني خلف نافذة: أحمر حين يُنفَّس ضغط إشارة الحساس، وأخضر ما دام هذا الضغط قائمًا. ويُدمج مع مرحّل بحيث **يحمرّ مؤشر أول حساس فصل وحده**: حين يفصل حساس يُنفَّس الضغط عن المكبس الكبير فيدفع ضغطُ التغذية المؤشر إلى الأحمر، وتنتقل الوصلة الداخلية فتصل منفذ الخرج بمنفذ التنفيس ويُحجب منفذ الدخل. فكل ما بعده يفقد تغذيته، والمؤشرات التي بعده تبقى خضراء لأن ضغط الإطلاق باقٍ عليها.

لكن هذا وحده لا يكفي. فالمؤشر الذي **قبل** نقطة الإطلاق ما زال يملك ضغطًا على منفذ التغذية، فإذا فصل حساسه لاحقًا (وهو ما يحدث كثيرًا: يُفصل الوعاء على مستوى عالٍ، ثم ينخفض ضغطه تدريجيًا فيفصل حساس الضغط المنخفض) فسيُظهر إشارة كاذبة. **ولذلك لا معنى لمؤشر «أول سبب» بلا مرحّل قفل في دائرة التغذية** يُنفّس التغذية عن المؤشرات التي قبل نقطة الإطلاق ويمنعها من الانتقال إلى الأحمر. وهذه علاقة يجب التحقق منها في الرسم لا الاكتفاء بوجود المؤشرات.

حلقة ESD وحلقة الانصهار: بناؤها وأمراضها

الحلقة **مستمرة مضغوطة** تدور في المنشأة، عليها صمامات تنفيس سريعة في مواضع مختارة وصمامات سحب يدوية، ووصلات قابلة للانصهار بدرجتي الحرارة وقواعد التوزيع نفسها التي في القسم 38.2 (74 °C افتراضيًا، و107 °C حول الأسطح الساخنة).

وثلاثة أمراض تلازم هذه الحلقات:

1. **التسرّب الحتمي.** كثرة الوصلات تجعل التسريب مسألة وقت، وعلاجه صمام الشحن السريع المحمّل بنابض والثقب المعايَر الثابت كما في القسم 38.2. ومن دونهما تسقط الحلقة تدريجيًا وتُوقف المنشأة بلا سبب، وهذه أشيع شكوى في المنشآت الهوائية.
2. **البطء.** النظام يعمل بتفريغ ضغط، فكلما كبر الحجم بطؤ. والعلاج صمامات التنفيس السريع قرب العناصر النهائية، وصمامات لا رجعية في المقاطع التي لا يلزم تفريغها. **ويُحسب زمن الاستجابة من الأقطار والأطوال ومعدلات**

التنفيس، لا يُفترض. وفي المواصفة تُذكر تأخيرات محددة أو زمن استجابة أقصى لكل حلقة.

3. **إغفال التنفيس مع غاز العملية.** القاعدتان في القسم 38.3 (تنفيس كل غلاف، وألا يُدخل التنفيس البعيد فقد ضغط) تنطبقان هنا على الحلقة كلها لا على اللوحة وحدها.

النبائط البينية والتوقيت

ضغط تشغيل المنطق الهوائي 140 إلى 345 kPa (20 إلى 50 psig)، ومشغّلات صمامات الإيقاف تحتاج أكثر من ذلك. فيُستعمل **صمام مِغزلي (Spool Valve)** نبيطةً بينية: يستقبل إشارة المنطق المنخفضة على طرف المكبس فينزلق المغزل ويصل التغذية العالية بالخرج؛ وعند زوال الإشارة يعيده النابض فيحجب التغذية ويصل الخرج بالتنفيس. ويكفي ثلاثي المنافذ للمشغّل أحادي العمل، ويلزم خماسي المنافذ للمشغّل مزدوج العمل. ومن الجهة الأخرى تُستعمل **مفاتيح الضغط** لتوليد إشارة كهربائية من دائرة هوائية لإيقاف معدة كهربائية أو للقياس عن بعد)، وتُستعمل **الصمامات الملفية** لتحويل إشارة كهربائية إلى هوائية.

والتوقيت هوائيًا بزجاجة حجم ومقيّد بصمام لا رجعي مدمج كما في القسم 38.3: موضع المقيّد يحدد نوع التأخير، وخطأ موضعه هو السبب الجذري في الحالة الميدانية في القسم 38.5. ويسمّى المقيّد أحيانًا «صمام تحكم بالجريان»، وصمامه اللارجعي يسمح بالجريان الحر في اتجاه ويقيّده في الآخر.

يُراجع مع هذا القسم: القسم 30.8 (مصفوفة السبب والنتيجة)، والفصل 29، والفصل 31 (الحمايات النموذجية لمعدات الإنتاج والمعالجة).

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	المهندس يقرر	الفني ينفذ ويقيس
الصمامات وترتيب الإغلاق	هوية SSV وSDV، وترتيب الإغلاق والفتح وتأخيراته، وسماحيات الفتح المبنية في العتاد	يقيس زمن إغلاق كل صمام من لحظة واحدة، ويثبت الترتيب: جناح ← رئيسي ← تحت سطحي
الحساسات والوسيط	مواضع الطيارات وعدد PSL، ودرجة حرارة الوصلات القابلة للانصهار، ووسيط اللوحة	يضبط الطيارات ويختبر الحلقة كلها حتى إغلاق الصمام، ويشحن الحلقات ويتحقق من الثقب المعوّض
المنظومة الهيدروليكية	ضغط الإبقاء، وضبط توقف المضخة ومنظم هوائها، وحجم الخزان مع خطة التوسع	يضبط منظم هواء المضخة، ويقرأ ضغطي التوقف وإعادة التشغيل ونقطة مفتاح الضغط المنخفض
التجاوز والاختبار	أنواع التجاوز ومواضعها، ودورية الاختبار ومعايير القبول وفق اللائحة السارية	يعيد كل تجاوز إلى الخدمة ويوثقه، ويقيس زمن الإغلاق وتسرب المقعد ويسجلهما
إعادة التشغيل	يوافق على إعادة البئر بعد تحديد السبب	يقرأ «أول سبب» قبل أي إعادة ضبط، وينفذ التسلسل المكتوب ويراقب 15 دقيقة على الأقل

◆ ◆ ◆

38.8 الأخطاء الشائعة

- إغلاق الصمام تحت السطحي أولًا أو مع الصمامات السطحية، فيُغلق تحت التدفق ويتآكل.
- ترك طيار الضغط المنخفض في التجاوز بعد البدء دون مؤقت يعيده ودون إنذار دائم.

- إعادة فتح البئر آليًا بعد عودة الضغط أو زوال السبب.
- لوحة تعمل بغاز العملية دون دراسة أثر فقده أو احتوائه على سوائل وشوائب.
- إصلاح حلقة الوصلات القابلة للانصهار بوصلة عادية بعد انصهارها.
- اختبار الطيارات على المنضدة فقط، دون اختبار الحلقة كلها حتى إغلاق الصمام.

38.9 ملخص

- رأس البئر يُحمى بحواجز متتالية، ويُغلق الصمام تحت السطحي أخيرًا ليبقى سليمًا.
- الطيارات والوصلات القابلة للانصهار وأزرار الإيقاف تبدأ الإيقاف، والمنطق هوائي أو هيدروليكي «مضغوط ليعمل»، فيقود فقد الضغط إلى الإغلاق.
- للإيقاف مستويات، ولا تُعاد البئر إلى الإنتاج إلا يدويًا وبتسلسل مكتوب.
- التجاوز محدود بزمن وموثق، والاختبار الدوري يشمل الحلقة كلها.
- منهج API RP 14C يبدأ من شجرة الخطر، وينتهي بمخطط SAFE الذي يربط كل حماية بما تمنعه.

وفي الفصل التالي: يفتتح الفصل 39 «استكشاف الأعطال (Troubleshooting) وتحليل السبب الجذري (RCA)» الباب السابع، فيجمع ما تكرر في حالات هذا الباب الميدانية (إيقاف كاذب من كابل، واتزان لم ينفع، وبئر رفضت أن تُفتح) في منهجية واحدة للتشخيص والوصول إلى السبب الجذري.

38.10 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الحواجز الثلاثة في رأس البئر؟ ولماذا يُغلق الصمام تحت السطحي أخيرًا؟
2. أين توضع طيارات الضغط العالي والمنخفض على خط التدفق؟ ولماذا قد يلزم أكثر من طيار ضغط منخفض؟

3. ما معنى «مضغوط ليعمل» في لوحة رأس البئر؟ وكيف يحقق الفشل الآمن؟
4. قارن بين الهواء وغاز العملية وسيطًا للوحة تحكم رأس البئر.
5. لماذا لا يُعاد فتح البئر تلقائيًا بعد زوال سبب الإيقاف؟ صف تسلسل إعادة التشغيل.
6. ما أنواع التجاوز في لوحة رأس البئر؟ وما الذي يجب أن يرافق كل تجاوز؟
7. كيف تعمل حلقة الوصلات القابلة للانصهار؟ وما مبدأ «أول سبب» (First-Out) في المنظومة الهوائية؟
8. ما الوثائق الثلاث SAT وSAC وSAFE في منهج API RP 14C؟ وما دور كل منها؟
9. في المثال المحلول 1 من القسم 38.3، لو كان عمق الصمام تحت السطحي 600 m وبقيت المعطيات الأخرى كما هي، فما الضغط السطحي اللازم لفتحه؟ وعلى أي قيمة يُضبط منظم هواء مضخة نسبتها 60:1 بهامش 15%؟ ولماذا لا يُنسخ الضبط من بئر إلى أخرى؟
10. في الحالة الميدانية «بئر فُصلت ثم رفضت أن تُفتح»، لماذا لم يكشف اختبار القبول خطأ دائرة التوقيت؟ وما البند الذي أُضيف إلى البروتوكول؟

مراجع الفصل: R64 (مبادئ الأجهزة: منظومة إيقاف رأس البئر ومنهج API RP 14C)، و API RP 14C (تحليل أنظمة السلامة السطحية الأساسية وتصميمها وتركيبها واختبارها في منشآت الإنتاج)، وAPI Spec 6A (معدات رأس البئر وشجرة الإنتاج)، وAPI Spec 14A وAPI RP 14B (الصمامات تحت السطحية وأنظمتها)، و NACE MR0175/ISO 151 56 (المواد في الخدمة الحامضة)، والفصول 28 و29 و30 و31 من هذا الكتاب.

الباب السابع: التشخيص والتحسين

بعد أن تعمل المنظومة يبدأ عمل آخر: أن تبقى سليمة وأن تتحسن. يبدأ الباب بمنهجية استكشاف الأعطال وتحليل السبب الجذري (الفصل 39)، ثم هندسة التشغيل للحلقات وقياس أدائها (الفصل 40)، ثم استراتيجيات التحكم المتقدمة التي تتجاوز حدود الحلقة الواحدة، وأمثلتها من معدات الباب السادس (الفصل 41)، ويختم بما يضيفه الذكاء الاصطناعي إلى التحكم والقياس وحدوده (الفصل 42).

الفصل 39: استكشاف الأعطال (Troubleshooting) وتحليل السبب الجذري (RCA)

لمن هذا الفصل: لفني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس الذي يُستدعى في منتصف الليل لأن قراءة «جُنّت» أو صمامًا لا يستجيب. ولمهندس الصيانة الذي يرى العطل نفسه يعود كل شهر. ولمهندس التحكم الذي يُطلب منه أن يكتب تقرير سبب جذري بعد إيقاف غير مخطط. ويفيد مهندس التشغيل الذي يريد أن يعرف: هل المشكلة في الجهاز أم في العملية؟

الفكرة الأساسية: استكشاف الأعطال منهجية تُتعلم، لا موهبة ولا حظ. الفني المتمرس لا يعرف الأعطال كلها، لكنه يعرف ترتيب الأسئلة. يبدأ بالسلامة، ثم يتحقق من أن العطل حقيقي، ثم يضيّق المسار بقياسات مختارة، كل قياس فيها يستبعد أكبر جزء ممكن من الاحتمالات. ثم يصلح ويتحقق، وبعدها يسأل «لماذا حدث هذا؟» حتى يصل إلى سبب يمكن منعه. وأغلى طريقة في المصنع هي «البندقية» (Shotgun): تبديل القطع واحدة بعد أخرى حتى يختفي العَرَض. فهي تستهلك قطع الغيار، وتطيل التوقف، وكثيرًا ما تترك السبب الحقيقي في مكانه ليعود.

هذا الفصل يجمع في إطار واحد ما تفرّق في الكتاب من أدوات التشخيص: تتبع المسار في سلسلة القياس (3.7)، وفحص النبائط الإلكترونية (43.12)، واختبار منطق PLC (19.10)، والحلقات الأرضية (32.8.6)، وتشخيص الاتصالات (23.12)، وبصمات الاهتزاز (33.5)، وتمييز عطل الجهاز من اضطراب العملية (40.3). ويبقى الدليل الميداني المفصل لكل نوع جهاز للفصل 85 (من الجزء القادم).

39.1 لماذا نحتاج إلى منهجية؟

كلفة العطل. تقديرات مجموعة ARC المنشورة (نقلها R67) أن الصناعات العملياتية تخسر نحو 5% من إنتاجها السنوي بسبب التوقفات غير المخططة وضعف الجودة، وأن نحو 80% من هذه الخسائر يمكن منعه. قد تختلف الأرقام من مصنع إلى آخر، لكن الدرس ثابت: ساعة الفني رخيصة مقارنة بساعة توقف الوحدة. لذلك يقاس نجاح استكشاف الأعطال بثلاثة مقاييس: زمن الوصول إلى السبب، وعدد القطع التي بُدّلت دون حاجة، وهل عاد العطل نفسه.

ما الذي قد يُطلب منك تشخيصه؟ ليس الجهاز وحده. قد تكون المشكلة في العملية نفسها، أو في الحلقة كلها، أو في جهاز أو مكوّن داخله. وقد تكون في منظومة هوائية أو إلكترونية أو رقمية، أو في شبكة أو محلل أو حاسوب أو بطاقة، أو في معدة عملية، بل قد تكون في إجراء التشغيل نفسه (R67).

على ماذا تعتمد مهارة التشخيص؟ على خبرتك، ومعرفتك بالأجهزة في موقعك، وأدوات الاختبار المتاحة لك وإتقانك لها، وفلسفة شركتك، وسهولة الوصول إلى الوثائق، وتوفر قطع الغيار، والوقت المسموح. والصفات التي تصنع مشخّصًا جيدًا هي: التفكير المنطقي المرتب، والتعلم من الأعطال السابقة، والفضول، والصبر، ومعرفة أين توجد المعلومة (R67).

جدول مقارنة: الطريقة العشوائية مقابل الطريقة المنهجية

المعيار	الطريقة العشوائية («البندقية»)	الطريقة المنهجية
نقطة البدء	الجهاز الذي «يتعطل عادة»	العَرَض مكتوبًا بدقة والسجلات
القرار التالي	تبديل قطعة أخرى	قياس يستبعد نصف الاحتمالات
قطع الغيار المستهلكة	كثيرة وتضيع معها الأدلة	قليلة ومبررة
زمن الوصول إلى السبب	غير متوقع	قصير وقابل للتقدير

المعيار	الطريقة العشوائية («البندقية»)	الطريقة المنهجية
معرفة السبب الجذري	نادرًا («اختفى العطل»)	مطلوبة قبل الإغلاق
احتمال عودة العطل	مرتفع	منخفض
ما يتعلمه الفريق	لا شيء	سجل يغذي الصيانة الوقائية

39.2 السلامة قبل أي فحص

أغلب حوادث فنيي الآلات الدقيقة وأجهزة القياس لا تقع أثناء الإصلاح، بل أثناء «فحص سريع» لم يُحسب أثره. قبل أن تلمس أي شيء، اسأل: ماذا سيحدث للعملية إن فتحتُ هذه الحلقة، أو فككت هذا المرسل، أو ضغطت هذا الزر؟

جدول: مخاطر استكشاف الأعطال وضوابطها

الخطر	أين يظهر في عمل الأجهزة	الضبط
إيقاف أو اضطراب غير مقصود	فتح حلقة مرسل حماية، وتبديل بطاقة، وفرض مخرج	إبلاغ المشغل قبل كل خطوة، وتجاوز مفوَّض وموثق عند الحاجة
طاقة كهربائية	لوحات 110/230 V AC ومغذيات المحركات والملفات	العزل والقفل والوسم (LOTO)، والتحقق من انعدام الفولتية
ضغط محبوس	خطوط النبض والمانيفولد وأنابيب هواء الأجهزة	عزل وتنفيس قبل الفك، وعدم الوقوف أمام الوصلة
مائع العملية	H_2S وهيدروكربونات ومواد ساخنة أو أكالة	تصريح عمل، وكاشف غاز شخصي، ومعدات وقاية مناسبة
جو قابل للانفجار	أي منطقة مصنفة	أدوات معتمدة للمنطقة أو شهادة خلو من الغاز (الفصل 26)

الخطر	أين يظهر في عمل الأجهزة	الضبط
الأمان الجوهري	دوائر Ex i	لا يوصل إليها إلا جهاز معتمد، ولا تُفحص بجهاز عزل عالي الجهد
الهواء المضغوط	صمامات هوائية تتحرك فجأة عند عودة الهواء	إبعاد اليدين عن ساق الصمام، وإبلاغ من حوله

تجاوز وظائف السلامة ليس قرارًا فرديًا. حين يتطلب الفحص تجاوز (Bypass) حماية في نظام السلامة الآلي (SIS)، يلزم تفويض مكتوب بحسب إجراء الموقع وIEC 61511، مع مدة محددة، وإجراءات تعويضية (مراقبة مشغل مخصصة مثلًا)، وسجل يُغلق عند إزالة التجاوز (الفصل 29). والتجاوز المنسي بعد الإصلاح من أخطر ما يتركه الفني خلفه.

قائمة تحقق قبل لمس الجهاز:

1. تصريح عمل ساري المفعول يغطي العمل الفعلي لا عنوانه فقط.
2. المشغل يعرف ما ستفعله، ويعرف كيف ستتصرف الحلقة ومتى تنتهي.
3. هل الجهاز جزء من حماية أو تعشيق؟ راجع مصفوفة السبب والنتيجة (17.10).
4. التجاوز أو الفرض (Force) اللازم مفوَّض ومسجل.
5. الحلقة في الوضع اليدوي إن كان الفحص سيغير القراءة.
6. العزل الكهربائي والضغطي منفذ ومتحقق منه.
7. الأدوات مناسبة لتصنيف المنطقة، والبطاريات مشحونة.
8. خطة للعودة: كيف ستعيد كل شيء كما كان إن لم تجد العطل؟

39.3 الإطار المنهجي في ست مراحل

أيًّا كانت طريقة البحث، يمر كل استكشاف عطل بالمراحل نفسها (الشكل 39-1). يسمي R67 المراحل الخمس بعد السلامة: التحقق من وجود العطل، وتحديد موضعه، وإصلاحه،

والتحقق من الإصلاح، والمتابعة لمنع تكراره. ويضيف R68 خطوات أدق داخل المرحلة الثانية: من الوحدة الوظيفية، إلى الدائرة، إلى المكوّن.

الشكل 39-1: *الإطار المنهجي لاستكشاف الأعطال: السلامة أولًا، ثم التحقق من العطل وتحديد موضعه وإصلاحه والتحقق من الإصلاح، وأخيرًا المتابعة لمنع التكرار. والقياس الصادق يعيد المشكلة إلى التشغيل مع الدليل.*

المرحلة 1: تحقق من وجود العطل.

- **اسأل المشغل** ماذا رأى، ومتى بدأ، وهل كان فجأة أم تدريجيًا، وماذا تغير قبله: مناوبة، أو صيانة، أو طقس، أو حمل، أو وصفة إنتاج.
- **شاهد بنفسك**: الشاشة، والاتجاهات (Trends)، والإنذارات، والجهاز في الميدان.
- **هل العملية في ظروفها العادية؟** معدل الإنتاج، والمواد الداخلة، ووضع المعدات المجاورة.

- **ابدأ بافتراض أن الأجهزة بريئة.** قد يكون القياس صادقًا ويُظهر تغيرًا حقيقيًا في العملية. وافهم كيف يُفترض أن تعمل الحلقة حين تكون سليمة، وما المعدات المرتبطة بها التي قد تؤثر فيها (R67).

المرحلة 2: حدد موضع العطل. ابدأ بأسهل الفحوص وأقلها تدخلًا. واسأل أولًا: هل يمكن تحقيق التحكم المطلوب والحلقة في الوضع اليدوي؟ فإن أمكن ذلك، فالعطل غالبًا في المتحكم أو ضبطه، وإن لم يمكن، فهو في الصمام أو في العملية، أو في القياس نفسه إن كانت قراءته خاطئة. ثم افصل بين الأجهزة وبقية المنظومة، وضع خطة، واختر طريقة العزل المناسبة (39.5)، وأبلغ الإنتاج بكل خطوة قد تسبب اضطرابًا أو إنذارًا.

المرحلة 3: أصلح العطل. ضع خطة الإصلاح وأبلغ بها الإنتاج، ونفذها وفق إجراءات الموقع وتعليمات المصنّع. وحين لا تكون مخولًا بالإصلاح، أوصِ به كتابيًا.

المرحلة 4: تحقق من الإصلاح. تأكد أن كل ما أصلحته وكل ما يرتبط به يعمل: القياس، والتحكم، والإنذارات، والتعشيقات. ولا يُغلق العمل حتى يرضى المشغل عن الأداء ويفهم كيف تعمل المنظومة في كل الظروف (R67). والحلقة التي أُصلحت يجب أن تُختبر في ظروف التشغيل الحقيقية، لا على الطاولة فقط.

المرحلة 5: تابِع وامنع التكرار. سجّل العطل في تاريخ الجهاز، واقترح التعديلات اللازمة، وحدّث برنامج الصيانة الوقائية، وأرسل تعديلات المخططات لتحديث نسخة «كما نُفذ» (As-Built). وهنا يبدأ تحليل السبب الجذري حين يستحقه العطل (39.14).

النموذج السباعي ومقابلته بالإطار. في أدلة الدعم الفني وشهادات تقنية المعلومات يشيع نموذج من سبع خطوات. وهو لا يخالف الإطار السابق، بل يقسّم مرحلة «حدد الموضع» إلى فرضية واختبار، ويجعل التوثيق خطوة مستقلة. والفائدة الأهم فيه صيغة «الفرضية ثم الاختبار»: لا تفك شيئًا قبل أن تكتب ما تتوقع أن تجده. فإن لم تجده، فقد تعلمت شيئًا واستبعدت احتمالًا.

جدول مقارنة: النموذج السباعي والإطار المعتمد في هذا الفصل

الخطوة في النموذج السباعي	ما تعنيه في عمل الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم	مرحلة الإطار (الشكل 39-1)
1. حدد المشكلة	اجمع الأعراض واسأل المشغل وراجع التغييرات الأخيرة	1: تحقق من وجود العطل
2. ضع فرضية للسبب المحتمل	رتّب الأسباب من الأبسط والأشيع إلى الأندر	2: حدد الموضع
3. اختبر الفرضية	قياس أو محاكاة تؤكد الفرضية أو تنفيها؛ إن نُفيت فعُد إلى 2	2: حدد الموضع
4. ضع خطة عمل	الخطوات، والمخاطر، والآثار الجانبية، والتوقف اللازم، والتنسيق مع التشغيل	0 و3: السلامة والإصلاح
5. نفّذ الحل أو صعّده	أصلح، أو حوّل الأمر إلى مستوى دعم أعلى إن خرج عن اختصاصك	3: أصلح
6. تحقق من الوظيفة كاملة	القياس والتحكم والإنذارات والتعشيقات في ظروف التشغيل الحقيقية	4: تحقق من الإصلاح
7. وثّق النتائج	الأعراض، والفرضيات المختبرة، والحل، والإجراءات الوقائية	5: تابِع وامنع التكرار

39.4 جمع المعلومات وصياغة العَرَض

العَرَض المكتوب بدقة نصف الحل. عبارة «الجهاز لا يعمل» صحيحة غالبًا، لكنها لا تحمل أي معلومة (R68). صِغ العَرَض بخمسة عناصر:

- **ماذا:** «LT-101 يقرأ 62.5% ثابتة».
- **أين:** على شاشة DCS وعلى شاشة المرسل المحلية.

- **متى:** منذ الساعة 14:10.
- **كم:** المستوى الحقيقي في الزجاجة المحلية نحو 40%.
- **ما الذي تغير:** معايرة وقائية نُفذت صباح اليوم.

عطل كامل أم تدهور في الأداء؟ هذا أول تصنيف للعَرَض، لأنه يوجه البحث. العطل الكامل (قراءة صفر، أو صمام لا يتحرك) يشير غالبًا إلى انقطاع: تغذية، أو سلك، أو بطاقة، أو مصهر. وتدهور الأداء (انجراف، أو ضوضاء، أو تذبذب، أو بطء) يشير إلى حالة تتطور: تلوث، أو تآكل، أو ضبط، أو تركيب.

جدول: مفاجئ أم تدريجي؟ ماذا يعني توقيت العطل

توقيت ظهور العَرَض	الأسباب المرجحة	أين تبحث أولًا
مفاجئ مع حدث معروف	عمل صيانة، أو تغيير تهيئة، أو تبديل بطاقة، أو انقطاع تغذية	سجل التغييرات (Audit Trail) وسجل الأحداث
مفاجئ دون حدث ظاهر	سلك مقطوع، أو طرف مرتخٍ، أو عطل إلكتروني	قياس التيار والفولتية على المسار
تدريجي خلال أيام أو أسابيع	انجراف الحساس، أو تلوث، أو انسداد خط النبض، أو تآكل	الاتجاه طويل المدى ومقارنته بمرجع
متقطع يأتي ويذهب	تلامس رديء، أو رطوبة، أو اهتزاز، أو تداخل كهرومغناطيسي	نصب الفخاخ (39.11) وربط التوقيت بالظروف
مرتبط بحالة تشغيل	حمل مرتفع، أو حرارة، أو بدء معدة كبيرة	مقارنة الحالات في المؤرخ

جدول: فئات أعطال الأجهزة الأكثر تكرارًا

الفئة	أمثلة	العلامة المميزة
أعطال الحلقة والتوصيل	حلقة 4–20 mA مقطوعة أو متآكلة، وطرف مرتخٍ، ورطوبة في صندوق التوصيل	فقد الإشارة أو قفزات، وتيار خارج المدى
تدهور الحساس	مزدوجة محترقة، وقطب ملوث، وغشاء متضرر أو متقادم	قراءة غير دقيقة أو بطيئة
انجراف المعايرة	ابتعاد تدريجي عن خط الأساس بفعل الحرارة والزمن	تباعد عن حساس مكرر أو مرجع محلي
مشكلات العملية التي تشبه عطل الجهاز	ترنح الصمام، وانسداد خط النبض، وتغير كثافة المائع	تغير متزامن في متغيرات مرتبطة
أخطاء التهيئة	مدى أو وحدة خاطئة، وجذر تربيعي مرتين، وتخميد مفرط	خطأ ثابت الشكل منذ تعديل معين
الأعطال الميكانيكية	ارتخاء وصلة الصمام، وتسرب هواء، واتساخ، وتآكل	عادة الأكثر احتمالًا، وتُرى بالفحص البصري

والملاحظة الميدانية القديمة ما زالت صحيحة: الأعطال الميكانيكية (وصلات مرتخية أو مكسورة، وأوساخ، وتآكل، واهتراء) هي أرجح مصادر أعطال الأجهزة، قبل الأعطال الإلكترونية (R68). ولمصادر العطل ثلاثة احتمالات عامة: المشغل، والبيئة، والجهاز نفسه.

مصادر المعلومات: أين تجد الجواب؟ الوثائق المحدّثة أداة تشخيص لا تقل أهمية عن أي جهاز قياس (R67).

السؤال	المصدر
كيف يُفترض أن تعمل الحلقة؟	مخطط P&ID، ووصف التحكم (Control Narrative)، ومصفوفة السبب والنتيجة

السؤال	المصدر
أين يمر السلك وعلى أي أطراف؟	مخطط الحلقة (Loop Diagram)، ومخططات التوصيل والخزائن
ما مدى الجهاز وتهيئته؟	ورقة المواصفات (Datasheet) وقاعدة بيانات الأجهزة وأداة إدارة الأصول
متى بدأ العطل وكيف تطور؟	المؤرخ (Historian) والاتجاهات
ماذا فعل المشغل والنظام؟	سجل الإنذارات والأحداث، وسجل أفعال المشغل، وتسلسل الأحداث (SOE)
من غيّر ماذا؟	سجل التغييرات في النظام وإدارة التغيير (MOC)
هل حدث هذا من قبل؟	سجل صيانة الجهاز ونظام CMMS وتقارير الأعطال السابقة
ما الذي يقوله الجهاز عن نفسه؟	تشخيص HART أو الشبكات الحقلية (Fieldbus)، وحالة NAMUR NE107 (39.12)
كيف تعمل الدوائر الكهربائية المرتبطة؟	مخططات تحكم المحركات في مراكز المحركات (MCC)

أدوات نظام التحكم الموزع في التشخيص. يوفر DCS الحديث أغلب ما يحتاجه المشخّص قبل أن يغادر غرفة التحكم (R67). من ذلك الشاشات الرسومية، وشاشة الحلقة التفصيلية، والاتجاهات الآنية والتاريخية، وملخص الإنذارات، وسجل الأحداث، وسجل أفعال المشغل، وتسلسل الأحداث بدقة المللي ثانية، وشاشات تشخيص النظام والشبكة والبطاقات، وتفاصيل الكتل الوظيفية واستراتيجية التحكم، وتهيئة الأجهزة الذكية عن بعد، وسجل التغييرات. وقبل أن تحمل حقيبتك إلى الميدان، اقضِ عشر دقائق أمام هذه الشاشات.

39.4-أ قراءة منحنيات الاتجاه (Trends): التحليل والمراقبة والتشخيص

منحنى الاتجاه (Trend) رسم بياني يعرض **كيف تتغير قيمة إشارة مع الزمن**. وهو من أقوى أدوات مهندس الآلات الدقيقة والتحكم في أنظمة التحكم والمراقبة كلها: DCS و SCADA وPLC وأنظمة إدارة المباني (BMS). فالرقم على الشاشة يقول إن الحرارة **الآن** 25 °C، أما الاتجاه فيقول كيف وصلت إليها: هل ارتفعت تدريجيًا أم فجأة؟ وهل تتكرر المشكلة في وقت محدد من اليوم؟

كيف يُقرأ منحنى الاتجاه؟

- **المحور الأفقي:** الزمن، مثل آخر ساعة أو آخر يوم أو آخر أسبوع.
- **المحور الرأسي:** قيمة الإشارة ووحدتها، مثل °C أو bar أو نسبة فتح الصمام %.
- **الخط المرسوم:** تغير القيمة خلال الفترة المختارة. ويمكن عرض عدة إشارات معًا (عدة أقلام) على المرجع الزمني نفسه للمقارنة، ولكل منها محوره ومقياسه.
- **نوع الإشارة:** الإشارة التناظرية (Analog) كالحرارة والضغط تظهر خطًا متصلًا. والإشارة المنفصلة (Digital) كحالة مضخة (تشغيل أو توقف) تظهر درجات بين 0 و1.

من أين تأتي البيانات؟ يعرض النظام نوعين من الاتجاه: **اتجاهًا لحظيًا (Real-Time Trend)** يُحفظ في ذاكرة المحطة لفترة قصيرة، و**اتجاهًا تاريخيًا** يأتي من خادم الأرشيف (Historian). والأرشيف لا يحفظ كل قراءة غالبًا، بل يضغط البيانات: يحفظ نقطة جديدة فقط إذا تغيرت القيمة أكثر من نطاق ميت (Deadband) محدد، أو وفق خوارزمية ضغط، ثم يصل بين النقاط المحفوظة بخطوط. فالخط المستقيم الطويل في الأرشيف قد يعني قيمة ثابتة فعلًا، وقد يعني أن الضغط أسقط تغيرات صغيرة، وقد يعني أن البيانات توقفت. ولذلك تُعرض علامة جودة البيانات (Quality) إن وفرها النظام، ويُتحقق من إعدادات الأرشفة للإشارة قبل الحكم على خط مستوٍ.

ثلاث فوائد:

1. **التحليل (Analysis):** معرفة السلوك الطبيعي للمعدة ومقارنة السلوك الحالي به:
   - هل ترتفع الحرارة كل يوم في الوقت نفسه؟
   - هل يزداد الضغط مع زيادة الحمل؟
   - هل صارت المعدة تحتاج وقتًا أطول لتصل إلى القيمة المطلوبة؟
   - هل الإشارة تتذبذب باستمرار بدل أن تستقر؟
2. **المراقبة (Monitoring):** التأكد أن النظام يعمل ضمن حدوده، واكتشاف التدهور قبل أن يصل إلى إنذار أو توقف. فانخفاض ضغط طرد مضخة تدريجيًا على مدى أيام يستدعي فحصًا، ولو لم يبلغ حد الإنذار بعد.
3. **تشخيص الأعطال (Troubleshooting):** وهي أهم الفوائد: معرفة **ما الذي حدث أولًا، وما الذي حدث بعده**. فالإنذار يخبر بوجود مشكلة، والاتجاه يكشف تسلسلها ويضيّق أسبابها المحتملة.

> **مثال عملي (ارتفاع حرارة غرفة يخدمها نظام تبريد):** نقطة الضبط 22 °C، والحرارة وصلت إلى 27 °C. تُعرض الإشارات التالية معًا على المرجع الزمني نفسه:

جدول: الإشارات التي تُعرض معًا وما يُسأل عنه في كل منها

الإشارة	ما الذي نريد معرفته منها؟
حرارة الغرفة	متى بدأ الارتفاع؟ وهل كان تدريجيًا أم مفاجئًا؟
نقطة الضبط (Setpoint)	هل تغيرت قبل ظهور المشكلة؟
أمر فتح صمام التبريد (Command)	هل طلب المتحكم تبريدًا أكثر؟
موضع الصمام الفعلي (Feedback)، إن وُجد	هل استجاب الصمام للأمر؟
حالة المروحة الفعلية	هل كانت تعمل وقت ارتفاع الحرارة؟
حرارة هواء التغذية	هل الهواء الداخل إلى الغرفة بارد بما يكفي؟

الشكل 39-2: *أنماط منحنيات الاتجاه في مثال تبريد الغرفة (قيم توضيحية): (أ) تشغيل طبيعي تنخفض فيه الحرارة من 27 °C وتستقر عند نقطة الضبط 22 °C في نحو 20 min؛ (ب) تذبذب مستمر حول نقطة الضبط؛ (ج) أمر فتح الصمام يصعد إلى 100% والموضع الفعلي ثابت عند 20%؛ (د) الحرارة في الفترة نفسها ترتفع من 22 إلى 27 °C.*

قراءة الأنماط:

- **النمط (أ):** يعطي زمن الاستجابة الطبيعي، وهو هنا نحو 20 min. فإذا صارت المعدة تحتاج 40 min في ظروف مشابهة، فذلك تدهور يستحق الفحص حتى لو لم يظهر إنذار.

- **النمط (ب):** يدفع إلى فحص ضبط المتحكم (الفصل 18)، وحركة الصمام واحتكاكه (القسم 39.8)، وتغير الحمل، وموقع الحساس. والشكل وحده لا يثبت السبب، بل يُقارن بإشارات المعدات وأوامرها.
- **النمطان (ج) و(د) معًا:** المتحكم يطلب تبريدًا أكثر، والموضع ثابت، والحرارة ترتفع. فيبدأ الفحص بالمشغّل والتوصيلات وحركة الصمام وصحة إشارة الموضع. وإن كان الصمام يتحرك فعلًا في الميدان والقراءة ثابتة، فالعطل في إشارة الموضع نفسها.

قرائن توجه الفحص:

- **ارتفعت الحرارة وبقي أمر الصمام 0%:** يُفحص وضع التشغيل (يدوي أم آلي)، والجدول الزمني، وشروط السماح بالتشغيل (Permissives)، ومنطق التحكم.
- **الأمر 100% والموضع الفعلي 0%:** يُفحص المشغّل والتوصيلات وحركة الصمام، مع التحقق من صحة إشارة الموضع.
- **فتح الصمام فعلًا لكن هواء التغذية بقي دافئًا:** يُتجه إلى توفر مياه التبريد وحرارتها وتدفقها، وأداء ملف التبريد.

وهذه **قرائن توجه الفحص، لا إثبات نهائي للسبب** (الشكل 39-3). وأمر تشغيل المعدة لا يعني أنها تعمل فعلًا، ولذلك فمقارنة **الأمر (Command)** بـ**التغذية الراجعة (Feedback)** من أنفع ما يُعرض في الاتجاه.

الشكل 39-3: *تسلسل تحليل ارتفاع الحرارة بمنحنيات الاتجاه: هل صدر أمر بزيادة التبريد؟ ثم هل استجاب الصمام فعلًا؟ ثم يُنتقل إلى مصدر التبريد نفسه. وكل فرع قرينة توجه الفحص الميداني ولا تغني عنه.*

خطوات تجعل القراءة أدق:

1. **اعرض فترة قبل العطل وأثناءه وبعده،** ولا تكتفِ بلحظة الإنذار.
2. **اجمع الإشارات المرتبطة بالمشكلة على مرجع زمني واحد.** وإن جاءت الإشارات من أنظمة مختلفة (DCS وPLC حزمة ونظام حماية)، فتحقق من تزامن ساعاتها. ففرق ثوانٍ بين الساعات يقلب ترتيب الأحداث، ولتسلسل الفصل يُعتمد مسجل الأحداث المتسلسلة (Sequence of Events) بدقة المللي ثانية.
3. **اختر معدل تسجيل مناسبًا:** تسجيل نقطة كل خمس دقائق قد يخفي توقفًا يستمر عشر ثوانٍ، وقد يُظهر تذبذبًا سريعًا بشكل خاطئ (القسم 3.3.3).

4. **راجع الوحدات ومقياس كل محور،** خاصة عند جمع الضغط والحرارة والنسب في رسم واحد. فالمقياس الواسع يخفي التغير، والضيق يضخّمه.
5. **انتبه للبيانات المفقودة وطريقة العرض:** المتوسطات تخفي القمم القصيرة، والخط الثابت قد يكون قراءة ثابتة فعلًا أو بيانات متوقفة.
6. **قارن بفترة تشغيل سليمة في ظروف مشابهة،** ثم تأكد بعد الإصلاح أن السلوك عاد طبيعيًا.

وأفضل سؤال أثناء قراءة الاتجاه: **«ما أول إشارة تغيرت؟ وهل استجابت بقية الإشارات كما يُفترض؟»**

> **دور المهندس ودور الفني:** المهندس يحدد الإشارات التي تُؤرشف ومعدل تسجيلها ونطاق ضغطها، ويصمم شاشات اتجاه جاهزة لكل وحدة تجمع الأمر والتغذية الراجعة والمتغير والاضطرابات الرئيسة، ويضمن تزامن ساعات الأنظمة. والفني يستخرج الاتجاه للفترة الصحيحة قبل أن يفتح أي غطاء، ويقارن الأمر بالتغذية الراجعة، ويسجل ما رآه في تقرير العطل، ثم يعيد الاتجاه بعد الإصلاح ليثبت أن السلوك عاد طبيعيًا.

39.5 طرق تحديد موضع العطل

لا توجد طريقة واحدة تصلح لكل عطل. يعرض R67 مجموعة طرق يختار منها المشخّص بحسب طبيعة العطل وأدواته:

جدول مقارنة: طرق تحديد موضع العطل

الطريقة	الفكرة	متى تناسب	ما يجب الحذر منه
تاريخ المعدة	الأعطال تتكرر؛ ابدأ بما تعطل سابقًا	معدات لها سجل جيد	لا تجعل التاريخ يعميك عن سبب جديد

الطريقة	الفكرة	متى تناسب	ما يجب الحذر منه
التتبع التسلسلي (مدخل/مخرج)	قياس بعد قياس من أحد طرفي المسار	مسار قصير أو مجهول التركيب	بطيء في المسارات الطويلة
التنصيف (Divide and Conquer)	كل قياس في منتصف المسار الباقي	مسار طويل وواضح النقاط	يحتاج نقاط قياس متاحة
الاستبدال (Substitution)	ضع قطعة سليمة معروفة مكان المشتبه بها	قطع رخيصة سريعة التبديل	يخفي السبب إن كان العطل خارج القطعة
حقن العطل أو الإشارة	أدخل إشارة معلومة وراقب الاستجابة	اختبار الحلقة من نقطة وسيطة	يتطلب تنسيقًا مع التشغيل
الإزالة (Remove and Conquer)	افصل الفروع واحدًا بعد آخر	عطل أرضي أو حمل زائد على مغذٍّ مشترك	قد يوقف أجهزة سليمة
تطويق المشكلة (Circle the Wagons)	ارسم حدًا حول المنطقة وافحص كل ما يعبره	منظومة معقدة بمداخل كثيرة	يحتاج معرفة جيدة بالحدود
نصب الفخاخ (Trapping)	سجّل بسرعة عالية حتى يظهر العطل	الأعطال المتقطعة	يحتاج وقتًا وصبرًا
من المعقد إلى البسيط	قسّم المنظومة إلى أجزاء بسيطة وافحص كلًّا منها	أنظمة كبيرة متداخلة	لا تُهمل التفاعل بين الأجزاء
الاستشارة ودعم المورد	اسأل زميلًا أو المصنّع	بعد استنفاد الطرق الداخلية	صِف العَرَض وقياساتك بدقة
«البندقية» (Shotgun)	بدّل كل شيء حتى يعمل	لا تناسب أي حالة تقريبًا	أغلى الطرق وأقلها تعليمًا

كيف أختار؟ ابدأ بتاريخ المعدة إن كان لها سجل، ثم بالتنصيف إذا كان المسار طويلًا ونقاطه متاحة، وبالتتبع التسلسلي إذا كان قصيرًا أو مجهول التركيب؛ ولا تلجأ إلى الاستبدال إلا لقطعة رخيصة سريعة التبديل بعد أن يضيّق القياس الاحتمالات. والجدول لا

يبين كلفة كل قياس ولا أثره في العملية: فقياس يوقف الوحدة أو يحتاج صعود برج قد يجعل الطريقة «الأسرع» على الورق أبطأ في الميدان، فاختر النقطة التي تقسم الاحتمال بأقل كلفة. وأكثر الأخطاء كلفة أن يبدأ الفني بالاستبدال («البندقية») قبل أي قياس، فيستهلك القطع ويفقد الدليل ويعود العطل.

التتبع التسلسلي والتنصيف. مسار الإشارة في حلقة نموذجية فيه نحو ثمانية عناصر: الحساس، وأطراف المرسل، وصندوق التوصيل، والكابل الرئيسي، وخزانة التوزيع، والحاجز أو العازل، وبطاقة الإدخال، والوسم في النظام. التتبع التسلسلي يقيس عند كل عنصر بالترتيب، وقد يحتاج سبعة قياسات في أسوأ حالة. أما التنصيف فيقيس في منتصف المسار: إن كانت الإشارة سليمة هناك فالعطل في النصف التالي، وإلا ففي النصف الأول. وكل قياس يستبعد نصف الاحتمالات الباقية، فيكفي لثمانية عناصر ثلاثة قياسات (الشكل 39-4).

الشكل 39-4: *التتبع التسلسلي مقابل التنصيف على مسار إشارة من ثمانية عناصر، والعطل في الحاجز: ستة قياسات بالتتبع، وثلاثة بالتنصيف.*

مثال محلول (عدد القياسات بالتنصيف):

- **المعطيات:** حلقة مرسل مستوى تمر بستة عشر عنصرًا يمكن القياس بعده: الحساس، والمرسل، وثلاثة صناديق توصيل، ولوحة وسيطة، ومقطعا كابل، وخزانة توزيع، وحاجز، ومحوّل إشارة، وبطاقة، ووحدة معالجة، وشبكة، وخادم، وشاشة.
- **الافتراضات:** عطل واحد فقط، وكل نقطة يمكن الوصول إليها، وكل قياس يستغرق نحو 10 دقائق مع التنقل.
- **الحل:** عدد القياسات بالتنصيف في أسوأ حالة يساوي أصغر عدد صحيح k يحقق $2^k \geq 16$، أي أربعة قياسات، نحو 40 دقيقة. وبالتتبع التسلسلي قد نحتاج 15 قياسًا، نحو ساعتين ونصف.
- **المعنى ميدانيًا:** نقطة التنصيف الأولى التي تُختار عادة هي خزانة التوزيع، لأنها تفصل الميدان عن غرفة التحكم ويسهل الوصول إليها. وفي الواقع لا تكون النقاط متساوية الكلفة: قياس في غرفة الأجهزة أرخص من صعود برج. لذلك يُعدَّل التنصيف ليختار النقطة التي تقسم **الاحتمال** مناصفة بأقل كلفة، لا النقطة التي تقسم **العدد** مناصفة.

حقن الإشارة. بدل أن تنتظر العملية، أدخل إشارة معلومة. مثال ذلك معاير في وضع المحاكاة عند صندوق التوصيل يعطي 4 و12 و20 mA، ومقاومة معلومة مكان RTD، ومصدر mV مكان مزدوجة حرارية. إن ظهرت القيمة الصحيحة في النظام، فالمسار من نقطة الحقن إلى الشاشة سليم، والعطل قبلها. وإن لم تظهر، فالعطل بعدها.

39.6 حلقة 4–20 mA: القياسات التي تحسم

أغلب أعطال القياس التناظري تُحسم بقياسين: التيار في الحلقة، والفولتية على أطراف المرسل. ويبين الشكل 39-5 أربع نقاط قياس في حلقة مرسل ثنائي السلك موصول ببطاقة إدخال فعالة (Active Input) تغذي الحلقة بفولتية 24 V، وما يُقرأ عند كل نقطة.

الشكل 39-5: *نقاط القياس الأربع في حلقة 4–20 mA. أطراف المرسل، وصندوق التوصيل، وما بعد الحاجز، وطرفا مقاومة القياس 250 أوم في البطاقة، مع القيم المرجعية للتيار والفولتية والنسبة.*

القيم المرجعية. على مقاومة 250 أوم يقابل كل 4 mA فولتًا واحدًا: 4 mA = 1 V = 0%، و8 mA = 2 V = 25%، و12 mA = 3 V = 50%، و16 mA = 4 V = 75%، و

$$20\ \text{mA} = 5\ \text{V} = 100\%\ (\text{R67}).$$

احفظ هذا الجدول، فهو أسرع طريقة لتحويل قراءة الفولتية إلى نسبة المدى.

مستويات التيار بحسب NAMUR NE43. تحدد التوصية منطقة القياس الصالح بين 3.8 و20.5 mA، وتجعل التيار 3.6 mA أو أقل، أو 21.0 mA أو أكثر، إشارة عطل. والشريطان بين 3.6 و3.8 mA وبين 20.5 و21.0 mA ليسا قياسًا صالحًا ولا إشارة عطل، فيُعاملان قيمة مشكوكًا فيها (19.6). ويضيف الفنيون تفسيرًا ميدانيًا لبعض القيم، وهو اجتهاد عملي لا نص التوصية:

التيار المقيس	الحالة وفق NE43	التفسير الميداني المرجح
نحو 0 mA	عطل	دائرة مفتوحة: سلك مقطوع، أو مصهر، أو فقد تغذية الحلقة

التيار المقيس	الحالة وفق NE43	التفسير الميداني المرجح
حتى 3.6 mA	عطل	المرسل كشف عطلًا ودفع خرجه إلى الأسفل (Downscale)
3.8 إلى 4.0 mA	قياس صالح دون الصفر	العملية تحت أدنى المدى قليلًا، أو انجراف في الصفر
4.0 إلى 20.0 mA	قياس عادي	راجع المطابقة مع العملية
20.0 إلى 20.5 mA	قياس صالح فوق المدى	العملية فوق المدى قليلًا؛ والثبات عند 20.5 mA تشبع: مدى مضبوط صغيرًا أو قيمة فعلية أعلى من المدى
21.0 mA أو أكثر	عطل	المرسل كشف عطلًا ودفع خرجه إلى الأعلى (Upscale)
أعلى بكثير من 22 mA	عطل	قصر بين طرفي المرسل؛ والتيار تحدّه عندئذ دائرة البطاقة أو الحاجز

كيف تقيس التيار دون أن توقف الوحدة؟ فتح الحلقة لإدخال مقياس على التوالي يجعل النظام يرى 0 mA. وقد يسبب ذلك إنذارًا، أو تحويل الحلقة إلى اليدوي، أو **فصل** وحدة إن كان المرسل جزءًا من حماية. البدائل الآمنة:

- **مقياس التيار بالملقط (mA Clamp Meter):** يقرأ تيار الحلقة دون فتحها، بدقة تكفي للتشخيص عادة.
- **طرفا الاختبار (TEST) في المرسل:** في كثير من المرسلات طرفا اختبار على جانبي ثنائي (Diode) موصول على التوالي مع الحلقة. يوصل المقياس بينهما فيمر التيار فيه دون فتح الحلقة. تحقق من الطراز في دليل المصنّع.
- **الفولتية على مقاومة القياس:** 1 إلى 5 V على 250 أوم تكافئ 4 إلى 20 mA.

ميزانية الفولتية. المرسل ثنائي السلك يحتاج حدًا أدنى من الفولتية على أطرافه ليعمل، ويُذكر في ورقة مواصفاته (مثلًا 10.5 V لطراز شائع). وكل عنصر في الحلقة يقتطع جزءًا من فولتية المصدر عند أعلى تيار: مقاومة القياس، والحاجز، والكابل، وأي مؤشر يضاف لاحقًا. والشرط العام:

$$V_{supply} - I_{max} \times R_{loop} \geq V_{min}$$

الشكل 39-6: *ميزانية الفولتية لحلقة بتغذية 24 V: الحلقة الأصلية (554 أوم) تترك للمرسل 11.8 V عند 22 mA، وبعد إضافة مؤشر 250 أوم (804 أوم) لا يستطيع المرسل رفع التيار فوق 16.8 mA تقريبًا.*

مثال محلول (قراءة لا تتجاوز 80%):

- **المعطيات:** تغذية الحلقة 24 V من البطاقة. مقاومة القياس 250 أوم، والحاجز 280 أوم، والكابل 1 km بمقطع 1.5 mm² (نحو 12 أوم/km لكل موصل، أي 24 أوم ذهابًا وإيابًا). أدنى فولتية للمرسل 10.5 V. بعد مشروع تعديل أُضيف مؤشر محلي على التوالي مقاومته 250 أوم. الشكوى: القراءة تتوقف عند نحو 80% مهما ارتفع المستوى.
- **الافتراضات:** نأخذ أعلى تيار يلزم أن يصل إليه المرسل، وهو 22 mA (إشارة العطل العلوية مع هامش)، لا 20 mA.
- **الحل:**

  - مقاومة الحلقة الأصلية: R = 250 + 280 + 24 = 554 أوم.
  - الهبوط عند 22 mA: I × R = 0.022 × 554 = 12.2 V.
  - ما يبقى للمرسل: V = 24 − 12.2 = 11.8 V، وهي أكبر من 10.5 V.
  - بعد إضافة المؤشر: R = 554 + 250 = 804 أوم.
  - أعلى تيار ممكن: I = (24 − 10.5) ÷ 804 = 16.8 mA، أي (16.8 − 4) ÷ 16 = 80% من المدى.
  - أقصى مقاومة مسموحة للحلقة عند 22 mA: R = (24 − 10.5) ÷ 0.022 = 614 أوم تقريبًا.
  - أي أن مقاومة الحلقة بعد التعديل (804 أوم) تتجاوز الحد المسموح (614 أوم)، فيتشبع المرسل عند 80% مهما ارتفع المستوى.
- **المعنى ميدانيًا:** العطل ليس في المرسل ولا في البطاقة، بل في تصميم الحلقة بعد التعديل. والعلامة المميزة سقف ثابت للقراءة لا يتغير بتغير العملية. الحل: مؤشر بهبوط فولتية أقل، أو مصدر تغذية أعلى في حدود شهادة الحاجز، أو نقل المؤشر إلى الشاشة. ويُراجع حساب الحلقة في كل تعديل (MOC).

أوضاع المعاير (Process Calibrator). كثير من الأخطاء في الميدان سببها وضع خاطئ للمعاير، لا عطل في الحلقة.

جدول مقارنة: أوضاع معاير الحلقة ومتى يُستعمل كل منها

الوضع	ما يفعله المعاير	متى تستعمله	تنبيه
قياس mA (Measure)	يقرأ التيار على التوالي	الحلقة تعمل بتغذيتها	فتح الحلقة يقطعها لحظة التوصيل

الوضع	ما يفعله المعاير	متى تستعمله	تنبيه
قياس mA مع تغذية V (Loop 24 Power)	يغذي المرسل ويقرأ تياره	فحص المرسل مفصولًا عن النظام أو في الورشة	لا تستعمله والحلقة موصولة ببطاقة فعالة
مصدر mA (Source)	يولّد تيارًا بتغذيته الداخلية	فحص مدخل سلبي (Passive) أو موضع صمام	لا تستعمله على بطاقة فعالة: مصدران في حلقة واحدة
محاكاة مرسل (Simulate)	يتحكم بتيار مصدر خارجي كأنه مرسل ثنائي السلك	حقن إشارة من صندوق التوصيل إلى بطاقة فعالة	المصدر الخارجي هو البطاقة، والمعاير بلا تغذية
قياس الفولتية	قياس 1–5 V أو فولتية التغذية	ميزانية الفولتية والمقاومات	اختر المدى الصحيح
مصدر mV أو محاكاة مقاومة	يحاكي مزدوجة حرارية أو RTD	فحص مداخل الحرارة	حدد نوع المزدوجة والتعويض البارد

كيف أختار؟ اسأل أولًا: من يغذي الحلقة؟ إن كانت البطاقة فعالة فاستعمل «محاكاة مرسل» لحقن الإشارة من صندوق التوصيل و«قياس mA» للقراءة؛ وإن كان المدخل سلبيًا أو الجهاز مفصولًا فاستعمل «مصدر mA» أو «قياس مع تغذية 24 V». والجدول لا يبين ما يحدث لحماية الوحدة حين تُفتح الحلقة لحظة التوصيل، فذلك يُحسم بالتنسيق مع التشغيل وتفويض التجاوز (39.2) لا بوضع المعاير. وأكثر الأخطاء كلفة وضع مصدرين في حلقة واحدة (مصدر أو تغذية 24 V على بطاقة فعالة)، فتظهر قراءة شاذة تُتهم بها البطاقة، وقد يتضرر المرسل أو البطاقة.

> **قاعدة البطاقة الفعالة والسلبية.** المرسل ثنائي السلك يأخذ تغذيته من الحلقة، فيحتاج بطاقة فعالة أو مصدرًا خارجيًا. أما المرسل رباعي الأسلاك فله تغذيته الخاصة ويخرج تيارًا فعالًا، فيحتاج بطاقة سلبية. ووصل مرسل رباعي الأسلاك ببطاقة فعالة يضع مصدرين في حلقة واحدة، فتكون القراءة شاذة أو معدومة، وقد يتضرر المرسل أو البطاقة.

اتصال HART في التشخيص. يُركّب اتصال HART إشارة رقمية متناوبة صغيرة (±0.5 mA، بتقنية إزاحة التردد FSK: 1200 Hz للواحد و2200 Hz للصفر) فوق تيار 4–20 mA دون أن تؤثر في متوسطه (R67). ولكي يعمل جهاز الاتصال يجب أن تكون في الحلقة مقاومة لا تقل عن نحو 230 أوم (250 أوم عادة)، ويوصل الجهاز على التوازي: بين طرفي المرسل أو بين طرفي المقاومة، لا على التوالي. ومنه تُقرأ القيمة الأولية (PV) والتيار الذي يظن المرسل أنه يخرجه والنسبة المئوية. **والمقارنة بين هذه القيم الثلاث وبين التيار المقيس فعلًا تحدد موضع العطل:** إن اختلفت PV عن العملية فالعطل في جانب الحساس. وإن اتفقت PV واختلف التيار المقيس عن التيار المعلن، فالعطل في مرحلة الخرج أو معايرتها (D/A Trim). وإن اتفق الاثنان واختلفت قراءة النظام، فالعطل بعد المرسل.

أوامر HART الشائعة في التشخيص (R67):

الفئة	أمثلة	الاستعمال في التشخيص
عامة (Universal)	قراءة نوع الجهاز، وPV ووحدتها، والتيار والنسبة، وحدود المدى والتخميد، والوسم	التعرف على الجهاز والتأكد من تهيئته
ممارسة شائعة (Common Practice)	كتابة التخميد والمدى، وضبط الصفر والمدى، وتيار ثابت، واختبار ذاتي، ومعايرة الخرج	اختبار الحلقة بتيار ثابت، وتصحيح الصفر، ومعايرة D/A
خاصة بالجهاز (Device Specific)	قطع التدفق المنخفض، والعدّاد، ومعامل الكثافة، وخصائص الصمام وحدود الشوط	إعدادات يكثر فيها الخطأ بعد تبديل الجهاز

تنبيه: وضع **التيار الثابت** (Fixed Current أو Loop Test) يفصل الخرج عن القياس. والمرسل المنسي في هذا الوضع يعطي قيمة ثابتة تبدو طبيعية. وكثير من المرسلات يخرج منه تلقائيًا بعد مهلة، لكن لا تعتمد على ذلك: أخرج الجهاز منه بنفسك، وسجل ذلك في تقرير العمل.

39.7 جداول التشخيص بحسب الجهاز

قبل الجداول، شجرة قرار عامة لقراءة مشكوك فيها (الشكل 39-7). هي التطبيق العملي لقاعدة تتبع المسار في القسم 3.7: أربعة أسئلة، كل سؤال يقسم المسار الباقي إلى نصفين.

الشكل 39-7: *سلسلة قرار لقراءة مشكوك فيها: هل تتفق مع متغير مرتبط؟ هل يقرأ المرسل العملية صحيحًا؟ هل يطابق التيار قراءة المرسل؟ هل يصل التيار إلى البطاقة؟ لكل جواب نصف من المسار يُستبعد.*

جدول تشخيص: أجهزة القياس (العَرَض ← السبب ← الفحص ← الإجراء)

العَرَض	السبب المرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
مرسل DP لتدفق يقرأ صفرًا والتدفق موجود	صمام المعادلة في المانيفولد الثلاثي مفتوح	راجع وضع صمامات المانيفولد	أغلق المعادلة ثم افتح العزل بالترتيب الصحيح
مرسل DP لمستوى يقرأ قيمة ثابتة	معادلة مفتوحة أو خط أخذ مسدود	احسب النسبة المقابلة لفرق ضغط صفري وقارنها بالقراءة	نظّف الخطوط أو صحح المانيفولد
قراءة التدفق مرتفعة جدًا عند التدفق المنخفض	الجذر التربيعي مطبق مرتين، في المرسل وفي النظام	راجع دالة النقل في المرسل (HART) وفي الكتلة	جذر واحد فقط، في مكان واحد موثق
ضغط يتذبذب مع نبض المضخة	مأخذ قريب من مصدر نبض، أو خط غاز فيه سائل	اتجاه سريع وفحص ميل خط النبض	مخمد أو تخميد مناسب، وإعادة توجيه الخط
مزدوجة حرارية تقرأ أعلى المدى أو أدناه فجأة	انقطاع المزدوجة، وقد اختير اتجاه كشف الاحتراق	قياس مقاومة الحلقة (بضعة أوم للسليمة)	بدّل العنصر وافحص الغمد
الحرارة تنقص حين يسخن رأس المزدوجة	قطبية كابل التمديد معكوسة	سخّن رأس الوصلة قليلًا وراقب الاتجاه	صحح القطبية؛ السالب في النوع K ممغنط قليلًا
خطأ ثابت في RTD ثنائي الأسلاك	مقاومة الأسلاك تُضاف إلى القياس	قس المقاومة عند الرأس وعند البطاقة	ثلاثة أو أربعة أسلاك، أو تعويض محسوب
قراءة حرارة بطيئة جدًا	عنصر لا يلمس قاع الغمد، أو غمد متسخ	زمن الاستجابة لخطوة معروفة	عنصر بطول صحيح ونابض ضغط، وتنظيف الغمد

العَرَض	السبب المرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
قراءة صحيحة لكن بعيدة عن مرسل مكرر	انجراف أو تهيئة مختلفة (مدى أو وحدة)	قارن تهيئة الجهازين بـ HART	معايرة أو تصحيح التهيئة
تدفق مغناطيسي يقرأ صفرًا والأنبوب يعمل	الأنبوب غير ممتلئ أو أقطاب متسخة	تشخيص «أنبوب فارغ» في الجهاز	موقع تركيب يضمن الامتلاء، وتنظيف الأقطاب

للتذكر في الحرارة: Pt100 يعطي 100 أوم عند 0 °C ونحو 138.5 أوم عند 100 °C. وكابل التمديد المعكوس القطبية يعطي خطأً يقارب ضعف فرق الحرارة بين رأس المزدوجة وطرف البطاقة، وبالإشارة المعاكسة. وفي الترميز الأمريكي يكون السلك السالب أحمر دائمًا، وفي ترميز IEC 60584-3 يكون السالب أبيض (الفصل 7).

جدول تشخيص: المتحكم والحلقة

العَرَض	السبب المرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
تذبذب منتظم يتوقف في اليدوي	كسب مرتفع أو زمن تكامل قصير	الرسم المتقاطع وشكل الموجة (40.3)	إعادة الضبط (الفصل 18)
الخرج عند حده والانحراف قائم	تشبع الخرج أو المدخل، أو تراكم التكامل (Windup)	قيمة الخرج وحدود الكتلة	إصلاح العنصر النهائي أو حدود مضادة للتراكم
الحلقة تبتعد عن نقطة الضبط	فعل المتحكم (مباشر أو عكسي) خاطئ	خطوة صغيرة في نقطة الضبط واتجاه الاستجابة	صحح الفعل
استجابة متأخرة وغير منتظمة	معدل تنفيذ الكتلة لا يناسب زمن تحديث الحلقة	إعداد المهمة ودورة المسح	مواءمة معدل التنفيذ مع ديناميكية العملية

العَرَض	السبب المرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
ضوضاء في الخرج	ترشيح غير كافٍ على القيمة المقاسة مع كسب مرتفع	اتجاه القيمة والخرج معًا	مرشح مناسب وخفض الكسب التفاضلي

حين يكون العطل في المحرك لا في الجهاز. كثير من «أعطال التحكم» في المضخات والمراوح تنتهي عند المحرك. ودراسات موثوقية المحركات الكبيرة (EPRI) تنسب نحو 41% من أعطالها إلى المحامل، و37% إلى الجزء الثابت (Stator)، و10% إلى الجزء الدوار، و12% لأسباب أخرى (R68). وأسباب أعطال المحركات الستة الشائعة: التيار الزائد، وانخفاض مقاومة العزل، والسخونة، والأوساخ، والرطوبة، والاهتزاز. والقاعدة التقريبية المعروفة: كل ارتفاع بنحو 10 °C فوق حرارة التصميم يقصّر عمر العزل إلى النصف تقريبًا. لذلك يُسأل عند كل فصل لمحرك: هل الحماية تعمل على نحو صحيح، أم أنها تكشف مشكلة حقيقية في المحرك (الفصل 32)؟

39.8 الصمامات والمشغلات: التشخيص المفصل

العنصر النهائي أكثر أجزاء الحلقة حركة واحتكاكًا وتعرضًا للعملية. لذلك كثير من «أعطال الضبط» تنتهي عنده. والصمام ليس جهازًا واحدًا، بل سلسلة: أمر من النظام، ثم الموضّع (Positioner) أو محوّل التيار إلى ضغط (I/P)، ثم تغذية الهواء بمنظمها ومرشحها، ثم المشغل (Actuator)، ثم الوصلة والساق، ثم الحشوة والتريم (Trim)، وأخيرًا العملية نفسها. ويُطبق عليها التنصيف كما في مسار الإشارة: قارن الأمر بخرج الموضع، ثم خرج الموضع بضغط المشغل، ثم ضغط المشغل بالشوط الفعلي. وحيث يختلف المتوقع عن المقيس يكون العطل. وأساسيات الصمام وملحقاته وفحصه في الفصل 15، وهنا نركز على التشخيص.

جدول تشخيص: صمامات التحكم والعناصر النهائية

العَرَض	السبب المرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
الصمام لا يتجاوز فتحة معينة	ضغط هواء التغذية منخفض أو المشغل صغير بعد خفض ضغط هواء المصنع	مقياس ضغط تغذية الموضع وفرق الضغط على الصمام	اضبط المنظم وفق ورقة المواصفات أو كبّر المشغل
حركة متقطعة وتذبذب الحلقة	التصاق الساق (Stiction) أو ارتخاء الوصلة	اختبار خطوات صغيرة في اليدوي (15.13)	صيانة الحشوة، وشد الوصلة، ومعايرة الموضع
الموضع لا يطابق الأمر	معايرة الموضع أو ذراع التغذية الراجعة	شوط كامل 0 و25 و50 و75 و100% ومقارنة الموضع	معايرة الموضع وتثبيت ذراعه
الصمام لا يتحرك إطلاقًا	لا هواء، أو صمام ملفي (Solenoid Valve) بلا تغذية، أو عجلة يدوية معشقة	فولتية الملف وضغط الهواء بعده ووضع العجلة	أعد الهواء والملف، وحرر العجلة
الصمام يفتح بدل أن يغلق	فعل المتحكم أو فعل المشغل معكوس	تحقق من فعل الصمام عند زيادة الإشارة وعند فقد الهواء	صحح التهيئة وفق ورقة المواصفات
تسرب هواء مسموع	أنبوب معصور أو وصلة مرتخية أو غشاء مثقوب	رغوة الصابون وقياس استهلاك الهواء	استبدال الوصلة أو الغشاء
الصمام بطيء في الإغلاق الطارئ	تنفيس الملف صغير، أو مرشح هواء مسدود، أو احتكاك	قياس زمن الشوط وتسجيله	معزز حجمي أو صمام تنفيس سريع، وتنظيف المرشح

وتلخص قائمة R67 وR68 فحوص الصمام الأساسية في أربعة أسئلة: هل تصل التغذية الهوائية الصحيحة إلى المشغل، دون أنابيب معصورة أو تسرب؟ هل الوصلات بين المشغل

والساق وذراع الموضع مشدودة؟ هل المشغل معاير، بحيث يطابق الموضع الأمر على الشوط كله؟ وهل ضغط الهواء المتاح يكفي بعد أي خفض لضغط هواء المصنع؟

قائمة فحص صمام في حلقة DCS (من الأمر إلى الساق). حين يتصرف الصمام بغرابة والحلقة تبدو سليمة على الشاشة، افحص بالترتيب (R69):

1. **سلامة إشارة الأمر وتحجيمها:** هل خرج الكتلة 0–100% يصل إلى الموضع 4–20 mA كما هو؟ راجع تحجيم قناة الإخراج، وأي توصيف (Characterization) أو تقسيم مدى (Split Range) في النظام أو في الموضع، وقس التيار عند الموضع.
2. **حركة الساق وصحة المشغل:** هل يتحرك الصمام شوطه كاملًا؟ هل المشغل سليم وضغط الهواء كافٍ؟ هل هناك احتكاك في الحشوة أو التصاق؟
3. **معايرة الموضع وتغذيته الراجعة:** هل الموضع المقروء يطابق الموضع الفعلي على مقياس الشوط؟ هل ذراع التغذية الراجعة مشدود؟ وهل نُفذت المعايرة الآلية للموضع بعد آخر صيانة؟
4. **اضطرابات التدفق والضغط وضوضاء الإشارة:** هل التذبذب مصدره الصمام، أم تغيرات الضغط قبله وبعده، أم ضوضاء في القياس تحرك الخرج؟
5. **إعدادات الضبط في DCS والمنطقة الميتة:** كسب مرتفع، أو تفاضلي على قياس مضطرب، أو منطقة ميتة للخرج أصغر من دقة الصمام، فيطارد المتحكم تغيرات لا يستطيع الصمام تنفيذها. وتذكر أن ضبط PID لا يعالج صمامًا ملتصقًا (3.8).

بصمة الصمام والموضّع الذكي. الموضّع الذكي يستطيع أن يرسم **بصمة الصمام (Valve Signature)**: الشوط مقابل ضغط المشغل أثناء فتح بطيء ثم إغلاق بطيء (الشكل 39-8). ومنها تُقرأ ثلاث حقائق دون فك الصمام:

- **مدى النابض (Bench Set):** الضغط الذي يبدأ عنده الشوط والضغط الذي يكتمل عنده. فإن تغير عن ورقة المواصفات، فالنابض متعب أو مضبوط خطأ.

- **الاحتكاك:** المسافة الأفقية بين منحنى الفتح ومنحنى الإغلاق تساوي ضعف الاحتكاك مقسومًا على مساحة الغشاء. الحلقة العريضة تعني حشوة مشدودة أكثر من اللازم، أو ساقًا مخدوشة، أو دليلًا متآكلًا.
- **حمل المقعد:** الجزء الذي يتغير فيه الضغط والشوط صفر. فإن كان قصيرًا جدًا، فقد لا يُحكم الصمام الإغلاق.

الشكل 39-8: *بصمة الصمام لصمام يفتح بالهواء: مدى النابض بين 0.8 و2.4 بار، والمسافة بين منحنى الفتح (متصل) ومنحنى الإغلاق (متقطع) تساوي ضعف الاحتكاك. الصمام السليم حلقته ضيقة، والحشوة المشدودة أكثر من اللازم توسّع الحلقة.*

مثال محلول (قراءة الاحتكاك من البصمة):

- **المعطيات:** مشغل غشائي مساحته الفعالة 0.058 m^2، ومدى نابضه 0.8 إلى 2.4 bar. البصمة عند الاستلام كان عرض حلقتها 0.10 bar، وبعد تبديل الحشوة صار 0.50 bar. والحلقة تتذبذب منذ الصيانة.
- **الافتراضات:** الأرقام تعليمية، وحدود الاحتكاك المقبولة لنوع الحشوة تؤخذ من المصنّع.

- **الحل:**
  - الاحتكاك: F = (عرض الحلقة ÷ 2) × مساحة الغشاء.
  - قبل الصيانة: $F = 0.05 \times 10^5\ \text{Pa} \times 0.058\ \text{m}^2 = 290\ \text{N}$.
  - بعدها: $F = 0.25 \times 10^5 \times 0.058 = 1450\ \text{N}$، أي خمسة أضعاف.
  - لو عمل الصمام دون موضع، لاحتاج تغيرًا في الإشارة قدره 0.50 ÷ 1.6 ≈ 31% من مدى النابض حتى يعكس اتجاهه.
  - والموضع يعوّض معظم ذلك، لكن ما يبقى يظهر قفزات «التصاق وانزلاق» في اختبار الخطوات.
- **المعنى ميدانيًا:** البصمة أثبتت أن الحشوة شُدت أكثر من اللازم بعد الصيانة. وهذا نمط الحالة في القسم 15.16. الحل: إعادة ضبط شد الحشوة إلى عزم المصنّع وإعادة البصمة، لا إعادة ضبط PID.

تنبيهات الموضّع الذكي التي تستحق المتابعة: انحراف الموضع عن الأمر أكثر من حد ولمدة (Travel Deviation). وانخفاض ضغط التغذية. وتشبع إشارة القيادة الداخلية للموضع، أي أنه يدفع بأقصى ما يستطيع ولا يصل، والسبب غالبًا تسرب أو احتكاك أو هواء غير كافٍ. وعداد الدورات والمسافة المقطوعة الذي يدل على تآكل الحشوة. وتُرتب هذه التنبيهات في فئات (39.12) NE107 لتذهب إلى الصيانة لا إلى المشغل.

جدول تشخيص: صمامات الإغلاق والإيقاف الطارئ (SDV وESDV)

العَرَض	السبب المرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
لا يتحرك عند أمر الإغلاق	الصمام الملفي عالق، أو منفذ التنفيس مسدود بحشرات أو أوساخ، أو الصمام عالق ميكانيكيًا	ضغط المشغل بعد فصل الملف، وفحص منفذ التنفيس	تنظيف أو تبديل الملف، وتركيب شبكة حماية على المنفذ

العَرَض	السبب المرجح	الفحص الحاسم	الإجراء
يغلق أبطأ من الزمن المطلوب	منفذ تنفيس صغير، أو أنبوب طويل ضيق، أو احتكاك	قياس زمن الشوط ومقارنته بالمتطلب في ورقة المواصفات	صمام تنفيس سريع (Quick Exhaust)، وأنابيب أوسع
مفتاح النهاية لا يطابق الموضع	مفتاح مزاح، أو كامة مرتخية، أو سلك	مقارنة الموضع المرئي بمؤشر المفتاح	ضبط المفتاح وتثبيته
فشل اختبار الشوط الجزئي (PST)	التصاق، أو هواء غير كافٍ، أو ضبط اختبار خاطئ	بصمة الشوط الجزئي ومقارنتها بالسابقة	صيانة قبل الطلب الحقيقي، فالاختبار كشف عطلًا خطيرًا
فصل كاذب متكرر	ملف محترق من التسخين المستمر، أو تلامس رديء في دائرته	مقاومة الملف وحرارته، والفولتية على أطرافه	ملف بتصنيف حراري مناسب للتغذية المستمرة
صمام مزدوج الفعل ينزاح ببطء	تسرب في مانع المكبس أو في الصمام الموجِّه	عزل الهواء ومراقبة الموضع والضغط	تبديل المانع

وقبل أي اختبار لصمام إيقاف طارئ يلزم التنسيق مع التشغيل وتفويض التجاوز (39.2)، لأن حركة الصمام قد توقف الوحدة.

جدول تشخيص: المشغلات الكهربائية (MOV)

العَرَض	السبب المرجح	الفحص
لا يستجيب للأمر البعيد	مفتاح الاختيار على «محلي»، أو فقد تغذية أو طور، أو حماية حرارية فصلت	مؤشرات المشغل المحلية وسجل إنذاراته
يتوقف في منتصف الشوط	فصل مفتاح العزم (Torque Switch) لعائق أو حشوة مشدودة	قيمة العزم المسجلة والشوط عند التوقف

العَرَض	السبب المرجح	الفحص
يدور بعكس الاتجاه	تسلسل الأطوار معكوس في التغذية ثلاثية الطور	تسلسل الأطوار؛ كثير من المشغلات الحديثة يصححه آليًا
يتجاوز نهاية الشوط أو يتوقف قبلها	ضبط حدود الشوط خاطئ بعد صيانة أو تبديل	معايرة حدي الفتح والإغلاق
يترنح في وضع التعديل	منطقة ميتة صغيرة جدًا مقارنة بدقة المشغل	إعداد المنطقة الميتة وعدد مرات البدء في الساعة
سخونة المحرك	عدد بدء يتجاوز تصنيف المحرك	سجل عدد مرات البدء وتصنيف الخدمة

المشغلات الهيدروليكية (صمامات الوقود والبخار في التوربينات): أغلب أعطالها من ثلاثة مصادر. الأول تلوث الزيت الذي يُعلق الصمام المؤازر (Servo Valve)، ويُراقب بعدّ الجسيمات وفق ISO 4406. والثاني عطل حساس الموضع (LVDT) أو إثارته، ويظهر في صورة فرق بين الحساسين المكررين. والثالث ضغط شحن المركم (Accumulator) المنخفض، فيبطؤ الإغلاق الطارئ. والتشخيص يبدأ بمقارنة تيار الصمام المؤازر بالموضع وبالأمر، كما في القسم 34.8.

جدول: التسرب والضوضاء في الصمامات

العَرَض	ما يعنيه	الفحص	المرجع
تدفق مع صمام مغلق تمامًا	تسرب المقعد: تريم متآكل، أو حمل مقعد غير كافٍ، أو جسم غريب	حرارة الأنبوب بعد الصمام، وكاشف فوق صوتي، وحمل المقعد في البصمة	فئات التسرب (15.6)
تسرب حول الساق	تسرب الحشوة (انبعاثات هاربة)	كاشف غاز، ومراقبة بصرية	الحشوة والمواد (15.12)

العَرَض	ما يعنيه	الفحص	المرجع
صوت حصى داخل الصمام	تكهف (Cavitation)	الضغوط قبل الصمام وبعده وضغط البخار	الخدمات القاسية (15.5)
تآكل سريع بمظهر «مصقول» بعد الصمام	وميض (Flashing)	الضغط بعد الصمام أقل من ضغط البخار	الخدمات القاسية (15.5)
اهتزاز وضوضاء عالية في خدمة الغاز	سرعة عالية أو اختيار تريم غير مناسب	حساب الضوضاء وسرعة المخرج	الاختيار وورقة البيانات (15.14)

39.8.1 الصمام «المار» وهو مغلق *(Control Valve Passing)*: الأسباب الثلاثة وطريقة التشخيص

من أكثر شكاوى التشغيل تكرارًا: «الصمام مغلق على الشاشة والتدفق لم يتوقف»، أو «حرارة الخط بعد صمام البخار ما زالت عالية والأمر 0%». هذه الحالة تسمى في الموقع مرور الصمام (Passing).

وقبل التشخيص تلزم حقيقة: صمام التحكم ليس صمام عزل. فله فئة تسرب مسموحة عند الإغلاق وفق ANSI/FCI 70-2 (القسم 15.6). في الفئة IV، وهي الشائعة للكراسي المعدنية، يُسمح بتسرب حتى 0.01% من السعة المقننة. وفي الفئة VI للكراسي اللينة يُسمح ببضع فقاعات في الدقيقة. فإن كانت الخدمة تحتاج إلى إغلاق محكم فعلًا، فالحل صمام عزل أو صمام إيقاف مستقل في السلسلة، لا مطالبة صمام التحكم بما لم يُصمم له.

فإن كان التسرب أكبر من فئة الصمام، أو ظهر فجأة بعد أن كان الصمام محكمًا، فأسبابه ثلاث مجموعات (الشكل 39-9):

الشكل 39-9: *مجموعة صمام التحكم ومواضع أسباب مروره وهو مغلق: (أ) مشكلات المشغل والموضّع التي تمنع وصول قوة الإغلاق كاملة إلى الكرسي، و(ب) المشكلات الميكانيكية في الساق والسدادة والكرسي والحشوة، و(ج) مشكلات العملية، ومنها فرق الضغط الأعلى من قدرة الإغلاق وصمام التجاوز اليدوي الذي يسرّب هو نفسه.*

جدول: أسباب مرور صمام التحكم وفحوصها

المجموعة	السبب	كيف يظهر	الفحص الحاسم	الإجراء
(أ) المشغل والموضّع	صفر الموضّع غير مضبوط، فيبقى في المشغل ضغط عند الأمر 0%	الموضّع يقرأ 0% لكن ضغط المشغل ليس عند قيمة الإغلاق	ضغط المشغل عند 0% مقارنة بورقة البيانات	معايرة الموضّع، وتفعيل وظيفة الإغلاق المحكم (Tight Shut-off) التي تفرغ المشغل أو تملؤه كاملًا عند أمر أقل من 1% تقريبًا
(أ)	ضبط النابض (Bench Set) خاطئ أو نابض متعب	حمل الكرسي أقل من المطلوب	بصمة الصمام وقيمة بداية الشوط	إعادة ضبط النابض وفق المصنّع
(أ)	ضغط هواء التغذية منخفض في صمام يغلق بالهواء	الصمام يصل إلى الكرسي بلا حمل كافٍ	مقياس ضغط التغذية عند الموضّع	إصلاح المنظم أو خط الهواء
(أ)	محدد شوط (Travel Stop) أو عجلة يدوية معشقة	الساق تتوقف قبل الكرسي	فحص العجلة والمحدد	تحرير العجلة وإزالة المحدد أو ضبطه
(ب) ميكانيكية	تآكل السدادة والكرسي، أو خدوش عليهما	تسرب يزداد تدريجيًا	اختبار تسرب في الورشة، ومعاينة التريم	لف السطحين (Lapping) أو تبديل التريم
(ب)	انفصال السدادة عن الساق، أو ارتخاء وصلتهما، أو انكسار المسمار	الساق تتحرك والتدفق لا يتغير كما يجب	مقارنة الشوط بالتدفق، وفحص الصمام بعد فكه	تبديل الوصلة أو المسمار

المجموعة	السبب	كيف يظهر	الفحص الحاسم	الإجراء
(ب)	ساق منحنية، أو احتكاك حشوة زائد	حركة متقطعة، والصمام لا يكمل الإغلاق	بصمة الصمام وعرض حلقة الاحتكاك (أول هذا القسم)	تبديل الساق، وضبط شد الحشوة
(ب)	جسم غريب على الكرسي (لحام، أو حصى، أو قشور)	يظهر بعد التشغيل الأول أو بعد صيانة الخط	الشوط يقف عند قيمة ثابتة فوق الصفر	فك الصمام وتنظيفه، ومصفاة قبله
(ج) العملية	فرق الضغط الحالي أعلى من فرق ضغط الإغلاق الذي صُمم له المشغل	الصمام محكم عند فرق ضغط منخفض ويمر عند العالي	مقارنة فرق الضغط الفعلي بورقة البيانات	مشغل أكبر أو نابض أقوى، أو تريم متوازن
(ج)	تكهف أو تآكل بالسحب (Wire Drawing) من التشغيل قرب الكرسي	تسرب يزداد، وضجيج عند الفتحات الصغيرة	معاينة التريم	تريم مقاوم، وتجنب التشغيل الطويل دون نحو 10% من الشوط
(ج)	جوامد أو هيدرات أو ثلج أو تمدد حراري	يظهر مع تغير الخدمة أو الحرارة	تاريخ العملية وحرارة الخط	مصفاة، أو تسخين، أو تريم مناسب

المجموعة	السبب	كيف يظهر	الفحص الحاسم	الإجراء
(ج)	المسار ليس صمام التحكم: صمام التجاوز اليدوي أو صمام تصريف يسرّب	التدفق مستمر رغم إحكام صمام التحكم	عزل صمام التحكم بصماميه ومراقبة التدفق	إصلاح صمام التجاوز

ترتيب التشخيص. يبدأ التشخيص بالأسهل والأرخص، ولا يُفك الصمام قبل أن يُستبعد ما يمكن فحصه وهو في مكانه (الشكل 39-10):

الشكل 39-10: *شجرة تشخيص الصمام المار: يُستبعد المسار الموازي أولًا، ثم يُفحص ضغط المشغل وشوط الموضّع عند الأمر 0%، ثم وصول الساق فعلًا إلى الكرسي، ثم فرق الضغط مقارنة بقدرة الإغلاق، وما بقي فهو تآكل التريم الذي يثبته اختبار التسرب وفق فئة الصمام.*

1. **استبعد المسار الموازي:** هل صمام التجاوز مغلق ومحكم؟ وهل صمامات التصريف والتنفيس على المحطة مغلقة؟ كثير من «الصمامات المارة» تكون صمام التجاوز اليدوي نفسه.

2. **افحص الأمر وضغط المشغل:** عند الأمر 0%، هل الموضّع يقرأ 0%؟ وهل ضغط المشغل عند القيمة التي تعطي حمل الكرسي الكامل، أي صفرًا لصمام يفتح بالهواء، وضغط التغذية كاملًا لصمام يغلق بالهواء؟
3. **افحص وصول الساق إلى الكرسي:** قارن مؤشر الشوط على الساق بالعلامة المسجلة عند الاستلام، أو بصمة الصمام في الموضّع الذكي.
4. **قارن فرق الضغط بقدرة الإغلاق:** إن كان الفرق الحالي أعلى مما في ورقة البيانات، فالمشكلة في التصميم أو في تغير الخدمة، لا في الصيانة.
5. **أثبت التسرب قبل فك الصمام:** من حرارة الخط بعد الصمام، أو بكاشف تسرب صوتي، أو باختبار ارتفاع الضغط: يُغلق صمام العزل بعد صمام التحكم، ويُراقب الضغط بينهما. فإن ارتفع والصمام مغلق، فهو يمر.
6. **ثم الصيانة:** فك الصمام، ومعاينة التريم، واختبار التسرب في الورشة وفق فئته قبل إعادته.

وكل هذه الأعمال تتم بتنسيق مع التشغيل وتحت تصريح عمل. وفك الصمام يحتاج إلى عزل المحطة بصمامي العزل وتفريغها والتحقق منها (الفصل 13).

مثال محلول (حمل الكرسي في صمام يفتح بالهواء):

- **المعطيات:**
  - صمام كروي بجريان تحت السدادة (Flow Under Plug)، وقطر الكرسي 50 mm.
  - المشغل غشائي يفتح بالهواء، مساحته الفعالة 0.058 m^2، وضبط نابضه عند الإغلاق 0.9 bar.
  - احتكاك الحشوة 450 N، وفرق الضغط عند الإغلاق 20 bar.
- **الافتراضات:** سدادة غير متوازنة، فيدفعها فرق الضغط على مساحة الكرسي نحو الفتح.

- **الحل:**
  - مساحة الكرسي: $\pi \div 4 \times 0.050^2 \approx 1.96 \times 10^{-3}\ m^2$.
  - قوة النابض عند الإغلاق: $0.9 \times 10^5 \times 0.058 \approx 5220\ N$.
  - قوة العملية التي تفتح السدادة: $20 \times 10^5 \times 1.96 \times 10^{-3} \approx 3930\ N$.
  - حمل الكرسي المتبقي: $5220 - 3930 - 450 \approx 840\ N$.
  - **حالة (أ):** إن ترك الموضّع في المشغل 0.25 bar عند الأمر 0%، فهذه قوة معاكسة قدرها $0.25 \times 10^5 \times 0.058 \approx 1450\ N$. تزيد على حمل الكرسي كله، فترتفع السدادة ويمر الصمام. والإصلاح تفعيل الإغلاق المحكم في الموضّع ليُفرّغ المشغل كاملًا.
  - **حالة (ج):** إن ارتفع فرق الضغط إلى 25 bar، صارت قوة العملية $25 \times 10^5 \times 1.96 \times 10^{-3} \approx 4910\ N$. فيصير حمل الكرسي $5220 - 4910 - 450 \approx -140\ N$–، ويمر الصمام حتى والمشغل مُفرَّغ تمامًا. وهنا لا تفيد المعايرة؛ الحل نابض أقوى، أو مشغل أكبر، أو تريم متوازن.
- **معنى النتيجة:** العَرَض واحد في الحالتين، «الصمام يمر»، لكن السبب في الأولى مشغل وموضّع، وفي الثانية عملية وتصميم. ولذلك يُقاس ضغط المشغل ويُقارن فرق الضغط بورقة البيانات قبل فك الصمام.

دور المهندس ودور الفني: الفني يقيس ضغط المشغل والشوط، ويستبعد المسار الموازي، ويجري اختبار ارتفاع الضغط، ويعاير الموضّع. والمهندس يقارن فرق الضغط الفعلي بقدرة الإغلاق المصممة، ويقرر هل المشكلة صيانة أم تصميم، ويحدد إن كانت الخدمة تحتاج إلى صمام عزل مستقل بدل مطالبة صمام التحكم بإغلاق محكم.

39.9 الدوائر المنفصلة والتغذية والعزل

التغذية أولًا، ثم دائرة التحكم. كل دائرة كهربائية فيها جزءان: دائرة القدرة ودائرة التحكم. افحص دائرة القدرة أولًا، فإن كانت سليمة فانتقل إلى دائرة التحكم (R68):

- **دائرة القدرة:** وصول التغذية وسلامتها، وعمل أجهزة الحماية (المصاهر والقواطع)، واستمرارية الكابلات ظاهريًا، وأي أثر لوميض أو رائحة احتراق.
- **دائرة التحكم:** تغذية التحكم أولًا، ثم عمل المرحلات والمؤقتات والمفاتيح، والأسلاك والأطراف، وتسلسل عمل الملامسات (Contactors)، وضبط أزمنة المؤقتات. فإن كان كل ذلك سليمًا ولم يعمل العنصر النهائي، فافحص العنصر النهائي نفسه.

تتبّع الفولتية (Voltage Walking) على سلسلة التعشيق. في سلسلة سماح من تلامسات على التوالي، ثبّت إحدى نقطتي المقياس على الطرف المشترك (0 V)، وانقل الأخرى من تلامس إلى التالي. حيث تختفي الفولتية يكون التلامس المفتوح (الشكل 39-11). ويمكن تطبيق التنصيف هنا أيضًا: ابدأ بالقياس في منتصف السلسلة.

الشكل 39-11: *تتبّع الفولتية على سلسلة سماح تشغيل مضخة: الفولتية 24 V حتى مفتاح مستوى السحب، ثم صفر بعده. المفتاح هو التلامس المفتوح، ويبقى السؤال: هل المستوى منخفض فعلًا أم المفتاح معطوب؟*

الاختبار الميت والاختبار الحي. الاختبار الميت (Dead Test) يُجرى والدائرة معزولة عن التغذية: استمرارية الموصلات، ومقاومة العزل، والقطبية. وهو الأسلم ويُفضل دائمًا. فإن لم يكن ممكنًا، فالاختبار الحي (Live Test) بالتغذية، مع الاحتياطات الكاملة (R68).

مقاومة العزل. تُقاس بجهاز قياس العزل (Insulation Tester) بين الموصلات والأرض. ومعيار القبول في المواصفة IEC 60364-6 للدوائر حتى 500 V: فولتية اختبار 500 V DC، ومقاومة لا تقل عن 1 ميغا أوم. وللدوائر منخفضة الجهد جدًا من نوع SELV وPELV: فولتية 250 V DC، ومقاومة لا تقل عن 0.5 ميغا أوم. وتشترط مواصفات مشاريع كثيرة قيمًا أعلى للكابلات الجديدة. **تحذير:** افصل المرسلات والبطاقات والحواجز قبل الاختبار، فجهد الاختبار يتلفها. ولا تُجرِ الاختبار في منطقة خطرة إلا بإجراء معتمد وشهادة خلو من الغاز.

العطل الأرضي في تغذية 24 V العائمة. كثير من أنظمة التحكم تغذي الحلقات والدوائر المنفصلة بمصدر 24 V DC معزول عن الأرض، مع جهاز كشف عطل أرضي. عطل أرضي واحد لا يسبب مشكلة ظاهرة. أما العطل الثاني على القطب الآخر فقد يُنتج مسارًا يشغّل مرحّلًا أو يفصل وحدة دون أمر. والبحث عن العطل الأول بطريقة الإزالة: افصل الفروع واحدًا بعد آخر، بالتنسيق مع التشغيل، حتى يختفي الإنذار.

درجات الفحص في المناطق الخطرة. تصنف المواصفة IEC 60079-17 فحص الأجهزة المعتمدة للمناطق الخطرة ثلاث درجات، وتضيف إليها أسلوب الإشراف المستمر (R68):

الدرجة	ما تشمله	ما تكشفه
الفحص البصري (Visual)	النظر دون أدوات أو فتح	براغٍ مفقودة، وكابلات متضررة، وغطاء مكسور
الفحص القريب (Close)	الفحص البصري مع أدوات دون فتح الغلاف	براغٍ مرتخية، وجلبة كابل غير محكمة

الدرجة	ما تشمله	ما تكشفه
الفحص التفصيلي (Detailed)	فتح الغلاف واستعمال أدوات وأجهزة اختبار	أطراف مرتخية، وتأريض خاطئ، ورطوبة داخلية
الإشراف المستمر (Continuous Supervision)	حضور متكرر لفنيين مؤهلين يعرفون المنشأة	يتيح إطالة فترات الفحص الدوري

39.10 تسلسل التشخيص في أنظمة PLC وDCS

حين يكون العطل في نظام التحكم نفسه، أو يُشتبه فيه، اتبع التسلسل من العام إلى الخاص (الشكل 39-12). والسبب بسيط: عطل في مستوى أعلى يُظهر أعراضًا في كل ما تحته. فلا معنى للبحث في قناة واحدة والبطاقة كلها بلا تغذية.

الشكل 39-12: *تسلسل التشخيص في أنظمة PLC وDCS: التغذية، ثم المعالج، ثم الاتصالات، ثم البطاقة، ثم القناة، ثم التوصيل الميداني، ثم الجهاز، ثم المنطق والتهيئة.*

قبل لمس أي سلك طبّق العزل والقفل والوسم، وتذكّر أن بعض المخارج تُغذّى من مصادر خارجية تبقى حية بعد فصل المتحكم. **والقاعدة الذهبية قبل أي تعديل:** لا تعدّل برنامج متحكم يعمل في الإنتاج عشوائيًا. احفظ نسخة احتياطية من البرنامج قبل أي تعديل، وغيّر شيئًا واحدًا في كل مرة واختبره، وسجّل كل تغيير (R69).

المنهج الخماسي لأعطال PLC. يختصر المهندسون التسلسل السابق في خمس خطوات تُنفذ بالترتيب (R69 وR70):

الخطوة	ما تفعله	ما تبحث عنه	الأداة
1. التغذية	قس 24 V DC على أطراف المتحكم والبطاقات أثناء تشغيل الأحمال	فولتية ضمن حدود ورقة البيانات (تسمح IEC 61131-2 عادة بمدى 20.4 إلى 28.8 V لتغذية 24 V DC)، وثابتة عند تشغيل الأحمال	مقياس متعدد
2. المؤشرات الضوئية	اقرأ مؤشرات المعالج والبطاقات	التشغيل والخطأ والصيانة والفرض والبطارية والاتصال	العين، ودليل المصنّع
3. المداخل والمخارج	قس الإشارة على أطراف القناة وقارنها بحالتها في البرنامج	هل يرى المتحكم المدخل؟ هل يصل أمر المخرج إلى الجهاز؟	مقياس متعدد، وملقط mA، وحاسوب
4. سجل التشخيص	افتح مخزن التشخيص أو سجل الأعطال	رمز الخطأ ووقته ووصفه	أداة البرمجة
5. المنطق مباشرة	راقب الأسطر والقيم في الزمن الحقيقي	تلامس مفتوح، أو مؤقت لا يكتمل، أو قيمة مفروضة	أداة البرمجة

1. التغذية أولًا. كثير من الأعطال التي تبدو معقدة سببها تغذية ضعيفة: فولتية تهبط تحت الحمل، أو مصهر محترق، أو مصدر متقادم، أو موصل تغذية مرتخٍ أو متأكسد. قس الفولتية أثناء تشغيل الأحمال، لا في حالة السكون فقط. وافحص تغذية التيار المتناوب

الداخلة إلى المصدر وقاطعها. **وقاعدة تصميم تمنع أعطالًا كثيرة:** غذِّ الأجهزة الميدانية (الحساسات والملفات اللولبية) من مصدر 24 V منفصل عن مصدر المعالج. فالمصدر المشترك يجعل كل ملف ثقيل يُسقط الفولتية على المعالج فتظهر أعطال عشوائية.

2. المؤشرات الضوئية. هي أسرع أداة تشخيص، وتعطيك فئة العطل قبل أن تفتح أي برنامج. وتختلف ألوانها ومعانيها بين المصنّعين، فالمرجع دليل الطراز نفسه. لكن المعاني العامة متقاربة:

المؤشر	الحالة الطبيعية	ما تعنيه الحالة غير الطبيعية	الخطوة التالية
التشغيل (RUN)	أخضر ثابت	المعالج متوقف (STOP) أو في بدء التشغيل	اعرف سبب التوقف من سجل التشخيص
الخطأ (ERROR أو FAULT)	مطفأ	عطل عتاد (ثابت عادة) أو عطل برنامج أو تهيئة قابل للاسترداد (وامض عادة)	افتح سجل التشخيص فورًا
الصيانة (MAINT)	مطفأ	مطلوب إجراء صيانة	اقرأ مدخل الصيانة في السجل
الفرض (FORCE)	مطفأ	توجد قيم مفروضة نشطة	اعرف من فرضها ولماذا، وأزلها بعد الاختبار
البطارية (BAT)	مطفأ	بطارية ضعيفة أو مفقودة، وقد يضيع البرنامج عند انقطاع التغذية	بدّل البطارية والمتحكم موصول بالتغذية حتى لا تضيع الذاكرة
الاتصال (LINK)	أخضر	لا اتصال بالشبكة	الكابل، والعنوان، والمحوّل

3. المداخل والمخارج. هي أكثر فئات أعطال PLC تكرارًا: حساس يتعطل، أو كابل ينقطع، أو قناة تحترق.

النوع	العَرَض	السبب المرجح	الفحص
مدخل منفصل	نشط دائمًا مهما كان الحساس	قصر إلى 24 V أو حساس معطوب	افصل الحساس: إن زالت الحالة فالحساس هو العطل
مدخل منفصل	لا ينشط أبدًا	دائرة مفتوحة، أو توصيل خاطئ، أو قناة معطوبة	قس الفولتية على طرف المدخل
مدخل منفصل	يتقطع بلا سبب	طرف مرتخٍ، أو تداخل، أو نوع حساس خاطئ (NPN مكان PNP)	شد الأطراف وراجع نوع الحساس
مخرج منفصل	نشط في البرنامج والجهاز لا يعمل	مصهر المخرج أو القناة معطوبة	قس الفولتية على طرف المخرج
مخرج منفصل	نشط دائمًا مهما كان البرنامج	ترانزستور مخرج مقصور أو مرحّل ملتصق	افرض المخرج على 0: إن بقي الجهاز يعمل فالقناة معطوبة
مخرج منفصل	يعمل متقطعًا مع الأحمال الثقيلة	تيار الحمل يتجاوز قدرة القناة	قارن التيار بمواصفة البطاقة، وأضف مرحّلًا وسيطًا
مدخل تناظري	صفر أو أدنى قيمة دائمًا	انقطاع الحلقة (0 mA) أو مرسل معطوب	قس التيار بالملقط عند أطراف البطاقة
مدخل تناظري	أعلى قيمة دائمًا	قصر، أو مرسل مشبع أو في وضع عطل علوي	افصل المرسل وراقب القيمة
مدخل تناظري	قيمة مضطربة	كابل غير محجوب، أو ممدود بجوار كابلات القدرة	كابل مجدول محجوب، والحجب مؤرّض من طرف اللوحة فقط (32.8)
مدخل تناظري	وحدات هندسية خاطئة	تحجيم خاطئ في البرنامج أو في تهيئة البطاقة	راجع معاملات التحجيم (19.6)

قراءة مؤشر القناة وحالتها في البرنامج معًا. هذا الجدول يختصر أغلب أعطال الدوائر المنفصلة: قارن ما يراه مؤشر البطاقة بما يراه البرنامج، وبما يفعله الجهاز في الميدان.

مؤشر البطاقة	الحالة في البرنامج	الجهاز الميداني	موضع العطل المرجح
مدخل مطفأ	0	الحساس نشط فعلًا	الحساس أو أسلاكه أو تغذيته
مدخل مضاء	0	—	القناة، أو عنوان خاطئ في البرنامج، أو مدخل مفروض على 0
مدخل مضاء	1	—	المدخل سليم، والعطل في المنطق بعده
مخرج مطفأ	0	—	المنطق لم يطلب التشغيل: تتبع الشروط
مخرج مطفأ	1	—	البطاقة، أو تغذية المخارج، أو المصهر، أو مخرج مفروض
مخرج مضاء	1	الجهاز لا يعمل	الأسلاك، أو الملف، أو المرحّل الوسيط، أو الجهاز نفسه

4. سجل التشخيص. يحفظ المتحكم سجلًا زمنيًا لكل الأحداث والتحذيرات والأعطال، ويسمى مخزن التشخيص (Diagnostic Buffer) في بعض المنصات وسجل الأعطال (Fault Log) في غيرها. اقرأه من الأحدث إلى الأقدم. **والمدخل الذي يسبق حدث التوقف مباشرة هو السبب في الغالب.** وأشهر أسباب توقف المعالج المفاجئ:

- خطأ برنامج أثناء التنفيذ: قسمة على صفر، أو فهرس مصفوفة خارج حدودها، أو عنوان ذاكرة غير صالح.
- عدم تطابق التهيئة: بطاقة في المشروع لا تطابق البطاقة المركبة فعلًا.
- تجاوز زمن الدورة حد مؤقت المراقبة (Watchdog)، بسبب حلقة لا تنتهي أو برنامج ثقيل.
- هبوط فولتية التغذية دون الحد الأدنى.

ولا تمسح عطلًا رئيسًا قبل أن تفهم سببه وتزيله، وإلا عاد فورًا.

5. المنطق مباشرة. بعد التأكد من سلامة العتاد والمداخل والمخارج، اتصل بالمتحكم وراقب البرنامج في الزمن الحقيقي. **مراقبة الأسطر** تُظهر أي تلامس مغلق وأي ملف نشط. و**جدول المراقبة** يعرض قيم المؤقتات والعدادات والقيم التناظرية. و**الإسناد الترافقي (Cross Reference)** يكشف كل موضع يُستعمل فيه الوسم، فتعرف كل سطر قد يؤثر في البت المشبوه.

العَرَض في المنطق	السبب الشائع	كيف تجده
المخرج لا ينشط والمداخل صحيحة	تلامس بنوع خاطئ (NO مكان NC) أو إمساك ناقص	تتبع السطر من اليسار إلى اليمين حتى أول تلامس مفتوح
المخرج ينشط ثم ينطفئ فورًا	تعشيق يمنعه أو مؤقت قصير	ابحث عما يطفئ الملف بالإسناد الترافقي
المؤقت لا يكتمل	مدخله لا يبقى نشطًا طوال الزمن	راقب الزمن المنقضي للمؤقت
العداد لا يزيد	المدخل مستمر لا نبضي، أو إعادة ضبط دائمة	راقب مدخل العد، وأضف كشف الحافة الصاعدة
ملف يُكتب في موضعين	آخر سطر في الدورة يفرض قيمته	الإسناد الترافقي على الملف (19.4)
المعالج يتوقف أثناء التنفيذ	قسمة على صفر أو كتلة بيانات غير موجودة	سجل التشخيص، وأضف فحص الصفر قبل القسمة

أعطال الاتصالات. صارت أكثر تكرارًا مع كثرة ما يتصل بالمتحكم: شاشات، ومحركات، ومداخل بعيدة، وأنظمة SCADA. وتسلسل فحصها: الطبقة المادية أولًا (الكابل ومؤشرات الاتصال على الطرفين)، ثم العنوان (هل عنوان IP وقناع الشبكة واسم الجهاز تطابق التهيئة حرفًا بحرف؟)، ثم الاستجابة (هل يرد الجهاز على أمر (ping) من حاسوب على الشبكة نفسها؟)، ثم البروتوكول (رقم المنفذ، مثل 502 لبروتوكول Modbus TCP، ومهلة

الانتظار، وملف وصف الجهاز). وللأعطال المتقطعة يُستعمل محلل حزم الشبكة (مثل Wireshark) بإذن إدارة أمن الشبكة (الفصلان 23 و24).

أعطال DCS الشائعة. يتبع DCS التسلسل نفسه، مع ثلاث خصوصيات (R69):

- **التغذية والتكرار:** افحص ثبات الفولتية، وافحص أطراف التغذية بمقياس الحرارة بالأشعة تحت الحمراء، فالطرف المرتخي يسخن قبل أن ينقطع. وتأكد أن مصدر الطاقة غير المنقطعة (UPS) والمصدر الاحتياطي يعملان فعلًا، بإنذار حالة لا بالافتراض.
- **البطاقات والإشارات:** قس مسار 4–20 mA على أطراف التوزيع الوسيطة لتحدد هل العطل في DCS أم في الميدان. هذه نقطة التنصيف الطبيعية في الشكل 39-4.
- **البرمجيات والتهيئة:** راجع سجلات إنذارات النظام وأحداثه. وإن تلفت قاعدة البيانات، فالاستعادة تكون من آخر نسخة احتياطية مستقرة ومختبرة. لذلك تُعد إدارة النسخ الاحتياطية جزءًا من الصيانة الدورية (21.10).

جدول تشخيص: فئات أعطال DCS وطرق كشفها ومنعها (R69)

الفئة	أمثلة	العلامات
عتاد: المتحكم	تغذية، أو عطل اتصال، أو تلف داخلي	انتقال إلى الاحتياطي، أو توقف حلقات مجموعة كاملة
عتاد: البطاقات	قناة معطوبة أو بطاقة كاملة	فقد إشارات أو قيم «سيئة»
عتاد: الشبكة	كابل، أو محوّل، أو بطاقة اتصال	بطء، أو قيم متجمدة، أو محطات «غير متصلة»
برمجيات: المنطق	خطأ برمجي أو تعديل غير مصرح به	سلوك غير متوقع بعد تنزيل
برمجيات: التهيئة	عنوان قناة أو معامل خاطئ	خطأ ثابت منذ تعديل

الفئة	أمثلة	العلامات
برمجيات: قاعدة البيانات	تلف أو فقد بيانات	عرض خاطئ أو تعطل برنامج
عوامل خارجية	حرارة، أو رطوبة، أو تداخل، أو تذبذب تغذية	أعطال متقطعة مرتبطة بالظروف

جدول تشخيص: فئات أعطال DCS وطرق كشفها ومنعها (تابع): طريقة الكشف والإصلاح والوقاية

الفئة	طريقة الكشف	الإصلاح والوقاية
عتاد: المتحكم	مؤشرات المتحكم وشاشة تشخيص النظام	إصلاح التغذية والوصلات، ثم تبديل المتحكم وفق إجراء المصنّع
عتاد: البطاقات	القياس على أطراف التوزيع الوسيطة	فحص الأسلاك والأطراف، ثم تبديل البطاقة
عتاد: الشبكة	أدوات تشخيص الشبكة: الاتصال والتأخير وفقد الحزم	إصلاح المسار وتفعيل التكرار
برمجيات: المنطق	سجل التغييرات ومقارنة النسخ	تصحيح أو استعادة نسخة مختبرة، وضبط الصلاحيات
برمجيات: التهيئة	مقارنة التهيئة بالوثائق	تصحيح مع إدارة التغيير
برمجيات: قاعدة البيانات	سجلات النظام وأحداثه	الاستعادة من نسخة احتياطية دورية

الفئة	طريقة الكشف	الإصلاح والوقاية
عوامل خارجية	ربط التوقيت بالظروف (39.11)	تكييف الغرف، والحجب، ومصادر UPS ومنظمات الفولتية، وواقيات الصواعق والتموجات (Surge Protectors) على التغذية وخطوط الإشارة الخارجة

طريقة الاستبدال في DCS. حين يبقى موضع العطل غامضًا، يُبدّل المشتبه به (بطاقة أو متحكم) بقطعة سليمة معروفة، ويُراقب هل زال العطل. وهي طريقة فعالة، بثلاثة شروط: أن يدعم النظام التبديل أثناء التشغيل أو أن يكون الاستبدال في توقف مخطط، وأن يكون الاحتياطي في المتحكم المكرر سليمًا ومتزامنًا قبل سحب أي شيء، وأن تُحفظ القطعة المنزوعة ويُسجل رقمها لتحليل العطل لاحقًا. ولا يُستبدل متحكم حماية إلا وفق إجراء نظام السلامة الآلي.

الوقاية أرخص من التشخيص. فحص دوري للعتاد والبرمجيات وخطوط الاتصال، ونسخ احتياطية مجدولة للبرامج وقواعد البيانات تُختبر استعادتها، وبيئة مضبوطة الحرارة والرطوبة في غرف الأجهزة، وتدريب المشغلين على التعرف على الأعطال والاستجابة لها، وخطط طوارئ مكتوبة لفقد الشاشات أو الشبكة (21.12).

مراجعة سريعة: مشكلات PLC الشائعة وأسبابها (R70). يجمع الجدول التالي في قائمة تحقق ميدانية واحدة الفئات التي فُصّلت في الخطوات الخمس السابقة:

الفئة	أمثلة
التغذية	تذبذب، أو انقطاع كامل، أو أطراف مرتخية على وحدة التغذية
بطاقات الإدخال والإخراج	قنوات محترقة، أو أسلاك مرتخية على الأطراف، أو نوع بطاقة لا يناسب الإشارة
الأجهزة الميدانية	حساسات معطوبة، أو أسلاك مقطوعة، أو مشغلات عالقة، أو ملامسات محترقة

الفئة	أمثلة
منطق البرنامج	أخطاء في التسلسل، أو إعدادات مؤقتات وعدادات خاطئة، أو حالات لم تُعالج
الاتصالات	كابلات مرتخية، أو عناوين IP خاطئة، أو بروتوكولات غير متوافقة، أو محولات معطوبة، أو تداخل
المعالج	سخونة، أو تلف الذاكرة، أو عطل داخلي
البيئة	حرارة، أو غبار، أو رطوبة، أو اهتزاز، أو تداخل كهرومغناطيسي أو لاسلكي

الفرض والمحاكاة: أدوات لا تُنسى. الفرض (Force) يثبت قيمة مدخل أو مخرج بغض النظر عن الواقع، والمحاكاة تستبدل قيمة القناة بقيمة يدوية. والاثنان مفيدان في الاختبار، وخطيران إن بقيا بعده. ويعرض كل نظام علامة بوجود فرض أو محاكاة. فاجعل مراجعتها خطوة ثابتة في بداية كل تشخيص (هل هناك قيمة مقفلة؟) وفي نهايته (هل أزلت كل ما فرضته؟).

استكشاف أعطال العملية. حين لا يكون العطل في جهاز واحد بل في أداء وحدة كاملة (جودة منتج، أو تدفق منخفض، أو دفعة تطول)، يتسع السؤال ليشمل الميكانيك والكهرباء والكيمياء والإنسان. ويضيف R70 إلى المنهجية العامة أربع خطوات خاصة بالعملية: **حدد النطاق** (مكوّن واحد أم قسم أم المصنع كله)، و**افحص المنبع والمصب** (هل المشكلة نشأت هنا أم أنها عَرَض لمشكلة قبلها أو بعدها؟)، و**افحص الأساسيات** (تغذية الكهرباء، وهواء الأجهزة، ومستويات الموائع)، و**أكّد السبب بإعادة إنتاجه** (هل يعود العَرَض حين تحاكي السبب بأمان؟). وتبدأ الاختبارات دائمًا بما لا يتدخل في العملية: المراقبة على الشاشات، ثم أدوات القياس المحمولة، ثم الاطلاع على المنطق، وأخيرًا تعديلات صغيرة مضبوطة في نقاط الضبط أو الخرج إن كانت آمنة.

39.11 الأعطال المتقطعة: فن نصب الفخاخ

العطل الدائم سهل نسبيًا، لأنه ينتظرك حتى تقيسه. أما العطل المتقطع فيختفي حين تصل، ويعود حين تغادر. والقاعدة فيه: لا تحاول أن تراه بعينك، بل **انصب له فخًا** يسجله حين يحدث، ثم اربط توقيته بما يحدث حوله.

أدوات الفخ:

- **اتجاه سريع في المؤرخ أو النظام:** خفّض فترة التسجيل للوسم المشبوه (مثلًا من 10 ثوانٍ إلى 100 ms) لفترة محددة، ثم أعدها.
- **تسلسل الأحداث (SOE):** يسجل تغير الإشارات المنفصلة بدقة المللي ثانية، فيبين أي حدث سبق الآخر.
- **مسجل بيانات أو معاير موثّق (Documenting Calibrator):** يوصل في الميدان ويسجل التيار أو الفولتية لساعات.
- **راسم الإشارات بذاكرة (Storage Oscilloscope):** للنبضات السريعة والتداخل.
- **تشخيص الأجهزة الذكية:** سجل أحداث المرسل عبر HART أو الشبكات الحقلية، وسجل حالات NE107.
- **الفحص الحراري:** كاميرا حرارية أو مقياس حرارة بالأشعة تحت الحمراء على الأطراف والمصاهر؛ الطرف المرتخي يسخن.

الشكل 39-13: *لماذا يُخفض زمن التسجيل عند نصب فخ لعطل متقطع: هبوط لحظي مدته 300 ms في إشارة 4–20 mA لا يظهر في اتجاه مسجل كل 10 s، ويظهر كاملًا بعرضه وعمقه بالتسجيل كل 100 ms، ثم يُربط توقيته بسجل تسلسل الأحداث (SOE).*

جدول: نمط التوقيت ← المشتبه به

متى يظهر العطل؟	المشتبه به الأول	الفحص
بعد المطر أو الغسيل	ماء في صندوق توصيل أو جلبة كابل	الفحص التفصيلي لصناديق المسار ومقاومة العزل
ليلًا أو صباحًا باكرًا	تكاثف، أو حرارة منخفضة، أو تغيّر حمل الشبكة	ربط التوقيت بحرارة المحيط
في منتصف النهار صيفًا	سخونة خزانة أو جهاز في الشمس	حرارة الخزانة وشاشات تشخيص الحرارة
عند بدء محرك كبير أو محرك سرعة متغيرة	تداخل كهرومغناطيسي، أو هبوط فولتية، أو حلقة أرضية	تسجيل الإشارة لحظة البدء وفحص التأريض (32.8)

متى يظهر العطل؟	المشتبه به الأول	الفحص
عند استعمال جهاز لاسلكي قريبًا	تداخل ترددات لاسلكية	اختبار متعمد بجهاز لاسلكي على مسافة معروفة
مع اهتزاز معدة	طرف مرتخٍ، أو وصلة مكسورة جزئيًا، أو مرحّل	هز الكابل أثناء المراقبة (بالتنسيق مع التشغيل)
كل عدد ثابت من الساعات	مهمة مجدولة في النظام، أو نسخ احتياطي، أو تبديل دوري	سجل مهام النظام ومقارنة التوقيت بدقة
بعد عمل صيانة في مكان آخر	فصل مشترك، أو توصيل خاطئ، أو فرض منسي	سجل تصاريح العمل في الفترة نفسها

تنبيه: اختبار «الهز» (Wiggle Test) لأسلاك دائرة حماية قد يسبب فصلًا. لا يُجرى إلا بعد تفويض التجاوز أو في توقف مخطط.

39.12 التشخيص الذاتي للأجهزة الذكية: NAMUR NE107

الأجهزة الذكية تعرف عن نفسها أكثر مما تعرضه في 4–20 mA. وتوصية NAMUR NE107 توحّد طريقة عرض حالة الجهاز في أربع إشارات حالة، إضافة إلى الحالة الطبيعية، حتى يفهمها المشغل والفني بالطريقة نفسها مهما كان المصنّع (R67):

إشارة الحالة	اللون المعتاد	صلاحية القياس	أمثلة	من يتصرف
طبيعي (OK)	أخضر	صالح	—	—
صيانة مطلوبة (Maintenance Required)	أزرق	صالح بعد، لكن الاحتياطي يتناقص	انجراف قريب من الحد، أو استهلاك عمر الحساس	الصيانة، دون إنذار للمشغل

إشارة الحالة	اللون المعتاد	صلاحية القياس	أمثلة	من يتصرف
خارج المواصفة (Out of Specification)	أصفر	مشكوك فيه	حرارة الجهاز أو العملية خارج حدود التصميم	الصيانة والتشغيل
فحص وظيفي (Function Check)	برتقالي	غير صالح مؤقتًا	الجهاز في المحاكاة أو في تيار ثابت أو تحت المعايرة	من يعمل على الجهاز، ويُعلم التشغيل
عطل (Failure)	أحمر	غير صالح	عطل الحساس أو الإلكترونيات أو التهيئة أو الاتصال	التشغيل فورًا والصيانة

القيمة العملية: توجيه الإشارات إلى من يحتاجها. «صيانة مطلوبة» تذهب إلى أداة إدارة الأصول لتُخطط، ولا تُغرق شاشة المشغل بإنذارات لا يفعل بها شيئًا (ISA-18.2). وحالة «فحص وظيفي» المنسية تكشف فورًا المرسل المتروك في تيار ثابت أو في المحاكاة. واقرأ الحالات مع القسم 40.1 الذي يصنف أنماط عطل القراءة نفسها.

39.13 حقيبة الأدوات: ماذا تحمل ومتى تستعمله

جدول مقارنة: أدوات استكشاف الأعطال

الأداة	ماذا تقيس أو تفعل	متى تستعملها	تنبيه
مقياس متعدد رقمي بقيمة فعالة حقيقية (True RMS)	فولتية وتيار ومقاومة واستمرارية	أول أداة في كل عطل	فئة أمان مناسبة، ولا تقِس التيار على مصدر فولتية
مقياس تيار بالملقط لمدى mA	تيار الحلقة دون فتحها	حلقات الحماية والحلقات الحية	صفّر الملقط قبل القياس

الأداة	ماذا تقيس أو تفعل	متى تستعملها	تنبيه
معاير عمليات (Process Calibrator)	قياس وتوليد ومحاكاة mA وV و mV وأوم	حقن الإشارة، والتحقق من البطاقات والمرسلات	اختر الوضع الصحيح (39.6)
جهاز اتصال HART أو مودم HART وحاسوب	قراءة PV والتهيئة والتشخيص وأوامر الاختبار	المرسلات الذكية	يلزم نحو 250 أوم في الحلقة (230 أوم على الأقل)، ونسخة معتمدة للمنطقة الخطرة
وحدة ضغط ومضخة يدوية أو مختبر الأثقال (Dead Weight Tester)	توليد ضغط مرجعي	معايرة مرسلات ومفاتيح الضغط	عزل وتنفيس قبل الفك
معاير حرارة جاف (Dry Block)	حرارة مرجعية للحساسات	التحقق من المزدوجات وRTD	زمن الاستقرار، وعمق الإدخال
جهاز قياس العزل	مقاومة العزل بجهد 250 إلى 1000 V	الكابلات والمحركات بعد الرطوبة	افصل الإلكترونيات، ولا يُستعمل على دوائر Ex i
مختبر كابلات الشبكة ومحلل الشبكات الحقلية وPROFIBUS	الاستمرارية وجودة الإشارة والأخطاء	أعطال الاتصال (الفصل 23)	لا توصل محللًا بشبكة تحكم دون إذن
راسم إشارات بذاكرة	الشكل الموجي والنبضات والتداخل	الأعطال المتقطعة والضوضاء	عزل المدخل عن الأرض
مقياس حرارة بالأشعة تحت الحمراء أو كاميرا حرارية	حرارة السطوح والأطراف	أطراف مرتخية، ومحامل، وخزانات ساخنة	الانبعاثية تغير القراءة

الأداة	ماذا تقيس أو تفعل	متى تستعملها	تنبيه
هاتف ذكي أو جهاز لوحي	صور، ووثائق، وحاسبات مدى وتحويل، ومصباح	التوثيق والرجوع إلى الأدلة	ممنوع في المناطق الخطرة ما لم يكن معتمدًا لها

كيف أختار؟ المقياس المتعدد والملقط أول ما يخرج من الحقيبة في كل عطل، ثم المعاير وجهاز HART حين يتعلق الأمر بمرسل أو بطاقة، ولا يُحمل جهاز العزل أو محلل الشبكة إلا لعطل يشير إليه القياس الأول. والجدول لا يبين حالة الأداة نفسها: معايرتها وشهادتها وبطاريتها واعتمادها للمنطقة الخطرة، وهي ما يجعل القراءة صالحة أصلًا (الفصل 14). وأكثر الأخطاء كلفة أداة في وضع خاطئ أو غير معايرة تقود إلى تبديل جهاز سليم، أو جهاز عزل يُوصل بدائرة Ex i أو بمرسل لم يُفصل فيتلفه.

وقبل الذهاب إلى الميدان: تأكد من معايرة أدوات الاختبار وصلاحية شهاداتها. فالقياس بأداة غير معايرة قد يقودك إلى تبديل جهاز سليم (الفصل 14).

39.14 تحليل السبب الجذري: من العَرَض إلى السبب الذي يمكن منعه

الإصلاح يعيد الوحدة إلى العمل. أما تحليل السبب الجذري – (Root Cause Analysis RCA) فيمنع العطل من العودة. وأساسه التمييز بين ثلاثة مستويات:

المستوى	السؤال	مثال
العَرَض (Symptom)	ماذا رأينا؟	فصل الضاغط على ضغط شفط منخفض جدًا
السبب المباشر (Direct Cause)	ما الذي أنتج العَرَض فورًا؟	انقطاع لحظي في حلقة المرسل
السبب الجذري (Root Cause)	لماذا وُجد السبب المباشر، وما الذي لو تغيّر لما حدث؟	إجراء تركيب لا يتحقق من مداخل الكابلات

ويختصر R68 التفكير في كل عطل بثلاثة أسئلة: ما الأرجح أنه تعطل؟ وما السبب الأرجح لتعطله؟ وكيف يُصحح العطل وسببه معًا؟ ويضيف أن الفحوص تكون من البسيط إلى المعقد، مع مراعاة درجة العطل، وأسبابه، ومساره الزمني، واحتمال اجتماع أكثر من عطل.

متى يستحق العطل تحليلًا رسميًا؟ ليس كل مصهر محترق يحتاج تقريرًا. والمعايير الشائعة في الشركات:

- كل فصل (Trip) غير مخطط لوحدة أو معدة رئيسة.
- كل حدث سلامة أو بيئة، أو فشل وظيفة سلامة عند الطلب.
- عطل يتكرر على الجهاز نفسه أو على أجهزة من النوع نفسه (مثلًا ثلاث مرات في سنة).
- عطل تتجاوز كلفته حدًا تحدده الشركة.
- «عطل لم يوجد» (No Fault Found) تكرر أكثر من مرة.

جدول مقارنة: أدوات تحليل السبب الجذري

الأداة	الفكرة	تناسب	حدودها
طريقة «لماذا» الخمس	سؤال «لماذا» متتابع حتى سبب يمكن التحكم فيه	أعطال بسلسلة سببية واضحة	خط واحد، وتعتمد على معرفة الفريق (39.15)
مخطط عظم السمكة (Ishikawa)	تصنيف الأسباب المحتملة في فئات قبل اختيار أحدها	أعطال بأسباب محتملة كثيرة	لا يثبت السبب، بل يولّد الفرضيات
الخط الزمني وتسلسل الأحداث	ترتيب كل ما حدث بدقة زمنية	الفصل والحوادث	يحتاج بيانات دقيقة التوقيت
شجرة العطل (Fault Tree Analysis)	تفكيك الحدث إلى أسباب منطقية بالبوابات «و» و«أو»	أحداث معقدة أو متعددة الأسباب	تتطلب وقتًا وخبرة (الفصل 29)
تحليل التغيير (Change Analysis)	مقارنة الحالة السليمة بالحالة المعطوبة: ما الذي اختلف؟	أعطال بدأت بعد تعديل	لا يكفي إن لم يتغير شيء ظاهر

الأداة	الفكرة	تناسب	حدودها
تحليل الحاجز (Barrier Analysis)	أي طبقة حماية كان يجب أن تمنع الحدث ولماذا لم تمنعه؟	أحداث السلامة	يحتاج فهم طبقات الحماية (LOPA)

كيف أختار؟ لعطل واحد بسلسلة سببية واضحة تكفي «لماذا» الخمس، ولعطل بأسباب محتملة كثيرة ابدأ بعظم السمكة لتوليد الفرضيات ثم اختبرها، ولحادث فصل أو سلامة ابدأ بالخط الزمني من سجل SOE ثم شجرة العطل أو تحليل الحاجز إن تعددت الأسباب. والجدول يعرض الأدوات لا الدليل: أيًّا كانت الأداة فكل حلقة فيها تحتاج قياسًا أو سجلًا يثبتها، وإلا بقيت فرضية. وأكثر الأخطاء كلفة اختيار أداة أكبر من العطل فيُغرق الفريق في تحليل لا يُنجز، أو أداة أصغر منه فتنتهي «لماذا» الخمس عند قطعة أو شخص ويعود العطل.

وتعرض المواصفة IEC 62740 مبادئ تحليل السبب الجذري وطرقه، وتصف IEC 61025 أسلوب شجرة العطل.

مخطط عظم السمكة. يُرسم الحدث في رأس السمكة، وتتفرع منه الفئات. ويُطرح في كل فئة سؤال: ما الذي في هذه الفئة كان يمكن أن يسبب الحدث؟ وفائدته أنه يمنع الفريق من القفز إلى أول سبب يخطر له، وهو غالبًا الجهاز. ونقترح لأعمال الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم ست فئات: الأسلوب والإجراء، والجهاز، والقياس والإشارة، والبيئة، والإنسان، والنظام والمنطق (الشكل 39-14). ثم تُختبر كل فرضية بدليل، ويُشطب ما لا دليل عليه.

الشكل 39-14: *مخطط عظم السمكة لفصل كاذب للضاغط K-201 على المرسل PZT-104. ست فئات تجمع الفرضيات قبل اختبارها، من المأخذ وأطراف صندوق التوصيل إلى تصويت 1oo1 وتهيئة إشارة العطل.*

«الخطأ البشري» ليس سببًا جذريًا. حين يصل التحليل إلى «أخطأ الفني»، اسأل مرة أخرى: لماذا كان الخطأ ممكنًا؟ هل الإجراء واضح؟ هل التدريب كافٍ؟ هل التصميم يسمح بالخطأ بسهولة؟ فالسبب الجذري المفيد يكون في منظومة يمكن تعديلها: إجراء، أو تصميم، أو تدريب، أو فحص. والتحليل الذي ينتهي بلوم شخص لا يمنع التكرار، ويعلّم الناس إخفاء الأخطاء.

39.15 طريقة «لماذا» الخمس

طريقة «لماذا» الخمس (5 Whys) أبسط أدوات تحليل السبب الجذري وأكثرها استعمالًا. نشأت على يد ساكيتشي تويودا، مؤسس مجموعة تويوتا الصناعية، ونشرها تايتشي أونو ضمن نظام إنتاج تويوتا. فكرتها: اسأل «لماذا حدث هذا؟»، ثم اجعل الجواب موضوع السؤال التالي، وكرر حتى تصل إلى سبب إن عالجته لم يتكرر العطل. والرقم خمسة

تقريبي: قد يكفي ثلاثة، وقد تحتاج سبعة. المعيار أن تصل إلى سبب **يمكن التحكم فيه ومنعه**، لا أن تعدّ الأسئلة (R69).

الخطوات الخمس لتنفيذ التحليل:

1. **كوّن الفريق:** من شهد الحدث، ومن يعرف الجهاز، ومن يعرف العملية، ومن يعرف المنظومة (التشغيل، والأجهزة، والكهرباء، والميكانيك عند الحاجة). التحليل الفردي يتوقف عند حدود معرفة صاحبه.
2. **عرّف المشكلة بدقة:** بالصيغة نفسها التي صغنا بها العَرَض في 39.4 (ماذا، وأين، ومتى، وكم)، وبلا تفسير مسبق. «فصل الضاغط ثلاث مرات في شهر على PZT-104 والضغط الفعلي طبيعي» أفضل من «المرسل معطوب».
3. **اسأل «لماذا» بالتتابع، وادعم كل جواب بدليل:** قياس، أو سجل، أو صورة، أو اختبار. الجواب بلا دليل فرضية، لا حلقة في السلسلة.
4. **حدد الإجراءات المضادة:** إجراء للسبب المباشر (إصلاح اليوم)، وإجراء للسبب الجذري (منع الغد)، ولكل منهما مسؤول وموعد.
5. **تابع وتحقق:** هل نُفذت الإجراءات؟ وهل توقف العطل فعلًا بعد فترة كافية؟ فإن عاد، فالسلسلة ناقصة.

الشكل 39-15: *تحليل «لماذا» الخمس لفصل الضاغط K-201. من انخفاض لحظي في إشارة PZT-104، إلى انقطاع عند صندوق التوصيل، إلى طرف متآكل، إلى ماء يدخل من مدخل كابل علوي، وأخيرًا إلى إجراء تركيب لا يتحقق من المداخل. كل جواب مدعوم بدليل.*

مثال محلول (سلسلة «لماذا» الخمس لفصل كاذب):

- **المعطيات:** الضاغط K-201 فصل ثلاث مرات في شهر على «ضغط شفط منخفض جدًا» من المرسل PZT-104. في كل مرة كان المشغلون يعيدون تشغيله فورًا، والضغط على المقياس المحلي والمرسل المجاور طبيعي. وظيفة الحماية بمرسل واحد (1oo1)، وتهيئتها تجعل إشارة العطل (دون 3.6 mA) فصلًا.
- **الافتراضات:** البيانات في المؤرخ بدقة 100 ms، وسجل SOE متاح. والتهيئة «العطل يساوي فصلًا» قرار مصمم في دراسة SIL، فلا تُغيَّر دون المسار نفسه.
- **الحل:**

1. **لماذا فصل الضاغط؟** لأن إشارة PZT-104 هبطت إلى 3.2 mA

مدة أقل من ثانية. *الدليل:* اتجاه المؤرخ وسجل SOE، ولم يتغير الضغط في المرسل المجاور.

2. **لماذا هبطت الإشارة؟** لانقطاع لحظي في الحلقة عند صندوق التوصيل JB-12. *الدليل:* تنصيف الحلقة، ثم هز الكابل عند JB-12 بعد تفويض التجاوز كرر الانقطاع.
3. **لماذا ينقطع؟** لأن طرف السلك متآكل تحت برغي مرتخٍ. *الدليل:* فحص تفصيلي وقياس مقاومة التلامس.
4. **لماذا تآكل؟** لأن الماء يدخل الصندوق من مدخل كابل علوي بجلبة غير مناسبة لاتجاهه. *الدليل:* آثار ماء داخل الصندوق بعد المطر، وحالات الفصل الثلاث وقعت في أيام ممطرة.
5. **لماذا الجلبة غير مناسبة؟** لأن إجراء التركيب وقائمة الفحص عند الاستلام لا يتضمنان التحقق من اتجاه مداخل الكابلات وتصنيف جلباتها. *هنا السبب الجذري:* ثغرة في الإجراء، لا في القطعة.

- **المعنى ميدانيًا:** لو توقف الفريق عند السؤال الثاني لبدّل المرسل، وعند الثالث لبدّل الطرف. وكان العطل سيعود في الشتاء التالي، في هذا الصندوق وفي كل صندوق مماثل. الإجراءات: إصلاح الطرف والجلبة (مباشر)، وفحص تفصيلي لكل صناديق التوصيل ذات المداخل العلوية في الوحدة (احتواء)، وإضافة البند إلى إجراء التركيب وقائمة الاستلام (جذري). ويُحال سؤال «هل يبقى 1oo1 مع العطل يساوي فصلًا مناسبًا لهذه الخدمة؟» إلى مراجعة دراسة SIL، لا إلى قرار في الميدان.

نموذج ورقة «لماذا» الخمس:

البند	المحتوى
المشكلة (ماذا، وأين، ومتى، وكم)	

البند	المحتوى
الفريق	
لماذا 1 ← الجواب ← الدليل	
لماذا 2 ← الجواب ← الدليل	
لماذا 3 ← الجواب ← الدليل	
لماذا 4 ← الجواب ← الدليل	
لماذا 5 ← الجواب ← الدليل	
السبب الجذري (منظومة يمكن تعديلها)	
الإجراء المباشر، والمسؤول، والموعد	
الإجراء الجذري، والمسؤول، والموعد	
التحقق من الفعالية (التاريخ والنتيجة)	

أخطاء شائعة في «لماذا» الخمس وعلاجها:

الخطأ	لماذا يضر	العلاج
التوقف عند العَرَض أو السبب المباشر	العطل يعود	اسأل: لو عالجت هذا فقط، هل يمنع التكرار؟
جواب بلا دليل	السلسلة تُبنى على ظن	لكل جواب قياس أو سجل أو اختبار
سلسلة واحدة لعطل له أكثر من سبب	يُهمل سبب مساهم	تفرّع عند كل «و»، أو ابدأ بعظم السمكة
الانتهاء بلوم شخص	لا تغيير في المنظومة، ويُخفى الخطأ لاحقًا	اسأل: لماذا كان الخطأ ممكنًا؟

الخطأ	لماذا يضر	العلاج
الانتهاء بسبب خارج السيطرة («المطر»)	لا إجراء ممكن	اسأل: لماذا أثّر فينا ما لا نتحكم فيه؟
فريق من تخصص واحد	الجواب محدود بمعرفته	فريق من التشغيل والأجهزة والصيانة

متى لا تكفي «لماذا» الخمس؟ في الحوادث الكبيرة، وأحداث السلامة، والأعطال ذات الأسباب المتشابكة. هنا تُستعمل طرق أشمل مثل شجرة العطل وتحليل الحاجز، وقد يلزم فريق تحقيق مستقل. وتبقى «لماذا» الخمس أداة لكل يوم، لا بديلًا عن التحقيق.

39.16 التوثيق والإغلاق

لماذا نسجل؟ السجل الجيد يكشف ما لا يراه الفني في عطل واحد (R68):

- **التعديلات الفنية تُسجل:** مضخة بسعة مختلفة، أو مرسل بمدى جديد، قد تغير سلوك الوحدة كلها.
- **الإصلاحات المؤقتة تُوسم مؤقتة،** حتى لا تصبح دائمة بالنسيان، ويُجدول الإصلاح الدائم.
- **الإصلاحات المتكررة على المعدة نفسها تظهر.** فإن تكرر العطل كثيرًا، فقد تكون المعدة غير مناسبة لمهمتها.
- **السجلات تفيد في تقدير القوى العاملة وقطع الغيار** وفي ضبط استهلاك المواد.

نموذج سجل عطل:

الحقل	مثال
الوسم والجهاز	PZT-104، مرسل ضغط شفط، وظيفة حماية للضاغط K-201
التاريخ والوقت وبلاغ من	2026-03-14 02:40، مشغل غرفة التحكم

الحقل	مثال
العَرَض كما صيغ	فصل على ضغط شفط منخفض جدًا، والضغط الفعلي طبيعي
الفحوص والقراءات	اتجاه 100 mA :3.2 ms لمدة 0.7 s؛ الحلقة سليمة عند الحاجز؛ انقطاع عند JB-12
السبب المباشر	طرف متآكل مرتخٍ
السبب الجذري	إجراء التركيب لا يتحقق من مداخل الكابلات (تحليل «لماذا» الخمس مرفق)
الإجراء المنفذ	تنظيف الصندوق وتجفيفه، وتبديل الطرف، وجلبة مناسبة، وسدادة
قطع الغيار	طرف واحد، وجلبة واحدة
مؤقت أم دائم	دائم
التجاوزات والفرض	تجاوز PZT-104 من 09:10 إلى 11:45، أُزيل وتُحقق منه
التحقق	اختبار الحلقة 4 و12 و20 mA، واختبار الفصل بالمحاكاة، وموافقة المشغل
إجراءات المتابعة	فحص 14 صندوقًا مماثلًا؛ تعديل الإجراء عبر MOC؛ تحديث مخطط الحلقة

قائمة الإغلاق (لا يُغلق العمل قبلها):

1. كل قيمة مفروضة أو محاكاة أُزيلت، وكل تجاوز أُغلق في سجله.
2. المرسلات خرجت من وضع التيار الثابت، والحلقات عادت إلى الوضع الآلي بموافقة المشغل.
3. الأغطية والجلبات والسدادات أُعيدت، وسلامة الأغلفة المعتمدة للمنطقة الخطرة محفوظة.
4. القياس والتحكم والإنذارات والتعشيقات جُربت في ظروف التشغيل الحقيقية.

5. السجل كُتب، وقطع الغيار سُجلت، وتعديلات المخططات أُرسلت لتحديث نسخة «كما نُفذ».
6. إجراءات المتابعة أُسندت إلى أصحابها بمواعيد.

39.17 مشروع الكتاب المتصل: ثلاثة أعطال في وحدة ضغط الغاز

نطبق المنهجية على ثلاثة أعطال في وحدة ضغط الغاز التي تتابعها فصول الكتاب. كل مثال قصير، ويركز على القرار الذي حسم التشخيص. (حالات مركبة تعليمية.)

(أ) LT-101 يقرأ قيمة ثابتة بعد المعايرة

- **المعطيات:** مرسل مستوى بالضغط التفاضلي على وعاء الشفط V-101، بساق رطبة. مداه من −250 إلى +150 mbar، ويقابله 0 إلى 100%. بعد معايرة وقائية صباحًا صارت القراءة ثابتة عند 62.5%، والزجاجة المحلية تُظهر نحو 40% يتغير.
- **الافتراضات:** المعايرة نُفذت على المانيفولد الثلاثي في موقعه.
- **الحل:**
  - النسبة التي تقابل فرق ضغط صفريًا: (0 − LRV) ÷ (URV − LRV).
  - بالتعويض: (0 − (−250)) ÷ (150 − (−250)) = 250 ÷ 400 = 62.5%.
  - القراءة الثابتة تساوي تمامًا «فرق ضغط صفري»، أي أن طرفي المرسل يريان الضغط نفسه، والسبب المرجح صمام المعادلة في المانيفولد، وقد تُرك مفتوحًا بعد المعايرة.
  - الفحص: وضع صمامات المانيفولد. الإجراء: إغلاق المعادلة، ثم فتح صمامي العزل بالترتيب الصحيح.

- **المعنى ميدانيًا:** حساب واحد على الورق حسم التشخيص قبل صعود السلم. والدرس للمتابعة: إضافة «وضع المانيفولد» إلى قائمة إعادة الجهاز للخدمة، والتحقق بمقارنة القراءة بالزجاجة بعد كل معايرة.

الشكل 39-16: *تشخيص LT-101 على الورق: المدى من 250− إلى +150 mbar يقابل 0 إلى 100%، فالقراءة الثابتة 62.5% تساوي بالضبط فرق ضغط صفريًا، أي أن صمام المعادلة في المانيفولد الثلاثي (3-Valve Manifold) تُرك مفتوحًا بعد المعايرة.*

(ب) FV-102 لا يتجاوز 60%

- **المعطيات:** صمام التحكم بتدفق التدوير FV-102 يستجيب بين 0 و60%، ثم يقف مهما زاد الأمر. بدأ ذلك بعد أسبوع من برنامج لتوفير الهواء خفّض ضغط هواء الأجهزة في المصنع. مدى نوابض المشغل 0.8 إلى 2.4 bar.
- **الافتراضات:** الموضع ومشغله سليمان ميكانيكيًا، ولا تسرب ظاهر.
- **الحل:** اختبار الخطوات في اليدوي يُظهر أن الموضع يطلب مزيدًا من الهواء عند 60% والصمام لا يتحرك. ومقياس تغذية الموضع يقرأ 2.5 bar فقط، وورقة المواصفات تطلب 4 bar. فالتغذية بالكاد تساوي أعلى مدى النابض، ولا تترك هامش قوة يغلب فرق الضغط والاحتكاك عند الفتحات الكبيرة.

- **المعنى ميدانيًا:** العطل في التغذية لا في الصمام. أعيد ضبط المنظم المحلي إلى 4 bar، وأضيف بند إلى إدارة التغيير في برنامج توفير الهواء: مراجعة قائمة المشغلات التي تحتاج ضغطًا أعلى قبل خفض ضغط الشبكة (R67).

(ج) PT-102 مستقر أكثر من اللازم

- **المعطيات:** الحلقة PIC-102 تعمل في الوضع الآلي، لكن قيمة PT-102 ثابتة عند 50.0% منذ الأمس، والخرج يزداد ببطء. سجل العمل يذكر اختبار حلقة بالأمس.
- **الافتراضات:** لا إنذار عطل للجهاز على الشاشة.
- **الحل:** تيار الحلقة بالملقط 12.00 mA بالضبط. وجهاز HART يعرض الجهاز في وضع «تيار ثابت»، وحالة NE107 «فحص وظيفي» ظاهرة في أداة إدارة الأصول لا على شاشة المشغل. الإجراء: التنسيق مع المشغل لتحويل الحلقة إلى اليدوي، ثم إخراج المرسل من وضع التيار الثابت، والتحقق من مطابقة القراءة للمقياس المحلي، ثم العودة إلى الآلي.
- **المعنى ميدانيًا:** قيمة «ثابتة أكثر من اللازم» عَرَض بحد ذاته (40.1). والإجراء الوقائي: توجيه حالة «فحص وظيفي» إلى شاشة المشغل للحلقات الحرجة، وإضافة بند الخروج من التيار الثابت إلى قائمة الإغلاق (39.16).

39.18 حالة ميدانية: مفتاح الضغط الذي بُدّل مرتين

مثال تعليمي مركّب.

- **العَرَض:** مضخة زيت تزييت احتياطية تبدأ وحدها عدة مرات في الأسبوع. منطق البدء يعتمد على مفتاح ضغط منخفض على خط الزيت، ونقطة ضبطه 1.5 bar. والضغط الطبيعي 2.5 bar.
- **الفرضيات:** المفتاح معطوب، أو ضغط الزيت ينخفض فعلًا، أو المنطق يخطئ.

- **الفحوص:** قبل وصول الفريق المنهجي بُدّل المفتاح مرتين («البندقية»)، ولم يتغير شيء. ثم بدأ الفريق من المرحلة 1: سجل SOE يبين أن المفتاح يفتح مدة أقل من 200 ms في كل مرة. ومقياس الضغط المحلي يتذبذب بسرعة حول 2.5 bar. ومرسل ضغط محمول بتسجيل سريع رُكّب مؤقتًا على مأخذ المفتاح نفسه، فسجّل نبضات حادة تهبط لحظيًا إلى نحو 1.3 bar عند كل بدء أو توقف لصمام تحكم قريب.
- **الدليل الحاسم:** هبوط الضغط حقيقي لكنه لحظي، ويحدث عند المأخذ فقط. فالمأخذ على نقطة قريبة من صمام يسبب اضطراب الضغط، والمفتاح بلا مخمد، والمنطق بلا تأخير زمني.
- **السبب الجذري:** قرار تصميم: موقع المأخذ، وغياب المخمد والتأخير، ولم يراجعه أحد لأن «المفتاح هو المعطوب» كان الجواب الجاهز. وسبب مساهم: غياب سجل يربط البدء الذاتي للمضخة بالأحداث الأخرى.
- **الإجراء والدرس:** مخمد نبض على المأخذ، وتأخير زمني قصير في منطق البدء. قيمة التأخير راجعتها إدارة التغيير مع الميكانيك للتأكد من أن المحامل تتحمل انقطاعًا بهذا الطول. ونُقل المأخذ في توقف لاحق. والدرس: القطعة التي تُبدّل مرتين دون أن يتغير العَرَض ليست العطل. قس قبل أن تبدّل.

الشكل 39-17: *الحالة الميدانية لمفتاح الضغط الذي بُدّل مرتين: ضغط الزيت الطبيعي 2.5 bar يهبط لحظيًا إلى نحو 1.3 bar لأقل من 200 ms عند كل حركة لصمام تحكم قريب، فيعبر نقطة ضبط المفتاح 1.5 bar ويبدأ المضخة الاحتياطية؛ ومخمد النبض والتأخير الزمني في المنطق يمنعان ذلك.*

دور المهندس ودور الفني:

المرحلة	دور المهندس	دور الفني
قبل الفحص	يفوّض التجاوز والفرض، ويحدد مدته والإجراءات التعويضية	يطلب تصريح العمل، ويبلغ المشغل بكل خطوة، ويطبق العزل والقفل والوسم
تحديد الموضع	يراجع ميزانية الفولتية وتهيئة الأجهزة ومنطق التحكم، ويقرر هل العطل صيانة أم تصميم	يصوغ العَرَض، ويقيس التيار والفولتية بالتنصيف، ويقرأ HART وسجل التشخيص

المرحلة	دور المهندس	دور الفني
الإصلاح والتحقق	يعتمد التعديلات عبر إدارة التغيير (MOC)، ويوافق على إعادة الحلقة إلى الخدمة	يصلح أو يبدّل، ويختبر الحلقة في ظروف التشغيل، ويزيل كل فرض وتجاوز ووضع تيار ثابت
بعد الإغلاق	يقود تحليل السبب الجذري، ويحوّل نتائجه إلى تعديل في الإجراء أو التصميم	يكتب سجل العطل بالقراءات والأدلة، ويحفظ القطعة المنزوعة للتحليل

39.19 الأخطاء الشائعة

- تبديل القطع قبل القياس، وفقد الأدلة مع القطعة المنزوعة.
- افتراض أن الجهاز معطوب قبل التأكد من أن العملية لم تتغير فعلًا.
- فتح حلقة مرسل حماية لقياس التيار دون تفويض، فتفصل الوحدة.
- البدء بالبرنامج في PLC قبل فحص التغذية والمؤشرات.
- استعمال المعاير في وضع «مصدر» على بطاقة فعالة، أو في وضع «تغذية 24 V» والحلقة موصولة.
- نسيان فرض، أو محاكاة، أو تجاوز، أو تيار ثابت بعد انتهاء العمل.
- إضافة مؤشر أو حاجز إلى حلقة دون حساب ميزانية الفولتية.
- اختبار العزل والمرسلات والبطاقات موصولة.
- مسح عطل رئيس في المتحكم قبل فهم سببه.
- إغلاق تحليل «لماذا» الخمس عند «خطأ بشري» أو عند قطعة، بدل منظومة يمكن تعديلها.
- إغلاق العمل دون موافقة المشغل ودون تحديث المخططات.

39.20 ملخص

استكشاف الأعطال منهجية تبدأ بالسلامة وتمر بخمس مراحل: التحقق من العطل، وتحديد موضعه، وإصلاحه، والتحقق من الإصلاح، والمتابعة لمنع التكرار. ويُصاغ العَرَض بدقة: ماذا، وأين، ومتى، وكم، وما الذي تغيّر. ويُحدد موضع العطل بطريقة مناسبة، أهمها التنصيف، لأن كل قياس فيه يستبعد نصف الاحتمالات. وفي حلقة 4–20 mA يحسم الموقف التيار وميزانية الفولتية ومقارنة قيم HART، مع معرفة مستويات NE43 وأوضاع المعاير. وفي PLC وDCS يكون الترتيب من العام إلى الخاص: التغذية، ثم المؤشرات، ثم المداخل والمخارج، ثم سجل التشخيص، ثم المنطق. وفي الصمامات يُنصَّف المسار بين الأمر وخرج الموضع وضغط المشغل والشوط الفعلي، وتكشف بصمة الصمام الاحتكاك ومدى النابض وحمل المقعد دون فك. والأعطال المتقطعة تحتاج فخاخًا لا انتظارًا. أما تحليل السبب الجذري فيفرق بين العَرَض والسبب المباشر والسبب الجذري. وأداته اليومية طريقة «لماذا» الخمس، بشرط أن يُدعم كل جواب بدليل، وأن تنتهي السلسلة عند منظومة يمكن تعديلها لا عند شخص. ولا يُغلق العمل قبل إزالة كل فرض وتجاوز، وتوثيق ما حدث.

وفي الفصل التالي: يتناول الفصل 40 «هندسة التشغيل للحلقات: أعطال الحساسات، وتمييز عطل الجهاز من اضطراب العملية، والمنطق القابل للاختبار، وقياس التحسين»، لأن الخطوة التالية بعد إصلاح العطل أن نصمم سلوك الحلقة عند وقوعه: كيف تكشفه وتتصرف وتعود دون قفزة.

39.21 أسئلة التقييم الذاتي

1. عدّد مراحل الإطار المنهجي لاستكشاف الأعطال، واذكر ما يُفحص في مرحلة «التحقق من الإصلاح».
2. أعد صياغة العَرَض «مرسل التدفق FT-205 خربان» بالعناصر الخمسة لصياغة العَرَض.

3. مسار إشارة فيه 32 نقطة قياس. كم قياسًا يلزم في أسوأ حالة بالتنصيف؟ ولماذا لا يُختار المنتصف العددي دائمًا؟
4. حلقة تغذيتها 24 V، ومرسلها يحتاج 12 V على الأقل. ما أقصى مقاومة مسموحة للحلقة إذا وجب أن يصل التيار إلى 22 mA؟
5. متى تستعمل المعاير في وضع «المحاكاة»، ومتى في وضع «المصدر»؟ وماذا يحدث لو عكست الوضعين؟
6. مرسل HART يعرض PV صحيحة و12.00 mA تيارًا معلنًا، والملقط يقرأ 11.20 mA. أين العطل، وما الإجراء؟
7. مؤشر مخرج PLC مضاء، والبت في البرنامج 1، والصمام الملفي لا يعمل. رتّب خطوات الفحص.
8. اذكر ثلاث أدوات لنصب فخ لعطل متقطع، واقترح فحصًا لعطل يظهر بعد المطر فقط.
9. طبّق طريقة «لماذا» الخمس على: «صمام FV-102 تأخر في الإغلاق أثناء إيقاف طارئ». ضع لكل جواب نوع الدليل المطلوب.
10. لماذا لا يُقبل «خطأ بشري» سببًا جذريًا؟ أعط مثالًا لإعادة صياغته إلى سبب في المنظومة.

مراجع الفصل: Lovell, D., «Troubleshooting Instrumentation & Control Systems»، عرض ISA؛ الإطار الخماسي، وطرق تحديد الموضع، وأدوات الاختبار، وخصائص حلقة التيار وجدول NE43، وأوامر HART، وأدوات DCS، وNE107، وفحوص الصمامات والحساسات)؛ R68 (عرض تدريبي «Diagnosing and Troubleshooting Instrumentation and Control Devices»، المستوى 3: خطوات التشخيص، والقدرة ثم التحكم، والاختبار الميت والحي، ودرجات الفحص، واختبارات العزل، ومصادر العطل، وأعطال المحركات، والسجلات)؛ R69 (مذكرات المؤلف المجمعة من مصادر منشورة: النموذج السباعي، والمنهج الخماسي لأعطال PLC، وأعطال DCS، وطريقة «لماذا»

الخمس)؛ R70 (مذكرة «What is Troubleshooting in PLC and Process»: أعطال PLC وخطوات تشخيصها، واستكشاف أعطال العملية)؛ وخبرة المؤلف الميدانية (R18). المواصفات: NAMUR NE43 وNE107، و60079-17 IEC (فحص الأجهزة في المناطق الخطرة)، و60364-6 IEC (مقاومة العزل)، و61511-1 IEC (التجاوز وإدارة وظائف السلامة)، وISA-18.2 (إدارة الإنذارات)، ومواصفات HART من FieldComm Group، و60584 IEC و60751 IEC (المزدوجات وRTD)، و62740 IEC (تحليل السبب الجذري)، و61025 IEC (شجرة العطل).

الفصل 40: هندسة التشغيل للحلقات: أعطال الحساسات، وتمييز عطل الجهاز من اضطراب العملية، والمنطق القابل للاختبار، وقياس التحسين

لمن هذا الفصل: مهندس التحكم والأجهزة في الموقع الذي يعيش مع الحلقات بعد تسليم المشروع: حين يتجمد مرسل في منتصف الليل، أو يتذبذب مستوى ولا يُعرف أهو الصمام أم المتحكم أم المضخة، أو يطلب المشغل «شغّل الاحتياطية تلقائيًا» ويريد مهندس التحكم أن يكتبه منطقًا يمكن اختباره، أو يسأل المدير: هل حسّن التعديل شيئًا فعلًا؟ ويفيد مهندس التشغيل الذي يريد أن يفهم ما يفعله النظام عند عطل القياس، ومهندس السلامة الذي يراجع فلسفة الأعطال.

الفكرة الأساسية: الحلقة كما صُممت غير الحلقة كما تعمل. الأولى تفترض حساسًا صادقًا وصمامًا مطيعًا وعملية مستقرة. والثانية تواجه حساسات تتجمد وتنجرف، وصمامات تلتصق، واضطرابات من الوحدات المجاورة، ومشغلين يطلبون المنطق بالكلمات لا بالمعادلات. ويجمع هذا الفصل خمس مهارات يومية: كيف يتصرف النظام عند عطل الحساس ثم يعود دون قفزة، وكيف نميز عطل الجهاز من اضطراب العملية بشكل المنحنى وفحص حاسم واحد، وكيف نحوّل طلب التشغيل إلى منطق بشروط وموانع ومؤقتات يُختبر كل انتقال فيه، وكيف نختبر الأعطال المركبة والانتقال إلى الاحتياطي لا التشغيل الطبيعي وحده، وكيف نثبت بالأرقام أن التحسين حقيقي.

40.1 أنماط عطل الحساس أثناء التشغيل

قبل أن نقرر ما يفعله النظام، نصنّف ما يمكن أن يحدث للقراءة:

النمط	كيف يبدو على الشاشة	الأسباب الشائعة	كيف يُكتشف آليًا
خارج المدى (Out of Range)	قفزة إلى 0% أو 100% أو قيمة ثابتة عند الحد	قطع سلك، قصر، فقد تغذية، فشل الإلكترونيات	تيار خارج مدى القياس 3.8–20.5 mA، وإشارة العطل ≥ 3.6 أو ≤ 21 mA (NAMUR NE43)؛ حالة «BAD» في HART/Fieldbus
التجمد (Frozen/Stuck)	خط مستقيم تمامًا لساعات مع تغير الظروف	انسداد خط النبض، تجمد، جهاز في وضع الاختبار أو المحاكاة، قيمة مقفلة في النظام، كابل اتصال Modbus منقطع مع بقاء آخر قيمة	انحراف معياري صفر خلال نافذة زمنية أطول من الطبيعي؛ مقارنة بحساس مرتبط
الانجراف (Drift)	ابتعاد بطيء عن الحساس المكرر أو عن المتوقع	تلوث، تقادم، حرارة، غشاء متضرر	تباعد تدريجي عن المرجع يتجاوز حدًا؛ المعايرة الدورية
الضوضاء (Noise)	تذبذب عالي التردد عشوائي	تأريض، تداخل كهرومغناطيسي، تكهف عند المأخذ، فقاعات	تباين مرتفع دون تغير في المتغيرات المرتبطة
القفزات (Spikes)	نبضات قصيرة إلى قيمة بعيدة ثم عودة	تلامس رديء، تداخل، خطأ اتصال	معدل تغير مستحيل فيزيائيًا (مثل 50 °C في ثانية لغمد)

النمط	كيف يبدو على الشاشة	الأسباب الشائعة	كيف يُكتشف آليًا
التباعد بين المكررات (Discrepancy)	حساسان أو ثلاثة تختلف قراءاتها بأكثر من الحد	أحدها معطوب أو مأخذه مسدود	فرق يتجاوز حدًا (مثلًا 2% من المدى) لمدة تتجاوز حدًا (مثلًا 10 s)

القاعدة الأولى: **إنذار عطل الجهاز غير إنذار العملية.** مرسل مستوى قطع سلكه يجب أن يعطي «LT-101 عطل جهاز» لا «مستوى منخفض جدًا»؛ وإلا تصرف المشغل، أو الحماية، على قراءة كاذبة. وهذا يُبنى في تهيئة بطاقة الإدخال (كشف NE43) وفي منطق النظام (وسم الجودة، Quality Status) وفي فلسفة الإنذارات (القسم 22.3).

الشكل 40-1: *أنماط عطل الحساس الستة كما تظهر على منحنى الاتجاه: خارج المدى (Out of Range)، والتجمد (Frozen)، والانجراف (Drift)، والضوضاء (Noise)، والقفزات (Spikes)، والتباعد بين المكررات (Discrepancy). وتحت كل نمط الفحص الآلي الذي يكشفه، كحدود NAMUR NE43 للتيار وانعدام الانحراف المعياري في حالة التجمد.*

40.2 ماذا يفعل النظام عند عطل الحساس؟

يبين الشكل 40-2 التسلسل: الكشف، ثم الوسم، ثم الاختيار بين قيمة بديلة والتحويل إلى اليدوي، ثم العودة بلا قفزة. وتُكتب القرارات الأربعة التالية مسبقًا في فلسفة التحكم (القسم 25.6)، ولا تُرتجل في منتصف الليل:

(1) القيمة البديلة (Substitute Value). الخيارات بترتيب الأفضلية:

- **حساس مكرر (Redundant Sensor):** أفضل بديل إن كان مستقلًا فعلًا (مأخذ مستقل وكابل مستقل وبطاقة مستقلة)؛ وفي ثلاثة حساسات يُستخدم **الوسيط (Median)** لأنه يستبعد الشاذ تلقائيًا دون منطق معقد، ويُنذر بالتباعد.
- **قيمة محسوبة من متغيرات أخرى:** مثل تدفق البخار من فتحة الصمام والضغط، أو الحرارة من قانون الغاز، أو المستوى من ميزان الكتلة لفترة قصيرة؛ وتُوسم «محسوبة» وتُحدد صلاحيتها الزمنية.
- **آخر قيمة جيدة (Last Good Value):** مقبولة لدقائق في حلقات بطيئة، وخطرة في حلقة سريعة لأنها تجمد الحلقة على حال قديمة.
- **قيمة ثابتة آمنة (Safe Default):** مثل «أقصى فتح لصمام التبريد» أو «إغلاق صمام الوقود»؛ وهي انتقال من التحكم إلى الحماية ويجب أن تكون قرار HAZOP.

(2) التحويل إلى اليدوي (Shed to Manual). حين لا يوجد بديل مقبول، يحوّل النظام المتحكم إلى اليدوي على **آخر خرج جيد** (لا إلى الصفر ولا إلى قيمة عشوائية)، وينذر المشغل بوضوح، ويقيّد معدل تغيير الخرج. ويقود المشغل الحلقة بقياس آخر (زجاجة مستوى، أو مقياس محلي، أو حساس مجاور) حتى الإصلاح. وهذا السلوك (Mode Shedding) هو الافتراضي الآمن لحلقات التحكم في أغلب أنظمة DCS. ويجب اختباره في FAT، لأن بعض التهيئات تترك المتحكم في التلقائي على قيمة BAD فيدفع الصمام إلى أحد طرفيه.

(3) وظيفة الحماية. قرارها مستقل عن القرارين السابقين. ففي وظيفة SIS بحساس واحد (1oo1) يحدد تحليل SIL وفلسفة الأعطال هل يكون عطل الحساس **فصلًا** (Fail-Safe) حين يكون الإيقاف مقبولًا، أم **إنذارًا** فقط (Alarm-Only) حين يكون الإيقاف الكاذب أشد ضررًا ويُغطى الخطر مؤقتًا بطبقة أخرى. وفي تصويت 2oo3 يُخفَّض التصويت إلى 1oo2 مع إنذار، ويُحدد **زمن الإصلاح المسموح** (مثلًا 72 ساعة). فإن تجاوزه العطل وجب إجراء تعويضي مكتوب أو الإيقاف (IEC 61511 والفصل 29).

(4) العودة بلا قفزة (Bumpless Return). بعد الإصلاح تُقارن القراءة الجديدة بالبديل مدة مراقبة. ثم يُهيّأ المتحكم بالقيمة الحالية (Initialize/Track)، أي يُضبط الحد التكاملي بحيث يساوي الخرج المحسوب الخرج الفعلي. ثم يُعاد إلى التلقائي بمعدل محدود لتغير نقطة الضبط أو الخرج، وأخيرًا يُزال الوسم. والقفزة هنا شائعة: متحكم بقي في اليدوي عند 60%، ثم أُعيد إلى التلقائي وحده التكاملي يحمل قيمة قديمة تعطي 30%، فيُغلق الصمام نصف فتحته في ثانية.

أمثلة بحسب المتغير:

- **ضغط شفط ضاغط (PIC مع مرسل واحد):** عند عطل المرسل يتحول المتحكم إلى اليدوي على آخر خرج ويُنذر؛ وحماية PSLL مستقلة على مرسلها الخاص (1oo1 بفلسفة «فصل عند العطل» لأن التوقف مقبول)؛ العودة بعد استبدال المرسل ومقارنته بمقياس محلي.
- **مستوى درم المرجل (ثلاثة مرسلات):** التحكم على الوسيط؛ عطل واحد يُنذر ويستمر التحكم على المتبقيين بمتوسطهما مع كشف التباعد؛ عطل اثنين يحوّل إلى اليدوي ويفعّل الحماية على المتبقي (أو يفصل بحسب الفلسفة)؛ ولا يُقبل تشغيل المرجل بعطلين أكثر من ساعات محددة (الفصل 36).
- **حرارة عادم التوربين (من نحو 12 إلى 27 مزدوجة أو أكثر بحسب الطراز):** المزدوجة الفاشلة (مفتوحة أو قراءة مستحيلة) تُستبعد من متوسط TTXM ومن حساب الانتشار تلقائيًا، ويُحدد عدد أقصى للمستبعدة (مثلًا اثنتان) بعده يُمنع

البدء أو يُفصل (الفصل 34)؛ وحساسات السرعة 2oo3: فقد واحد إنذار، وفقد اثنين فصل لأن الحماية من السرعة الزائدة لا تُترك على حساس واحد.

- **تدفق وقود لحلقة نسبة هواء/وقود:** عطل مرسل الوقود يحوّل حلقة النسبة إلى اليدوي ويثبت الهواء على آخر قيمة أو أعلى (اتجاه آمن: هواء زائد) لا أقل.

الشكل 40-2: *التعامل مع عطل حساس أثناء التشغيل: كشف العطل ووسم القيمة، ثم قيمة بديلة مقيدة المعدل أو تحويل إلى اليدوي بآخر خرج جيد، مع استقلال وظيفة الحماية وعودة بلا قفزة بعد الإصلاح.*

مثال محلول (منطق التباعد بين مرسلين):

- **المعطيات:** حلقة ضغط بمرسلين PT-201A وPT-201B مداهما 0–50 bar، يعمل المتحكم على متوسطهما. حد التباعد 2% من المدى (1.0 bar) لمدة 10 s. في يوم ما بدأ B ينجرف ببطء حتى صار A = 30.2 وB = 31.6 bar.
- **الافتراضات:** لا يوجد مرجع ثالث؛ المقياس المحلي على الخط يقرأ 30.3 bar بدقة ±0.5 bar.
- **الحل:** الفرق 1.4 bar > 1.0 bar لأكثر من 10 s ← إنذار «تباعد PT-201». المتوسط 30.9 bar يحمل خطأ +0.7 bar (2.3% من القيمة) وهو ما يراه المتحكم. المنطق المكتوب: عند التباعد يبقى المتحكم على المتوسط ويُنذر (لا يقرر النظام أيهما المعطوب إذ لا حَكَم بينهما)؛ يأتي الفني بالمقياس المحلي المعاير فيجد A مطابقًا؛ يحوّل المتحكم يدويًا إلى «A فقط» بزر اختيار المصدر، ويُوسم B للمعايرة. لو زاد التباعد فوق 5% (2.5 bar) دون تدخل خلال 30 دقيقة يتحول المتحكم إلى اليدوي تلقائيًا.
- **معنى النتيجة:** بمرسلين لا يمكن للنظام أن يحكم؛ يمكنه فقط أن ينبه ويحافظ على وضع معقول. الحكم الآلي يحتاج ثلاثة (وسيط) أو مرجعًا مستقلًا؛ وهذا هو الفرق بين «مكرر» و«مصوّت».

40.3 التمييز بين عطل الجهاز واضطراب العملية

أكثر الوقت يُهدر في المصانع على السؤال: هل ما أراه حقيقي؟ يبين الشكل 40-3 أربعة منحنيات تبدو متشابهة لأول وهلة (كلها «تذبذب») لكل منها فحص واحد يميزه.

ما يبدو	الاحتمال الأول	الاحتمال الثاني	الاحتمال الثالث
تذبذب مستمر بدورة ثابتة	التصاق الصمام (في حلقة المستوى: PV مثلثية وOP منشارية؛ وفي حلقة التدفق: PV شبه مربعة وOP مثلثية)	كسب المتحكم عالٍ أو زمن تكامل قصير (جيبية)	اضطراب دوري خارجي (مضخة تعمل وتتوقف دوريًا، مبادل، حلقة مجاورة)
ضوضاء عالية التردد	تداخل كهربائي أو تأريض	تكهف أو فقاعات عند المأخذ	تدفق مضطرب حقيقي عند الحساس
قفزة مفاجئة في القراءة	عطل جهاز (سلك، بطاقة، اتصال)	تغير حقيقي مفاجئ (فتح صمام تجاوز)	تغيير تهيئة (مدى، وحدة)
انجراف بطيء	انجراف الحساس (تلوث، تقادم)	تغير حقيقي بطيء (تلوث مبادل، تآكل فتحة)	تغير في الظروف المرجعية (حرارة محيطة على مرسل DP قديم)
قراءة ثابتة تمامًا	تجمد الجهاز أو انسداد المأخذ	عملية مستقرة فعلًا	قيمة مقفلة في النظام (Forced/Simulated)
القراءة «معقولة» لكنها خاطئة	ساق مرجعية فارغة، مأخذ معكوس، مدى مقلوب	—	—

جدول: التمييز بين عطل الجهاز واضطراب العملية (تابع): الفحص الحاسم لكل حالة

ما يبدو	الفحص الحاسم
تذبذب مستمر بدورة ثابتة	ضع المتحكم في **اليدوي**: يتوقف خلال دورة (متحكم)، أو يتوقف ويكشف اختبار الخطوات القفز (صمام)، أو يستمر (خارجي)
ضوضاء عالية التردد	لا تظهر في OP ولا في متغير مرتبط فيزيائيًا؛ ضع معاير حلقة (Loop Calibrator) بتيار ثابت مكان المرسل (تبقى = كهربائي)؛ ارفع التخميد مؤقتًا وراقب هل يتغير المتوسط

ما يبدو	الفحص الحاسم
قفزة مفاجئة في القراءة	القفزة في **متغير واحد** دون أثر في المتغيرات المرتبطة (ضغط يقفز والتدفق والحرارة ثابتان = جهاز)؛ سجل التغييرات في النظام
انجراف بطيء	قارن بمرجع مستقل (حساس مجاور، مقياس محلي معاير، ميزان كتلة أو طاقة)؛ الانجراف الحقيقي يظهر في متغيرين مرتبطين معًا
قراءة ثابتة تمامًا	غيّر شيئًا صغيرًا في العملية أو نفّس الخط وراقب الاستجابة؛ افحص علامة القفل في النظام
القراءة «معقولة» لكنها خاطئة	ميزان الكتلة أو الطاقة عبر الوحدة؛ الفحص عند حالتي تشغيل مختلفتين (خطأ الإزاحة ثابت والخطأ النسبي يتغير)

الشكل 40-3: *أربعة تذبذبات متشابهة ظاهريًا وفحصها الحاسم: التصاق الصمام (مثلثية ومنشارية، يتوقف في اليدوي ويكشفه اختبار الخطوات)، وكسب عالٍ (جيبية تتلاشى في اليدوي)، واضطراب خارجي (يستمر في اليدوي)، وضوضاء قياس (عشوائية لا أثر لها في الخرج ولا في المتغيرات المرتبطة).*

أدوات التمييز الخمس:

1. **المتغير المرتبط:** لكل قياس شريك فيزيائي: التدفق مع الضغط التفاضلي، والمستوى مع فرق التدفقين، والحرارة مع التدفق والحمل، وسرعة الآلة مع التيار. ما يتغير وحده مشبوه.
2. **الوضع اليدوي والخطوات الصغيرة:** الأداة الأرخص (القسم 15.13).

3. **المرجع المستقل:** مقياس محلي معاير، أو حساس محمول، أو ميزان مادة (ما يدخل يساوي ما يخرج زائد التراكم).
4. **الرسم المتقاطع (PV مقابل OP):** الالتصاق يرسم متوازي أضلاع بزوايا حادة، وسوء الضبط يرسم قطعًا ناقصًا، والاضطراب الخارجي سحابة بلا شكل.
5. **الطيف (FFT) للمتغير:** ذروة عند تردد واحد تشير إلى مصدر ميكانيكي (سرعة مضخة) أو إلى حلقة مجاورة تتذبذب بالدورة نفسها.

> **تنبيه مهني:** ابدأ بأرخص الفحوص وأقلها تدخلًا (النظر إلى المتغيرات المرتبطة والسجلات) قبل الفك؛ وحين تفك جهازًا سجل قراءته قبل الفك، فكثير من «الأعطال» تحل نفسها بالفك والتركيب فتضيع فرصة معرفة السبب.

وأداة بصرية سريعة تكمل المنحنيات الزمنية هي الرسم المتقاطع للقيمة المقاسة مقابل خرج المتحكم (الشكل 40-4): أشكاله الثلاثة مذكورة في الأداة 4 أعلاه، وسبب متوازي الأضلاع في الالتصاق أن الخرج يتحرك والقيمة ثابتة ثم تقفز.

الشكل 40-4: *الرسم المتقاطع PV مقابل OP لثلاثة أسباب للتذبذب: (أ) التصاق الصمام، (ب) كسب زائد في المتحكم، (ج) اضطراب دوري من المنبع؛ الشكل الهندسي للمسار يميز السبب قبل أي اختبار.*

40.4 من طلب المشغل إلى منطق قابل للاختبار

يقول رئيس الوردية: «شغّل المضخة الاحتياطية تلقائيًا إذا وقفت العاملة». الجملة صحيحة بوصفها طلبًا، لكنها قاصرة بوصفها مواصفة. فالمبرمج الذي ينفذها حرفيًا قد يعطي مضخة تبدأ وهي في وضع الصيانة، أو تبدأ وتتوقف عشر مرات في دقيقة، أو تبدأ أثناء إيقاف طارئ. ويمر تحويل الطلب إلى منطق بستة أسئلة، لكل جواب سطر في الوثيقة وحالة اختبار (الشكل 40-5):

السؤال	الجواب للمضخة الاحتياطية P-102	ما الذي يُكتب في المنطق
متى يبدأ؟ (شروط البدء)	انخفاض ضغط التصريف المشترك دون PSL لمدة 2 s، **أو** إشارة «فشل» من المضخة العاملة (سقوط القاطع، أو أمر تشغيل بلا تأكيد خلال 5 s)	شرطان بـ«أو»، كل منهما بمؤقت تأخير لتفادي القفزات
متى يُمنع؟ (الموانع/التعشيقات)	ESD قائم؛ مستوى السحب LSLL قائم؛ صمام السحب غير مفتوح؛ المضخة في وضع محلي أو صيانة؛ عطل في محركها	قائمة شروط منع («و-ليس»، AND NOT) تُراجع في HAZOP؛ الموانع تُعرض على الشاشة بأسبابها
ما الأولوية؟	أمر ESD يغلب كل شيء؛ الفصل الآلي للمضخة نفسها يغلب أمر البدء؛ البدء اليدوي من المشغل مسموح إن كانت جاهزة	ترتيب صريح؛ لا «آخر أمر يفوز»
كم ننتظر؟ (المؤقتات)	مؤقت تأكيد البدء 10 s (قاطع مغلق + ضغط تصريف فوق PSL)؛ فترة حظر إعادة البدء 60 s؛ محاولتان كحد أقصى	كل مؤقت له اسم وقيمة قابلة للضبط من واجهة الصيانة لا من الشيفرة
كيف يُعاد الضبط؟	بعد فشل المحاولتين لا تُجرى محاولة ثالثة؛ إعادة الضبط يدوية من المشغل بعد فحص السبب	زر إعادة ضبط مع تسجيل من ضغطه ومتى

السؤال	الجواب للمضخة الاحتياطية P-102	ما الذي يُكتب في المنطق
ماذا لو فشل التشغيل؟	إنذار «فشل بدء P-102» بأولوية عالية؛ بقاء المضخة في حالة FAILED؛ إبلاغ الصيانة؛ إن كانت العاملة أيضًا واقفة تُفعّل حماية العملية (إغلاق التغذية بالمستوى)	حالة صريحة لا مجرد غياب حالة «تعمل»

مخطط الحالات: خمس حالات (غير جاهزة، وجاهزة، وبدء، وتعمل، وفشل) وسبعة انتقالات. لكل انتقال شرط مكتوب، ولكل شرط حالة اختبار تحدد ثلاثة أمور: ما نضبطه في المداخل (محاكاةً أو فعلًا)، وما نتوقعه في المخارج والإنذارات والسجل، ومعيار القبول (الزمن بالثواني والحالة النهائية). وهذا المخطط هو الجسر بين كلام المشغل وشيفرة PLC، ويُعرض على المشغل نفسه للموافقة قبل البرمجة، بلغته، في صورة جدول.

الشكل 40-5: *تحويل طلب «شغّل المضخة الاحتياطية تلقائيًا» إلى مخطط حالات: شروط البدء والموانع والمؤقتات وإعادة الضبط وسلوك الفشل، وكل سهم حالة اختبار بمدخلات ونتيجة متوقعة ومعيار قبول.*

نموذج حالة اختبار (من جدول FAT):

رقم	الحالة الابتدائية	الإجراء	النتيجة المتوقعة	معيار القبول	النتيجة
T-07	P-102 جاهزة، P-101 تعمل، الضغط طبيعي	محاكاة سقوط قاطع P-101	خلال 2 s أمر بدء P-102؛ خلال 10 s تأكيد التشغيل؛ إنذار «P-101 فشل» و«P-102 بدأت تلقائيًا»	زمن الاستجابة ≤ 2 s؛ لا محاولة ثانية إن نجحت الأولى؛ السجل يحمل الطابع الزمني والسبب	✓ / ✗

رقم	الحالة الابتدائية	الإجراء	النتيجة المتوقعة	معيار القبول	النتيجة
T-08	كما سبق لكن ESD قائم	محاكاة سقوط القاطع	لا أمر بدء؛ إنذار «بدء P-102 ممنوع: ESD»	لا حركة للمخرج مطلقًا	
T-09	P-102 جاهزة؛ تأكيد التشغيل محجوب	سقوط قاطع P-101	محاولة 1 تفشل بعد 10 s؛ انتظار 60 s؛ محاولة 2 تفشل؛ حالة FAILED وإنذار أولوية عالية؛ لا محاولة ثالثة	عدد المحاولات = 2 بالضبط	

40.5 اختبار الأعطال المركبة والانتقال إلى النظام الاحتياطي

اختبار «التشغيل الطبيعي» يثبت أن النظام يعمل حين يعمل كل شيء. أما الحوادث فتقع حين يفشل شيء فيتصرف النظام تصرفًا لم يختبره أحد. لذلك تُضاف إلى برنامج FAT و SAT (القسم 30.12) قائمة سيناريوهات للأعطال المركبة، لكل منها إجراء ونتيجة متوقعة ومعيار قبول:

السيناريو	الإجراء في الاختبار	النتيجة المتوقعة	معيار القبول
فقد أحد مصدري التغذية للمتحكم	افصل قاطع المصدر A ثم أعده، ثم B	لا انقطاع في المعالجة؛ إنذار فقد المصدر؛ لا تغير في أي مخرج	زمن الانتقال 0 (مزدوج التغذية)؛ لا إنذارات كاذبة من I/O

السيناريو	الإجراء في الاختبار	النتيجة المتوقعة	معيار القبول
فقد التغذية الكاملة عن خزانة I/O بعيدة	افصل التغذية	مخارج الخزانة إلى وضع الفشل المحدد (لا آخر قيمة ما لم يُحدد)؛ إنذار فقد الاتصال بالخزانة؛ الحلقات المتأثرة إلى اليدوي أو البديل	كل مخرج يذهب إلى وضعه المكتوب في قائمة I/O؛ لا مخرج «معلق»
انقطاع شبكة التحكم (كابل واحد ثم الاثنان)	اسحب كابلًا ثم الآخر	مع كابل واحد: لا أثر إلا إنذار؛ مع الاثنين: المتحكم يستمر محليًا والمحطات تفقد الرؤية؛ عند العودة لا قفزة في القيم	زمن استعادة الشبكة ≥ المحدد؛ المؤرخ يسجل الفجوة لا قيمًا مزيفة
تعطل المتحكم الأساسي (Failover)	اسحب وحدة المعالجة الأساسية أثناء التشغيل	انتقال إلى الاحتياطي بلا اضطراب في المخارج؛ إنذار؛ عند إعادة الوحدة تعود للتزامن دون تدخل	فترة الانتقال ≥ دورة مسح واحدة؛ لا مخرج يتغير أكثر من دقة التمييز
إعادة تشغيل محطة تشغيل أو خادم	أعد تشغيل المحطة وسط مناورة	استمرار التحكم؛ عودة الشاشات بحالة صحيحة؛ لا فقد للإنذارات الواقعة أثناء الغياب	كل الإنذارات محفوظة في الخادم لا في المحطة
فقد هواء الأجهزة	أغلق تغذية الهواء عن وحدة	كل صمام إلى وضع فشله المكتوب (15.8)؛ إنذار ضغط هواء منخفض قبل وصول الصمامات إلى الفشل	كل صمام يطابق قائمته؛ زمن الوصول مطابق لسعة الخزان
فقد اتصال حزمة (Modbus مع ضاغط الهواء أو التوربين)	افصل كابل الاتصال	القيم إلى «BAD» لا تجميد؛ التعشيقات المعتمدة على الحزمة تتصرف وفق فلسفتها؛ إنذار الاتصال	لا قيمة قديمة تُعرض كأنها حية (القسم 23.14)

السيناريو	الإجراء في الاختبار	النتيجة المتوقعة	معيار القبول
انقطاع التغذية عن الصمامات الملفية للسلامة	افصل تغذية 24 V عن لوحة SOV	كل الصمامات إلى وضع الفصل؛ التسلسل الصحيح؛ لا تلف	الزمن حتى الإغلاق مطابق لورقة البيانات
عودة الطاقة بعد انقطاع كامل (Cold Restart)	افصل كل شيء ثم أعد	المتحكم يبدأ في الحالة الآمنة المكتوبة (لا يعيد تشغيل المعدات من نفسه)؛ الحلقات في اليدوي حتى يؤكد المشغل	لا معدة تبدأ تلقائيًا بعد العودة ما لم يُحدد ذلك صراحة

قواعد الاختبار: يُنفذ كل سيناريو مرة واحدة على الأقل في FAT وأخرى في SAT، ويُعاد بعد أي تغيير في المعمارية أو البرمجيات. وتُسجل النتيجة بالطابع الزمني من سجل الأحداث، لا من ذاكرة الحاضرين. وكل سلوك غير متوقع يُصنَّف في إحدى فئتين: خطأ يُصلح قبل التشغيل، أو سلوك مقبول يُوثق ويُدرَّب عليه المشغلون.

40.6 قياس نجاح التحسين بالأرقام

«صارت الحلقة أفضل» عبارة لا تُدرج في تقرير. يُقاس التحسين بمؤشرات قبل وبعد، على فترتين متكافئتين:

المؤشر	كيف يُحسب	ما يقيسه
الانحراف المعياري للمتغير حول نقطة الضبط (σ)	من المؤرخ على نافذة لا تقل عن 24 ساعة بحمل مماثل	جودة التنظيم
التكامل المطلق للخطأ (IAE) بعد اضطراب قياسي	∫ مقدار |PV − SP| dt لخطوة نقطة ضبط أو اضطراب بالحجم نفسه	سرعة الاستجابة وإخمادها
زمن الاستقرار	من الخطوة حتى دخول نطاق ±2% من القيمة النهائية والبقاء فيه	الاستجابة الديناميكية

المؤشر	كيف يُحسب	ما يقيسه
حركة الصمام	عدد انعكاسات اتجاه الساق في اليوم، أو المسافة المقطوعة	استهلاك عمر الصمام وعلامة التذبذب
نسبة الوقت في التلقائي	ساعات التلقائي ÷ ساعات التشغيل	ثقة المشغل بالحلقة
عدد الإنذارات في الساعة لكل مشغل	من نظام الإنذارات؛ مقارنة بحدود EEMUA 191 (القسم 22.3)	عبء المشغل
الإيقافات الكاذبة في السنة	من سجل الأحداث	موثوقية الحماية والأجهزة
استهلاك الطاقة أو المواد	kWh للطن، أو غاز الوقود للميغاواط، مصححًا بالحمل والحرارة المحيطة	الأثر الاقتصادي

كيف أختار؟ اختر مؤشرًا لجودة التنظيم (σ أو IAE)، وآخر لكلفة الحصول عليها (حركة الصمام)، وثالثًا لثقة المشغل (الوقت في التلقائي والإنذارات)، ورابعًا للأثر الاقتصادي إن أمكن تصحيحه بالحمل؛ فالمؤشر الواحد يُثبت أي شيء. والجدول لا يبين شرط المقارنة: فترتان متكافئتان في الحمل والحرارة ونوع الخام، ومصدر واحد للبيانات هو المؤرخ، ولا مؤشر يُحسب من الشاشة. وأكثر الأخطاء كلفة الاحتفال بانخفاض σ وحده بينما ارتفعت حركة الصمام، أي ضبط عدواني يشتري استقرار المتغير بعمر الحشوة والكرسي.

تثبيت ظروف المقارنة: الحمل نفسه (أو تصحيح بالحمل)، والفترة نفسها من اليوم (بسبب الحرارة المحيطة)، ونوع الوقود أو الخام نفسه، ومدة كافية لتشمل الاضطرابات المعتادة، مع استبعاد فترات البدء والتوقف. ويُحسب المؤشر بالطريقة نفسها ومن المصدر نفسه (المؤرخ لا الشاشة). فبدون هذا التثبيت يمكن «إثبات» أي شيء.

مثال محلول (تحسين حلقة مستوى وعاء الشفط في مشروع الكتاب):

- **المعطيات:** قبل التعديل (أسبوع بحمل 70% إلى 80%): σ للمستوى 1.8%، انعكاسات الصمام 420 في اليوم، الحلقة في التلقائي 55% من الوقت، 9 إنذارات مستوى في اليوم. بعد إصلاح التصاق LV-101 وإعادة ضبط المتحكم (أسبوع بحمل مماثل): σ = 0.5%، انعكاسات 90 في اليوم، التلقائي 98%، إنذارات 0.4 في اليوم.
- **الافتراضات:** الأسبوعان متكافئان في الحمل ونوع الغاز؛ لا تغيير آخر في الوحدة؛ نافذة الحساب 24 ساعة × 7.
- **الحل:**
  - انخفاض σ: (1.8 − 0.5) ÷ 1.8 = 72%.
  - انخفاض حركة الصمام: (420 − 90) ÷ 420 ≈ 79%، ويُتوقع معه انخفاض تآكل الحشوة والكرسي، ويُتحقق من أثره على العمر بسجلات الصيانة.
  - الوقت في التلقائي: من 55% إلى 98%، أي أن المشغل توقف عن قيادة الحلقة يدويًا.
  - الإنذارات: من 9 إلى 0.4 في اليوم.
- **معنى النتيجة:** التحسين حقيقي ومتسق عبر أربعة مؤشرات مستقلة؛ ولو تحسن σ وحده مع ارتفاع حركة الصمام لكان ذلك ضبطًا عدوانيًا يشتري استقرار المتغير بعمر الصمام، وهو ما تكشفه المؤشرات مجتمعة لا المؤشر الواحد.

الشكل 40-6: *أربعة مؤشرات مستقلة قبل تحسين حلقة مستوى وعاء الشفط وبعده: الانحراف المعياري σ من 1.8% إلى 0.5%، وانعكاسات الصمام من 420 إلى 90 في اليوم، والوقت في التلقائي من 55% إلى 98%، وإنذارات المستوى من 9 إلى 0.4 في اليوم؛ واتساقها معًا هو ما يثبت أن التحسين حقيقي.*

40.7 مشروع الكتاب المتصل: وحدة ضغط الغاز (الجزء الثاني)

نطبق الفصل على الوحدة التي بدأ عرضها في القسم 15.14:

- **مستوى V-101:** ثلاثة مرسلات LT-101A/B/C (رادار موجه، وضغط تفاضلي، وضغط تفاضلي) بمآخذ مستقلة؛ التحكم LIC-101 على الوسيط؛ التباعد 3% لمدة 20 s إنذار؛ عطل واحد: استمرار على متوسط الاثنين؛ عطلان: تحويل إلى اليدوي؛ الحماية LZT-103 (المستوى المنخفض جدًا) مستقلة 1oo1 بفلسفة «فصل عند العطل»: عطل المرسل يغلق LV-101 عبر صمامه الملفي كما يفعل المستوى المنخفض جدًا، وهذا مقبول لأن المستوى بعد الإغلاق يرتفع ببطء

ويسبقه إنذار المستوى العالي من LIC-101 بوقت كافٍ، أما الفشل الخطر فمعناه انفلات الغاز إلى فاصل التصريف المنخفض الضغط.

- **ضغط الشفط PIC-102:** مرسل واحد مع مقياس محلي؛ عطل ← يدوي على آخر خرج؛ PZT-104 للحماية مستقل.
- **مضخة تصريف السوائل P-101/P-102:** المنطق كما في 40.4 مع الجدول والاختبارات T-07 إلى T-09.
- **اختبارات الأعطال المركبة:** فقد الاتصال Modbus مع لوحة الضاغط (القيم إلى BAD، منع الانفصال الهوائي (Surge) يبقى على مرسلاته الموصولة سلكيًا)، وفقد هواء الأجهزة (FV-102 يفتح، LV-101 يغلق، SDV يغلق).
- **مؤشرات النجاح:** σ لمستوى V-101، وعدد فتحات FV-102 غير الضرورية، وإنذارات الوحدة في الساعة، والإيقافات الكاذبة.

الشكل 40-7: *معمارية قياس مستوى الوعاء V-101 في مشروع الكتاب: ثلاثة مرسلات بمآخذ مستقلة (رادار موجّه وضغطان تفاضليان) تغذي اختيار الوسيط (Median Select) لحلقة LIC-101 مع إنذار تباعد 3% لمدة 20 s وسلوك تدهور محدد، ومرسل الحماية LZT-103 في مسار SIS مستقل بفلسفة الفصل عند العطل (Fail-Safe).*

40.8 حالة ميدانية: مرسل ضغط مجمد وصمام مفتوح بالكامل

نوع الحالة: مثال تعليمي مركّب (يجمع أنماطًا متكررة؛ الأرقام تعليمية).

- **العَرَض:** في وحدة ضغط غاز، أثناء الوردية الليلية، ارتفع ضغط الشفط تدريجيًا حتى فتح صمام التنفيس إلى الشعلة (وهو حماية مستقلة عن الحلقة لا جزء منها)، بينما تعرض الشاشة ضغط شفط ثابتًا عند 20.4 barg منذ ساعتين، وصمام تعويض الغاز PV-402 الذي يُدخل الغاز إلى وعاء الشفط ليرفع ضغطه مفتوحًا 100%.
- **الفرضيات:** (1) زيادة حقيقية في الغاز الوارد تجاوزت سعة الصمام؛ (2)

تجمد مرسل PT-402 فيرى المتحكم ضغطًا أدنى من نقطة الضبط فيزيد فتح صمام التعويض حتى النهاية فيرتفع الضغط الحقيقي؛ (3) عطل في الصمام.

- **الفحوص:** المتغيرات المرتبطة: تدفق الغاز الوارد ثابت، وضغط التصريف ارتفع، ومقياس الضغط المحلي على الشفط يقرأ 24.5 barg بينما الشاشة 20.4؛ منحنى PT-402 خط مستقيم تمامًا (انحراف معياري صفر) منذ 02:10 وقبلها كان يتحرك بعُشر البار.
- **الدليل الحاسم:** الفرق بين المقياس المحلي والشاشة مع تجمد المنحنى في لحظة محددة؛ وفي السجل: عند 02:10 دخل فني بجهاز HART على PT-402 لاختبار حلقة أخرى وترك المرسل في وضع «تيار ثابت» (Loop Test) عند 20.4 barg ولم يخرجه.
- **السبب الجذري:** المرسل في وضع محاكاة الخرج؛ ونظام التحكم لا يميز بين تيار محاكى وتيار حقيقي؛ ولا يوجد كشف تجمد ولا مقارنة بمتغير مرتبط؛ والمتحكم بقي في التلقائي على قيمة «صحيحة الشكل» فقاد الصمام إلى الطرف.
- **الإجراء:** إخراج المرسل من وضع المحاكاة ومقارنته بالمقياس؛ إضافة كشف التجمد (انحراف معياري صفر لمدة 15 دقيقة على متغير ديناميكي = إنذار جهاز)؛ إضافة إنذار «الصمام عند الطرف لأكثر من 5 دقائق» لحلقات الضغط؛ إجراء تصريح عمل يشترط تسجيل الدخول على أي مرسل حي وإخراجه من المحاكاة قبل إغلاق التصريح، مع إنذار HART «المرسل في وضع الاختبار» عبر نظام إدارة الأصول.
- **الدرس:** القراءة المجمدة أخطر من القراءة الخاطئة لأنها تبدو صحيحة؛ وأول سؤال أمام أي مرسل ثابت: هل تتحرك المتغيرات المرتبطة؟

الشكل 40-8: *مسار الحالة الميدانية: تتجمد قراءة PT-402 عند 20.4 barg من الساعة 02:10 بعد تركها في وضع التيار الثابت (Loop Test)، فيفتح المتحكم صمام التعويض PV-402 حتى 100% ويرتفع الضغط الحقيقي إلى 24.5 barg فيفتح صمام التنفيس. وكشف التجمد المقترح (σ = 0 لمدة 15 دقيقة) كان سينذر عند 02:25، وإنذار بقاء الصمام عند الطرف أكثر من 5 دقائق عند 02:55.*

دور المهندس ودور الفني:

المهمة	دور المهندس	دور الفني
فلسفة عطل الحساس	يكتب لكل حلقة طريقة الكشف والقيمة البديلة وسلوك الحماية والعودة، ويعرضها على HAZOP	يبلغ عن أنماط العطل المتكررة في الميدان، ويتحقق من تهيئة كشف NE43 في البطاقات

المهمة	دور المهندس	دور الفني
تمييز الجهاز من العملية	يحلل الاتجاهات والرسم المتقاطع، ويختار الفحص الحاسم	يقارن بالمقياس المحلي المعاير، وينفذ اختبار الخطوات في اليدوي بالتنسيق مع المشغل
المنطق القابل للاختبار	يحوّل طلب المشغل إلى جدول الأسئلة الستة ومخطط الحالات وحالات الاختبار	يحاكي المداخل في FAT وSAT، ويسجل النتائج بالطابع الزمني
قياس التحسين	يختار المؤشرات والفترتين المتكافئتين، ويكتب التقرير	يحافظ على معايرة القياسات خلال فترتي المقارنة، ويسجل أعمال الصيانة التي قد تؤثر فيهما

40.9 الأخطاء الشائعة

1. إنذار عطل الجهاز يظهر في صورة إنذار عملية (منخفض جدًا) فيُساء تفسيره أو يُفصل عليه.
2. المتحكم يبقى في التلقائي على قيمة BAD أو مجمدة ويقود الصمام إلى الطرف.
3. مرسلان بلا حكم يُعاملان كما لو كانا ثلاثة، أو ثلاثة تُعامل بالمتوسط بدل الوسيط.
4. العودة إلى التلقائي بلا تهيئة فتقفز الحلقة.
5. تشخيص التذبذب بتغيير الكسب قبل تجربة دقيقتين في الوضع اليدوي.
6. فك الجهاز قبل النظر إلى المتغيرات المرتبطة والسجل.
7. منطق «شغّل الاحتياطية» بلا موانع ولا حد للمحاولات ولا حالة فشل.
8. اختبار التشغيل الطبيعي فقط، وترك سلوك فقد الشبكة والتغذية والهواء للحادثة الأولى.
9. الحكم على التحسين بمؤشر واحد أو بفترتين غير متكافئتين.

10. ترك المرسل في وضع المحاكاة بعد اختبار الحلقة.

40.10 ملخص

التشغيل هو اختبار التصميم الحقيقي. لكل حساس فلسفة عطل مكتوبة: كيف يُكتشف عطله، وبأي قيمة يُستبدل أو متى تتحول الحلقة إلى اليدوي، وكيف تتصرف الحماية باستقلال، وكيف تعود الحلقة بلا قفزة. ولكل تذبذب أو قفزة أو انجراف فحص حاسم يميز الجهاز من العملية قبل الفك: اليدوي، والخطوات الصغيرة، والمتغير المرتبط، والمرجع المستقل. وكل طلب تشغيل يُترجم إلى شروط وموانع وأولويات ومؤقتات وإعادة ضبط وسلوك فشل، ثم إلى حالات اختبار. وتُختبر الأعطال المركبة (تغذية، شبكة، متحكم، هواء، اتصال) بمعايير قبول مكتوبة. ويُقاس التحسين بعدة مؤشرات على فترتين متكافئتين.

وفي الفصل التالي: يتناول الفصل 41 «استراتيجيات التحكم المتقدمة»: التعاقبي والتغذية الأمامية والنسبة وتقسيم المدى والانتقاء وتعويض الزمن الميت، أي البنى التي تُبنى من الحلقات التي نظّمنا تشغيلها هنا، ثم يأتي الفصل 42 «الذكاء الاصطناعي وأثره في مستقبل التحكم والقياس»، وهو الطبقة التي تُبنى فوق أدوات هذا الفصل: نماذج تتعلم من بيانات الحلقات نفسها فتكشف التجمد والانجراف والتدهور مبكرًا، وتبقى محكومة بفلسفة الأعطال والحواجز التي وضعناها هنا.

40.11 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق بين إنذار عطل الجهاز وإنذار العملية؟ وكيف يُبنى الأول في بطاقة الإدخال وفي النظام؟
2. حلقة حرارة بمرسل واحد فقد إشارته. اقترح تسلسلًا كاملًا من الكشف إلى العودة بلا قفزة، وبيّن ما يختلف لو كان المرسل جزءًا من وظيفة SIL 2.
3. لماذا الوسيط أفضل من المتوسط لثلاثة حساسات؟ وماذا يحدث للوسيط حين يفشل حساسان في اتجاهين متعاكسين؟

4. مستوى وعاء يتذبذب بدورة 4 دقائق. وضعت المتحكم في اليدوي فاستمر التذبذب. ما استنتاجك، وما الفحص التالي؟

5. ارسم الرسم المتقاطع (PV مقابل OP) المتوقع لحلقة بصمام ملتصق ولحلقة بكسب عالٍ، وبيّن الفرق.

6. حوّل الطلب «افتح صمام التجاوز تلقائيًا إذا ارتفع ضغط التصريف» إلى جدول الأسئلة الستة ومخطط حالات.

7. اكتب ثلاث حالات اختبار لفقد الاتصال بحزمة توربين عبر Modbus: المدخلات، والنتيجة المتوقعة، ومعيار القبول.

8. ما الذي يجب أن يحدث للصمامات والحلقات عند عودة الطاقة بعد انقطاع كامل؟ ولماذا لا تبدأ المعدات من نفسها؟

9. حلقة تدفق: قبل التعديل σ = 2.1% وحركة الصمام 300 انعكاس/يوم؛ بعده σ = 0.9% و650 انعكاسًا/يوم. هل هذا تحسين؟ فسّر.

10. في الحالة الميدانية (القسم 40.8): اذكر ثلاثة إجراءات وقائية بترتيب فاعليتها، وما الذي كان سيكشف المشكلة خلال دقائق لا ساعات؟

مراجع الفصل: NAMUR NE43 (إشارة العطل في المرسلات) وNE107 (تصنيف حالة الجهاز)، وIEC 61511 (فلسفة الأعطال وزمن الإصلاح في وظائف السلامة)، وISA-EEMUA 191 / 18.2 (إدارة الإنذارات ومؤشراتها)، وISA-75.25 (اختبار خطوات الصمام)، وISA-TR84.00.02 (حساب التصويت)، وR2 (اختبارات التشغيل التجريبي)، و R18 (الخبرة الميدانية للمؤلف)، والفصول 15 و18 و29 من هذا الكتاب.

الفصل 41: استراتيجيات التحكم المتقدمة: التعاقبي والتغذية الأمامية والنسبة وتقسيم المدى والانتقاء وتعويض الزمن الميت

لمن هذا الفصل: مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم الذي ضبط حلقاته جيدًا وفق (الفصل 18)، ثم وجد أن بعضها لا يتحسن مهما ضُبط: حلقة حرارة تهتز كلما تغير ضغط البخار، أو خليط تنحرف نسبته كلما تغير الحمل، أو صمامان على متغير واحد يتعاركان، أو حد تشغيل يُتجاوز لأن المتحكم الذي يحميه كان «نائمًا». ويفيد مهندس التصميم الذي يكتب وصف التحكم (Control Narrative) لوحدة جديدة، ومهندس التشغيل التجريبي الذي يختبر هذه البنى قبل التسليم، والفني الذي يحتاج أن يعرف لماذا لا تتحرك الحلقة الثانوية وهي في الوضع الآلي.

الفكرة الأساسية: حلقة (PID) الواحدة ترى متغيرًا واحدًا وتحرك صمامًا واحدًا، ولا تعرف شيئًا عن الاضطراب إلا بعد أن يظهر أثره في المتغير. واستراتيجيات هذا الفصل ليست خوارزميات جديدة، بل **ترتيبات لحلقات PID عادية وكتل حسابية بسيطة** تعطي المتحكم معلومة إضافية أو قيدًا إضافيًا: قياس وسيط أسرع (التعاقبي)، أو قياس الاضطراب نفسه (التغذية الأمامية)، أو علاقة ثابتة بين تدفقين (النسبة)، أو أكثر من عنصر نهائي (تقسيم المدى)، أو أكثر من هدف على عنصر واحد (الانتقاء)، أو نموذج يتنبأ بما سيأتي بعد الزمن الميت. وكل استراتيجية لها شرط يجعلها تنجح، وخطأ تنفيذي واحد يجعلها أسوأ من الحلقة البسيطة التي حلت محلها.

41.1 متى لا تكفي حلقة واحدة؟

الحلقة المغلقة البسيطة (القسم 3.1-أ) تصحح أي اضطراب في النهاية، لكنها تصححه **بعد** أن يحرف المتغير المقاس، وبسرعة يحددها أبطأ ما في الحلقة. فإذا كان الاضطراب كبيرًا أو متكررًا، وكانت العملية بطيئة أو ذات زمن ميت كبير، فلن يمنع أي ضبط انحرافًا ملموسًا. والسؤال الأول قبل اختيار أي استراتيجية هو: **ما الذي يمنع هذه الحلقة من الأداء المطلوب؟** والجدول التالي يربط كل سبب بالاستراتيجية التي تعالجه.

جدول: من المشكلة إلى الاستراتيجية

ما يُلاحظ في الحلقة	السبب الحقيقي	الاستراتيجية	القسم
المتغير ينحرف كلما تغير ضغط التغذية أو حرارتها، ثم يعود ببطء	اضطراب يدخل عبر العنصر النهائي قبل أن يصل إلى المتغير	التعاقبي (Cascade)	(41.2)
انحراف كبير عند كل تغير في الحمل، والحمل نفسه يُقاس	الحلقة لا ترى الاضطراب حتى يظهر أثره	التغذية الأمامية (Feedforward)	(41.3)
تدفقان يجب أن يبقيا بنسبة ثابتة (خلط، حقن مادة، وقود وهواء)	الهدف علاقة بين متغيرين لا قيمة مطلقة	التحكم بالنسبة (Ratio)	(41.4)
مدى التشغيل أوسع من صمام واحد، أو المتغير يحتاج تسخينًا وتبريدًا	عنصر نهائي واحد لا يكفي	تقسيم المدى (Split Range) وتحكم موضع الصمام (VPC)	(41.5)
حد تشغيل (حرارة، تيار محرك، ضغط) يُتجاوز أحيانًا	هدفان على عنصر نهائي واحد	الانتقاء (Override) بكتلة اختيار	(41.6)
الحلقة بطيئة أو تتذبذب مهما ضُبطت، والزمن الميت أكبر من الثابت الزمني	الزمن الميت يحد من الكسب الممكن	تعويض الزمن الميت (متنبئ سميث)	(41.7)

ما يُلاحظ في الحلقة	السبب الحقيقي	الاستراتيجية	القسم
تحريك حلقة يحرف حلقة أخرى ثم ترد عليها	تفاعل بين الحلقات	اختيار الأزواج وفك الارتباط (Decoupling)	(41.8)
الحلقة ممتازة عند حمل ومتذبذبة أو بطيئة عند حمل آخر	كسب العملية يتغير مع نقطة التشغيل	جدولة الكسب (Gain Scheduling)	(41.9)
عدة متغيرات وقيود متفاعلة ومطلوب تشغيل قريب من الحدود	مسألة متعددة المتغيرات	التحكم التنبؤي (MPC) فوق الحلقات الأساسية	(41.10)

كيف أختار؟ القاعدة: شخّص قبل أن تختار؛ اسأل أين يدخل الاضطراب وهل يُقاس، وهل الهدف قيمة أم علاقة، وهل العنصر النهائي واحد أم أكثر، وهل الزمن الميت هو ما يحد الكسب، فكل سطر في الجدول جواب عن سؤال واحد من هذه. والجدول لا يبين أن الاستراتيجيات تتراكب: التحكم ثلاثي العناصر في الدرم تعاقبي وتغذية أمامية معًا، والاحتراق نسبة وانتقاء معًا، فلا تختر واحدة وتغلق الباب. والخطأ الأكثر كلفة تشخيص «حلقة بطيئة» بأنها زمن ميت فتُضاف كتلة تعويض، والسبب صمام ملتصق أو ترشيح مبالغ فيه كان إصلاحه أرخص من أي بنية.

قبل أي استراتيجية: كل ما في هذا الفصل مبني على حلقات أساسية سليمة: صمام بلا التصاق ولا منطقة ميتة كبيرة (القسم 15.13)، وقياس صحيح الترشيح، ومتحكمات مضبوطة (الفصل 18). والاستراتيجية المتقدمة فوق حلقة مريضة لا تعالجها، بل تخفي عطلها وتضيف تعقيدًا. ولذلك يبدأ كل مشروع تحسين بمراجعة أداء الحلقات الموجودة (الفصل 40).

الشكل 41-1: *البنى الأربع الأكثر استعمالًا برموز مخطط الأنابيب والأجهزة: (أ) التعاقبي: متحكم الحرارة يعطي نقطة ضبط لمتحكم تدفق البخار؛ (ب) التغذية الأمامية: قياس تدفق المنتج الداخل يمر بكتلة تقديم وتأخير ويُجمع مع خرج متحكم الحرارة؛ (ج) النسبة: التدفق الحر A مضروبًا في النسبة R يصير نقطة ضبط التدفق B؛ (د) الانتقاء: متحكما الحمل وحد حرارة العادم إلى كتلة اختيار الأدنى، والخرج المختار يعود إلى تكامل كل منهما.*

◆ ◆ ◆

41.2 التحكم التعاقبي (Cascade Control)

الفكرة: متحكمان متداخلان. **المتحكم الرئيسي (Primary / Master)** يقيس المتغير الذي يهمنا فعلًا (حرارة المنتج مثلًا)، ولا يحرك الصمام، بل يعطي خرجه **نقطة ضبط** لمتحكم ثانٍ. و**المتحكم الثانوي (Secondary / Slave)** يقيس متغيرًا وسيطًا أسرع (تدفق البخار)، ويحرك الصمام ليبقي هذا المتغير عند ما يطلبه الرئيسي (الشكل 41-1أ).

فإذا هبط ضغط البخار قل التدفق عند الفتحة نفسها، فيراه المتحكم الثانوي خلال ثوانٍ ويفتح الصمام، قبل أن تتأثر الحرارة إلا قليلًا. أما الحلقة الواحدة فلا ترى هبوط الضغط إلا بعد أن يمر أثره في المبادل كله وتنخفض الحرارة.

شروط نجاح التعاقبي:

1. **الاضطراب يدخل الحلقة الداخلية.** التعاقبي يعالج الاضطرابات التي يراها المتغير الثانوي فقط: ضغط البخار في المثال. أما تغير تدفق المنتج فلا يراه متحكم التدفق، ويبقى على الرئيسي وحده (أو على التغذية الأمامية، القسم 41.3).
2. **الحلقة الداخلية أسرع كثيرًا من الخارجية.** القاعدة العملية أن يكون الثابت الزمني للحلقة الداخلية المغلقة أصغر من الخارجية بثلاث إلى خمس مرات على الأقل، وكلما زاد الفرق كان أفضل. فإن تقاربتا تفاعلتا وتذبذبتا معًا.
3. **المتغير الثانوي مقاس بموثوقية.** إذا فسد قياس التدفق فسدت الحلقتان، ولذلك تُعرّف حالة القياس السيئ وما يحدث عندها (القسم 41.12).

أمثلة شائعة للتعاقبي:

جدول: أزواج تعاقبية نموذجية

الرئيسي (الخارجي)	الثانوي (الداخلي)	الاضطراب الذي يرفضه الثانوي	أين يوجد
حرارة مخرج مبادل أو فرن	تدفق البخار أو الوقود	تغير ضغط التغذية أو قيمتها الحرارية	المبادلات، والأفران، والمراجل
مستوى وعاء	تدفق السائل الخارج	تغير الضغط في المصب	فواصل الإنتاج، وأبراج التقطير
حرارة مفاعل	حرارة سائل التبريد في الغلاف	تغير حرارة ماء التبريد الداخل	المفاعلات الكيميائية

الرئيسي (الخارجي)	الثانوي (الداخلي)	الاضطراب الذي يرفضه الثانوي	أين يوجد
مستوى درم المرجل	تدفق ماء التغذية	تغير ضغط مضخات التغذية (مع تغذية أمامية من تدفق البخار)	التحكم ثلاثي العناصر (القسم 36.7.1)
تدفق عبر صمام	موضع ساق الصمام	الاحتكاك وتغير القوى على الساق	الموضع نفسه حلقة داخلية (القسم 15.9)
ضغط الشفط في ضاغط	سرعة الضاغط	تغير الحمل على المحرك أو التوربين	الضواغط (الفصل 35)

كيف أختار؟ القاعدة: المتغير الثانوي هو أقرب قياس سريع إلى مدخل الاضطراب على مسار العنصر النهائي، لا أي قياس متاح؛ فتدفق البخار يرى ضغط البخار، وحرارة الغلاف ترى ماء التبريد. والجدول لا يبين نسبة السرعتين، وهي شرط البنية: داخلية ليست أسرع بثلاث إلى خمس مرات تعطي حلقتين تتذبذبان معًا. والخطأ الأكثر كلفة اختيار ثانوي بقياس غير موثوق أو بطيء (تدفق مضطرب أو حرارة بغمد ثقيل)، فيفسد القياس الحلقتين وتُترك الداخلية في الوضع الآلي إلى الأبد.

والمثال قبل الأخير في الجدول يوضح أن التعاقبي موجود في أغلب الحلقات دون أن ننتبه: فالموضّع (Positioner) متحكم داخلي يقيس موضع الساق ويصححه، ولذلك يجب أن يكون أسرع من حلقة التدفق التي فوقه. والموضّعات الرقمية الحديثة تحقق ذلك عادة، لكن في الحلقات السريعة جدًا (تدفق السوائل وضغطها) يُراجع زمن استجابة الموضع قبل الحكم على ضبط الحلقة.

الضبط بالترتيب: تُضبط الحلقة الداخلية أولًا وهي في الوضع الآلي بنقطة ضبط محلية، وتُختبر بقفزة في نقطة الضبط. ثم تُحوَّل إلى الوضع التعاقبي (CAS)، ويُعامل المتحكم الرئيسي الحلقة الداخلية المغلقة على أنها جزء من العملية: تُجرى تجربة القفزة على خرج الرئيسي (أي على نقطة ضبط الداخلية)، ويُستخرج النموذج (الكسب والثابت الزمني

والزمن الميت) ويُضبط بالطريقة نفسها (القسم 18.7). وكثيرًا ما تكفي الحلقة الداخلية بفعل تناسبي تكاملي سريع، وبعضها بتناسبي وحده، لأن الرئيسي يزيل أي انحراف باقٍ.

مثال محلول (تعاقبي على مسخن بالبخار، الشكل 41-2):

- **المعطيات:** حرارة مخرج مسخن نقطة ضبطها 150 °C. نموذج الحرارة من تدفق البخار: كسب 1.2 °C لكل 1% من مدى التدفق، وثابت زمني 60 s، وزمن ميت 8 s. التدفق يتبع فتحة الصمام بثابت زمني 3 s. وعند الزمن 60 s يهبط ضغط البخار فيصير التدفق عند الفتحة نفسها 80% مما كان.
- **الافتراضات:** الحلقة الواحدة (PI) مضبوطة بطريقة SIMC بمعامل λ مساوٍ للزمن الميت: الكسب 2.7 وزمن التكامل 61.5 s. وفي التعاقبي: الداخلية (PI) بكسب 1.2 وزمن تكامل 3 s، والخارجية بكسب 2.38 وزمن تكامل 60 s. والنتائج من محاكاة عددية للنموذج نفسه.
- **الحل بالوحدات:**
  - **الحلقة الواحدة:** يهبط تدفق البخار إلى نحو 40% قبل أن تتحرك الحلقة، وتنخفض الحرارة إلى 146.6 °C، أي بانحراف أقصى 3.4 °C. ولا تعود إلى ±0.1 °C إلا بعد نحو 320 s. ومجموع الخطأ المطلق (IAE) نحو 285 °C·s.
  - **التعاقبي:** يرى متحكم التدفق النقص فورًا فيفتح الصمام. فلا يهبط التدفق تحت 46%، وأقصى انحراف في الحرارة 0.5 °C، ومجموع الخطأ المطلق نحو 20 °C·s، أي أقل بأربع عشرة مرة.
  - **الحالة النهائية في الحالتين:** فتحة الصمام تستقر عند 62.5% لتعطي التدفق الأصلي نفسه (0.8 ÷ 50).
- **معنى النتيجة:** التعاقبي لم يغير الحالة النهائية، بل غيّر **من يصحح ومتى**. فالاضطراب صُحح في الحلقة التي تراه أولًا. ولو كان الاضطراب تغيرًا في تدفق المنتج لما تحسن شيء بالتعاقبي، لأن متحكم التدفق لا يراه.

الشكل 41-2: *هبوط ضغط البخار (قيم محاكاة): أعلى: حرارة المخرج بحلقة واحدة (انحراف أقصى 3.4 °C) وبالتعاقبي (0.5 °C)؛ أسفل: تدفق البخار في الحالتين، وفتحة الصمام في التعاقبي تقفز فورًا لتستقر عند 62.5%.*

أخطاء التنفيذ الخاصة بالتعاقبي:

- **الحلقة الداخلية ليست في الوضع التعاقبي.** بعد صيانة أو تدخل يدوي تبقى الداخلية في الوضع الآلي بنقطة ضبط محلية ثابتة، فيحسب الرئيسي ويتكامل دون أن يصل خرجه إلى شيء. والحل: أن يتبع الرئيسي في هذه الحالة (تتبع نقطة الضبط أو القيمة المقاسة للداخلية)، وأن تُظهر الشاشة حالة «التعاقب مفتوح».
- **تشبع الرئيسي حين تتشبع الداخلية.** إذا بلغ الصمام 100% بقيت الداخلية تحت نقطة ضبطها، وظل الرئيسي يرفع نقطة الضبط بلا فائدة، فيتشبع تكامله

ويتأخر عند العودة. والحل: أن يعرف الرئيسي حالة التشبع من الداخلية فيوقف تكامله، أو أن يأخذ تكامله القيمة الفعلية للداخلية (Back-Calculation / External Reset Feedback)، كما في (القسم 18.3).

- **عدم تطابق المدى.** خرج الرئيسي 0–100% يجب أن يُحوَّل إلى مدى نقطة ضبط الداخلية بوحداتها (مثلًا 0–20 t/h)، مع حدود دنيا وعليا لنقطة الضبط تمنع طلب ما لا يجوز.

◆ ◆ ◆

41.3 التغذية الأمامية (Feedforward Control)

الفكرة: إذا كان الاضطراب الرئيسي **يُقاس**، فلماذا ننتظر أثره؟ التغذية الأمامية تقيس الاضطراب، وتحسب ما يلزم من تغيير في العنصر النهائي لإلغاء أثره، وتطبقه فورًا. فزيادة تدفق المنتج الداخل إلى المسخن تعني حاجة إلى بخار أكثر، ويُعرف مقدار الزيادة من موازنة الطاقة قبل أن تنخفض الحرارة (الشكل 41-1ب).

لماذا لا تعمل التغذية الأمامية وحدها؟ لأنها بلا تغذية راجعة لا ترى نتيجة عملها. فأي خطأ في النموذج، أو أي اضطراب لم يُقس (تلوث المبادل، أو تغير حرارة المنتج الداخل، أو خطأ في مقياس التدفق)، يبقى انحرافًا دائمًا. ولذلك تُجمع دائمًا مع متحكم تغذية راجعة: **الأمامية تعالج معظم الاضطراب المقاس بسرعة، والراجعة تصحح ما بقي وما لم يُقس.**

مكونات التغذية الأمامية:

1. **الكسب الساكن:** كم يلزم من المتغير المتحكم به لكل وحدة من الاضطراب؟ ويؤخذ من موازنة كتلة أو طاقة، أو من تجربة: قفزة في الاضطراب وقفزة في الخرج، ونسبة الكسبين هي كسب التغذية الأمامية (Kd ÷ Ku−).
2. **التعويض الديناميكي:** إذا كان أثر الاضطراب في المتغير أسرع من أثر الصمام، فإن الكسب الساكن وحده يصل متأخرًا. وتُستعمل كتلة **تقديم وتأخير (Lead-**

(Lag زمن التقديم فيها يساوي الثابت الزمني لمسار الصمام، وزمن التأخير يساوي الثابت الزمني لمسار الاضطراب. وإذا كان الزمن الميت لمسار الاضطراب أطول من مسار الصمام، يُضاف تأخير زمني بالفرق. أما إذا كان أقصر فلا يمكن إلغاؤه، لأن ذلك يتطلب أن يتحرك الصمام قبل أن يقع الاضطراب.

3. **نقطة الجمع:** يُجمع خرج الأمامية مع خرج الراجعة (جمعًا في أغلب الحالات، أو ضربًا حين يتغير كسب العملية مع الحمل). ويُطبَّق **الانحراف** عن قيمة التصميم لا القيمة المطلقة، أو يُهيأ التكامل عند التشغيل، حتى لا يقفز الصمام حين تُفعَّل الأمامية.

مثال محلول (الكسب الساكن من موازنة الطاقة):

- **المعطيات:** ماء يُسخن من 30 إلى 80 °C بتدفق 10 kg/s، والحرارة النوعية 4.18 kJ/(kg·K)، والتسخين ببخار مشبع عند 6 bar مطلق، حرارته الكامنة نحو 2086 kJ/kg.
- **الافتراضات:** يتكاثف البخار كله ويخرج المتكاثف مشبعًا (يُهمل التبريد الزائد)، وتُهمل مفاقيد الحرارة.
- **الحل بالوحدات:**
  - الحمل الحراري = 10 × 4.18 × 50 = 2090 kW.
  - تدفق البخار = 2090 ÷ 2086 = 1.00 kg/s، أي نحو 3.6 t/h.
  - كسب التغذية الأمامية = 4.18 × 50 ÷ 2086 = 0.100 kg من البخار لكل 1 kg من الماء.
  - فإذا زاد تدفق الماء بمقدار 2 kg/s، تضيف التغذية الأمامية فورًا 0.20 kg/s من البخار (0.72 t/h).
- **معنى النتيجة:** الكسب محسوب من الفيزياء لا من التجربة، وهو صحيح عند كل حمل ما دامت حرارتا الدخول والخروج ثابتتين. أما المفاقيد والتلوث فيصححها المتحكم الراجع. ولو تغيرت حرارة الماء الداخل كثيرًا،

لكان الأفضل أن تقيسها التغذية الأمامية أيضًا (الكسب يتناسب مع فرق الحرارة).

مثال محلول (أثر التعويض الديناميكي، الشكل 41-3):

- **المعطيات:** مسار صمام البخار إلى الحرارة: كسب 1.0 °C لكل 1%، وثابت زمني 50 s، وزمن ميت 10 s. مسار تدفق المنتج إلى الحرارة: كسب −0.5 °C لكل 1%، وثابت زمني 30 s، وزمن ميت 4 s. وعند 60 s يزيد تدفق المنتج 20%، فلو لم يتحرك الصمام لانخفضت الحرارة 10 °C.
- **الافتراضات:** المتحكم الراجع PI بكسب 2.5 وزمن تكامل 50 s في الحالات الثلاث. والنتائج من محاكاة عددية.
- **الحل بالوحدات:**
  - **الراجعة وحدها:** أقصى انحراف 4.2 °C، ومجموع الخطأ المطلق نحو 200 °C·s.
  - **مع تغذية أمامية ساكنة** (كسب 0.5% من فتحة الصمام لكل 1% من التدفق، أي +10% فورًا): 2.2 °C، و102 °C·s.
  - **مع تقديم وتأخير** (تقديم 50 s وتأخير 30 s): 1.8 °C، و50 °C·s، ويستقر أسرع.
  - **الحالة النهائية في الثلاث:** الصمام عند 60%.
- **معنى النتيجة:** الأمامية قسمت الانحراف على اثنين تقريبًا، والتعويض الديناميكي خفض الخطأ المتراكم إلى الربع. لكنها لم تلغه، لأن الاضطراب يصل إلى الحرارة بعد 4 s والبخار بعد 10 s، ولا تستطيع أي حسابات أن تعوض هذه الثواني الست. فحدود التغذية الأمامية تحددها الفيزياء: كلما كان مسار الصمام أسرع من مسار الاضطراب كانت أنجح.

الشكل 41-3: *زيادة تدفق المنتج 20% (قيم محاكاة): أعلى: حرارة المخرج بالراجعة وحدها (انحراف أقصى 4.2 °C)، ومع أمامية ساكنة (2.2 °C)، ومع أمامية بتقديم وتأخير (1.8 °C)؛ أسفل: فتحة صمام البخار: الأمامية تحرك الصمام لحظة تغير الحمل، والتقديم والتأخير يزيد الحركة الأولى ثم يعيدها.*

تطبيقات مشهورة: التحكم ثلاثي العناصر في درم المرجل، وفيه تدفق البخار تغذية أمامية لتدفق ماء التغذية (القسم 36.7.1). والتحكم بحرارة الأفران بقياس تدفق الشحنة. وتحكم الأمونيا أو المواد الكيميائية بقياس تدفق الغاز أو الماء المعالج. وفي التوربينات الغازية يُستعمل طلب الحمل تغذية أمامية للوقود قبل أن تتغير السرعة (الفصل 34).

◆ ◆ ◆

41.4 التحكم بالنسبة (Ratio Control)

الفكرة: في كثير من العمليات لا يهم تدفق مادة بحد ذاته، بل **نسبته إلى تدفق آخر**: الوقود إلى الهواء، والمادة المضافة إلى المنتج، والماء إلى الإسمنت، والمرتجع (Reflux) إلى المنتج العلوي في برج التقطير. فيُسمى أحد التدفقين **الحر (Wild)** لأنه لا يُتحكم به هنا (يحدده الحمل أو وحدة أخرى)، ويُتحكم بالآخر ليتبعه.

طريقتا التنفيذ:

1. **الضرب (المفضلة):** قياس التدفق الحر يُضرب في النسبة R، والناتج نقطة ضبط لمتحكم التدفق الثاني (الشكل 41-1ج). فالحلقة حلقة تدفق عادية، وكسبها لا يتغير.
2. **القسمة:** تُحسب النسبة الفعلية A ÷ B وتُجعل هي القيمة المقاسة لمتحكم نسبة. وهذه الطريقة أسهل للمشغل في القراءة، لكن كسب الحلقة يتغير عكسيًا مع A: فعند الأحمال المنخفضة يكبر الكسب وقد تتذبذب الحلقة، وعند A قريب من الصفر تصير القسمة غير معرّفة. ولذلك يُفضَّل الضرب، وتُعرض النسبة الفعلية للمشغل عرضًا فقط.

مثال محلول (تحويل النسبة إلى نسبة مئوية من المدى):

- **المعطيات:** التدفق الحر A بمرسل مداه 0–200 m³/h، والتدفق المتحكم به B بمرسل مداه 0–50 m³/h، والمطلوب B = 0.2 × A.
- **الافتراضات:** الإشارتان خطيتان مع التدفق (إن كان القياس بالضغط التفاضلي فقد استُخرج الجذر التربيعي قبل كتلة النسبة، القسم 8.2).
- **الحل بالوحدات:**
  - إذا عملت الكتلة بالوحدات الهندسية فالنسبة 0.2 كما هي.
  - إذا عملت بالنسبة المئوية من المدى:

$$\mathrm{B\%} = 0.2 \times \mathrm{A} \times (100 \div 50)$$

- $B\% = 0.2 \times (A\% \times 200 \div 100) \times (100 \div 50)$
- $B\% = 0.8 \times A\%$.
  - فالنسبة التي تُكتب في الكتلة **0.8** لا 0.2.
  - التحقق: A = 150 m³/h (أي 75%) → B% = 0.8 × 75 = 60% → B = 0.2 × 150 = 30 m³/h.

- **معنى النتيجة:** أكثر أخطاء التحكم بالنسبة شيوعًا ليس في المتحكم، بل في مديات المرسلات: نسبة صحيحة هندسيًا تُكتب في كتلة تعمل بالنسبة المئوية فيخرج الخليط بعيدًا عن المطلوب. وأي تغيير لاحق في مدى أحد المرسلين يغير النسبة الفعلية دون أن يتغير الرقم في الكتلة.

التقييد المتقاطع في الاحتراق (Cross-Limiting): في المراجل والأفران لا يكفي أن تكون النسبة صحيحة في الحالة المستقرة، بل يجب ألا يزيد الوقود على الهواء المتاح **أثناء تغير الحمل**. فمروحة الهواء ومخمداتها أبطأ عادة من صمام الوقود، فإذا ارتفع الطلب ارتفع الوقود أولًا، ونقص الهواء لحظيًا، فيتكون أول أكسيد الكربون ووقود غير محترق قد يشتعل في مسالك الغاز. والحل **التقييد المتقاطع المزدوج (Double Cross-Limiting)**، وهو ممارسة قياسية في تحكم الاحتراق (R44):

- **نقطة ضبط الوقود** = الأدنى بين طلب الحمل والوقود الذي يسمح به **الهواء المقاس فعلًا**.
- **نقطة ضبط الهواء** = الأعلى بين طلب الحمل والهواء الذي يحتاجه **الوقود المقاس فعلًا**.

فعند زيادة الحمل يسبق الهواء ويتبعه الوقود، وعند النقص ينخفض الوقود أولًا ويتبعه الهواء. والإشارات هنا بعد تحويلها إلى المقياس نفسه، بحيث يعني 100% من الهواء الكمية المطلوبة لـ 100% من الوقود مع الهواء الزائد المصمم.

مثال محلول (أثر التقييد المتقاطع، الشكل 41-4):

- **المعطيات:** يقفز طلب الحمل من 50% إلى 80% ثم يعود. حلقة الوقود بثابت زمني 2 s، وحلقة الهواء بثابت زمني 8 s.
- **الحل (محاكاة):**
  - **بلا تقييد:** يصل الوقود إلى الطلب بسرعة ويتأخر الهواء، فتنزل نسبة الهواء المتاح إلى المطلوب حتى **81%** بعد نحو 3 s من القفزة. وهذا احتراق ناقص الهواء، وإن كان قصيرًا.
  - **بالتقييد المتقاطع:** لا تنزل النسبة عن 100% في أي لحظة. والثمن أن الوقود يصل إلى الحمل الجديد بسرعة الهواء، أي أبطأ.
  - **وعند خفض الحمل:** تزيد نسبة الهواء مؤقتًا في الحالتين، وهذا فاقد كفاءة قصير لا خطر فيه.
- **معنى النتيجة:** سرعة الاستجابة للحمل تُقايَض بالسلامة. وتحدد حدود التقييد (والهواء الزائد الأدنى) بالتنسيق مع مهندس الاحتراق وصانع الحارق، مع بقاء حمايات إدارة الحارقات (BMS) مستقلة عن هذا التحكم.

الشكل 41-4: *قفزة الحمل من 50% إلى 80% ثم عودته (قيم محاكاة): (أ) بلا تقييد متقاطع يسبق الوقود الهواء، فتنزل نسبة الهواء المتاح إلى المطلوب إلى 81%؛ (ب) بالتقييد المتقاطع المزدوج يسبق الهواء صعودًا ويتأخر نزولًا، فلا تنزل النسبة عن 100%.*

◆ ◆ ◆

41.5 تقسيم المدى (Split Range) وتحكم موضع الصمام (Valve Position Control)

تقسيم المدى: خرج متحكم واحد يُوزع على عنصرين نهائيين أو أكثر، لكل منهما جزء من مدى الخرج (القسم 20.11). وله ثلاثة استعمالات:

1. **عنصران متعاكسان على المتغير نفسه:** صمام تبريد وصمام تسخين على حرارة مفاعل، أو صمام إدخال نيتروجين وصمام تنفيس على ضغط غطاء خزان (Blanketing).

2. **عنصران في الاتجاه نفسه لتوسيع المدى:** صمام صغير يعمل عند التدفقات المنخفضة بدقة، ثم يفتح صمام كبير حين يمتلئ الصغير.
3. **صمام وعنصر آخر على التسلسل:** مثل صمام إعادة التدوير ثم تشغيل مضخة إضافية، أو مخمد مروحة ثم تغيير سرعتها.

الشكل 41-5: *ثلاثة أشكال لتقسيم المدى: (أ) تبريد وتسخين بتقسيم متساوٍ حول فجوة 48–52% لا يعمل فيها أي صمام؛ (ب) تقسيم غير متساوٍ: التبريد 300 kW على 0–75% والتسخين 100 kW على 75–100%، فيبقى الميل 4 kW لكل 1% من الخرج في المدى كله؛ (ج) صمام صغير 10 Cv على 0–10% ثم صمام كبير 90 Cv على 10–100%، فيبقى مجموع Cv خطيًا مع الخرج. والرسوم تفترض خاصية مركبة خطية لكل صمام.*

ثلاث قضايا تصميمية لا تظهر في الرسم البسيط:

- **الكسب يتضاعف:** صمام يتحرك من 0 إلى 100% على نصف مدى الخرج كسبه ضعف كسب صمام على المدى كله. فإذا نُقلت معاملات الضبط من حلقة بصمام واحد، صارت الحلقة أعنف بمقدار الضعف.
- **الكسب يختلف بين الجزأين:** إذا كانت سعة صمام التسخين غير سعة صمام التبريد، فكسب العملية يقفز عند نقطة التقسيم، فتكون الحلقة مضبوطة في جزء وعنيفة أو بطيئة في الآخر. والحل تقسيم المدى بنسبة السعة (الشكل 41-5ب)، أو جدولة الكسب (القسم 41.9).
- **الفجوة والتداخل:** فجوة صغيرة حول نقطة التقسيم تمنع عمل الصمامين معًا، وهو هدر للطاقة (تسخين وتبريد في آن) أو للنيتروجين. لكن الفجوة الكبيرة منطقة ميتة يتأرجح فيها المتغير. والتداخل المقصود يُستعمل حين يكون الانتقال بلا انقطاع أهم من الهدر.

مثال محلول (تقسيم بحسب السعة):

- **المعطيات:** مفاعل بسعة تبريد 300 kW وسعة تسخين 100 kW.
- **الافتراضات:** خاصية مركبة خطية لكل صمام (القسم 15.3).
- **الحل بالوحدات:**
  - **بتقسيم متساوٍ** (0–50% و50–100%): التبريد = 50 ÷ 300 = 6 kW لكل 1% من الخرج، والتسخين 2 kW = 50 ÷ 100 لكل 1%. فكسب العملية في جزء التبريد ثلاثة أضعافه في جزء التسخين.
  - **بتقسيم بحسب السعة** (0–75% و75–100%): التبريد ÷ 300 = 4 kW = 75 لكل 1%، والتسخين 4 kW = 25 ÷ 100 لكل 1%. فالكسب واحد في المدى كله.
- **معنى النتيجة:** نقطة التقسيم ليست 50% بالضرورة. ونقطة «لا تسخين ولا تبريد» صارت عند 75% من الخرج، وهذا يُكتب في وصف التحكم ويُعرض

> للمشغل حتى لا يظن أن الخرج 70% يعني تسخينًا.

التنفيذ في النظام: الطريقة القديمة كانت معايرة موضّعي الصمامين على نصفي الإشارة نفسها (4–12 mA و12–20 mA) من مخرج تناظري واحد. والأفضل اليوم أن يكون لكل صمام مخرج تناظري مستقل، ويُقسم المدى في برنامج النظام بكتل تحويل. فبذلك يُختبر كل صمام وحده، وتُقرأ تشخيصات كل موضّع، ولا يفقد عطل مخرج واحد التحكم بالصمامين معًا، ويُحدد وضع الفشل لكل صمام بحسب وظيفته.

تحكم موضع الصمام (VPC) بديلًا عن تقسيم المدى: حين يكون المطلوب دقة الصمام الصغير وسعة الكبير معًا، يُستعمل ترتيب آخر يسمى أيضًا «التحكم بالمدى المتوسط (Mid-Ranging)». فيحرك المتحكم الرئيسي **الصمام الصغير السريع** وحده. ويقيس متحكم ثانٍ بطيء **موضع الصمام الصغير**، ونقطة ضبطه نحو 50%، ويحرك **الصمام الكبير** ببطء ليعيد الصغير إلى منتصف مداه. فتصحح الاضطرابات السريعة بالصمام الصغير، ويحمل الكبير الحمل الأساسي. والشرط أن يكون متحكم الموضع أبطأ كثيرًا من الحلقة الرئيسية، وإلا تعارك الصمامان. ويُستعمل الترتيب نفسه لإبقاء صمام تحكم بعيدًا عن حده، بتعديل نقطة ضبط ضغط أو سرعة مضخة (توفير طاقة).

◆ ◆ ◆

41.6 التحكم الانتقائي (Override / Selective Control) وحدود التشغيل

الفكرة: عنصر نهائي واحد عليه أكثر من هدف. صمام الوقود في توربين غازي مطلوب منه أن يحقق الحمل، وألا تتجاوز حرارة العادم حدها، وألا يتجاوز التسارع حده. ومضخة مطلوب منها تدفق معين، وألا يتجاوز ضغط الطرد حدًا، وألا يتجاوز تيار المحرك حدًا. فلكل هدف متحكم، وتجمع مخارجها **كتلة اختيار الأدنى أو الأعلى**، والمختار هو الذي يحرك العنصر (الشكل 41-1د). ففي التشغيل العادي يسيطر متحكم الهدف الرئيسي،

ويبقى متحكم الحد «احتياطيًا». فإذا اقترب المتغير من حده انخفض طلب متحكم الحد، فيختاره الانتقاء ويسيطر حتى يزول القيد.

أي الاختيارين؟ يُسأل: في أي اتجاه يُفرض القيد؟ إذا كان القيد يمنع **زيادة** الخرج (حد حرارة، حد تيار، حد ضغط طرد أعلى)، فالاختيار **الأدنى (Low Select)**. وإذا كان يمنع **نقصه** (حد تدفق أدنى لحماية مضخة، أو حد مستوى أدنى)، فالاختيار **الأعلى (High Select)**. ومثاله في الضواغط: صمام إعادة التدوير يفتحه متحكم ضغط الشفط أو متحكم منع الانفصال الهوائي، أيهما طلب فتحًا أكبر، فيُختار الأعلى (الفصل 35).

الشرط الحاسم: منع تشبع المتحكم غير المختار. المتحكم الذي لا يسيطر لا يرى أثر خرجه، لأن خرجه لا يصل إلى العنصر. فإذا كان متحكم PI عاديًا، ظل تكامله يتراكم ما دام متغيره بعيدًا عن حده، حتى يبلغ 100%. فإذا جاء الوقت الذي يُحتاج فيه، احتاج زمنًا طويلًا ليفك تشبعه وينزل تحت خرج المتحكم المسيطر. وفي هذا الزمن يتجاوز المتغير حده. والعلاج المعتمد **التغذية الراجعة الخارجية للتكامل (External Reset Feedback)**: يُبنى تكامل كل متحكم على **الخرج المختار فعلًا** لا على خرجه هو. فيبقى خرج المتحكم غير المسيطر أعلى من الخرج الفعلي بمقدار فعله التناسبي فقط، ويستلم السيطرة لحظة يحتاج إليها.

مثال محلول (حد حرارة العادم، الشكل 41-6):

- **المعطيات:** متحكم حمل (PI بكسب 0.8 وزمن تكامل 8 s) ومتحكم حد حرارة العادم (PI بكسب 0.6 وزمن تكامل 12 s ونقطة ضبط 560 °C)، واختيار الأدنى إلى صمام الوقود. الحمل يتبع الوقود بثابت زمني 8 s. وحرارة العادم تساوي 3.2 + 400 × الحمل (°C)، مع ثابت زمني 12 s. وعند 150 s تُرفع نقطة ضبط الحمل من 40% إلى 60%، وهذا يتطلب 592 °C، فيجب أن يوقفه الحد عند 50%.
- **الحل (محاكاة):**
  - **دون تغذية راجعة خارجية:** قبل القفزة كان خرج متحكم الحرارة

مشبعًا عند 100%، لأن الحرارة 528 °C، أي تحت الحد بـ 32 °C منذ بداية التشغيل. فلم يستلم السيطرة إلا بعد 42 s من القفزة. وفي هذا الوقت وصل الحمل إلى نحو 60%، وبلغت الحرارة **586 °C**، أي تجاوزت الحد 26 °C، وبقيت فوقه نحو 68 s.

- **مع التغذية الراجعة الخارجية:** كان خرج متحكم الحرارة قبل القفزة أعلى من الخرج الفعلي بقدر فعله التناسبي فقط (نحو 59% مقابل 40%). فاستلم السيطرة بعد 12 s، وبلغت الحرارة **566 °C**، أي تجاوزًا قدره 6 °C لنحو 23 s، سببه تأخر قياس الحرارة نفسه.
- **الحالة النهائية في الحالتين:** الحمل 50% والحرارة 560 °C.

- **معنى النتيجة:** البنية واحدة والضبط واحد، والفرق كله في وصلة واحدة من الخرج المختار إلى تكامل المتحكمين. ولو كان هناك فصل حماية عند 580 °C لفصلت الوحدة في الحالة الأولى ولم تفصل في الثانية.

الشكل 41-6: *حد حرارة العادم باختيار الأدنى (قيم محاكاة) بعد رفع نقطة ضبط الحمل من 40% إلى 60% عند 150 s. أعلى: الحرارة تتجاوز الحد 26 °C دون تغذية راجعة خارجية، و6 °C معها؛ وسط: خرج متحكم الحرارة مشبع عند 100% في الحالة الأولى فيتأخر نزوله، وقريب من الخرج الفعلي في الثانية؛ أسفل: الحمل يصل إلى 60% ثم يُسحب إلى 50% في الأولى، ويوقفه الحد عند 50% دون تجاوز كبير في الثانية.*

قواعد تصميم الانتقاء:

- **الانتقاء تحكم لا حماية.** متحكم الحد يُبقي التشغيل ضمن الحدود ويقلل الفصل، لكنه لا يحل محل وظيفة السلامة الآلية المستقلة (الفصل 29). وتُختار نقطة ضبط الحد بحيث يعمل قبل إنذار الحد وقبل فصل الحماية بهامش كافٍ.
- **كل متحكم يُضبط وهو مسيطر.** يُختبر متحكم الحد بتقريب المتغير من حده فعلًا أو بمحاكاة، لا بالضبط النظري فقط.
- **المشغل يجب أن يعرف من يسيطر.** تعرض الشاشة المتحكم المختار (مؤشر «الحد نشط»)، ويُسجل الانتقال في المؤرخ. واستمرار الحد نشطًا ساعات علامة على أن نقطة الضبط الرئيسية غير قابلة للتحقيق، ويستحق إنذار إرشاد لا إنذارًا عاجلًا (ISA-18.2).
- **لا يُخلط الانتقاء بين المتحكمات مع انتقاء القياسات.** اختيار الأعلى بين ثلاث حرارات لحماية أسخن نقطة، أو اختيار الوسيط بين ثلاثة مرسلات، هو اختيار إشارة قياس (القسم 20.7). أما هنا فالاختيار بين **مخارج متحكمات**.

◆ ◆ ◆

41.7 التعويض عن الزمن الميت: متنبئ سميث (Smith Predictor)

المشكلة: الزمن الميت أصعب ما في العملية. فالمتحكم لا يرى أثر حركته إلا بعد انقضائه، فإذا كان الكسب عاليًا واصل الحركة قبل أن يرى الأثر فتجاوز. ولذلك تفرض قواعد الضبط كسبًا أصغر كلما كبرت نسبة الزمن الميت إلى الثابت الزمني (θ/τ)، ويصير أداء الحلقة محدودًا بالزمن الميت لا بالضبط. ومن أمثلته: حلقات المحللات التي تأخذ عيناتها عبر خط طويل وتحتاج دقائق لكل قياس، وحلقات السيور الناقلة، وخلط التيارات في خط طويل قبل المرسل.

الحل الأول دائمًا: تقليل الزمن الميت فعليًا. نقل المحلل أو مرسله إلى أقرب نقطة ممكنة، وتسريع نظام أخذ العينة بخط تدوير سريع (Fast Loop)، وتقليل فترة المسح في النظام والترشيح الزائد. فكل ثانية تُزال من الزمن الميت تحسّن الحلقة أكثر من أي خوارزمية.

فكرة متنبئ سميث: إذا كان عندنا نموذج للعملية (كسب وثابت زمني وزمن ميت)، يمكن للمتحكم أن يرى **ما ستكون عليه** القيمة المقاسة بعد انقضاء الزمن الميت. فيحسب النظام قيمتين من النموذج: الاستجابة دون زمن ميت، والاستجابة بالزمن الميت. ويُغذى المتحكم بالقيمة المقاسة مضافًا إليها الفرق بينهما. فإذا كان النموذج صحيحًا، رأى المتحكم عملية بلا زمن ميت، وأمكن ضبطه بكسب أعلى. ويُصحح الفرق بين القياس والنموذج المتأخر أخطاء النموذج والاضطرابات. وكثير من أنظمة التحكم الموزع فيها كتلة جاهزة بهذا الاسم أو باسم «معوض الزمن الميت (Dead-Time Compensator)».

مثال محلول (الشكل 41-7):

- **المعطيات:** عملية بكسب 1.0، وثابت زمني 20 s، وزمن ميت 40 s، أي θ/τ = 2. قفزة في نقطة الضبط 10% عند 10 s، ثم اضطراب حمل عند 300 s.
- **الافتراضات:** المتحكم PI العادي مضبوط بطريقة SIMC مع λ = θ: الكسب = 0.25 = (80 × 1) ÷ 20، وزمن التكامل 20 s. ومتنبئ سميث مع PI مضبوط على العملية دون زمن ميت بثابت مطلوب 10 s: الكسب 2.0، وزمن التكامل 20 s. والنتائج من محاكاة عددية.
- **الحل (محاكاة):**
  - **PI وحده:** تجاوز 4%، ويستقر ضمن ±2% بعد نحو 242 s من القفزة.
  - **سميث بنموذج صحيح:** بلا تجاوز، ويستقر بعد نحو 79 s، أي الزمن الميت 40 s مضافًا إليه أربعة أمثال الثابت المطلوب تقريبًا.
  - **سميث والزمن الميت الفعلي أطول من النموذج بـ 25%** (50 s بدل 40 s): تجاوز 35% وتذبذب، ويستقر بعد نحو 290 s، أي أسوأ من PI العادي.
  - **رفض اضطراب الحمل:** الانحراف الأقصى متقارب في الحالات كلها (نحو 4.4%)، لأن أثر الاضطراب لا يُرى إلا بعد الزمن الميت

في كل الأحوال. ويعود سميث أسرع قليلًا.

- **معنى النتيجة:** متنبئ سميث يحسن الاستجابة لتغيير نقطة الضبط كثيرًا ما دام النموذج صحيحًا، وخاصة الزمن الميت. لكنه حساس لخطأ الزمن الميت. فإذا كان الزمن الميت يتغير مع الحمل (وهو الغالب حين يكون سببه نقل المادة: زمن النقل = الحجم ÷ التدفق)، يجب أن يتغير النموذج معه، أو يُضبط المتحكم بحذر. وفي كثير من الحلقات يكون PI مضبوطًا بطريقة لامدا المحافظة أكثر متانة وأسهل صيانة.

الشكل 41-7: *عملية زمنها الميت ضعف ثابتها الزمني (قيم محاكاة): PI وحده يستقر في 242 s؛ متنبئ سميث بنموذج صحيح يستقر في 79 s دون تجاوز؛ وإذا كان الزمن الميت الفعلي أطول من النموذج بـ 25% تجاوز 35% وتذبذب. وعند اضطراب الحمل (300 s) لا يتحسن الانحراف الأقصى كثيرًا.*

◆ ◆ ◆

41.8 التفاعل بين الحلقات وفك الارتباط (Interaction and Decoupling)

المشكلة: في وحدة فيها متغيران يتحكم بهما صمامان، قد يؤثر كل صمام في المتغيرين معًا. فخلاط ماء حار وماء بارد يُتحكم فيه بالتدفق الكلي والحرارة: فتح صمام الماء الحار يرفع التدفق والحرارة معًا. فإذا صححت حلقة الحرارة حركت التدفق، فتصحح حلقة التدفق فتحرك الحرارة، وقد تتذبذب الحلقتان وكل منهما مضبوطة جيدًا وحدها.

مصفوفة الكسب النسبي (Relative Gain Array – RGA): أداة بسيطة لاختيار الأزواج: أي صمام يتحكم بأي متغير. ولمسألة من متغيرين وصمامين، بكسوب ساكنة K11 (المتغير 1 من الصمام 1) وK12 وK21 وK22، يُحسب:

$$\lambda 11 = 1 \div (1 - K12 \times K21 \div (K11 \times K22))$$

وتُقرأ النتيجة هكذا:

- **λ11 قريب من 1:** الزوج (1 مع 1، و2 مع 2) مناسب، والتفاعل ضعيف.
- **قريب من 0:** الأزواج المعاكسة (1 مع 2، و2 مع 1) هي الصحيحة.
- **0.5:** تفاعل شديد في أي اختيار.
- **سالب:** لا يُستعمل هذا الزوج أبدًا، لأن فتح الحلقة الأخرى أو إغلاقها يعكس اتجاه الأثر.

مثال محلول (خلاط ماء حار وبارد):

- **المعطيات:** ماء حار 80 °C وماء بارد 20 °C، والتدفق الكلي المطلوب 100 m^3/h.
- **الافتراضات:** الخلط كامل، والكثافة والحرارة النوعية ثابتتان. فالتدفق F = F1 + F2، والحرارة T = (80 F1 + 20 F2) ÷ F.
- **الحل بالوحدات:**
  - من التفاضل: ∂F = ∂F1 = ∂F/∂F1 = 1، F2

- $\partial T/\partial F1 = (80 - T) \div F$
- $\partial T/\partial F2 = (20 - T) \div F$
  - عند **T = 50 °C** (F1 = F2 = 50 m³/h):
  - $\partial T/\partial F1 = 0.3$ و$\partial T/\partial F2 = -0.3$ °C لكل 1 m³/h.
  - بالأزواج (التدفق مع الحار، والحرارة مع البارد): $\lambda 11 = 1 \div (1 - K12 \times K21 \div (K11 \times K22))$
- $\lambda 11 = 1 \div (1 - 1 \times 0.3 \div (1 \times (-0.3))) = 1 \div 2 = \mathbf{0.5}$
  - التفسير: تفاعل شديد في أي اختيار.
  - عند **T = 70 °C** (F1 = 83.3 و$F2 = 16.7$ m³/h):
  - $\partial T/\partial F1 = 0.1$ و$\partial T/\partial F2 = -0.5$.
  - بالأزواج نفسها: $\lambda 11 = 1 \div (1 + 0.2) =$ **0.83**
  - التفسير: زوج جيد: التدفق الكلي مع التيار الأكبر، والحرارة مع التيار الأصغر.

- **معنى النتيجة:** الأزواج الجيدة تعتمد على نقطة التشغيل. والقاعدة العامة في الخلط: **يُتحكم بالتدفق الكلي بالتيار الأكبر، وبالتركيب أو الحرارة بالتيار الأصغر.** وعند التقارب يصبح الحل تغيير المتغيرات نفسها، لا ضبط الحلقات.

طرق تخفيف التفاعل:

1. **اختيار الأزواج الصحيحة بـ RGA** قبل أي شيء.
2. **فصل السرعات:** تُجعل إحدى الحلقتين أبطأ كثيرًا من الأخرى (ثلاث إلى خمس مرات)، فترى الأسرع الأبطأ كاضطراب بطيء. وهو أبسط الحلول وأكثرها استعمالًا.
3. **تغيير المتغيرات المتحكم بها:** في الخلاط يُحسب طلب التدفق الكلي ونسبة الحار من الكلي، ويُوزعان على الصمامين: F1 = الكلي × النسبة، وF2 = الكلي

× (1 − النسبة). فيحرك متحكم التدفق الكلي، ويحرك متحكم الحرارة النسبة، ويصير التفاعل شبه معدوم.

4. **فك الارتباط (Decoupling):** كتلة ترسل إلى كل صمام تعويضًا عن أثر حركة الصمام الآخر، محسوبًا من كسوب العملية. وهي فعالة ما دام النموذج صحيحًا، وتحتاج صيانة إذا تغيرت الكسوب.

وحين تزيد المتغيرات على اثنين أو ثلاثة، وتكثر القيود، يصبح الحل الأمثل التحكم التنبؤي متعدد المتغيرات (القسم 41.10).

◆ ◆ ◆

41.9 اللاخطية وجدولة الكسب (Gain Scheduling) والتحكم التكيفي

المشكلة: الضبط الذي يُحسب عند حمل معين يفترض أن كسب العملية وثوابتها الزمنية ثابتة. وفي الواقع يتغير كسب العملية مع الحمل: خاصية الصمام المركبة تتغير مع هبوط الضغط (القسم 15.3)، وزمن النقل يقصر كلما زاد التدفق، وكسب حلقة الأس الهيدروجيني (pH) قد يتغير مئات المرات قرب نقطة التعادل. فالحلقة المضبوطة عند 80% حمل قد تكون بطيئة عند 30% أو متذبذبة.

الحلول بالترتيب:

1. **إصلاح السبب الفيزيائي:** اختيار خاصية الصمام الصحيحة (متساوية النسبة أو خطية بحسب هبوط الضغط المتاح) يجعل الكسب المركب ثابتًا تقريبًا، وهذا أرخص من أي حل برمجي.
2. **خط تحويل (Characterizer):** كتلة تحويل على الخرج تعكس لاخطية الصمام، أو على القيمة المقاسة تعكس لاخطية العملية، مثل تحويل قراءة الأس الهيدروجيني إلى «طلب الكاشف» في حلقات المعادلة.
3. **جدولة الكسب:** تُضبط الحلقة عند عدة أحمال، وتُحفظ المعاملات في جدول، ويُختار الكسب (أو يُحسب بالاستيفاء) من متغير يمثل نقطة التشغيل كالحمل أو

التدفق. فإذا كان كسب العملية 2.0%/% عند الحمل المنخفض و0.5%/% عند العالي، وأُريد أن يبقى حاصل ضرب كسب المتحكم في كسب العملية 0.6، يكون كسب المتحكم 0.3 عند الحمل المنخفض و1.2 عند العالي. والشرط أن يتغير متغير الجدولة ببطء نسبة إلى الحلقة، وأن يكون الانتقال بين المعاملات سلسًا.

4. **التحكم التكيفي (Adaptive Control):** متحكم يقدّر نموذج العملية باستمرار من البيانات ويعدل معاملاته. وهو مفيد في العمليات التي يتغير كسبها ببطء وبلا جدول معروف، مثل تلوث المبادلات وتغير المحفزات. لكنه يحتاج إثارة كافية في البيانات، وقد يقدر نموذجًا خاطئًا حين تكون العملية مستقرة طويلًا أو حين يتغير الاضطراب. ولذلك يُستعمل غالبًا لاقتراح المعاملات أو ضمن حدود مقيدة، لا حرًّا بلا إشراف.

◆ ◆ ◆

41.10 من التحكم المتقدم التقليدي إلى التحكم التنبؤي (Model Predictive Control – MPC)

الاستراتيجيات السابقة تُسمى معًا **التحكم التنظيمي المتقدم (Advanced Regulatory Control – ARC)**. وهي تُبنى من كتل موجودة في كل نظام تحكم، ويفهمها المشغل والفني. وحين تتجاوز المسألة قدرتها، أي عدة متغيرات متفاعلة، وعدة قيود يجب احترامها معًا، وهدف اقتصادي بالعمل قرب الحدود، يُستعمل **التحكم التنبؤي بالنموذج (MPC)**.

ما يفعله المتحكم التنبؤي:

- **نموذج متعدد المتغيرات:** يعرف أثر كل متغير يحركه (Manipulated Variable) في كل متغير يتحكم به (Controlled Variable)، وأثر الاضطرابات المقاسة. ويُبنى من تجارب قفزات في الوحدة.
- **التنبؤ:** يحسب مسار كل متغير في أفق زمني قادم.

- **التحسين:** يختار في كل دورة (عادة كل دقيقة أو أقل) خطة حركات تبقي المتغيرات ضمن حدودها، وتقرب الوحدة من الهدف الاقتصادي (إنتاج أكبر أو طاقة أقل)، ثم ينفذ الحركة الأولى فقط ويعيد الحساب في الدورة التالية.
- **مكانه في البنية:** يعمل فوق الحلقات الأساسية، فيكتب **نقاط ضبط** لمتحكمات PID الموجودة ولا يحرك الصمامات مباشرة في الغالب. فإذا توقف أو فقد الاتصال، بقيت الحلقات الأساسية تعمل على آخر نقاط ضبط.

متى يستحق؟ في الوحدات الكبيرة المستقرة ذات القيمة الاقتصادية العالية: أبراج التقطير، ووحدات التكرير، ووحدات معالجة الغاز، والأفران الكبيرة، والمحطات التي تعمل قرب حدودها. أما الحلقة الواحدة البسيطة فلا تحتاجه.

شروط نجاحه: حلقات أساسية سليمة ومضبوطة وفي الوضع الآلي أو التعاقبي، وأجهزة قياس موثوقة (المتحكم التنبؤي يعمل بالقياسات نفسها)، ونماذج تُحدَّث حين تتغير الوحدة، ومهندس يتابع أداءه بعد التشغيل. وأكثر مشاريعه فشلًا ليست التي أخطأت في الرياضيات، بل التي أُطفئت بعد أشهر لأن أحدًا لم يعد يصونها.

ويتناول (الفصل 48) من الأجزاء القادمة التحكم التنبؤي والضبابي والتكيفي بالتفصيل. وخلاصة دراسة للمؤلف في التحكم الضبابي بمستوى الدرم في (القسم 36.7.2).

◆ ◆ ◆

41.11 اختيار الاستراتيجية: جدول مقارنة

جدول: مقارنة استراتيجيات التحكم التنظيمي المتقدم

الاستراتيجية	ما تعالجه	شرطها الأساسي	ترتيب الضبط	فشلها الأشهر	تطبيق نموذجي
التعاقبي	اضطراب يدخل عبر العنصر النهائي	داخلية أسرع 3–5 مرات على الأقل	الداخلية أولًا ثم الخارجية	الداخلية ليست في CAS، أو تشبع الرئيسي	حرارة ← تدفق بخار
التغذية الأمامية	اضطراب مقاس (الحمل)	قياس الاضطراب ونموذج أثره	الراجعة أولًا، ثم الكسب الساكن، ثم التقديم والتأخير	كسب خاطئ أو قياس اضطراب معطل يحرف الحلقة	حرارة مسخن مع تدفق المنتج
النسبة	علاقة ثابتة بين تدفقين	قياس خطي للتدفقين ومديات صحيحة	حلقة التدفق المتحكم به فقط	نسبة بالوحدات الهندسية في كتلة تعمل بالنسبة المئوية	خلط، حقن، وقود وهواء
التقييد المتقاطع	نقص الهواء أثناء تغير الحمل	قياس الوقود والهواء الفعليين	حلقتا الوقود والهواء، ثم الحدود	تعطيل القيد «لتسريع» الاستجابة	المراجل والأفران
تقسيم المدى	مدى أوسع من صمام، أو تسخين وتبريد	مخرج مستقل لكل صمام وتقسيم بحسب السعة	حلقة واحدة، ويُختبر كل جزء	قفزة الكسب عند نقطة التقسيم، أو فجوة كبيرة	حرارة مفاعل، ضغط غطاء خزان

الاستراتيجية	ما تعالجه	شرطها الأساسي	ترتيب الضبط	فشلها الأشهر	تطبيق نموذجي
موضع الصمام (VPC)	دقة صمام صغير وسعة كبير	متحكم الموضع أبطأ كثيرًا	الرئيسية أولًا، ثم متحكم الموضع ببطء	تعارك الصمامين	صمامان متوازيان، سرعة مضخة
الانتقاء	أكثر من هدف على عنصر واحد	تغذية راجعة خارجية للتكامل	كل متحكم وهو مسيطر	تشبع المتحكم غير المسيطر	حدود التوربين والضاغط والمضخة
متنبئ سميث	زمن ميت كبير	نموذج دقيق للزمن الميت	النموذج أولًا، ثم المتحكم	زمن ميت يتغير مع الحمل	المحللات، والسيور، والخطوط الطويلة
فك الارتباط	تفاعل الحلقات	كسوب معروفة وثابتة	الأزواج بـ RGA أولًا	نموذج قديم	الخلط، والتقطير
جدولة الكسب	كسب يتغير مع الحمل	متغير جدولة يمثل الحمل	ضبط عند كل حمل	انتقال غير سلس بين المعاملات	الصمامات بمدى تشغيل واسع، pH
التحكم التنبؤي	متغيرات وقيود متعددة	حلقات أساسية سليمة ونماذج	الأساسية أولًا، ثم تجارب القفزات	إطفاؤه لغياب الصيانة	التكرير ومعالجة الغاز

كيف أختار؟ اقرأ العمود الثاني أولًا ثم الثالث: ما الذي يعالجه كل ترتيب، وهل شرطه متوافر عندك فعلًا (قياس للاضطراب، وداخلية أسرع، ونموذج للزمن الميت، ومخرج لكل صمام)؛ فإن غاب الشرط فالترتيب لا يفشل ببطء بل يكون أسوأ من الحلقة البسيطة. والجدول لا يبين كلفة الصيانة: النماذج (سميث، وفك الارتباط، والتنبؤي) تحتاج من يحدّثها حين تتغير الوحدة، بينما التعاقبي والنسبة والانتقاء تعيش عقودًا بلا صيانة.

والخطأ الأكثر كلفة اختيار الترتيب الأذكى بدل الأبسط الكافي، فيُطفأ بعد أشهر لأن أحدًا لم يعد يفهمه، وتعود الحلقة إلى اليدوي.

◆ ◆ ◆

41.12 التنفيذ في نظام التحكم: الأوضاع والتهيئة والاختبار

الاستراتيجية الصحيحة على الورق تفشل في الموقع غالبًا بسبب تفاصيل التنفيذ لا بسبب الفكرة. وهذه التفاصيل يجب أن تُكتب في وصف التحكم وتُختبر في اختبار قبول المصنع (FAT) واختبار قبول الموقع (SAT):

1. **الأوضاع (Modes):** لكل متحكم في البنية أوضاعه: يدوي، وآلي بنقطة ضبط محلية، وتعاقبي بنقطة ضبط من متحكم آخر، وأحيانًا نقطة ضبط من حاسوب أو متحكم تنبؤي. ويحدد الوصف متى يُسمح بكل وضع، ومن يغيره.
2. **التهيئة والتحويل السلس:** حين تكون الحلقة الداخلية في غير الوضع التعاقبي، يُهيأ خرج الرئيسي ليساوي نقطة ضبط الداخلية الحالية (تتبع). فإذا أُعيدت إلى التعاقبي لم تقفز نقطة الضبط (القسم 18.9).
3. **منع التشبع عبر البنية كلها:** كل حد في آخر السلسلة (صمام عند حده، حلقة داخلية مشبعة، انتقاء اختار غيرها) يجب أن يصل خبره إلى كل متحكم فوقه، إما بإشارات حالة أو بتغذية راجعة خارجية للتكامل.
4. **سلوك القياس السيئ (Bad PV):** ماذا يحدث إذا فسد قياس المتغير الثانوي أو قياس الاضطراب؟ الحلقة الداخلية تنتقل إلى اليدوي أو تجمد خرجها، والرئيسي يتبع. والتغذية الأمامية تُجمد آخر قيمة جيدة أو تُلغى بتدرج. والانتقاء يستبعد متحكمًا قياسه سيئ في الاتجاه الآمن. ويُكتب ذلك لكل إشارة.
5. **الانحدار إلى وضع أبسط (Mode Shedding):** عند فقد جزء من البنية تنحدر إلى أبسط بنية تعمل: من التنبؤي إلى الحلقات الأساسية، ومن التعاقبي إلى الآلي، ومع إنذار للمشغل.

6. **العرض للمشغل:** شاشة لكل استراتيجية تبين البنية والأوضاع والمتحكم المسيطر والحدود النشطة، لا مجرد مجموعة أوجه متحكمات منفصلة.
7. **الاختبار:** يُختبر كل مسار بمحاكاة قبل التشغيل: تحويل الأوضاع في كل اتجاه دون قفزة، وتشبع كل عنصر، وفساد كل قياس، وانتقال السيطرة في الانتقاء في الاتجاهين، وإشارة كل صمام في تقسيم المدى عند نقاط 0 و25 و50 و75 و 100%.

◆ ◆ ◆

41.13 مشروع الكتاب المتصل: وحدة ضغط الغاز

في (القسم 18.11) ضُبطت حلقتا الوحدة منفردتين. وتضيف مرحلة التحسين بنيتين:

جدول: الاستراتيجيات المضافة إلى وحدة ضغط الغاز

البنية	المكونات	السبب	نقاط الاختبار
تعاقبي على مستوى الفاصل V-101	LIC-101 (رئيسي) يعطي نقطة ضبط FIC-103 (ثانوي) على خط السائل الخارج، و-FIC 103 يحرك LV-101	ضغط خط تصريف السائل يتغير مع الوحدات في المصب، فيتغير التدفق عند الفتحة نفسها ويضطرب المستوى	التحويل من AUTO إلى CAS دون قفزة، وتتبع LIC-101 حين يكون FIC-103 في AUTO، وسلوك فساد قياس FT-103 (FIC-103 إلى MAN وLIC-101 يتبع مع إنذار)
انتقاء الأعلى على صمام إعادة التدوير FV-102	خرج PIC-102 (ضغط الشفط) وخرج متحكم منع الانفصال الهوائي إلى كتلة اختيار الأعلى، ثم FV-102	صمام واحد عليه هدفان: ضغط الشفط، والبعد عن خط الانفصال الهوائي (الفصل 35)	تغذية راجعة خارجية للتكامل في المتحكمين من الخرج المختار، ومؤشر المتحكم المسيطر على الشاشة، واختبار الانتقال بمحاكاة اقتراب نقطة التشغيل من خط التحكم

ويُضاف بعدهما إلى سجل ضبط الحلقات (القسم 18.11) سطر لكل بنية: الأوضاع المسموح بها، ومعاملات كل متحكم، ونتيجة اختبار الانتقال.

◆ ◆ ◆

41.14 حالة ميدانية: فصل ضاغط هواء لأن حد تيار المحرك كان «نائمًا»

- **العَرَض:** بعد ترقية نظام التحكم في محطة ضواغط هواء، فصل مرحل الحمل الزائد محرك الضاغط الرئيسي مرتين في يومين حارين عند ذروة الطلب. ولم يكن ذلك يحدث قبل الترقية. وفي الضاغط متحكم ضغط طرد يحرك ريش التوجيه عند المدخل (Inlet Guide Vanes)، ومتحكم حد لتيار المحرك، وكتلة اختيار الأدنى بينهما.
- **الفرضيات:** (1) تغير إعداد مرحل الحمل الزائد في الصيانة؛ (2) تدهور المحرك أو الضاغط فزاد تياره؛ (3) نقطة ضبط حد التيار أعلى من اللازم؛ (4) متحكم الحد لم يستلم السيطرة في الوقت المناسب.
- **الفحوص:** إعداد المرحل مطابق للوحة المحرك (استبعد 1). والتيار عند الحمل نفسه قبل الترقية وبعدها متطابق في المؤرخ (استبعد 2). ونقطة ضبط الحد 95% من التيار المقنن، أي تحت إعداد المرحل بهامش كافٍ (استبعد 3). ثم عُرض خرج متحكم الحد في الاتجاه قبل الفصل.
- **الدليل الحاسم:** كان خرج متحكم حد التيار عند 100% طوال الساعات التي سبقت الفصل، لأن التيار تحت حده. وحين تجاوز التيار الحد، احتاج الخرج نحو 40 s لينزل من 100% إلى ما تحت خرج متحكم الضغط. وفي هذه الثواني بقي التيار فوق حد المرحل حتى فصل. ووُجد أن كتلة الاختيار في النظام الجديد نُفذت دون ربط الخرج المختار بمدخل التغذية الراجعة الخارجية لتكامل المتحكمين، بينما كان النظام القديم يفعل ذلك داخليًا.

- **السبب الجذري:** نقل بنية انتقاء إلى منصة جديدة دون نقل وظيفة منع التشبع، وغياب اختبار انتقال السيطرة في قائمة اختبارات الترقية.
- **الإجراء التصحيحي:** ربط الخرج المختار بمدخل التغذية الراجعة الخارجية في المتحكمين، واختبار الانتقال بمحاكاة ارتفاع التيار (استلم الحد السيطرة خلال ثوانٍ)، وإضافة مؤشر «حد التيار نشط» على الشاشة، وإضافة بند «اختبار انتقال السيطرة لكل انتقاء» إلى قائمة اختبارات كل ترقية لاحقة. (مثال تعليمي مركّب.)

دور المهندس ودور الفني:

المجال	ما يقرره المهندس	ما ينفذه الفني ويقيسه
التصميم	يختار الاستراتيجية بحسب سبب ضعف الأداء، ويكتب وصف التحكم: البنية، والمديات، والأوضاع، والحدود، وسلوك فساد كل قياس	يراجع أن كل قياس في البنية موجود ومداه مطابق، وينبه إلى المرسلات البطيئة أو غير الموثوقة
التنفيذ	يراجع برمجة الكتل: التهيئة، والتتبع، ومنع التشبع، والتغذية الراجعة الخارجية	يتحقق من ربط الإشارات وتحجيمها، ويختبر كل صمام في تقسيم المدى وحده عند خمس نقاط
الضبط	يضبط بالترتيب (الداخلية أولًا، والراجعة قبل الأمامية)، ويحسب كسب الأمامية والنسبة	ينفذ تجارب القفزة مع المشغل، ويسجل الاتجاهات بدقة المؤرخ الكاملة
الاختبار والتشغيل	يعتمد نتائج اختبار الانتقال والأوضاع، ويدرب المشغلين على قراءة البنية	يجري اختبارات الانتقال وفساد القياس، ويملأ سجل الاختبار
المتابعة	يراجع مؤشرات الأداء: نسبة بقاء البنية في وضعها الكامل، ومدة نشاط الحدود	يبلغ عن أي بنية يتركها المشغلون خارج وضعها الكامل، فذلك أول علامة على مشكلة

41.15 الأخطاء الشائعة

- تطبيق استراتيجية متقدمة فوق حلقة أساسية مريضة (صمام ملتصق أو قياس ضاج) بدل إصلاحها.
- حلقة داخلية أبطأ من الخارجية، أو قريبة منها في السرعة، في بنية تعاقبية.
- ترك الحلقة الداخلية في الوضع الآلي بعد صيانة، فتبقى الخارجية تحسب بلا أثر.
- تغذية أمامية بلا تغذية راجعة، أو بكسب محسوب بوحدات خاطئة، أو من قياس اضطراب لا يُراقب.
- حساب النسبة بالقسمة وجعلها القيمة المقاسة، فيتغير كسب الحلقة مع الحمل.
- كتابة نسبة هندسية في كتلة تعمل بالنسبة المئوية من المدى، أو تغيير مدى مرسل دون تعديل النسبة.
- تعطيل التقييد المتقاطع في الاحتراق «لتسريع» الاستجابة للحمل.
- تقسيم المدى بالتساوي بين صمامين مختلفي السعة، أو على مخرج تناظري واحد لصمامين.
- كتلة انتقاء دون تغذية راجعة خارجية للتكامل، فيتأخر متحكم الحد عن استلام السيطرة.
- اعتبار متحكم الحد وظيفة حماية تغني عن الفصل المستقل.
- متنبئ سميث بزمن ميت ثابت في عملية يتغير زمنها الميت مع التدفق.
- ضبط حلقتين متفاعلتين بالسرعة نفسها دون فحص الأزواج.
- وصف تحكم لا يذكر سلوك فساد القياس ولا انحدار الأوضاع، فيقرره المبرمج وحده.

41.16 ملخص

الاستراتيجيات المتقدمة ترتيبات لحلقات PID عادية تعطيها معلومة أو قيدًا إضافيًا. **التعاقبي** يصحح الاضطراب في الحلقة التي تراه أولًا، وشرطه أن تكون الداخلية أسرع كثيرًا. **والتغذية الأمامية** تتحرك لحظة قياس الاضطراب، وتحتاج تغذية راجعة تصحح ما بقي، وحدودها يرسمها الفرق بين زمني المسارين. **والنسبة** تُنفذ بالضرب لا بالقسمة، وتُحسب مع مديات المرسلات. **والتقييد المتقاطع** يمنع أن يسبق الوقود الهواء. **وتقسيم المدى** يُقسم بحسب السعة ويُنفذ بمخرج لكل صمام. **والانتقاء** يعطي عنصرًا واحدًا أكثر من هدف، ولا يعمل دون تغذية راجعة خارجية للتكامل. **ومتنبئ سميث** يلغي أثر الزمن الميت في الاستجابة ما دام النموذج صحيحًا، لكن تقليل الزمن الميت فعليًا يسبقه دائمًا. **والتفاعل** يُعالج بالأزواج الصحيحة ثم بفصل السرعات ثم بتغيير المتغيرات. **وجدولة الكسب** تعالج تغير العملية مع الحمل. **والتحكم التنبؤي** يأتي فوق هذا كله حين تتعدد المتغيرات والقيود. وفي كل منها يُكتب وصف التحكم كاملًا، وتُختبر الأوضاع والتشبع وفساد القياس قبل التسليم.

وفي الفصل التالي: يتناول الفصل 42 «الذكاء الاصطناعي وأثره في مستقبل التحكم والقياس»: ما الذي يمكن أن تضيفه النماذج المتعلمة من البيانات إلى الحلقات والاستراتيجيات التي بُنيت في هذا الفصل، وما الذي لا يجوز أن توكل إليه.

41.17 أسئلة التقييم الذاتي

1. حلقة حرارة فرن تتأثر بتغير ضغط غاز الوقود وبتغير تدفق الشحنة. أي الاضطرابين يعالجه التعاقبي (حرارة ← تدفق الوقود)؟ وأيهما يحتاج تغذية أمامية؟ ولماذا؟
2. حلقة داخلية لتدفق البخار ثابتها الزمني المغلق 4 s، وحلقة الحرارة الخارجية ثابتها 15 s. هل البنية مناسبة؟ وماذا تتوقع؟ وما الذي تقترحه؟

3. ماء يُسخن من 25 إلى 75 °C بتدفق 8 kg/s، والحرارة النوعية 4.18 kJ/(kg·K)، والحرارة الكامنة للبخار 2100 kJ/kg. احسب تدفق البخار وكسب التغذية الأمامية، ثم الزيادة المطلوبة في البخار إذا زاد تدفق الماء 1.5 kg/s.

4. في تغذية أمامية: مسار الصمام بثابت زمني 40 s وزمن ميت 6 s، ومسار الاضطراب بثابت زمني 20 s وزمن ميت 10 s. صمم كتلة التعويض الديناميكي (التقديم والتأخير والتأخير الزمني).

5. تدفق حر بمرسل مداه 0–400 m³/h، وتدفق متحكم به بمرسل مداه 0–20 m³/h، والمطلوب أن يكون الثاني 3% من الأول. ما النسبة التي تُكتب في كتلة تعمل بالنسبة المئوية من المدى؟ وتحقق عند 300 m³/h.

6. لماذا تُفضل طريقة الضرب على طريقة القسمة في التحكم بالنسبة؟ اذكر سببين.

7. اكتب معادلتي نقطة ضبط الوقود ونقطة ضبط الهواء في التقييد المتقاطع المزدوج، واشرح ما يحدث عند زيادة الحمل وعند نقصه.

8. صمامان متوازيان سعتاهما Cv 20 وCv 80 يعملان بتقسيم مدى في الاتجاه نفسه. أين تضع نقطة التقسيم ليبقى مجموع Cv خطيًا مع الخرج؟ وكم يكون Cv عند خرج 60%؟

9. متحكم حد في بنية انتقاء كان خرجه 100% قبل أن يُحتاج. اشرح لماذا يتأخر عن استلام السيطرة، وكيف تحل التغذية الراجعة الخارجية للتكامل المشكلة. وكيف تختبر ذلك في الموقع؟

10. خلاط تياري ماء 90 °C و30 °C، والتدفق الكلي 120 m³/h، والحرارة المطلوبة 45 °C. احسب λ11 للأزواج (التدفق الكلي مع الماء الحار، والحرارة مع البارد)، وقرر الأزواج الأفضل.

مراجع الفصل: R78 (Shinskey، التعاقبي، والتغذية الأمامية، والتقييد المتقاطع، والانتقاء والتغذية الراجعة الخارجية للتكامل)؛ R79 (Seborg وزملاؤه: التغذية الأمامية، ومتنبئ سميث، ومصفوفة الكسب النسبي، والتحكم التنبؤي)؛ R80 (Skogestad، قواعد SIMC)؛

R44 (Gilman: تحكم الاحتراق والتقييد المتقاطع والتحكم ثلاثي العناصر)؛ R57 وR59 (التحكم ثلاثي العناصر والتحكم الضبابي بمستوى الدرم)؛ R16 (أساسيات التحكم بالعمليات)؛ R49 (نظرية التحكم)؛ ISA-5.1 لرموز الحلقات، وISA-18.2 للإنذارات؛ وخبرة المؤلف في حلقات محطات التوليد ومنشآت الغاز (R18). والأرقام في الأمثلة المحلولة والأشكال من محاكاة عددية لنماذج رتبة أولى بزمن ميت، وهي توضيحية.

الفصل 42: الذكاء الاصطناعي وأثره في مستقبل التحكم والقياس

لمن هذا الفصل: مهندس التحكم والأجهزة الذي يسمع كل يوم عن الذكاء الاصطناعي، ويُعرض عليه نظام صيانة تنبؤية أو مساعد ذكي لغرفة التحكم، ويريد أن يفهم ما وراء الكلمات: ماذا يستطيع هذا الشيء فعلًا، وأين حدوده، وأين مكانه في بنية التحكم، وماذا يعني لمهنته في العقد القادم. وهو فصل لا يحتاج إلى خلفية برمجية، لكنه يفترض ما سبق في الكتاب عن الحلقات والأنظمة والسلامة.

الفكرة الأساسية: الذكاء الاصطناعي في الصناعة ليس متحكمًا جديدًا يحل محل PID وPLC، بل طبقة فوقهما تتعلم من البيانات ما لا يستطيع المهندس كتابته في صورة قاعدة: أنماط الأعطال قبل وقوعها، ومتغيرات الجودة التي لا تُقاس مباشرة، وأفضل نقاط التشغيل في ظروف متغيرة، والمعنى المختبئ في آلاف الإنذارات والوثائق. وتظهر قيمته حين تكون البيانات جيدة، والمشكلة محددة، والحواجز مبنية. ويظهر خطره حين يُعامل صندوقًا أسود يُوثق به أكثر مما يستحق، أو حين يُقرَّب من منطق السلامة الذي لا يجوز أن يقترب منه.

42.1 ما الذكاء الاصطناعي بلغة مهندس التحكم؟

مهندس التحكم يعرف النماذج جيدًا: دالة النقل نموذج، ومعادلة الطاقة في التوربين نموذج، وخريطة الضاغط نموذج. وكل هذه نماذج مبنية من الفيزياء والخبرة، يكتب المهندس معادلاتها ثم يعاير معاملاتها. أما التعلم الآلي (Machine Learning) فيقلب الترتيب: يعطي الخوارزمية بيانات المداخل والمخارج فتستنتج العلاقة بينها بنفسها. وهو

مفيد حين تكون العلاقة معقدة أو غير معروفة أو متغيرة، وضار حين تكون البيانات قليلة أو منحازة أو لا تمثل ما سيواجهه النظام.

المصطلحات الأساسية:

المصطلح	معناه	مثال في المصنع
التعلم الخاضع للإشراف (Supervised Learning)	نتعلم من أمثلة معروفة النتيجة	توقع لزوجة المنتج من الحرارات والضغوط بعد مقارنتها بنتائج المختبر
التعلم غير الخاضع للإشراف (Unsupervised Learning)	نبحث عن أنماط دون نتائج معروفة	تجميع أنماط تشغيل الضاغط، وكشف ما يخرج عنها
التعلم المعزز (Reinforcement Learning)	يتعلم النظام بالتجربة والمكافأة	ضبط نقاط تشغيل عبر محاكٍ، ونادر جدًا في الإنتاج الحقيقي
الشبكة العصبية (Neural Network) والتعلم العميق (Deep Learning)	نماذج بطبقات كثيرة تتعلم تمثيلات معقدة	تحليل صور الكاميرات وإشارات الاهتزاز والسلاسل الزمنية
النموذج اللغوي الكبير (LLM) والذكاء التوليدي (Generative AI)	نموذج مدرب على نصوص هائلة يفهم اللغة ويولدها	مساعد يقرأ أدلة التشغيل والإجراءات ويجيب عن أسئلة المشغل
الانجراف (Drift)	تغير العلاقة الحقيقية بعد تدريب النموذج	بعد استبدال حساس أو تغيير مادة خام لم يعد النموذج صالحًا
الحساس الافتراضي (Soft Sensor)	نموذج يقدر متغيرًا من متغيرات أخرى	تركيز منتج البرج من الحرارة والضغط والتدفقات

ما الذي يبقى ثابتًا: حلقة PID تبقى، ومنطق التعشيق يبقى، ونظام السلامة يبقى مستقلًا حتميًا. فالذكاء الاصطناعي يجلس فوق هذه الطبقات ويستفيد منها، ولا يلغيها.

الشكل 42-1: *طبقات «الذكاء» في التحكم عبر الزمن، من PID والمنطق المتسلسل إلى الذكاء التوليدي: كل طبقة تُبنى فوق ما قبلها وتعتمد على البيانات أكثر ويقل شرحها.*

42.2 ما سبق في هذا الكتاب: التحكم كان ذكيًا قبل الاسم

كثير مما يُسمى اليوم ذكاءً اصطناعيًا عرفه مهندسو التحكم بأسماء أخرى: الضبط الذاتي للمتحكمات (Auto-tuning) يتعرف على ديناميكا العملية ويحسب المعاملات، والتحكم الضبابي (Fuzzy) يصوغ خبرة المشغل قواعد لغوية، والتحكم التنبؤي بالنموذج (MPC) يحسن الأداء ضمن قيود على أفق زمني، والأنظمة الخبيرة تشخص الأعطال بقواعد الخبراء (ومثال التحكم الضبابي في القسم 36.7.2). والتحسين في الوقت الحقيقي (RTO) يبحث عن أفضل نقطة تشغيل اقتصاديًا. وكل هذه نماذج مبنية أساسًا من الفيزياء والخبرة.

ما يضيفه التعلم الآلي أمران: القدرة على استخلاص النموذج من البيانات حين تكون الفيزياء معقدة أو مجهولة، والقدرة على معالجة أنواع بيانات لم تكن متاحة للتحكم من قبل: الصور، والصوت، والنصوص. ولذلك يُنظر إليه مكملًا لهذه الأدوات لا بديلًا عنها: MPC بنموذج مُحسَّن بالتعلم، وضبط ذاتي يتعلم من تاريخ الحلقة، ونظام خبير يتغذى من كشف الشذوذ.

42.3 البيانات أولًا: العقبة الحقيقية

كل مشروع ذكاء اصطناعي في المصانع يصطدم أولًا بالبيانات لا بالخوارزميات:

- **الجودة:** قياسات بلا معايرة، وحساسات عالقة، وقيم مجمدة عند انقطاع الاتصال، وإنذارات مكبوتة، كلها تدخل المؤرخ وتبدو أرقامًا. والنموذج يتعلم منها أخطاءها. وهنا يظهر أثر كل ما في الباب الثاني من هذا الكتاب (أجهزة القياس والمعايرة): المعايرة، والتركيب، والصيانة، ليست شروطًا للتحكم فحسب، بل للذكاء الاصطناعي.
- **الضغط والتخزين:** كثير من المؤرخات تخزن القيمة عند تغيرها بأكثر من حد معين، وهو ما يسمى ضغط البيانات (Compression)، وتستكمل ما بين النقاط المخزنة بالاستيفاء، فتضيع التذبذبات الصغيرة التي قد تكون أول علامة على عطل. وتُراجع إعدادات الضغط للوسوم التي ستدخل في التحليل.
- **السياق:** قيمة الاهتزاز بلا معرفة الحمل والسرعة والحرارة المحيطة لا تعني شيئًا. وحالة المعدة (تشغيل، توقف، بدء، صيانة) يجب أن تكون متاحة وسمًا، وإلا تعلم النموذج من فترات التوقف كأنها تشغيل.
- **الوسم (Labeling):** لتعلم كشف الأعطال نحتاج إلى أمثلة أعطال موثقة: متى بدأ العطل؟ وما نوعه؟ وهذه تعيش في سجلات الصيانة وتقارير الحوادث، وغالبًا ما تكون نصًا حرًا غير مرتبط بالوسوم. وربط سجل الصيانة بالمؤرخ عمل هندسي لا خوارزمي.
- **الندرة:** الأعطال الخطيرة نادرة، فالبيانات التي تصف التشغيل الطبيعي كثيرة وبيانات الفشل قليلة. ولهذا يغلب في الصناعة كشف الشذوذ (Anomaly Detection) على التصنيف المباشر للأعطال: يتعلم النموذج السلوك الطبيعي، وينبه إلى ما يخرج عنه.
- **الحوكمة:** من يملك البيانات؟ وهل يجوز إرسالها إلى سحابة المورد؟ وهل فيها ما يكشف أسرار الإنتاج؟ وهذه أسئلة تُحسم في العقد لا بعد النشر.

42.4 التطبيق الأول: كشف الشذوذ والصيانة التنبؤية

هذا أنضج تطبيق وأكثره انتشارًا. الفكرة: نبني نموذجًا لسلوك المعدة الطبيعي من تاريخها، ثم نراقب الفرق بين ما يتوقعه النموذج وما نقيسه فعلًا. فالإنذار التقليدي يقول «الحرارة تجاوزت 95 °C»، أما النموذج فيقول «الحرارة 78 °C، لكنها عند هذا الحمل وهذه الحرارة المحيطة كان يجب أن تكون 71 °C، وهذا الفرق يتسع منذ أسبوع».

الشكل 42-2: *كشف الشذوذ في حرارة محمل: النموذج يتوقع الحرارة من الحمل والحرارة المحيطة، والبواقي بين القياس والتوقع تتجاوز نطاق الثقة قبل أن يصل القياس إلى حد الإنذار التقليدي بأيام.*

> **مثال محلول (نموذج بسيط بالانحدار):** حرارة محمل مضخة سُجلت شهرين مع الحمل L بالنسبة المئوية والحرارة المحيطة Ta. أعطى الانحدار الخطي:

$$\mathrm{T} = 35 + 0.42 \times \mathrm{L} + 0.50 \times \mathrm{Ta}$$

وانحراف البواقي المعياري σ = 1.2 °C. وفي يوم ما كان الحمل 70% والحرارة المحيطة 34 °C والقياس 73.5 °C.

- التوقع = 35 + 29.4 + 17 = 81.4 °C.
- البقية = القياس − التوقع = 73.5 − 81.4 = −7.9 °C.
- بوحدات σ: 7.9− ÷ 1.2 ≈ −6.6σ، أي أن القياس أقل من المتوقع بكثير.
- التفسير: هذا شذوذ أيضًا، وقد يعني حساسًا انزلق من مكانه أو انخفاضًا حقيقيًا في الحمل لم يسجله عداد الحمل. فكشف الشذوذ لا يقول ما العطل، بل يقول «انظر هنا».
- ولو كان القياس 86 °C لكانت البقية +4.6 °C أي +3.8σ، شذوذ موجب يستحق فحص التزييت والمحاذاة، مع أن القيمة نفسها بعيدة عن حد الإنذار 95 °C.

ما يُراقب عادة: الاهتزاز وطيفه، وحرارات المحامل واللفات، وتيار المحرك وتوازن أطواره، وضغوط السحب والطرد وكفاءة المضخة أو الضاغط المحسوبة، وحرارات عادم التوربين وتشتتها بين الحارقات، وأداء المبادلات الحرارية عبر معامل الانتقال المحسوب، وعمر عناصر المرشحات عبر فرق الضغط مصححًا بالتدفق.

الشكل 42-3: *مجموعة مضخة ومحرك مراقبة: مقاييس الاهتزاز على محامل المحرك والمضخة، وحرارة المحمل، وضغطا السحب والطرد، وعداد التدفق، ومحول التيار، وهي القياسات التي يتغذى منها نموذج الصيانة التنبؤية.*

من الكشف إلى القرار: التنبيه وحده لا قيمة له إن لم يصل إلى من يقرر بصيغة مفهومة: أي معدة، وأي قياس انحرف، وكم يشبه هذا النمط أعطالًا سابقة، وما الفحص المقترح. ومقياس نجاح النظام ليس دقة النموذج بل عدد الأعطال التي اكتُشفت مبكرًا فعلًا، وقلة الإنذارات الكاذبة التي قد ترهق الفريق حتى يهمله.

مثال محلول (قيمة اقتصادية): مضخة تغذية حرجة، فشل محملها المفاجئ يوقف الوحدة يومين بخسارة إنتاج 150 ألف دولار في اليوم وتكلفة إصلاح طارئ 40 ألفًا. وبالكشف المبكر يُخطط الاستبدال في توقف قادم بتكلفة 15 ألفًا وبلا خسارة إنتاج.

- التوفير لكل حادثة = (أيام التوقف × خسارة اليوم + الإصلاح الطارئ) − الاستبدال المخطط
- = (2 × 150 + 40) − 15 = 325 ألف دولار.
- التوفير السنوي للأسطول = التوفير لكل حادثة × معدل الأعطال × عدد المضخات
- = 325 × (1 ÷ 3) × 10 ≈ 1.08 مليون دولار في السنة.
- التفسير: يُقارن هذا الرقم بتكلفة النظام والحساسات الإضافية والصيانة السنوية للنماذج، وهذا الحساب هو ما يجب أن يسبق أي مشروع.

42.5 الحساسات الافتراضية والاستدلال

كثير من متغيرات الجودة لا تُقاس مباشرة أو تُقاس ببطء: تركيب منتج برج التقطير يُعرف من المختبر كل ثماني ساعات، أو من محلل باهظ الثمن بطيء الاستجابة. والحساس الافتراضي (Soft Sensor) نموذج يقدر هذا المتغير كل دقيقة من قياسات متاحة: حرارات الصواني، والضغط، والتدفقات، ومعدل الارتجاع. ويُصحح انحيازه دوريًا حين تصل نتيجة المختبر.

الشكل 42-4: *الحساس الافتراضي: نموذج استدلالي يقدر تركيز المنتج من خمسة قياسات متاحة كل دقيقة، ويُصحح انحيازه بنتيجة المختبر كل ثماني ساعات، ويغذي حلقة التحكم.*

ما يجب أن يعرفه مهندس التحكم:

- الحساس الافتراضي يصلح للتحكم التنظيمي والتحسين، ولا يصلح وحده للسلامة ولا للقياس التجاري.
- يجب أن تُعرض قيمته على المشغل مميزة عن القياسات الحقيقية، مع مؤشر ثقة، ومع سلوك محدد عند فقد أحد مداخله (تجميد، أو العودة إلى نموذج أبسط، أو التحويل إلى اليدوي).
- التصحيح بالمختبر يجب أن يراعي زمن أخذ العينة لا زمن وصول النتيجة، وإلا صُحح النموذج بقيمة تمثل حالة قديمة.
- يُعاد التحقق منه بعد كل تغيير في العملية أو الأجهزة، ويُوثق كأي جهاز قياس في قاعدة بيانات الأجهزة مع نسخته وتاريخ تدريبه.

42.6 التحسين والتحكم المتقدم المدعوم بالتعلم

تحسين نقاط التشغيل: نماذج تتعلم علاقة الاستهلاك والإنتاج والانبعاثات بنقاط الضبط، ثم تقترح نقاطًا أفضل ضمن قيود: خفض استهلاك الوقود في مرجل، وضبط الأكسجين

الزائد، وتوزيع الحمل بين ضواغط متوازية، وتقليل الطاقة في محطات التحلية. وتُنفذ عادة بإحدى طريقتين:

1. **استشارية (Open Loop):** يعرض النظام التوصية والمكسب المتوقع، والمشغل يطبقها أو يرفضها. وهي نقطة البداية دائمًا، لأنها تبني الثقة وتكشف أخطاء النموذج بلا خطر.
2. **مغلقة بحواجز (Closed Loop with Guardrails):** يكتب النظام نقاط الضبط إلى نظام التحكم، لكن ضمن حدود دنيا وعليا لكل نقطة، وبمعدل تغير محدود، وبتعطيل تلقائي عند فقد البيانات أو خروج المؤشرات عن نطاقها، ومع مفتاح إيقاف بيد المشغل. وهذه هي الطريقة نفسها التي تُنشر بها أنظمة MPC منذ عقود.

الشكل 42-5: *مكان الذكاء الاصطناعي في بنية التحكم: فوق طبقة التحكم الحتمية، يستقبل البيانات من المؤرخ ويكتب نقاط ضبط ضمن حواجز واقية، ونظام السلامة مستقل عنه تمامًا.*

التعلم المعزز: يتعلم فيه النظام بالتجربة، وهذا مقبول في محاكٍ لا في وحدة إنتاج حقيقية. وأغلب نتائجه المنشورة في الصناعة إما على محاكيات أو في حلقات ضيقة بحواجز صارمة. فحين يُعرض عليك، اسأل: أين تعلم؟ وماذا يحدث حين يواجه حالة لم يرها؟

MPC بنماذج متعلمة: الاتجاه الأكثر واقعية هو استخدام التعلم لتحسين نموذج MPC وتحديثه من البيانات، مع بقاء بنية MPC نفسها وقيودها وشفافيتها.

42.7 مساعد المشغل والذكاء التوليدي

النماذج اللغوية الكبيرة أضافت ما لم يكن ممكنًا: قراءة الوثائق وفهم الأسئلة بلغة طبيعية. وتطبيقاتها التي بدأت تظهر في غرف التحكم والصيانة:

- **البحث في الوثائق:** «ما تسلسل إعادة تشغيل ضاغط الغاز بعد انطلاق حماية الاهتزاز؟» فيجيب المساعد من إجراء التشغيل المعتمد مع الإشارة إلى مصدره، بدل البحث في مئات الصفحات.
- **شرح الإنذارات:** ربط الإنذار بوصفه في قاعدة الإنذارات، والسبب المحتمل، والإجراء الموصى به، وما حدث في مرات سابقة مشابهة.
- **تلخيص المناوبة:** صياغة تقرير التسليم من سجلات الأحداث والإنذارات والملاحظات.
- **مساعدة المهندس:** مراجعة منطق PLC، وكتابة مسودة إجراء أو تقرير عطل، وتفسير كود خطأ من دليل الصانع، وترجمة الوثائق.
- **الصيانة:** اقتراح خطوات التشخيص من سجل الأعطال، والمساعدة في كتابة أوامر العمل.

حدوده التي يجب أن تُقال بوضوح: النموذج اللغوي يولد نصًا معقولًا، لا نصًا صحيحًا بالضرورة، وقد «يهلوس» إجراءً غير موجود بثقة كاملة. ولذلك: يُقيد بوثائق المنشأة المعتمدة (ما يسمى التوليد المعزز بالاسترجاع، Retrieval-Augmented Generation)،

ويُلزم بذكر مصدره، ولا يُستخدم مصدرًا وحيدًا لأي إجراء يمس السلامة، ولا يُسمح له بتنفيذ أوامر في نظام التحكم، وتُراجع مخرجاته كما يُراجع عمل مهندس جديد. وتُحفظ بيانات المنشأة داخل حدودها ما لم يسمح العقد بغير ذلك.

42.8 الرؤية الحاسوبية والصوت

- **الكاميرات:** كشف اللهب في الشعلة والحارقات، وكشف التسرب بكاميرات الأشعة تحت الحمراء للتصوير البصري للغاز (OGI)، ومراقبة معدات الوقاية الشخصية والمناطق المحظورة، وقراءة المقاييس الميكانيكية القديمة التي لا إشارة لها، ومراقبة مستوى الرغوة والألوان في العمليات.
- **الصوت والاهتزاز:** ميكروفونات وأجهزة فوق صوتية تتعلم بصمة الصوت الطبيعية للضواغط والصمامات والمحامل، وتكشف التسرب والتكهف والاحتكاك.
- **الطائرات المسيرة والروبوتات:** تفتيش الشعلات والخزانات والأنابيب البعيدة بالصور الحرارية، ثم تحليلها آليًا.

وهذه الأدوات تضيف حساسات جديدة لا مقاييس تقليدية لها، وتحتاج إلى القواعد نفسها: تحديد الحد المقبول، والتحقق من الإنذارات الكاذبة، والتكامل مع نظام الإنذارات لا العمل في جزيرة منفصلة.

42.9 الذكاء داخل أجهزة القياس ونظام التحكم

الأجهزة الميدانية نفسها بدأت تحمل نماذج:

- **التشخيص المتقدم في المرسلات:** كشف انسداد خطوط النبض من التغير في ضجيج الإشارة، وكشف انفصال الحساس، ومراقبة صحة الحلقة الكهربائية، والتنبؤ بعمر الغشاء في الموائع الأكّالة.
- **الصمامات الذكية:** مقارنة بصمة الصمام بمرور الوقت، وتقدير الاحتكاك والتسرب، والتنبؤ بالحاجة إلى الصيانة (الفصل 15).

- **العدادات:** التحقق الذاتي في عدادات كوريوليس والكهرومغناطيسية، وتصحيح الأخطاء في العدادات فوق الصوتية بالتعرف على أنماط التدفق.
- **الحساسات ذاتية التحقق (Self-Validating):** تعطي مع القيمة مؤشر جودة يمكن أن يستخدمه نظام التحكم للتحول إلى قياس بديل.
- **نظام التحكم:** ضبط ذاتي مستمر للحلقات، وكشف الحلقات المتذبذبة وضعف الأداء، وإدارة الإنذارات الديناميكية التي تكبت ما لا معنى له في حالة تشغيل معينة.
- **الحوسبة الطرفية (Edge):** نماذج تعمل في بوابة قرب المعدة، فتُحلل بيانات الاهتزاز عالية التردد محليًا وترسل النتائج لا البيانات الخام.

التوأم الرقمي (Digital Twin): نموذج حي للأصل، يجمع الفيزياء والبيانات، يُستخدم لاختبار سيناريوهات التشغيل، والتدريب، والتحقق من منطق التحكم قبل تنزيله، وتقدير حالة المعدة وعمرها المتبقي. والنسخة العملية منه تبدأ بمحاكٍ للعملية مرتبط بنسخة من منطق التحكم، وتنمو تدريجيًا.

42.9.1 خريطة التطبيقات: المشكلة، ونوع الطريقة، وما يُتحقق منه

ليس كل تحليل متقدم ذكاءً اصطناعيًا. فمتحكم PID، وتحويل فورييه السريع (FFT)، والتحكم التنبؤي (MPC)، والمنطق الضبابي، والتوأم الرقمي، لا تعني بالضرورة وجود تعلّم آلي. ولذلك يُسأل عن كل تطبيق سؤال واحد قبل غيره: **هل يعمل بقواعد ثابتة كتبها مهندس، أم بنموذج فيزيائي من معادلات العملية، أم بنموذج يتعلم من البيانات، أم بمزيج منها؟** فالجواب يحدد كيف يُختبر، وكيف يفشل، ومن يستطيع أن يشرح قراره.

ومستوى تدخل النظام يُحدَّد بالوضوح نفسه: هل **يراقب** فقط ويرفع تنبيهًا، أم **يوصي** بإجراء يقرره المشغّل، أم **يعدّل التشغيل** وحده ضمن حدود؟ والبداية الصحيحة دائمًا بالمراقبة والتوصية. أما السماح له بالتأثير المباشر في التحكم فيحتاج إلى تحقق موثق، وحدود صارمة للتعديل، ومسار رجوع محدد إلى التحكم التقليدي. ولا يكون في أي مستوى بديلًا عن حمايات السلامة المعتمدة (42.11).

جدول: تطبيقات الذكاء الاصطناعي والتحليل المتقدم في التحكم والقياس

المجال	التطبيق	مثال عملي	نوع الطريقة غالبًا	ما يجب التحقق منه
الصيانة التنبؤية	كشف علامات التدهور قبل تعطل المعدة	تغيّر تدريجي في اهتزاز ضاغط وحرارة محامله وحمله	نموذج متعلم مع حدود فيزيائية	أن يميز النموذج التدهور من تغيّر الحمل الطبيعي
تشخيص أعطال أجهزة القياس	كشف الانجراف والتجمّد والقراءات غير المنطقية	مرسل ضغط ثابت القراءة والتدفق وموضع الصمام يتغيران	قواعد، ونموذج متعلم للقيمة المتوقعة	المقارنة بقياس مستقل وبسياق العملية
التمييز بين عطل الجهاز واضطراب العملية	تحليل إشارات مترابطة لتحديد الاحتمال الأرجح	ارتفاع حرارة العادم: احتراق غير متوازن أم مزدوجة معطوبة؟	نموذج متعلم أو فيزيائي	ألا يُعدّ الترابط بين الإشارات إثباتًا للسبب
الحساسات الافتراضية (Soft Sensors)	تقدير متغير من قياسات أخرى	تقدير تركيب منتج من الحرارة والضغط والتدفق حين يكون المحلل بطيئًا	نموذج متعلم أو هجين	المقارنة بالمختبر أو المحلل، وحدود صلاحية التقدير
مراقبة أداء حلقات التحكم	كشف التذبذب وبطء الاستجابة والتشبع	الحلقات التي تعمل طويلًا في اليدوي أو تتذبذب باستمرار	إحصاء وقواعد، وقد يُضاف مصنّف متعلم	التمييز بين سوء الضبط والتصاق الصمام والاضطراب الخارجي
المساعدة في ضبط PID	اقتراح معاملات من استجابة العملية	تحليل تجربة خطوة واقتراح ضبط لنطاق تشغيل محدد	نموذج فيزيائي بسيط، ليس تعلمًا بالضرورة	الاستقرار والقيود قبل تطبيق المعاملات (18.8)

المجال	التطبيق	مثال عملي	نوع الطريقة غالبًا	ما يجب التحقق منه
تشخيص صمامات التحكم	تحليل الأمر والموضع والضغط والتدفق معًا	كشف الاحتكاك والمنطقة الميتة وبطء المشغل	تحليل بصمة وقواعد، وقد يُضاف نموذج متعلم	التأكيد باختبار الصمام وبيانات الموضّع (15)
تحسين الطاقة والتشغيل	اقتراح نقاط تشغيل تحقق هدفًا ضمن القيود	توزيع الحمل بين ضواغط أو مضخات لتقليل الطاقة	تحسين رياضي على نموذج فيزيائي أو متعلم	قيود العملية وحدود المعدات والحمايات
نمذجة العمليات والتحكم المتقدم	نموذج متعلم للتنبؤ أو التحسين	توقع حرارة مخرج فرن بعد تغيّر الوقود والحمل	نموذج متعلم أو هجين	الصلاحية خارج بيانات التدريب، والسلوك عند فقد قياس
إدارة الإنذارات	تجميع الإنذارات المترابطة وتحليل التسلسل	فهم رشقة إنذارات بعد توقف ضاغط	إحصاء وتجميع، وقد يُضاف نموذج متعلم	ألا يُخفى إنذار مهم ولا تتغير أولويته دون مراجعة معتمدة
الرؤية الحاسوبية	فحص الصور والفيديو والصور الحرارية	قراءة عداد محلي بالكاميرا، أو كشف سخونة في لوحة	نموذج متعلم	الإضاءة وزاوية التصوير ودقة القراءة واحتمال الخطأ

المجال	التطبيق	مثال عملي	نوع الطريقة غالبًا	ما يجب التحقق منه
مراجعة الوثائق الهندسية	استخراج البيانات وكشف التعارض	مقارنة الوسوم والمديات بين قائمة الأجهزة وقائمة المداخل والمخارج وأوراق البيانات	نموذج لغوي مع قواعد مطابقة	المطابقة مع الوثائق الأصلية وإصداراتها
المساعدة في البرمجة والاختبار	مسودات منطق وقوائم اختبار	تحويل وصف تشغيل مضختين إلى حالات وتسلسلات واختبارات	نموذج لغوي	مراجعة المنطق ومحاكاته، خصوصًا فقد التغذية وأولوية الفصل (20.17)
المساعد الفني المعتمد على الوثائق	الإجابة من أدلة المصنّع ووثائق الموقع مع إظهار المصدر	تفسير رسالة تشخيص أو العثور على إجراء اختبار	نموذج لغوي مع استرجاع من الوثائق	صحة المصدر والطراز والإصدار، وعدم اختلاق خطوات
الأمن السيبراني الصناعي	كشف أنماط اتصال أو دخول غير معتادة	جهاز بدأ يرسل أوامر كتابة غير مألوفة إلى PLC	قواعد، وكشف شذوذ متعلم	فصل السلوك المريب عن أعمال الصيانة المصرح بها (24)
المعايرة وإدارة الأجهزة	تحليل تاريخ الانجراف	ترتيب أولويات المعايرة من نتائج الحالة كما وُجدت (As-Found)	إحصاء	ألا تتغير فترات المعايرة دون مراجعة متطلبات الجودة والسلامة (14.8)

كيف أختار؟ القاعدة: ابدأ من الصف الذي يطابق خسارتك المحسوبة بالأرقام، ثم اقرأ عمود «نوع الطريقة»: إن كان الإحصاء أو القواعد أو النموذج الفيزيائي يكفي فلا تشترِ تعلمًا آليًا، فالعمود نفسه يقول إن كثيرًا من التطبيقات لا يحتاجه. والجدول لا يبين نضج

كل تطبيق ولا كلفة بياناته: كشف الشذوذ في المعدات الدوارة ناضج ويتغذى من قياسات موجودة، والحساس الافتراضي يحتاج نتائج مختبر موسومة بزمن العينة، والمساعد اللغوي يحتاج وثائق معتمدة محدّثة. والخطأ الأكثر كلفة اختيار التطبيق قبل قراءة العمود الأخير: أداة تُنشر ولا يُعرف كيف يُتحقق من مخرجاتها إما تُهمل بعد أول إنذارات كاذبة أو تُصدَّق أكثر مما تستحق.

42.9.2 ثلاث حالات محلولة: التشخيص التقليدي وما يضيفه الذكاء الاصطناعي

البيانات في الحالات الثلاث تعليمية، أُعدّت لتوضيح الطريقة، وليست من منشأة بعينها. وتُعرض كل حالة بالتسلسل نفسه: المشكلة، ثم البيانات، ثم الطريقة، ثم النتيجة، ثم قرار المهندس.

الحالة الأولى: مرسل ضغط مجمّد (بيانات تعليمية)

- **المشكلة:** مرسل ضغط وعاء PT-302 يقرأ 6.02 bar منذ 40 دقيقة، والمتحكم راضٍ عن القراءة.
- **البيانات:** الانحراف المعياري للقراءة في آخر 15 دقيقة صفر تقريبًا، وكان في العادة نحو 0.03 bar. وفي الفترة نفسها زاد التدفق الداخل 20%، وتحرك موضع صمام الخرج من 45% إلى 62%.
- **الطريقة التقليدية:** قاعدة تجمّد: إنذار إذا لم تتغير القراءة أكثر من 0.005 bar خلال 15 دقيقة (20.14). وهي تكشف هذه الحالة، لكنها تعطي إنذارات كاذبة حين تستقر العملية فعلًا، في الليل مثلًا.
- **ما يضيفه الذكاء الاصطناعي:** نموذج متعلم يتوقع ضغط الوعاء من التدفق وموضع الصمام وضغط المنبع. القيمة المتوقعة 6.8 bar، والفرق بين المتوقع والمقيس (البقية) 0.8 bar ويتزايد. فالتنبيه هنا مبني على تناقض الإشارات، لا على ثبات القراءة وحده.

- **النتيجة:** مقياس الضغط المحلي PI-302 يقرأ 6.9 bar، فالمرسل معطوب لا العملية مستقرة.
- **قرار المهندس:** تحويل الحلقة إلى المرسل الاحتياطي أو إلى اليدوي، وأمر عمل للمرسل وخط النبض (40.8). **مستوى التدخل:** مراقبة وتوصية.

الحالة الثانية: صمام يسبب تذبذب الحلقة (بيانات تعليمية)

- **المشكلة:** حلقة مستوى تتذبذب بسعة نحو ±3% ودورة نحو 4 دقائق، وأُعيد ضبطها مرتين دون فائدة.
- **البيانات:** القيمة المقاسة (PV) تأخذ شكلًا مثلثيًا، وخرج المتحكم (OP) شكلًا منشاريًا. وهذه بصمة الالتصاق في حلقة تكاملية كالمستوى؛ أما في حلقة التدفق فيكون OP مثلثيًا وPV قريبًا من الموجة المربعة (40.3).
- **الطريقة التقليدية:** رسم PV مقابل OP (40.3)، ثم اختبار في اليدوي بخطوات 0.5%: لا يتحرك الصمام حتى يتراكم الأمر 1.5%، ثم يقفز. فالالتصاق نحو 1.5%.
- **ما يضيفه الذكاء الاصطناعي:** أداة مراقبة أداء الحلقات تفحص 380 حلقة كل ليلة، وتستخرج من شكل الإشارتين علامات الالتصاق، وتضع هذه الحلقة في رأس القائمة. قيمة الأداة في الترتيب والفرز على نطاق واسع، لا في التشخيص النهائي.
- **النتيجة:** بصمة الصمام من الموضّع الذكي تؤكد احتكاكًا عاليًا في الحشوة.
- **قرار المهندس:** صيانة الحشوة، وعدم إعادة الضبط، لأن تخفيف الكسب يطيل دورة التذبذب ويخفف ظهوره ولا يعالج الالتصاق (15.13). **مستوى التدخل:** مراقبة وتوصية.

الحالة الثالثة: محمل تتغير اهتزازاته مع الحمل (بيانات تعليمية)

- **المشكلة:** اهتزاز محمل مضخة 2.8 mm/s عند حمل 70%، و3.6 mm/s عند حمل 95%. وحد الإنذار الثابت 4.5 mm/s، فلا إنذار.

- **البيانات:** ستة أسابيع من الاهتزاز والحمل والسرعة وحرارة الزيت.
- **الطريقة التقليدية:** مقارنة الاهتزاز عند الحمل نفسه أسبوعًا بعد أسبوع، وهي صحيحة لكنها تحتاج إلى انتظار الحمل المتشابه وجهدًا يدويًا.
- **ما يضيفه الذكاء الاصطناعي:** نموذج متعلم يتوقع الاهتزاز من الحمل والسرعة وحرارة الزيت. عند حمل 95% كان المتوقع 3.1 mm/s، والمقيس 3.6 mm/s. والبقية ارتفعت من 0.1 إلى 0.5 mm/s خلال ستة أسابيع، بثبات، عند كل الأحمال. فهذا تدهور لا تغيّر حمل.
- **النتيجة:** تحليل الطيف يظهر مكونات عند ترددات عيب المحمل الدحرجي (33).
- **قرار المهندس:** تبديل المحمل في أقرب فرصة صيانة مخططة، دون إيقاف طارئ، مع متابعة أسبوعية للبقية. **مستوى التدخل:** مراقبة وتوصية.

الدرس المشترك: في الحالات الثلاث لم يحل النموذج محل المهندس ولا محل القياس المستقل. بل قدّم التنبيه أبكر، أو رتّب الأولويات على نطاق لا يستطيعه البشر يدويًا. وبقي التأكيد بقياس مستقل أو اختبار، وبقي القرار بيد المهندس.

42.10 الحدود والمخاطر

- **الصندوق الأسود:** حين لا يستطيع أحد أن يشرح سبب توصية النموذج، لا يمكن مراجعته ولا الوثوق به في القرارات المهمة. وتُفضل النماذج القابلة للتفسير، أو أدوات تشرح أهم المدخلات المؤثرة في كل توصية.
- **الانجراف:** استبدال حساس، أو تغيير مادة خام، أو صيانة كبرى، كلها تغير العلاقات التي تعلمها النموذج. ولذلك يُراقب أداؤه بالمقارنة المستمرة مع الواقع، ويُعاد تدريبه بقرار موثق لا تلقائيًا.
- **الارتباط ليس سببًا:** قد يتعلم النموذج أن الاهتزاز يرتفع حين يتذبذب ضغط الطرد، فيقترح تثبيت ضغط الطرد، والحقيقة أن كليهما نتيجة تكهف سببه انخفاض ضغط السحب. ومهندس العملية هو من يميز.

- **البيانات المنحازة:** نموذج تدرب على سنة بلا صيف حار لن يعرف الصيف الحار.
- **الثقة الزائدة:** أخطر ما في النظام الناجح أن يتوقف الناس عن مراجعته. فالمشغل الذي يتبع التوصيات بلا تفكير يفقد مهارته، وحين يتعطل النظام لا يعرف ما يفعل.
- **الإنذارات الكاذبة:** نظام يطلق عشرة تنبيهات كاذبة لكل تنبيه صحيح سيُهمَل خلال أسابيع، وسيُهمَل معه التنبيه الصحيح.
- **الأمن السيبراني:** كل نموذج يحتاج إلى بيانات، أي إلى وصلة من نظام التحكم إلى الخارج، وكل نموذج يكتب نقاط ضبط هو مسار إلى الداخل. ويُطبق عليه كل ما في الفصل 24: يعيش في المنطقة المنزوعة السلاح أو في الحافة، ويقرأ عبر قناة محكومة، ولا يكتب إلا عبر حواجز.
- **البيانات الشخصية والملكية:** صور الكاميرات وسجلات المشغلين وبيانات الإنتاج لها قواعد قانونية وتعاقدية.

42.11 الذكاء الاصطناعي والسلامة الوظيفية

القاعدة التي لا استثناء لها اليوم: **لا يدخل الذكاء الاصطناعي في تنفيذ وظيفة سلامة مصنفة SIL.** فنظام السلامة يجب أن يكون حتميًا، قابلًا للتحقق، ثابت السلوك، ومعتمدًا وفق IEC 61508 وIEC 61511، ولا تستوفي النماذج المتعلمة هذه الشروط: لا يمكن اختبار كل حالاتها، ولا إثبات سلوكها عند مدخلات لم تُدرب عليها، وقد تتغير بإعادة التدريب. ويصنّف التقرير الفني ISO/IEC TR 5469 (الصادر عام 2024) استخدامات الذكاء الاصطناعي في الأنظمة المرتبطة بالسلامة، وأغلب ما يُقبل اليوم هو التطبيقات التي لا تنفذ الوظيفة نفسها.

ما يُسمح به ويُفيد:

- التنبؤ بالأعطال في عناصر SIS (حساسات وصمامات) لتخطيط الصيانة، مع بقاء الحماية على الحساسات الحقيقية.

- تحليل بيانات اختبارات الإثبات والتجاوزات والطلبات على SIS لاكتشاف أنماط تدهور.
- مساعدة في مراجعة وثائق SRS ومصفوفات السبب والنتيجة (Cause and Effect)، مع بقاء القرار للمهندس.
- محاكاة سيناريوهات الطلب في التوأم الرقمي للتدريب.

التحكم الأساسي: حين يكتب النموذج نقاط ضبط إلى DCS، يُعامل كأي مصدر خارجي: حواجز في DCS نفسه لا في النموذج فقط، وتقييم في HAZOP لسيناريو «النموذج يعطي قيمة خاطئة قصوى» (الفصل 28)، والتأكد من أن طبقات الحماية المستقلة تغطي هذا السيناريو.

42.12 كيف تُنفذ تجربة ناجحة؟

الشكل 42-6: *منهجية تجربة الذكاء الاصطناعي في المنشأة بسبع خطوات، من تحديد المشكلة بالأرقام إلى المراقبة المستمرة، والعودة إلى البداية حين تتغير العملية.*

1. **المشكلة والقيمة:** ابدأ بخسارة محددة بالأرقام: توقفات مضخة، أو استهلاك وقود، أو منتج خارج المواصفة. ولا تبدأ بالتقنية بحثًا عن مشكلة.

2. **خط الأساس:** ما الذي يحققه الحل التقليدي؟ فكثير من المشكلات تُحل بضبط حلقة، أو إنذار محسوب، أو معادلة بسيطة في DCS، بلا تعلم آلي. والنموذج يجب أن يتفوق على خط الأساس، لا على «لا شيء».
3. **البيانات:** جرد الوسوم، وفحص جودتها، وربط سجلات الصيانة، وتقسيم البيانات إلى تدريب واختبار زمنيًا (الاختبار على فترة لاحقة لم يرها النموذج).
4. **النموذج:** أبسط ما يكفي. الانحدار والنماذج الإحصائية تفسر وتعمل في حالات كثيرة، ولا يُلجأ إلى الشبكات العميقة إلا حين تثبت الحاجة.
5. **التحقق:** على بيانات لم يرها النموذج، وعلى حالات أعطال حقيقية سابقة إن وجدت، وبمقاييس يفهمها المشغل: كم عطلًا كان سيكتشف؟ وبأي مهلة؟ وكم إنذارًا كاذبًا في الشهر؟
6. **النشر بحواجز:** استشاريًا أولًا لعدة أشهر، مع متابعة يومية، ثم إغلاق الحلقة إن كان ذلك مبررًا، بالحواجز المذكورة.
7. **المراقبة:** أداء النموذج مع الزمن، وإعادة التدريب عند الانجراف، ومسؤول مسمى عن كل نموذج كما لكل جهاز مسؤول.

مثال محلول (تقييم نتيجة تجربة): نظام كشف شذوذ راقب 40 مضخة سنة كاملة. وقعت 6 أعطال محامل، اكتشف النظام 5 منها بمهلة متوسطها 11 يومًا، وأطلق 38 تنبيهًا كاذبًا.

- الحساسية (Recall) = 5 ÷ 6 ≈ 83%.
- الدقة (Precision) = 5 ÷ (5 + 38) ≈ 12%، أي أن تسعة من كل عشرة تنبيهات كاذبة.
- بمعدل نحو 3 إلى 4 تنبيهات في الشهر يستغرق فحص كل منها ساعتين، وهو عبء مقبول إن أدى إلى منع خمسة أعطال. لكن لو كانت التنبيهات الكاذبة 380 لأهمل الفريق النظام كله. فالمقياسان معًا، لا الحساسية وحدها، هما ما يحدد النجاح. والخطوة التالية خفض الإنذارات الكاذبة بإضافة سياق الحمل وحالة التشغيل إلى النموذج، لا بتضييق العتبة وحده.

42.13 أثره في مهنة مهندس التحكم والقياس

لن يستبدل الذكاء الاصطناعي مهندس التحكم، لكنه سيغير ما يقضي فيه وقته:

- **ما يبقى أساسًا:** فهم العملية، وفيزياء القياس، وهندسة الحلقات والأنظمة، والسلامة الوظيفية. فهذه ما يحتاجه النموذج لتكون بياناته صحيحة وتوصياته منطقية، وما يحتاجه المشغل حين يتعطل النموذج.
- **ما يُضاف:** فهم البيانات وإحصائها، وقراءة النماذج ومساءلتها، وأساسيات البرمجة بلغة مثل Python وSQL للتعامل مع المؤرخ، والشبكات والأمن، والقدرة على تقييم عروض الموردين بعيدًا عن الدعاية.
- **ما يتغير في العمل اليومي:** تقل الأعمال المتكررة (البحث في الوثائق، وكتابة التقارير، ومراجعة الإنذارات واحدًا واحدًا)، ويزيد عمل التحليل والقرار والتحقق.

ويصبح مهندس التحكم حلقة الوصل بين فريق البيانات الذي لا يعرف المصنع وفريق التشغيل الذي لا يعرف النماذج.

- **ما يجب الحذر منه:** فقدان المهارة اليدوية إن تُرك كل شيء للأدوات، والاعتماد على مورد واحد يملك النماذج والبيانات، وتجاهل صغار الفنيين الذين يجب أن يتدربوا على الأدوات الجديدة والقديمة معًا.

الشكل 42-7: *مهارات مهندس التحكم والقياس: ما يبقى من فهم العملية وأجهزة القياس وأنظمة التحكم، وما يُضاف من البيانات والإحصاء والبرمجة والشبكات والأمن والتعلم الآلي والتواصل.*

42.13.1 مستقبل التحكم والآلات الدقيقة والأتمتة: ما يتغير وما يبقى

دخل الذكاء الاصطناعي عمل مهندس التحكم فعلًا، لا في غرفة التحكم وحدها بل في مكتب التصميم والورشة وخط الإنتاج. والسؤال العملي لم يعد «هل سيأتي؟» بل «أين يحسّن العمل، وأين يجب أن يبقى بعيدًا؟». ويمكن تلخيص الاتجاه في عبارة واحدة: **تنتقل الصناعة من الأتمتة إلى الاستقلالية التدريجية**، أي أن يفعل النظام وحده أكثر فأكثر، ضمن حدود يضعها المهندس ويتحقق منها (الشكل 42-8).

الشكل 42-8: *من الأتمتة إلى الاستقلالية التدريجية: خمس درجات من التشغيل اليدوي إلى التشغيل شبه المستقل، وطبقة السلامة الآلية تبقى حتمية ومستقلة في كل الدرجات.*

جدول: المجالات التي يغيّرها الذكاء الاصطناعي، وما يبقى، ودور المهندس

المجال	ما يتغير	ما يبقى	دور مهندس التحكم
هندسة المشاريع	مسودات أوراق البيانات والوصف الوظيفي ومصفوفات السبب والنتيجة تُكتب بمساعد ذكي، وتُولَّد حالات الاختبار من الوصف	المسؤولية عن الوثيقة المعتمدة وتوقيعها	يراجع كل ناتج كما يراجع عمل مهندس جديد، ويتحقق من كل رقم ومصدر

المجال	ما يتغير	ما يبقى	دور مهندس التحكم
برمجة PLC وDCS	توليد مقترحات منطق من الوصف الوظيفي، ومراجعة البرامج آليًا بحثًا عن الأخطاء الشائعة	الاختبار بالمحاكاة و FAT وSAT، والفهم الكامل لكل كتلة (20)	يكتب وصفًا واضحًا قابلًا للاختبار، ويختبر المنطق في كل حالاته الحدية
التشغيل	مساعد يشرح الإنذار ويقترح الإجراء، ونماذج توصي بنقاط تشغيل أفضل	قرار المشغّل وإجراءات التشغيل المعتمدة	يحدد ما يُسمح للنموذج أن يوصي به، وما يُسمح له أن ينفذه، وبأي حدود
الصيانة	الصيانة التنبؤية، وتشخيص ذاتي أعمق في المرسلات والصمامات الذكية	الإصلاح الميداني والمعايرة والتحقق بأداة مرجعية	يربط التنبؤ بأمر عمل وخطة، ويقيس دقة التنبؤ بالأرقام
الآلات الدقيقة و CNC	تعديل سرعة التغذية آليًا بحسب حمل المغزل، وتقدير تآكل الأداة من الاهتزاز والصوت، والفحص بالرؤية الحاسوبية	قواعد الدقة والمعايرة والتتبعية المترولوجية (14)	يضمن أن القياس الذي يتعلم منه النموذج صحيح ومعاير
الروبوتات	روبوتات تعاونية (Cobots) تعمل قرب الإنسان وفق ISO/TS 15066)، وتعلّم المهام بالعرض بدل البرمجة	حواجز السلامة وفئات الإيقاف والتعشيقات (19.9.1)	يصمم الواجهة والتعشيقات والإيقاف الطارئ، ولا يربط السلامة برسالة شبكة عادية
البنية	متحكمات افتراضية تعمل على خوادم صناعية، وأنظمة مفتوحة قابلة للتبديل مثل معيار (O-PAS)، وإيثرنت متقدم للأجهزة الميدانية (Ethernet-APL)	الحتمية الزمنية والتكرار والأمن السيبراني (23 و24)	يقيّم الجديد بمعايير الاعتمادية والأمن، لا بعروض المورّدين

ما لا يتغير، ولن يتغير قريبًا:

- **الفيزياء:** النموذج الذي يتعلم من مرسل منسدّ أو غير معاير يتعلم الخطأ. فجودة القياس أساس كل ذكاء فوقه.

- **السلامة الوظيفية:** وظائف السلامة الآلية تُصمم حتمية، ويُتحقق منها بالحساب والاختبار (29). ولا يُقبل فيها اليوم نموذج متعلّم لا يمكن إثبات سلوكه في كل الحالات. وقد بدأت التشريعات، مثل قانون الذكاء الاصطناعي الأوروبي (EU AI Act)، تعامل الذكاء الاصطناعي في مكونات السلامة معاملة الأنظمة عالية الخطورة.
- **المسؤولية:** التوقيع على وثيقة أو ضبط حماية أو تسليم نظام يبقى على إنسان مؤهل. والأداة تسرّع العمل ولا تتحمل عواقبه.

خطة عملية للمهندس في السنوات الثلاث القادمة:

1. **ثبّت الأساس:** ما يبقى أساسًا كما ذُكر في القسم 42.13 (انظر «ما يبقى أساسًا»)، فهذا ما يميز المهندس الذي يستعمل الأداة عن الأداة نفسها.
2. **تعلّم البيانات:** استخراج البيانات من المؤرخ، وتنظيفها، وقراءة الاتجاهات، مع أساسيات اللغتين المذكورتين في «ما يُضاف» (القسم 42.13).
3. **استعمل المساعدات الذكية في عملك اليومي** بقاعدة ثابتة: كل ناتج يُراجع، وكل رقم يُتحقق من مصدره، ولا تُدخل بيانات المنشأة في أداة لا يسمح بها العقد.
4. **جرّب مشروعًا صغيرًا واحدًا:** كشف شذوذ في مضخة، أو حساس افتراضي لمتغير جودة، بخطوات القسم 42.12، وقِس النتيجة بالأرقام قبل التوسع.
5. **احفظ المهارة اليدوية ودرّب الفنيين:** فالأنظمة الذكية تتعطل أيضًا، وحين تتعطل يعود العمل إلى من يعرف كيف يقيس ويعاير ويشخّص بيده.

المعنى ميدانيًا: مستقبل هذه المهنة ليس أقل حاجة إلى مهندس التحكم، بل أكثر حاجة إلى مهندس يفهم العملية والبيانات معًا، ويعرف أين يضع الذكاء الاصطناعي في البنية، وأين يمنعه.

42.14 دراسة حالة: نظام صيانة تنبؤية بدأ بالفشل ثم نجح

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في محطة توليد اشترت الإدارة نظام صيانة تنبؤية لأسطول من 30 معدة دوارة، وربطته بالمؤرخ، وشغّل المورد النماذج خلال أسابيع. وفي الشهر الأول أطلق النظام أكثر من مئتي تنبيه، تبين أن معظمها يتعلق بفترات البدء والإيقاف التي تعلمها النموذج على أنها تشغيل، وبحساسي اهتزاز معطلين يعطيان قيمًا ثابتة، وبمضخة احتياطية تعمل يومًا واحدًا في الأسبوع فبدا تشغيلها كل مرة شذوذًا. ففقد المشغلون ثقتهم وأغلقوا التنبيهات.

ما أُعيد بناؤه: كُلف مهندس أجهزة من المحطة بالعمل مع فريق المورد ثلاثة أشهر. أُصلح الحساسان وأُضيف فحص لجودة الإشارة يستبعد القيم المجمدة. أُضيفت حالة التشغيل من DCS وسمًا لكل معدة، ودُربت النماذج على فترات التشغيل المستقر فقط، وعُوملت المضخات الاحتياطية بنماذج خاصة تراعي فترات التوقف. وأُعيد النظر في القيمة: خمس معدات حرجة فقط دخلت في الوضع النشط بمتابعة يومية، والبقية في وضع المراقبة. وحُددت لكل تنبيه صيغة موحدة: المعدة، والقياس المنحرف، والسياق، والفحص المقترح.

النتيجة: خلال السنة التالية انخفضت التنبيهات إلى نحو أربعة في الشهر، اكتُشف بها ثلاثة أعطال محامل وعطل محاذاة وتسرب في ختم قبل أن تتطور، وعاد المشغلون إلى الثقة بالنظام تدريجيًا.

الدروس:

- النموذج لا يعرف ما لم يُخبر به: حالة التشغيل وجودة الحساسات شرطان قبل أي تعلم.
- الإنذارات الكاذبة تقتل المشروع أسرع من أي عطل تقني.
- مهندس من الموقع يعرف المعدات شرط النجاح، لا ترف.
- البدء بمعدات قليلة حرجة أفضل من تغطية الأسطول كله في يوم واحد.

دور المهندس ودور الفني: يحدد المهندس المشكلة وقيمتها بالأرقام، ويقارن الحل المتعلم بخط الأساس التقليدي، ويرسم حدود ما يُسمح للنموذج أن يوصي به أو ينفذه، ويبقيه خارج منطق السلامة، ويكون المسؤول المسمى عنه بعد النشر. أما الفني فيضمن ما يقوم عليه النموذج كله: حساسات معايرة، ووسوم حالة تشغيل صحيحة، وسجلات صيانة تذكر متى بدأ العطل وما نوعه. وهو من يتحقق ميدانيًا من كل تنبيه بقياس مستقل قبل أي إجراء، ويبلغ عن التنبيهات الكاذبة حتى يُعاد النظر في النموذج.

42.15 الأخطاء الشائعة

- البدء بالتقنية لا بالمشكلة، ومشاريع تجريبية بلا قيمة محسوبة.
- تجاهل جودة البيانات والحساسات، ثم لوم النموذج.
- تدريب النموذج على بيانات تشمل فترات التوقف والأعطال دون وسم.
- الاكتفاء بالحساسية وتجاهل الإنذارات الكاذبة.
- إغلاق الحلقة قبل مرحلة استشارية كافية، أو دون حواجز في نظام التحكم نفسه.
- الاقتراب من نظام السلامة بأي نموذج متعلم.
- الثقة بمخرجات النموذج اللغوي في إجراء يمس السلامة دون مراجعة المصدر.
- إرسال بيانات المنشأة إلى الخارج دون تقييم أمني وتعاقدي.
- نماذج بلا مسؤول ولا مراقبة، فتنجرف وتبقى تعمل.
- استبعاد مهندسي الموقع والمشغلين من التصميم، ثم الاستغراب من عدم استخدام النظام.

42.16 ملخص

الذكاء الاصطناعي طبقة فوق التحكم الحتمي لا بديل عنه، يتعلم من البيانات ما يصعب كتابته قاعدة. وأنضج تطبيقاته كشف الشذوذ والصيانة التنبؤية، ثم الحساسات الافتراضية، وتحسين نقاط التشغيل بحواجز، ومساعدو المشغل بالنماذج اللغوية المقيدة بوثائق المنشأة، والرؤية الحاسوبية، والتشخيص داخل الأجهزة. وعقبته الأولى البيانات: جودتها وسياقها ووسمها. ومخاطره: الصندوق الأسود، والانجراف، والثقة الزائدة، والإنذارات الكاذبة، والأمن. ولا يدخل في وظائف السلامة المصنفة. وتُنفذ تجاربه بمنهجية: مشكلة بالأرقام، وخط أساس، وبيانات، ونموذج بسيط، وتحقق، ونشر استشاري ثم مغلق بحواجز، ومراقبة. وسيغير المهنة بإضافة مهارات البيانات والأمن، وسيبقى فهم العملية والقياس والسلامة أساسها.

وفي الفصل التالي: ينتقل الفصل 43 «النبائط الإلكترونية الأساسية وفحصها وقراءة الدوائر» من أعلى طبقات النظام إلى أدناها: المكونات التي تُبنى منها البطاقات والمرسلات، لأن كل نموذج ذكي يبقى رهين قياس سليم ودائرة سليمة.

42.17 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق بين نموذج مبني من الفيزياء ونموذج متعلم من البيانات؟ ومتى يُفضل كل منهما؟
2. لماذا يغلب كشف الشذوذ على تصنيف الأعطال في التطبيقات الصناعية؟
3. نموذج حرارة محمل $T = 35 + 0.42 \times L + 0.5 \times Ta$، حيث T بالدرجة المئوية، و L الحمل بالنسبة المئوية من 0 إلى 100، وTa الحرارة المحيطة بالدرجة المئوية، والمعاملان 0.42 و0.5 بوحدة °C لكل وحدة من L وTa على الترتيب، وانحراف البواقي المعياري 1.2 °C. عند حمل 85% وحرارة محيطة 30 °C قُرئت 92 °C. احسب البقية بوحدات σ وفسرها.

4. ما الشروط الأربعة لاستخدام حساس افتراضي في حلقة تحكم؟
5. اذكر خمسة حواجز واقية يجب أن توجد قبل السماح لنموذج بكتابة نقاط ضبط إلى DCS، وأين تُنفذ؟
6. لماذا لا يدخل الذكاء الاصطناعي في وظيفة سلامة مصنفة SIL؟ وما الذي يُسمح به حول SIS؟
7. ما مخاطر استخدام نموذج لغوي في غرفة التحكم؟ وكيف تُخفف؟
8. نظام كشف شذوذ اكتشف 8 من 10 أعطال وأطلق 120 تنبيهًا كاذبًا في السنة. احسب الحساسية والدقة، وما الذي تقترحه؟
9. ما الانجراف؟ واذكر ثلاثة أحداث في المصنع تستدعي إعادة التحقق من النموذج.
10. في الحالة 42.14، ما الأسباب الثلاثة لفشل المرحلة الأولى؟ وما الذي يتعلمه مهندس التحكم عن دوره من هذه الحالة؟

مراجع الفصل: ISO/IEC TR 5469، السلامة الوظيفية وأنظمة الذكاء الاصطناعي؛ IEC 61508 وIEC 61511 لحدود الأنظمة المرتبطة بالسلامة؛ سلسلة IEC 62443 لأمن الاتصال بين النماذج وأنظمة التحكم؛ ISA-95 لتكامل أنظمة المؤسسة والتحكم؛ NAMUR NE 175 وNE 176 حول مفهوم المراقبة والتحسين المفتوح ونماذج البيانات؛ أدبيات التحكم التنبؤي بالنموذج والأنظمة الخبيرة؛ كتاب المؤلف عن التوربينات الغازية، قسم الصيانة التنبؤية (R42)؛ خبرة المؤلف في مشاريع مراقبة الحالة في المحطات.

الباب الثامن (تكميلي): الخلفية الإلكترونية لأنظمة التحكم

باب تكميلي لمن أراد أن يفهم ما داخل الأجهزة والبطاقات: النبائط الإلكترونية وفحصها وقراءة الدوائر (الفصل 43)، ثم المعالجات والمتحكمات الدقيقة والأنظمة المدمجة (الفصل 44). ويستطيع الفني أن يقرأ الفصل 43 مبكرًا مع فصول القياس، لأنه أداته في فحص البطاقات والمرسلات.

الفصل 43: النبائط الإلكترونية الأساسية وفحصها وقراءة الدوائر

لمن هذا الفصل: فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس ومهندس التحكم الذي يفتح لوحة أو بطاقة إدخال وإخراج أو مصدر تغذية أو مرسلًا معطلًا، ويحتاج إلى أن يعرف ما أمامه من مكونات، وما وظيفة كل منها، وكيف يفحصها بجهاز القياس المتعدد قبل أن يقرر استبدال بطاقة كاملة. ويفيد الطالب والمهندس الجديد بوصفه جسرًا بين الإلكترونيات التي درسها ودوائر المصنع التي يعمل عليها.

الفكرة الأساسية: كل جهاز قياس أو تحكم، مهما كان ذكيًا، مبني من عدد محدود من النبائط: مقاومات تحد التيار وتقسم الجهد، ومكثفات تخزن الشحنة وتنعّم الجهد، وملفات تخزن الطاقة المغناطيسية، وديودات تمرر التيار في اتجاه واحد، وترانزستورات تعمل مفاتيح أو مكبرات، ومرحلات تعزل وتنفذ. من يعرف سلوك كل نبيطة سليمة، وكيف تفشل عادةً، يستطيع أن يشخص العطل بخطوات قليلة، وأن يفرق بين نبيطة تالفة وأخرى سليمة ضللته قراءتها داخل الدائرة.

43.1 لماذا يحتاج مهندس التحكم إلى الإلكترونيات؟

لم يعد إصلاح البطاقات الإلكترونية على مستوى المكونات عملًا يوميًا في أغلب المنشآت، فالسياسة الشائعة استبدال الوحدة كاملة. ومع ذلك يحتاج مهندس التحكم إلى الإلكترونيات في مواقف كثيرة:

- **الواجهات:** بين نظام التحكم والمعدات دوائر بسيطة يصممها المهندس أو يعدلها: مقاومة 250 Ω لتحويل 4–20 mA إلى 1–5 V، وديود حماية على ملف مرحل، ومقاومة تحميل لحساس ثنائي الأسلاك، ومقرن ضوئي للعزل.
- **التشخيص:** حين يتكرر احتراق مخرج PLC، أو يعيد مصدر تغذية إقلاعه من تلقاء نفسه، أو يومض مدخل رقمي، فالسبب غالبًا نبيطة أو توصيل يُكتشف بالقياس لا بالتخمين.
- **الأنظمة القديمة:** لوحات الإنذار والحمايات القديمة في محطات كثيرة مبنية من مكونات منفصلة، وقطع غيارها لم تعد متاحة، فيصبح فهم الدائرة شرطًا لإبقائها تعمل.
- **اختيار المعدات ومراجعة التصاميم:** تقييم مصدر تغذية أو مرحل ساكن أو مغير سرعة يحتاج إلى فهم مكوناته وحدودها الحرارية والكهربائية.

الشكل 43-1: *أشكال شائعة للنبائط الإلكترونية المنفصلة: مقاومة بحلقات ألوان، ومكثف سيراميكي، ومكثف كيميائي بقطبية، وديود، وثنائي باعث للضوء، وترانزستور بغلاف TO-92، وMOSFET بغلاف TO-220، ومرحل صغير، ومقاومة متغيرة.*

43.2 أدوات الفحص وقواعد السلامة

جهاز القياس المتعدد (Multimeter): الأداة الأولى في فحص النبائط. يقيس الجهد المستمر والمتردد والتيار والمقاومة، ويفحص الاستمرارية بصفارة والديود، ويقيس في كثير من الطرازات السعة والتردد. ويُشرح استعماله خطوة بخطوة في القسم الفرعي التالي، مع اختيار فئته (CAT) بحسب مكان الاستخدام.

43.2.1 جهاز القياس المتعدد خطوة بخطوة: الفولتميتر والأميتر والأوميتر

جهاز القياس المتعدد (Multimeter، ويُسمى في الورش «الملتيميتر» أو «الأفوميتر» AVO) يجمع عدة أجهزة في جهاز واحد: **الفولتميتر** لقياس الجهد، و**الأميتر** لقياس التيار، و**الأوميتر** لقياس المقاومة (وهو ما يقصده بعضهم بـ«رزستميتر»). منه نوعان: **رقمي بشاشة** (DMM) وهو الأشيع، و**تناظري بعقرب** ما زال مفيدًا لرؤية التذبذب البطيء. ما يلي للرقمي على دوائر منخفضة الجهد وحلقات الأجهزة؛ أما قياسات لوحات القدرة فتحتاج إلى تدريب وجهاز ومجسات بتصنيف جهد وفئة (IEC 61010) **CAT** مناسبين للموقع. ويبين الشكل 43-2 الواجهة وطرق التوصيل.

الفرق بين القياسات الثلاثة:

القياس	معناه	الجهاز والوحدة	طريقة التوصيل
الجهد (Voltage)	فرق الجهد بين نقطتين	فولتميتر، فولت V	بالتوازي بين النقطتين دون فتح الدائرة
التيار (Current)	معدل مرور الشحنة في الدائرة	أميتر، أمبير A	بالتوالي داخل مسار التيار بعد فتحه
المقاومة (Resistance)	معارضة العنصر لمرور التيار	أوميتر، أوم Ω	على طرفي العنصر بعد فصل التغذية

الجهاز يغيّر وظيفته بحسب المفتاح الدوّار؛ ولذلك **تغيير وضع المفتاح قد يتطلب أيضًا تغيير مدخل السلك الأحمر**، وهذا أصل معظم الحوادث الصغيرة مع الجهاز.

المداخل والرموز:

المدخل أو الرمز	معناه
COM	مدخل السلك الأسود؛ مرجع القياس وليس بالضرورة أرضيًا
VΩ	مدخل الأحمر لقياس الجهد والمقاومة، وغالبًا الاستمرارية والديود
mA / µA	مدخل الأحمر للتيارات الصغيرة ضمن الحد المكتوب (مصهر داخلي)
A أو 10A	مدخل التيار الأعلى بحسب حد الجهاز ومدة القياس المسموحة
V⎓ أو DCV	جهد مستمر (بطارية، حلقة 24 V)
V~ أو ACV	جهد متردد
A⎓ / A~	تيار مستمر أو متردد
Ω	مقاومة
رمز الصفارة	فحص الاستمرارية
Hz	تردد
رمز المكثف	سعة كهربائية

قد يشترك أكثر من قياس في وضع واحد ويُنتقل بينها بزر SELECT، ويختلف ترتيب المداخل والوظائف باختلاف الطراز، فاقرأ لوحة جهازك.

1. قياس الجهد (الفولتميتر) — مثال بطارية 1.5 V:

1. ضع الأسود في COM والأحمر في VΩ.
2. اختر V⎓ للجهد المستمر (أو V~ للمتردد).
3. في الجهاز اليدوي المدى اختر مدى أعلى من المتوقع (2 V أو 20 V بحسب المتاح)؛ وفي الجهاز ذي المدى التلقائي (Auto Range) يختار الجهاز المدى بنفسه.

4. ضع الأحمر على موجب البطارية والأسود على سالبها.
5. اقرأ الشاشة: 1.58 V هو جهد البطارية وقت القياس، و−1.58 V يعني أن المجسين معكوسان بالنسبة للقطبية (في المتردد لا يدل العكس على قطبية ثابتة).

الفولتميتر يوصل **بين طرفي العنصر دون فتح الدائرة**، ويمكن قياس هبوط الجهد على مصباح أو مقاومة وهي تعمل. **تحذير:** لا تقس الجهد والسلك الأحمر في مدخل A أو mA؛ مقاومة الأميتر شبه صفرية فتسبب قصرًا.

2. قياس التيار (الأميتر) — دائرة بطارية ومصباح صغير تيارها المتوقع ضمن قدرة الجهاز:

1. افصل التغذية.
2. ضع الأسود في COM والأحمر في مدخل التيار المناسب (mA أو 10A).
3. اختر A⎓ أو mA⎓، وابدأ بالمدى الأعلى المناسب إن لم تعرف القراءة، مع الالتزام بحد المدخل والمصهر.
4. افصل السلك بين موجب البطارية والمصباح.
5. صِل الأحمر بموجب البطارية والأسود بطرف المصباح الذي فصلته؛ يبقى الطرف الآخر متصلًا بسالب البطارية.
6. شغّل الدائرة واقرأ (مثلًا 0.12 A = 120 mA)، ثم افصل التغذية قبل فك التوصيل أو تغيير المدخل.
7. **أعد السلك الأحمر إلى VΩ** بعد الانتهاء.

ممنوع وضع الأميتر مباشرة بين طرفي البطارية أو بين طرفي أي مصدر جهد؛ فمقاومته الداخلية شبه صفرية، فيحدث قصر يحرق المصهر أو يؤذي المستخدم. ولا يُقاس تيار محرك أو حمل كبير بجهاز قياس متعدد يدوي إن تجاوز التيار قدرته؛ يُستخدم مقياس الملقط.

3. قياس المقاومة (الأوميتر): الأوميتر يرسل تيار اختبار صغيرًا من بطاريته الداخلية، ولذلك يُستخدم على دائرة **مفصولة التغذية**:

1. افصل التغذية وتحقق من غياب الجهد بالقياس.
2. فرّغ المكثفات بالطريقة المناسبة إن وُجدت.
3. ضع الأسود في COM والأحمر في VΩ، واختر Ω.
4. لفحص مقاومة داخل دائرة، افصل أحد أطرافها لمنع المسارات الموازية من تغيير القراءة.
5. ضع المجسين على طرفي المقاومة واقرأ: مقاومة مكتوب عليها 1 kΩ تظهر 0.998 kΩ أي 998 Ω.

القراءة	معناها المحتمل
قريبة من 0 Ω	مقاومة منخفضة جدًا أو قصر، بحسب العنصر
220 Ω	مقاومة 220 أوم
4.7 kΩ	4700 أوم
2 MΩ	مليونا أوم
OL	دائرة مفتوحة أو مقاومة تتجاوز مدى الجهاز

OL لا تعني دائمًا أن العنصر تالف؛ قد يكون المدى غير مناسب. ومقاومة أسلاك المجسات (نحو 0.2 إلى 0.5 Ω) تؤثر عند قياس المقاومات الصغيرة، فتُلمس المجسات ببعضها أولًا وتُطرح القراءة (أو تُستخدم وظيفة REL).

4. فحص سلك أو مصهر بالصفارة (Continuity): اختر رمز الصفارة بعد فصل التغذية، واستخدم COM وVΩ: المس المجسين ببعضهما أولًا للتحقق من استجابة الجهاز، ثم ضع مجسًا على كل طرف من السلك أو المصهر المعزول عن المسارات الأخرى. صدور صفارة يعني مقاومة أقل من عتبة الجهاز (عادة بضع عشرات من الأوم)، وOL يعني عدم وجود مسار موصل. مصهر منفصل يقرأ قريبًا من الصفر ويصدر صفارة يُرجَّح أنه سليم؛ لكن

الصفارة وحدها لا تثبت جودة الكابل تحت الحمل ولا سلامة عزله (لذلك جهاز قياس العزل في الجدول التالي).

5. مقياس التيار بالملقط (Clamp Meter، ويُسمى في الورش «الكلمب ميتر»): جهاز ذو فك يحيط بالسلك لقياس التيار **دون قطع مساره**:

1. اختر التيار AC أو DC بحسب الدائرة وما يدعمه الجهاز (ليست كل الأجهزة تقيس DC).
2. في قياس DC نفّذ التصفير ZERO وفق دليل الجهاز قبل إحاطة السلك.
3. ضع الفك حول **موصل واحد فقط** وأغلقه بالكامل.
4. اقرأ الشاشة (مثلًا 3.6 A).

إذا أحطت سلكي الذهاب والعودة معًا تعادلت مجالاتهما وظهرت قراءة قريبة من الصفر. وليست كل أجهزة الملقط حساسة بما يكفي لإشارات 4–20 mA؛ ولذلك يوجد **ملقط mA** خاص بحلقات الأجهزة يقيس دون فتح الحلقة.

6. قياسات وأجهزة أخرى:

الوظيفة أو الجهاز	استخدامه وطريقة القراءة
فحص الديود	على عنصر مفصول التغذية ومعزول عند الحاجة؛ ديود سيليكون عادي يعطي نحو 0.5 إلى 0.8 V أماميًا وOL عكسيًا؛ القيمة هبوط جهد لا مقاومة (القسم 43.6)
قياس السعة (Capacitance)	افصل المكثف وفرّغه بأمان وتحقق من غياب الجهد؛ اختر رمز المكثف واقرأ مثلًا 9.8 µF؛ قياس السعة وحده لا يكشف كل أعطاله (ESR في القسم 43.4)
قياس التردد Hz	على إشارة ضمن حدود مدخل الجهاز؛ 50 Hz تعني 50 دورة في الثانية

الوظيفة أو الجهاز	استخدامه وطريقة القراءة
جهاز قياس العزل (Megger)	يقيس مقاومة العزل بجهد اختبار محدد (500 أو 1000 V)؛ على معدات معزولة ومفصولة عن الإلكترونيات الحساسة، مع تفريغ الشحنة بعد الاختبار؛ ليس بديلًا من الأوميتر
الميكروأوميتر (Micro-ohmmeter)	للمقاومات الصغيرة جدًا مثل نقاط تلامس القواطع والوصلات؛ يستخدم توصيلًا بأربعة أسلاك (Kelvin) لإلغاء أثر مقاومة أسلاك القياس
راسم الذبذبات (Oscilloscope)	يعرض شكل الجهد مع الزمن لتشخيص النبضات والتشويش وتغير الإشارة (القسم 23.12)

مثال محلول (حلقة 4–20 mA بجهاز القياس المتعدد):

- **المعطيات:** مرسل ضغط مضبوط خطيًا على 0–10 bar، وقياس التيار في الحلقة بالتوالي أعطى 12.00 mA.
- **الافتراضات:** الحلقة سليمة والمرسل معاير، والأميتر في مدخل mA على وضع DC، وفُتحت الحلقة وفق إجراء الموقع (أو استُخدم ملقط mA فلم تُفتح).
- **الحل بالوحدات:**
  - النسبة من المدى = (I − 4) ÷ 16 = (12 − 4) ÷ 16 = 0.5
  - الضغط = النسبة × المدى = 0.5 × 10 = 5 bar.
  - بالفولتميتر على مقاومة الدخل 250 Ω: V = I × R = 12 × 0.25 = 3.0 V ضمن 1–5 V.
  - التفسير: قراءة الجهد تُؤخذ من دون فتح الحلقة.
- **معنى النتيجة:** القياس بالفولتميتر على مقاومة الدخل أسلم لأنه لا يفتح الحلقة؛ وفتح حلقة عاملة قد يسبب إنذارًا أو فصلًا (قيمة سيئة دون 3.6 mA)، فيُجرى ضمن إجراءات الموقع مع تجاوز موثَّق. ولا يُستخدم وضع Ω

على الحلقة وهي مغذّاة.

الشكل 43-2: *جهاز القياس المتعدد: (أ) الواجهة النموذجية بالمفتاح الدوّار والمداخل الأربعة؛ (ب) التوصيل الصحيح: الفولتميتر بالتوازي على طرفي العنصر، والأميتر بالتوالي بعد فتح المسار، والأوميتر على عنصر مفصول التغذية بطرف مفكوك؛ (ج) مقياس الملقط حول موصل واحد؛ (د) قياس تيار حلقة 4–20 mA وتحويله إلى ضغط.*

أجهزة أخرى: جهاز LCR لقياس السعة والمحاثة بدقة، ومقياس ESR لكشف جفاف المكثفات الكيميائية دون فكها غالبًا، وراسم الذبذبات لرؤية التموج والنبضات، ومصدر

تغذية معمل بحد تيار لتجربة الدوائر بأمان، وجهاز فحص المكونات الرقمي الذي يتعرف على نوع الترانزستور وأطرافه.

قواعد لا يُتنازل عنها:

- لا تُقاس المقاومة ولا الاستمرارية ولا الديود في دائرة مُغذّاة. افصل التغذية وتحقق من غيابها بالقياس.
- فرّغ المكثفات الكبيرة قبل لمسها أو قياسها، خاصة في مصادر التغذية ومغيرات السرعة، حيث قد يبقى جهد خطير دقائق بعد الفصل.
- البطاقات التي فيها MOSFET ودوائر متكاملة حساسة للكهرباء الساكنة: يُستخدم سوار التأريض وسطح العمل المؤرض والأكياس المضادة للكهرباء الساكنة.
- جهاز قياس العزل (Megger) يولد 500 V أو 1000 V، ويُتلف الإلكترونيات. فلا يُستخدم على كابلات موصولة ببطاقات أو مرسلات قبل فصلها.
- القياس داخل الدائرة قد يُضلل، لأن التيار يجد مسارات موازية عبر مكونات أخرى. فإذا جاءت القراءة غير متوقعة، يُفك طرف واحد على الأقل من النبيطة ويُعاد القياس.

43.2-أ مرجع مصوّر: عشرون مكوّنًا إلكترونيًا شائعًا، شكلها ورمزها وفحصها الأولي

قبل تفصيل كل نبيطة في الأقسام التالية، هذا مرجع سريع يجمع أشهر عشرين مكوّنًا يصادفها مهندس الآلات الدقيقة وفنيها على بطاقات الأجهزة ومصادر التغذية ولوحات التحكم (الشكل 43-3). والأرقام في الجداول تطابق أرقام الشكل. وهي أهم المكونات الأساسية، لا حصر لكل الأنواع.

الشكل 43-3: *عشرون مكوّنًا إلكترونيًا شائعًا بشكلها الخارجي ورمزها في المخططات. والشكل وترتيب الأرجل يختلفان بحسب رقم القطعة، فيُرجع دائمًا إلى ورقة بياناتها (Datasheet).*

الصورة للتعرّف على المكوّن فقط. أما ترتيب الأرجل وحدود الجهد والتيار والقراءات الطبيعية، فتُؤخذ من ورقة البيانات (Datasheet) بحسب رقم القطعة المكتوب عليها، لأن الأشكال الخارجية تتشابه كثيرًا.

قبل الفحص بالمقياس المتعدد (Multimeter): تنطبق هنا قواعد السلامة والقياس نفسها (انظر القسم 43.2: «قواعد لا يُتنازل عنها»)، ويُضاف: تُفرَّغ المكثفات بمقاومة تناسب جهدها وطاقتها لا بقصر أطرافها بمفك، وتُفسَّر القراءة OL بحسب وضع الجهاز.

جدول: المكونات 1–9: المقاومات والمكثفات والملفات والديودات

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	طريقة الفحص والنتيجة المتوقعة
1. المقاومة (R)	تحدّ التيار، وتقسم الجهد	على وضع Ω، تُقارن القراءة بالقيمة المكتوبة أو بحلقات الألوان مع السماحية. فمقاومة 1 kΩ ±5% مقبولة بين 950 و1050 Ω
2. المقاومة المتغيرة (Potentiometer)	منزلق يغيّر المقاومة ليضبط جهدًا أو إشارة	بين الطرفين الخارجيين المقاومة الكلية. وبين المنزلق وأحد الطرفين تتغير القراءة بسلاسة مع الدوران، والقفزات أو الانقطاع المتكرر علامة تلف
3. المكثف غير القطبي (C)	يخزن الطاقة في مجال كهربائي، ويُستعمل للترشيح والربط بين المراحل	بعد تفريغه وعزله يُقاس بوضع السعة ويُقارن بقيمته وسماحيته. وانخفاض مقاومته لحظيًا أثناء الشحن لا يعني قصرًا
4. المكثف الإلكتروليتي	سعة كبيرة لتنعيم جهد التغذية، وله قطبية	تُقاس السعة، ويُفحص الـ ESR بجهاز مناسب عند تشخيص أعطال التغذية. فالسعة الصحيحة وحدها لا تثبت سلامته، والانتفاخ أو التسريب علامة تلف (القسم 43.4)

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	طريقة الفحص والنتيجة المتوقعة
5. الملف (L)	يخزن الطاقة في مجال مغناطيسي ويقاوم تغير التيار	تُفحص استمرارية السلك ومقاومته، والمقاومة المنخفضة طبيعية غالبًا، وOL تعني قطعًا. وقياس الحث بجهاز LCR يكشف ما لا يكشفه الأوم
6. الديود (D)	يمرر التيار في اتجاه واحد أساسًا	بوضع فحص الديود: الأحمر على الأنود A والأسود على الكاثود K يعطي 0.5–0.8 V لديود السيليكون، وبالعكس OL
7. ديود زينر	يثبت الجهد تقريبًا عند قيمته في الانحياز العكسي	الفحص الأمامي كالديود. أما جهد الزينر نفسه فيحتاج إلى مصدر محدود التيار ومقاومة، ولا يؤكده المقياس المتعدد وحده
8. الثنائي الباعث للضوء (LED)	يحوّل جزءًا من الطاقة الكهربائية إلى ضوء بتيار أمامي	وضع فحص الديود قد يضيئه خافتًا ويعرض هبوط جهده. وبعض الأجهزة لا تعطي جهدًا كافيًا لبعض الألوان، فعدم الإضاءة وحده لا يثبت التلف
9. جسر التقويم	أربعة ديودات تحوّل الجهد المتردد إلى مستمر نابض	تُفحص الديودات الأربعة كل على حدة كما في الجدول التالي

فحص الديود وجسر التقويم بالتفصيل: في القسم 43.6 (قراءات القصر والقطع ودلالة الحلقة على الكاثود)؛ وهذه القيم لا تنطبق على كل أنواع الديودات، فديود شوتكي مثلًا هبوطه أقل، خاصة خارج الدائرة وبجهاز مناسب.

جدول: فحص جسر التقويم ذي الأطراف (~ و~ و+ و−) بوضع فحص الديود

المجس الأحمر	المجس الأسود	القراءة المتوقعة
كل طرف ~ بالتتابع	+	هبوط جهد ديود (0.5–0.8 V)
−	كل طرف ~ بالتتابع	هبوط جهد ديود (0.5–0.8 V)

المجس الأحمر	المجس الأسود	القراءة المتوقعة
عكس المجسين في كل قياس مما سبق	—	OL غالبًا

جدول: المكونات 10–14: الترانزستورات والثايرستور والترياك

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	الفحص الأولي
10. ترانزستور NPN	تيار القاعدة B يتحكم بالتيار بين المجمع C والباعث E، فيعمل مفتاحًا أو مضخمًا	للسيليكوني البسيط: الأحمر على B والأسود على E ثم على C يعطي 0.5–0.8 V لكل وصلة، وبالعكس OL
11. ترانزستور PNP	كالـ NPN بقطبيات واتجاهات معكوسة	الأسود على B والأحمر على E ثم على C يعطي 0.5–0.8 V، وبالعكس OL
12. MOSFET	جهد البوابة G بالنسبة إلى المنبع S يتحكم بالتوصيل بين المصرف D والمنبع	لنوع القناة N المعزز (N-channel Enhancement): تُوصل G مع S لتفريغ البوابة، ثم يُفحص ديود الجسم بين S وD (الأحمر على S). والقصر المستمر بين D وS في الاتجاهين علامة اشتباه قوية
13. الثايرستور (SCR)	نبضة في البوابة G تبدأ التوصيل من A إلى K، ويبقى موصلًا حتى ينخفض تياره دون تيار الإمساك	المقياس يكشف القصر الواضح بين A وK ولا يثبت سلامة التشغيل. والفحص الوظيفي يحتاج إلى مصدر مستمر منخفض ومعزول ومحدود التيار، وحمل ومقاومة بوابة من ورقة البيانات
14. الترياك (TRIAC)	مفتاح إلكتروني يمرر التيار في الاتجاهين لأحمال التيار المتردد	يُفحص غياب القصر بين MT1 وMT2 والبوابة غير محفزة. وإثبات عمله يحتاج إلى دائرة اختبار للتحفيز والتوصيل في الاتجاهين

وفي الترانزستور العادي يُفحص أيضًا ما بين C وE في الاتجاهين، وتظهر OL غالبًا والقاعدة غير موصولة. ولا تُعمَّم هذه القاعدة على ترانزستور دارلنغتون، ولا على الترانزستورات التي بداخلها مقاومات أو ديودات. واجتياز فحص الوصلات لا يثبت الكسب ولا الأداء تحت الحمل (القسم 43.7) و(القسم 43.8). وفي الثايرستور لا تطفئه إزالة إشارة البوابة بعد التقاطه، بل يلزم أن ينخفض تيار الحمل دون تيار الإمساك. وقد لا يعطي المقياس تيارًا كافيًا لالتقاطه أصلًا (القسم 43.9).

جدول: المكونات 15–20: المرحّل والمصهر والحساسات والمحوّل والدوائر المتكاملة

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	طريقة الفحص
15. المرحّل (Relay)	ملف كهرومغناطيسي يحرك نقاط تلامس لفتح دائرة أو إغلاقها	تُقاس مقاومة الملف وتُقارن بمواصفاته. وتُفحص COM–NC وCOM–NO قبل تغذية الملف وبعدها بجهده ونوعه المقننين. وصوت النقرة وحده لا يثبت سلامة التلامسات (القسم 43.10)
16. المصهر (Fuse)	ينصهر فيقطع الدائرة عند تجاوز التيار وفق منحنى الزمن والتيار	خارج الدائرة: مقاومة منخفضة جدًا تعني الاستمرارية، وOL تعني الانقطاع. ويُبدَّل بمثله تمامًا بعد معرفة سبب انصهاره (القسم 26.6.2)
17. المقاومة الحرارية (NTC)	تنخفض مقاومتها مع ارتفاع الحرارة، وتُستعمل للاستشعار أو لتحديد تيار البدء	تُقاس مقاومتها ثم تُدفّأ بلطف ضمن حدودها فتنخفض بسلاسة. والتحقق الدقيق بمقارنة المقاومة بالحرارة في ورقة البيانات
18. المقاومة الضوئية (LDR)	تنخفض مقاومتها مع زيادة الضوء	على وضع Ω تُقارن القراءة وهي مغطاة بالقراءة وهي معرضة للضوء، وتكون أعلى في الظلام

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	طريقة الفحص
19. المحوّل (Transformer)	ينقل الطاقة بين ملفاته بالحث المغناطيسي، ويغيّر الجهد بنسبة اللفات	تُفحص استمرارية كل ملف. ولا يُتوقع توصيل بين الابتدائي والثانوي في المحوّل المعزول. والأوم لا يكشف كل قصر بين اللفات، ولا يثبت سلامة العزل تحت الجهد (القسم 43.5)
20. الدائرة المتكاملة (IC)	عناصر كثيرة في شريحة واحدة: تضخيم، أو توقيت، أو تنظيم، أو معالجة	لا فحص عام لها بالمقياس. يُحدد رقمها ووظيفتها، ثم تُفحص التغذية والإشارات المتوقعة وفق ورقة البيانات، وقد يلزم راسم إشارة (Oscilloscope) ودائرة اختبار (القسم 43.11)

القاعدة الذهبية: رقم القطعة المكتوب عليها هو نقطة البداية دائمًا. فمنه يُعرف ترتيب الأرجل، وحدود الجهد والتيار، والقراءات التي تُعد طبيعية لتلك القطعة بالذات.

مكوّنات أخرى تتكرر في بطاقات الأجهزة ومصادر التغذية: العشرون السابقة هي الأساس، وتظهر معها في العمل الميداني خمس عشرة عائلة أخرى (الشكل 43-4).

الشكل 43-4: *خمس عشرة عائلة إضافية من المكونات برمزها وشكلها الخارجي الشائع (رسوم توضيحية): ديود شوتكي، والديود الضوئي، وديود الحماية من النبضات (TVS)، وترانزستور دارلنغتون، وJFET، وIGBT، والدياك، والفاريستور (MOV)، والمصهر القابل لإعادة الضبط (PPTC)، والعازل الضوئي، ومرحّل الحالة الصلبة (SSR)، ومنظّم الجهد، والمضخم التشغيلي والمقارن، والكريستالة، والمفتاح. ورسوم MOSFET وJFET وIGBT تمثل النوع ذا القناة N، ورسم TVS يمثل النوع ثنائي الاتجاه. والعبوة لا تحدد نوع القطعة ولا ترتيب أرجلها.*

جدول: المكونات 21–35: مبدأ العمل والفحص وحدوده

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	الفحص الأولي	حدود الفحص
21. ديود شوتكي (Schottky)	وصلة معدن وشبه موصل، هبوطها الأمامي منخفض وسرعتها عالية، وتشيع في مصادر التغذية والحماية من عكس القطبية	كالديود في الاتجاهين، والهبوط الأمامي بتيار المقياس نحو 0.15–0.45 V	الهبوط المنخفض ليس قصرًا، والقيمة تتغير بالقطعة والحرارة

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	الفحص الأولي	حدود الفحص
22. الديود الضوئي (Photodiode)	يولّد تيارًا يتغير مع الإضاءة، ويعمل غالبًا بانحياز عكسي في دائرة قياس	فحص الديود يكشف بعض الأعطال، ثم يُختبر تغير التيار بين الظلام والضوء بدائرة انحياز ومضخم	تياراته قد تكون أصغر من قدرة المقياس العادي، وشكله قد يشبه LED
23. ديود الحماية من النبضات (TVS)	يحدّ الجهد العابر بامتصاص النبضة ضمن قدرته، وله نوع أحادي الاتجاه وثنائي الاتجاه	يُبحث عن القصر بوضع الديود أو Ω. الأحادي يشبه الديود أماميًا، والثنائي قد يعطي OL في الاتجاهين	OL لا يثبت سلامة جهد الانهيار ولا قدرة الامتصاص
24. ترانزستور دارلنغتون	ترانزستوران متصلان لكسب تيار عالٍ، وقد يحوي مقاومات أو ديود حماية داخلية	تُراجع دائرته الداخلية أولًا. هبوط B–E قد يساوي وصلتين تقريبًا، وقد لا يكفيه جهد بعض المقاييس	لا تنطبق عليه نتائج فحص الترانزستور المفرد حرفيًا
25. ترانزستور JFET	قناة بين D وS تتحكم بها وصلة بوابة منحازة عكسيًا، ويكون موصلًا عند VGS = 0	تُفحص وصلة البوابة إلى القناة بوضع الديود، ثم تغير تيار D–S مع جهد البوابة في دائرة اختبار	التوصيل بين D وS عند جهد بوابة صفري طبيعي، ولا تُطبق عليه قاعدة MOSFET
26. ترانزستور IGBT	بوابة معزولة تتحكم بمسار قدرة بين C وE، ويشيع في الإنفرترات ومحركات السرعة المتغيرة (VFD)	بعد تفريغ G–E يُفحص قصر C–E وتسرب البوابة، والديود الموازي إن وُجد	ليس لكل IGBT ديود مدمج، والفحص لا يثبت تحمل الجهد ولا سرعة التبديل

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	الفحص الأولي	حدود الفحص
27. الدياك (DIAC)	يبدأ التوصيل في الاتجاهين عند جهد انهياره، ويُستعمل لتحفيز الترياك	المقياس يعطي غالبًا OL في الاتجاهين، والتحقق بقياس جهد الانهيار بمصدر معزول قابل للضبط ومقاومة تحديد	OL لا يثبت سلامته، فقد يكون مفتوحًا تالفًا
28. الفاريستور (MOV)	مقاومة غير خطية تنخفض بشدة عند ارتفاع الجهد، وتُوصل على التوازي لتحد النبضات	يُفحص التشقق والاحتراق، ثم مقاومته خارج الدائرة وتكون عالية جدًا، والقصر عطل	المقاومة العالية لا تثبت جهد التثبيت ولا طاقة الامتصاص
29. المصهر القابل لإعادة الضبط (PPTC)	ترتفع مقاومته بالتسخين عند التيار الزائد، ويعود تدريجيًا بعد زوال العطل وتبريده	يُقاس باردًا وتُقارن مقاومته بورقة البيانات	لا يُختبر تيار فصله عمدًا بالمقياس
30. العازل الضوئي (Optocoupler)	LED داخلي ينقل الإشارة ضوئيًا إلى ترانزستور أو عنصر آخر، مع فصل كهربائي بين الجهتين	يُفحص الـ LED، ثم يُشغَّل بتيار محدود بمقاومة، ويُراقب تبدل جهد الخرج مع مقاومة سحب	لا يثبت جهد العزل ولا نسبة نقل التيار (CTR)
31. مرحّل الحالة الصلبة (SSR)	واجهة إلكترونية تشغل خرج MOSFET أو TRIAC أو SCR بلا تلامسات ميكانيكية	يُحدد نوع الدخل والخرج، ثم يُختبر بجهد تحكم مقنن وحمل مناسب ومصدر معزول محدود التيار	له تيار تسرب عند الإيقاف وحد أدنى للحمل، **وليس وسيلة عزل آمنة للصيانة**

الرقم والمكوّن	مبدأ العمل	الفحص الأولي	حدود الفحص
32. منظّم الجهد (Voltage Regulator)	يثبت جهد الخرج ضمن مجال للدخل والحمل، خطيًا أو بالتبديل	يُفحص القصر، ثم يُغذى بجهد مسموح مع مكثفاته وحمل مناسب، ويُقاس الدخل والخرج والتموج	لا ترتيب أرجل موحدًا، ويلزم هامش فرق الجهد (Dropout)، وقد يفصل حراريًا
33. المضخم التشغيلي والمقارن (Op-Amp / Comparator)	المضخم يكبّر فرق المدخلين مع تغذية راجعة، والمقارن يبدّل خرجه بحسب أي المدخلين أعلى	تُفحص التغذية ومجال الدخل، ثم يُختبر في دائرة موصى بها، والمقارن بجهدين معلومين	خرج المجمع المفتوح يحتاج مقاومة سحب، وفحص Ω لا يحكم على الشريحة
34. الكريستالة والرنان (Crystal / Resonator)	رنين ميكانيكي كهرضغطي يثبت تردد المذبذب، مرجعًا للساعة والتوقيت	يُفحص نشاط المذبذب بمسبار منخفض السعة، أو بجهاز اختبار ومقياس تردد	OL بالمقياس طبيعي، وتحميل المسبار قد يوقف التذبذب
35. المفتاح والزر (Switch / Push Button)	يفتح مسارًا أو يغلقه بنقاط NO أو NC، ثابتًا أو لحظيًا	تُفحص الاستمرارية مع تغيير الوضع والتغذية مفصولة	ارتداد التلامس عند الانتقال طبيعي ويحتاج إزالة ارتداد (Debounce) في بعض التطبيقات (القسم 3.3.2)

جدول: حروف الأرجل الشائعة

الرمز	المعنى
A / K	الأنود والكاثود في الديود والثايرستور
B / C / E	القاعدة والمجمع والباعث في الترانزستور ثنائي القطبية
G / D / S	البوابة والمصرف والمنبع في ترانزستورات FET

الرمز	المعنى
G / C / E	البوابة والمجمع والباعث في IGBT
MT1 / MT2 / G	الطرفان الرئيسان والبوابة في التريـاك
COM / NO / NC	المشترك، والمفتوح عادةً، والمغلق عادةً في التلامسات

مثال محلول (مقاومة LED على مخرج 5 V):

- **المعطيات:** مصدر 5 V، والهبوط الأمامي لـ LED الأحمر نحو 2 V، والتيار المطلوب 5 mA.
- **الحل بالوحدات:**
  - $R = (V - V_LED) \div I = (5 - 2) \div 0.005 = 600\ \Omega$.
  - أقرب قيمة قياسية أعلى 680 Ω.
  - التيار الفعلي = 4.4 mA ≈ 680 ÷ (5 − 2).
  - القدرة على المقاومة = 0.013 W ≈ 680 × 0.0044^2 = $I^2 \times R$.
  - التفسير: التيار الفعلي أقل قليلًا من المطلوب وهذا مقصود، والقدرة صغيرة جدًا فتكفيها أصغر مقاومة.
- **معنى النتيجة:** تُختار القيمة القياسية الأعلى حتى لا يتجاوز التيار المطلوب. ويُتحقق من تصنيف الـ LED في ورقة بياناته، لأن هبوطه يختلف بين الألوان والأنواع.

43.3 المقاومة

التعريف والوظيفة: المقاومة (Resistor) نبيطة تعيق مرور التيار وفق قانون أوم: V = I × R. وتُستخدم لتحديد التيار، وتقسيم الجهد، وتحويل التيار إلى جهد، وضبط كسب المكبرات، وتفريغ المكثفات.

أنواعها:

النوع	الخواص	الاستخدام النموذجي
الغشاء الكربوني	رخيصة، وتفاوتها غالبًا ±5%	الدوائر العامة
الغشاء المعدني	دقيقة ±1% أو أفضل، ومعامل حرارتها صغير	دوائر القياس ومقاومات تحويل الإشارة
السلكية (Wire-wound)	تتحمل قدرة كبيرة	مقاومات الحمل والتفريغ والكبح
السطحية (SMD)	صغيرة جدًا، والقيمة مكتوبة بأرقام	البطاقات الحديثة
المتغيرة (Potentiometer)	ثلاثة أطراف، والوسط منزلق	ضبط الصفر والمدى في الأجهزة القديمة

كيف أختار؟ القاعدة: ما يدخل في مسار القياس (مقاومة تحويل 4–20 mA، ومقاومات كسب المكبر) يأخذ غشاءً معدنيًا بتفاوت ضيق ومعامل حرارة صغير، وما يحمل قدرة (تفريغ، كبح، حمل) يأخذ السلكية بقدرة تفوق المحسوبة بهامش، والباقي غشاء كربوني. والجدول لا يبين معامل الحرارة رقمًا ولا تحمل الجهد النبضي، وهما ما يفصل بين مقاومتين بالقيمة نفسها في حلقة قياس أو دائرة حماية. والخطأ الأكثر كلفة مقاومة تحويل ±5% في حلقة قياس، فيظهر خطأ 5% في كل قراءة ويُعاير المرسل عبثًا.

مقاومات خاصة: الثرمستور NTC تنخفض مقاومته مع الحرارة، ويُستخدم في القياس والحد من تيار البدء. والثرمستور PTC ترتفع مقاومته فجأة عند حد معين، ويُستخدم مصهرًا ذاتي الاستعادة وفي حماية ملفات المحركات. والمقاومة الضوئية LDR تتغير مع الضوء. والمقاومة المتغيرة مع الجهد (Varistor أو MOV) تبقى عالية حتى جهد معين ثم توصل بقوة، فتحمي من الاندفاعات.

قراءة القيمة: في المقاومة ذات أربع حلقات، الحلقتان الأوليان رقمان، والثالثة مضاعف، والرابعة التفاوت.

الشكل 43-5: *جدول ألوان المقاومات، ومثال لمقاومة حلقاتها أصفر وبنفسجي وبني وذهبي، أي 470 Ω بتفاوت ±5%.*

مثال محلول (القدرة المبددة): مقاومة تحويل الإشارة 250 Ω في حلقة 4–20 mA.

- عند 20 mA: الجهد $= 0.020 \times 250 = 5\ \text{V}$، والقدرة $= I^2 \times R = 0.020^2 \times 250 = 0.1\ \text{W}$.
- مقاومة بقدرة 0.25 W كافية، مع هامش أكثر من الضعف.
- لكن دقة التحويل هنا تتوقف على تفاوت المقاومة وثباتها الحراري، فمقاومة ±5% قد تعطي 5.25 V بدل 5 V، أي خطأ 5% في القياس. لذلك تُستخدم مقاومة غشاء معدني ±0.1% ومعامل حرارة منخفض.

الفحص: تُقاس المقاومة بعد فصل التغذية وفك أحد طرفيها إن أمكن، وتُقارن بالقيمة الاسمية والتفاوت. والأعطال الشائعة: القطع (OL)، وارتفاع القيمة مع الزمن في المقاومات عالية القيمة، وتغير اللون أو تشقق الغلاف من الحرارة، وهو دليل على حمل زائد يجب البحث عن سببه قبل الاستبدال. أما المقاومة المتغيرة فتُفحص بقياس المقاومة بين الطرف الأوسط وأحد الطرفين أثناء التدوير البطيء، والقراءة يجب أن تتغير بسلاسة دون قفزات.

43.4 المكثف

التعريف والوظيفة: المكثف (Capacitor) لوحان موصلان يفصل بينهما عازل، يخزن الشحنة الكهربائية: Q = C × V، ووحدة السعة الفاراد، والقيم العملية بالميكرو والنانو والبيكو فاراد. ويمرر المكثف التيار المتردد ويمنع المستمر بعد شحنه. ولذلك يُستخدم في تنعيم الجهد بعد التوحيد، وفصل الضجيج عن خطوط التغذية قرب الدوائر المتكاملة (Decoupling)، وتمرير الإشارات المتغيرة مع حجب المركبة المستمرة، والتوقيت مع المقاومات، وتحسين معامل القدرة، وبدء المحركات أحادية الطور.

أنواعه:

النوع	الخواص	ملاحظات
السيراميكي	قيم صغيرة، واستجابة سريعة، ولا قطبية له	فصل الضجيج والترددات العالية
الغشائي (Film)	ثابت ودقيق ويتحمل جهودًا عالية	دوائر التوقيت والتيار المتردد والكبح
الكيميائي الألومنيوم	سعة كبيرة بحجم صغير، وله قطبية	التنعيم في مصادر التغذية؛ يجف مع الحرارة والزمن
التانتالوم	سعة كبيرة وحجم صغير جدًا	حساس للجهد العكسي والاندفاعات؛ قد يحترق بقصر
المكثفات الفائقة (Supercapacitors)	سعة بالفاراد	تغذية احتياطية قصيرة للذاكرة والساعات

كيف أختار؟ القاعدة: فصل الضجيج قرب الدوائر المتكاملة سيراميكي، والتوقيت ودوائر التيار المتردد غشائي، والتنعيم في التغذية كيميائي ألومنيوم بجهد مقنن أعلى من جهد العمل بهامش، والحجم الصغير جدًا تانتالوم بشرط قطبية مضمونة وبلا اندفاعات. والجدول لا يبين ESR ولا الحرارة المقننة ولا العمر بالساعات، وهي ما يحدد عمر مصدر

التغذية أكثر من السعة. والخطأ الأكثر كلفة استبدال مكثف كيميائي في مصدر تبديلي بآخر بالسعة نفسها لكن ESR مختلف أو جهد أقل أو مقنن لحرارة أدنى، فيعود العطل بعد أشهر في خزانة حارة.

ثابت الزمن: حين يُشحن مكثف عبر مقاومة، يصل جهده إلى نحو 63% من جهد المصدر بعد زمن $\tau = R \times C$، وإلى أكثر من 99% بعد 5τ. والتفريغ يتبع المنحنى نفسه نزولًا.

الشكل 43-6: *شحن المكثف وتفريغه عبر مقاومة بمضاعفات ثابت الزمن، وطريقة التفريغ الآمن بمقاومة معزولة بدل قصر الأطراف.*

مثال محلول (الطاقة المخزنة وزمن التفريغ): في مغير سرعة صغير مكثف في وصلة التيار المستمر سعته 1000 µF مشحون إلى 560 V، وعلى أطرافه مقاومة تفريغ 100 kΩ.

- الطاقة المخزنة $= \tfrac{1}{2} \times C \times V^2 = 0.5 \times 0.001 \times 560^2 \approx 157$ J، وهي طاقة كافية لإحداث إصابة خطيرة.
- ثابت الزمن $= 100{,}000 \times 0.001 = 100$ s.
- بعد 5τ، أي نحو 8 دقائق، ينخفض الجهد إلى أقل من 1% أي نحو 4 V. ولهذا يكتب المصنعون على هذه الأجهزة: انتظر عدة دقائق بعد الفصل، ثم تحقق بالقياس قبل اللمس.

الفحص: يُفرغ المكثف أولًا. ثم تُقاس سعته بجهاز القياس أو LCR وتُقارن بالقيمة الاسمية وتفاوتها، الذي قد يبلغ ±20% في الكيميائية. ويُقاس ESR في المكثفات الكيميائية، فارتفاعه دليل جفاف حتى لو كانت السعة مقبولة. وبوضع المقاومة يُرى في المكثف السليم الكبير أن القراءة تبدأ صغيرة ثم ترتفع حتى OL مع شحنه من الجهاز، أما القراءة الثابتة المنخفضة فتعني قصرًا أو تسريبًا. وبالنظر: انتفاخ رأس المكثف الكيميائي، أو تسرب سائله، أو تشقق السيراميكي، علامات تلف واضحة.

43.5 الملف والمحول

الملف (Inductor): سلك ملفوف يخزن الطاقة في مجال مغناطيسي، ويقاوم تغير التيار فيه. يُستخدم في المرشحات، ومصادر التغذية التبديلية، وخنق الضجيج على الكابلات. والخاصية التي تهم مهندس التحكم أن الملف يولد جهدًا عكسيًا كبيرًا حين يُقطع تياره فجأة: $V = L \times di/dt$. وهذا ما يحدث في ملفات المرحلات والصمامات الملفية والكونتاكتورات، وهو سبب إضافة ديودات الحماية ودوائر RC والمقاومات المتغيرة مع الجهد (القسم 43.6).

المحول (Transformer): ملفان على قلب مغناطيسي، ونسبة الجهد تساوي نسبة عدد اللفات تقريبًا. ومنه محولات التغذية، ومحولات العزل، ومحولات التيار CT والجهد VT في القياس والحماية.

الفحص: تُقاس مقاومة الملف، فالقطع يعطي OL، والقصر بين اللفات يعطي قيمة أقل من المعتادة لكنه صعب الكشف بالمقاومة وحدها، ويحتاج مقارنة المحاثة أو اختبار نبضي. ويُقاس العزل بين الملفات وبين الملف والقلب بجهاز العزل بعد فصل كل ما هو إلكتروني. وتحذير مهم: لا يُفتح ثانوي محول التيار ولابتدائيه تيار، لأن جهده يرتفع إلى قيم خطيرة؛ يُقصر الثانوي أولًا بمفتاح القصر.

43.6 الديود

من أين تأتي أشباه الموصلات؟ السيليكون النقي موصل ضعيف (شبه موصل ذاتي)، لأن لذرته أربعة إلكترونات تكافؤ ترتبط كلها بجاراتها. فإذا أُضيفت إليه شوائب بنسب ضئيلة (Doping) تغير سلوكه: الشوائب ذات الإلكترونات الخمسة، مثل الفوسفور، تترك إلكترونًا حرًا فينتج نوع N، والشوائب ذات الإلكترونات الثلاثة، مثل البورون، تترك فجوة فينتج نوع P. وحين تلتقي منطقة P بمنطقة N تتكون وصلة (PN Junction)، وهي أساس الديود والترانزستور.

التعريف والوظيفة: الديود (Diode) يمرر التيار من المصعد (Anode) إلى المهبط (Cathode)، ويمنعه في الاتجاه العكسي. وفي الانحياز الأمامي يحتاج إلى جهد صغير ليبدأ التوصيل: نحو 0.6 إلى 0.7 V للسيليكون، ونحو 0.2 إلى 0.4 V لديود شوتكي. والحلقة المرسومة على جسمه تدل على المهبط.

أنواعه ووظائفها:

- **ديود التوحيد:** يحول المتردد إلى مستمر نابض، ويُجمع أربعة منها في قنطرة (Bridge) لتوحيد الموجة كاملة.
- **ديود زينر (Zener):** يُستخدم في الانحياز العكسي، فيحافظ على جهد ثابت عند قيمته، مثل 5.1 V أو 24 V، ويُستخدم لتثبيت الجهد وحماية المداخل.
- **الثنائي الباعث للضوء (LED):** يبعث ضوءًا عند التوصيل، وجهده الأمامي نحو 1.8 إلى 3.3 V حسب اللون، ويحتاج دائمًا إلى مقاومة تحدد تياره.
- **ديود شوتكي (Schottky):** جهده الأمامي منخفض وسرعته عالية، ويُستخدم في مصادر التغذية التبديلية ودوائر التكرار (Diode OR) لمصادر 24 V.
- **ديود كبت الجهد العابر (TVS):** يستجيب في جزء من النانو ثانية ليقص الاندفاعات، ويُستخدم في حماية خطوط الإشارة ومداخل الأجهزة الميدانية من الصواعق القريبة.

- **ديود الحماية (Flyback أو Freewheeling):** يُركب معكوسًا على ملف مرحل أو صمام ملفي بتيار مستمر، فيمر فيه تيار الملف عند فصله وتتبدد طاقته، فيُحد الجهد العكسي.

مثال محلول (نموذج 0.7 V): مصدر +5 V، ومقاومة 20 kΩ، وديود سيليكوني بانحياز أمامي إلى الأرضي.

- جهد الديود 0.7 V، فجهد المقاومة 4.3 V = 0.7 − 5.
- التيار = 0.215 mA = 20,000 ÷ 4.3.
- جهد الخرج عند نقطة التقاء المقاومة بالديود = 0.7 V.

مثال محلول (قنطرة التوحيد): محول ثانويه 8.5 V فعّال يغذي قنطرة ومكثف تنعيم.

- ذروة الجهد = 8.5 × √2 ≈ 12 V.
- في كل نصف دورة يمر التيار في ديودين، فتنقص الذروة نحو 1.4 V، لتصبح نحو 10.6 V على المكثف.
- ويتوقف التموج على سعة المكثف وتيار الحمل:
- $$\Delta V \approx I \div (2 \times f \times C)$$
- لحمل 0.5 A ومكثف 2200 µF على 50 Hz: ΔV ≈ 0.5 ÷ (100 × 0.0022) ≈ 2.3 V.
- التفسير: تموج بهذا القدر على نحو 10.6 V كبير، ولذلك يتبع القنطرة منظم جهد.

الشكل 43-7: *فحص الديود بجهاز القياس المتعدد في الاتجاهين، وموجات الجهد في قنطرة توحيد مع مكثف تنعيم.*

الفحص: في وضع اختبار الديود، الطرف الأحمر موجب. يُوضع الأحمر على المصعد والأسود على المهبط، فتظهر قراءة بين 0.5 و0.8 V للديود السيليكوني السليم. ثم يُعكس الطرفان فتظهر OL. أما القراءة القريبة من الصفر في الاتجاهين فتعني قصرًا، وOL في الاتجاهين تعني قطعًا. وديود زينر يُفحص بالطريقة نفسها في الاتجاه الأمامي، أما جهد الزينر نفسه فيحتاج إلى مصدر تغذية مع مقاومة. والثنائي الباعث للضوء LED قد يضيء ضوءًا خافتًا في وضع اختبار الديود في بعض الأجهزة، وهذا دليل سلامته.

43.7 الترانزستور ثنائي القطبية (BJT)

التعريف والوظيفة: الترانزستور ثنائي القطبية ثلاث طبقات من شبه الموصل، إما NPN أو PNP، وأطرافه القاعدة (B) والمجمع (C) والباعث (E). تيار صغير في القاعدة يتحكم في تيار أكبر بين المجمع والباعث، ونسبة التكبير hFE أو β تتراوح عادة بين 20 و300. ويعمل في منطقتين تهمان مهندس التحكم:

- **مفتاح:** في القطع لا يمر تيار، وفي الإشباع يمر أقصى تيار ويكون الجهد بين المجمع والباعث صغيرًا، نحو 0.2 V. وهكذا تعمل مخارج PLC الترانزستورية ودوائر تشغيل المرحلات.
- **مكبر:** في المنطقة الفعالة بين القطع والإشباع، كما في مراحل التكبير في الدوائر التناظرية.

مثال محلول (تشغيل مرحل بترانزستور): ملف مرحل 24 V مقاومته 1200 Ω يُشغل بترانزستور NPN، والإشارة القادمة 24 V، وأدنى β في ورقة البيانات 50.

- تيار الملف = 24 ÷ 1200 = 20 mA.
- أدنى تيار قاعدة لازم = 20 ÷ 50 = 0.4 mA. وللتأكد من الإشباع نصمم على ضعفين أو أكثر، أي نحو 1 mA.
- مقاومة القاعدة = (24 − 0.7) ÷ 0.001 ≈ 23 kΩ، فتُختار القيمة القياسية 22 kΩ.
- ويُضاف ديود حماية معكوس على الملف، وإلا فإن الجهد العكسي عند الفصل قد يتجاوز جهد انهيار الترانزستور ويتلفه بعد مرات قليلة.

الشكل 43-8: *رمز الترانزستور NPN ونموذج فحصه بديودين متصلين بالقاعدة، ودائرة تشغيل مرحل من خرج منطقي مع ديود الحماية.*

الفحص: يُعامل الترانزستور كأنه ديودان يلتقيان في القاعدة. في NPN: الأحمر على القاعدة والأسود على المجمع يعطي نحو 0.6 إلى 0.7 V، وكذلك مع الباعث. وتكون قراءة القاعدة–الباعث عادة أعلى قليلًا من القاعدة–المجمع، وهذا يساعد على تمييز الطرفين. أما بين المجمع والباعث فتظهر OL في الاتجاهين. وفي PNP تنعكس الأقطاب: الأسود على القاعدة. وأي قراءة قريبة من الصفر بين المجمع والباعث تعني قصرًا. ويقيس بعض الأجهزة hFE مباشرة إذا وُضع الترانزستور في المقبس المخصص.

43.8 ترانزستور MOSFET وIGBT

MOSFET: ترانزستور تأثير المجال ذو البوابة المعزولة. أطرافه البوابة (G) والمصرف (D) والمنبع (S). يتحكم فيه جهد البوابة لا تيارها، فالبوابة معزولة تمامًا تقريبًا. فإذا تجاوز جهد البوابة عتبة معينة، نحو 2 إلى 4 V في الأنواع العادية، أصبحت المقاومة بين المصرف والمنبع صغيرة جدًا (Rds(on))، قد تبلغ ميلي أوم. ويحتوي داخله على ديود بين المنبع والمصرف (Body Diode). وهو المكون الأساسي في مصادر التغذية التبديلية ومخارج التيار المستمر الحديثة والمغيرات الصغيرة.

IGBT: يجمع بوابة MOSFET المعزولة مع قدرة الترانزستور ثنائي القطبية على حمل تيارات وجهود كبيرة. أطرافه البوابة والمجمع والباعث. وهو قلب مغيرات سرعة المحركات (VFD) والعاكسات ومصادر التغذية غير المنقطعة الكبيرة.

الفحص: البوابة حساسة جدًا للكهرباء الساكنة، فيُمسك المكون من جسمه ومع سوار التأريض. وخطوات فحص MOSFET قناة N بوضع اختبار الديود:

1. تُقصر الأطراف الثلاثة لحظة لتفريغ البوابة.
2. الأحمر على المنبع والأسود على المصرف: تظهر قراءة ديود الجسم، نحو 0.4 إلى 0.7 V. وبالعكس: OL.
3. تُلمس البوابة بالطرف الأحمر لحظة مع بقاء الأسود على المنبع، فتُشحن البوابة وتفتح القناة.

4. الآن بين المصرف والمنبع قراءة صغيرة جدًا في الاتجاهين، لأن القناة موصلة.
5. تُقصر البوابة مع المنبع لتفريغها، فتعود القراءة إلى OL في اتجاه المصرف إلى المنبع.

أي قراءة منخفضة بين البوابة وأي طرف آخر تعني تلف العازل، وهو عطل شائع بعد الاندفاعات أو الكهرباء الساكنة. أما وحدات IGBT الكبيرة في المغيرات فتُفحص عادة بإجراء المصنّع وأجهزة خاصة، ويكفي جهاز القياس لكشف القصر الواضح في ديوداتها العكسية.

43.9 الثايرستور والترياك والمرحل الساكن

- **الثايرستور (SCR):** ديود بطرف ثالث هو البوابة. لا يوصل حتى تصل نبضة إلى البوابة، فإذا بدأ التوصيل بقي موصلًا حتى لو زالت النبضة، ولا يُطفأ إلا إذا انخفض تيار المصعد تحت تيار الإمساك. في التيار المتردد يطفئه مرور الموجة بالصفر تلقائيًا. يُستخدم في موحدات القدرة المتحكم بها، وشواحن البطاريات، وأنظمة إثارة المولدات.
- **الترياك (TRIAC):** يعادل ثايرستورين متعاكسين، فيوصل في الاتجاهين، ويُستخدم للتحكم بأحمال التيار المتردد كالسخانات والمصابيح.
- **المرحل الساكن (SSR):** مرحل بلا أجزاء متحركة، فيه مقرن ضوئي للعزل وترياك أو ثايرستوران أو MOSFET للخرج. مزاياه عمر طويل وتبديل صامت وسريع، ويُفضل في التحكم بالسخانات بنبضات متكررة. وعيوبه تبديد حرارة يحتاج مشتتًا، وجهد متبقٍ عند التوصيل، وتيار تسريب صغير عند الفصل. وهذا التسريب قد يُبقي حملًا صغيرًا، مثل مدخل PLC أو ملف مرحل صغير، في حالة التشغيل حتى بعد فصل المرحل الساكن. كما أن فشله الشائع قصر، أي أنه يبقى موصلًا، فلا يُعتمد عليه وحده في وظائف الأمان.

الشكل 43-9: *نبائط التبديل القدرية الشائعة ورموزها وأطرافها: MOSFET وIGBT والثايرستور والترياك.*

43.10 المرحل والمقرن الضوئي

المرحل الكهرومغناطيسي: ملف يجذب عند تغذيته ذراعًا يحرك تلامسات مفتوحة عادةً أو مغلقة عادةً. يعزل دائرة التحكم عن دائرة الحمل، ويسمح بتبديل عدة دوائر بإشارة واحدة. ومنطق الفشل الآمن فيه أن يبقى الملف مغذّى في التشغيل الطبيعي فيسقط المرحل إلى وضع الأمان عند انقطاع التغذية أو السلك (يُفصَّل في الفصل 46 من الجزء القادم). **الفحص:** تُقاس مقاومة الملف وتُقارن بورقة البيانات، مثل مئات الأوم لملفات 24 V. ثم يُغذى الملف ويُسمع صوت الجذب، وتُقاس الاستمرارية في التلامسات قبل التغذية وبعدها. ويُقاس هبوط الجهد على التلامس تحت الحمل إن أمكن، لأن التلامس المتآكل قد يعطي استمرارية بجهاز القياس ويفشل مع التيار الحقيقي.

المقرن الضوئي (Optocoupler): ثنائي باعث للضوء وترانزستور ضوئي في غلاف واحد، ينقل الإشارة بالضوء فيعزل الجانبين كهربائيًا بعزل قد يبلغ آلاف الفولتات. نجده

في مداخل ومخارج PLC الرقمية، ومصادر التغذية التبديلية، وبطاقات الاتصال. **الفحص:** يُفحص جانب الدخل كأي LED، ثم يُغذى الدخل عبر مقاومة ويُقاس توصيل الترانزستور في الخرج.

43.11 الدوائر المتكاملة الشائعة

- **منظمات الجهد:** الخطية مثل 7805 التي تعطي 5 V ثابتًا، وLM317 القابلة للضبط. تحتاج إلى فرق جهد بين الدخل والخرج، نحو 2 V، وتبدد الفرق حرارة. والمنظمات التبديلية أعلى كفاءة وأكثر تعقيدًا.
- **مكبر العمليات (Op-Amp):** مكبر بكسب كبير جدًا يُضبط سلوكه بمقاومات خارجية. منه تُبنى دوائر تكبير إشارات المزدوجات الحرارية، ومحولات التيار إلى جهد، والمقارنات، والمرشحات. والقاعدتان العمليتان لتحليله مع التغذية الراجعة السالبة: لا يدخل تيار إلى مدخليه، ويسعى الخرج ليجعل جهد المدخلين متساويًا.
- **المؤقت 555 والدوائر المنطقية:** في الفصل 17 (المؤقتات في القسم 17.9).
- **المحولات بين التناظري والرقمي (ADC وDAC):** في بطاقات الإدخال والإخراج التناظرية، ودقتها بعدد البتات، فبطاقة 16 بت تقسم مداها إلى 65,536 خطوة.

الفحص: لا تُفحص الدائرة المتكاملة بجهاز القياس كالمكونات المنفصلة. الأسلوب العملي أن تُقاس التغذية على أطرافها أولًا وفق ورقة البيانات، ثم إشارات الدخل والخرج أثناء التشغيل، ويُقارن السلوك بالمتوقع. فمنظم 7805 دخله 12 V وخرجه صفر، مع برودة جسمه، غالبًا تالف من الداخل، أما إن كان جسمه ساخنًا فالأرجح أن خرجه مقصور بالحمل فدخل في حد التيار والإيقاف الحراري، ويُحسم الأمر بفصل الحمل.

43.12 قراءة الدوائر وتشخيص الأعطال

الرموز: تُرسم الدوائر الكهربائية في المنشآت الحديثة غالبًا وفق IEC 60617، وفي المنشآت ذات الأصل الأمريكي وفق ANSI/IEEE 315. والفرق الأوضح في رمز المقاومة:

مستطيل في IEC وخط متعرج في ANSI، ويظهر الفرق أيضًا في رموز التلامسات والملفات. ويجب قراءة جدول الرموز (Legend) في أول صفحات المخططات قبل تفسير أي رمز غير مألوف، لأن بعض المصنعين يضيفون رموزهم الخاصة.

أنواع المخططات: المخطط المبدئي (Schematic) يشرح عمل الدائرة، ومخطط التوصيل (Wiring Diagram) يبين الأطراف الحقيقية وأرقامها، ومخطط الحلقة (Loop Diagram) يتتبع إشارة جهاز واحد من الحقل إلى بطاقة النظام مرورًا بصناديق التوصيل والخزائن (الفصل 5). وفي التشخيص نبدأ عادة من مخطط الحلقة لمعرفة المسار، ثم نعود إلى المخطط المبدئي لفهم ما يجب أن يحدث في كل نقطة.

منهجية التشخيص: الخطأ الأشيع ليس نقص المعرفة، بل القفز إلى استبدال القطع قبل فهم العطل. والمنهجية التالية تختصر الوقت وتمنع استبدال قطع سليمة:

الشكل 43-10: *منهجية من سبع خطوات لتشخيص عطل في دائرة إلكترونية، تبدأ بالأعراض والتغذية وتنتهي بالاختبار والتوثيق.*

1. **الأعراض:** متى ظهر العطل؟ هل هو دائم أم متقطع؟ هل تزامن مع صيانة أو عاصفة أو تغيير في الحمل؟

2. **المسار:** حدد في المخطط مسار الإشارة أو التغذية المعنية، والنقاط التي يمكن القياس عندها.
3. **التغذية أولًا:** قِس جهد التغذية عند النبيطة نفسها لا عند المصدر، وافحص المصاهر والأرضي. نسبة كبيرة من الأعطال تنتهي هنا.
4. **التقسيم:** قِس في منتصف المسار. إن كانت الإشارة سليمة هناك فالعطل بعدها، وإلا فقبلها. وكرر حتى تحصر الجزء المعطل.
5. **فحص النبيطة:** بعد فصل التغذية وتفريغ المكثفات، افحص النبيطة المشتبه بها، ويُفضل خارج الدائرة أو بفك أحد أطرافها.
6. **الاستبدال وسبب التلف:** استبدل بمثيل مطابق في القيمة والجهد والقدرة والسرعة، ثم اسأل: لماذا تلفت؟ فالترانزستور الذي احترق بسبب غياب ديود الحماية سيحترق بديله أيضًا.
7. **الاختبار والتوثيق:** اختبر الوظيفة كاملة في الظروف الحقيقية، وسجل العطل وسببه وما تغير.

مثال محلول (حصر عطل في حلقة 4–20 mA): مرسل ضغط ثنائي الأسلاك يتغذى من الحلقة، يُقرأ على الشاشة 0 mA (حالة «إشارة سيئة»)، وشاشته المحلية مطفأة (ولو كان مرسلًا رباعي الأسلاك بتغذية مستقلة لعملت شاشته رغم انقطاع الحلقة، وهذا أول ما يُسأل عنه: كيف يتغذى المرسل؟). كل قياسات الجهد التالية بالنسبة إلى سالب مصدر الحلقة (0 V) والشكل 43-11 يبين نقاطها:

- في صندوق التوصيل الميداني نقيس جهد الطرف الموجب للحلقة (V3): 0 V. معنى ذلك أن التغذية لا تصل إلى هذه النقطة.
- في خزانة النظام نقيس جهد مصدر 24 V على طرف البطاقة: 24 V سليم.
- على مصهر الحلقة في الخزانة: 24 V على طرفه القريب من المصدر (V1) و 0 V على طرفه البعيد (V2)، كلاهما بالنسبة إلى 0 V؛ أي أن الجهد عبر المصهر نفسه 24 V. المصهر مقطوع.

- قبل تركيب مصهر جديد نبحث عن سبب القطع: نقيس المقاومة بين طرفي الكابل بعد فصله من الجهتين، فنجد قصرًا جزئيًا في صندوق توصيل دخله الماء. يُصلح العزل والتوصيل، ثم يُركب المصهر، وتُفحص الحلقة.

الشكل 43-11: *حصر عطل في حلقة 4–20 mA بمرسل ثنائي الأسلاك: نقاط قياس الجهد V1 وV2 على طرفي المصهر وV3 في صندوق التوصيل، وكلها بالنسبة إلى سالب المصدر؛ ولو كان المرسل رباعي الأسلاك لعملت شاشته رغم انقطاع الحلقة.*

وفي هذا المثال لم نحتج إلى فحص أي نبيطة إلكترونية؛ فالمنهجية أوصلتنا إلى العطل الحقيقي خلال دقائق.

43.13 حالة ميدانية: مكثفات جافة وإعادة إقلاع لا تفسير لها

نوع الحالة: مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في محطة ضخ نائية، كانت وحدة PLC تعيد الإقلاع مرة أو مرتين في الأسبوع دون نمط واضح، ولم يسجل النظام أي عطل قبل كل إعادة. استُبدل المعالج ثم بطاقة الاتصال، وبقيت المشكلة.

لاحظ فني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس أن أغلب مرات الإعادة حدثت في ساعات الظهيرة، وفي لحظات قريبة من تشغيل مضخة بمرحل كبير. فوُصل راسم ذبذبات بخاصية الالتقاط (Trigger) على خرج مصدر التغذية 24 V، وضُبط على هبوط الجهد تحت 20 V. وبعد يومين التقط هبوطًا مدته نحو 15 ms إلى 17 V لحظة تشغيل ملف الكونتاكتور، وهو ما يكفي لإعادة إقلاع المعالج.

عند فحص مصدر التغذية، وعمره أكثر من اثنتي عشرة سنة في خزانة بلا تكييف، كانت مكثفات الخرج الكيميائية منتفخة الرؤوس قليلًا. وسعتها المقاسة قريبة من الاسمية، لكن ESR كان أعلى بأضعاف مما في مثيلاتها الجديدة. فالمكثفات الجافة لم تعد قادرة على تزويد التيار اللحظي حين يسحب ملف الكونتاكتور تيار الجذب.

استُبدل مصدر التغذية بآخر أكبر قدرة، وفُصلت تغذية ملفات الكونتاكتورات عن تغذية المعالج بمصدر مستقل، وأُضيف تبريد للخزانة، وتوقفت إعادة الإقلاع.

الدروس:

- قياس السعة وحده لا يكشف المكثف الكيميائي الجاف؛ ESR هو المؤشر.
- الأعطال المتقطعة تحتاج أداة تسجيل أو التقاط، لا قياسًا عابرًا.
- الحرارة أكبر عدو للمكثفات الكيميائية، وعمرها يتضاعف تقريبًا مع كل انخفاض 10 °C في حرارة التشغيل.
- لا تُغذى الأحمال الحثية الكبيرة والمعالجات من المصدر نفسه دون حساب.

دور المهندس ودور الفني: الفني يقيس ويفحص: التغذية عند النبيطة نفسها، والمصاهر، والنبائط بعد فصل التغذية وتفريغ المكثفات. ويلتقط الأعطال المتقطعة بأداة تسجيل، ويبدّل القطعة بمثيل مطابق في القيمة والجهد والقدرة. والمهندس يقرر ما وراء القطعة: لماذا تلفت، وهل يلزم تعديل في التصميم (ديود حماية، أو فصل تغذية الأحمال الحثية عن المعالج، أو تبريد الخزانة)، وهل تُصلح البطاقة على مستوى المكونات أم تُستبدل كاملة، ثم يعتمد التعديل عبر إدارة التغيير (MOC).

43.14 الأخطاء الشائعة

- قياس المقاومة أو الديود في دائرة ما زالت مُغذاة، فتتلف أداة القياس أو تعطي قراءة مضللة.
- لمس مكثفات مصادر التغذية والمغيرات قبل تفريغها والتحقق بالقياس.
- تركيب مكثف كيميائي أو تانتالوم بقطبية معكوسة.
- استبدال مكثف بآخر أقل جهدًا، أو بقيمة ESR مختلفة في مصدر تغذية تبديلي.
- إهمال ديود الحماية على ملفات التيار المستمر، أو تركيبه بالاتجاه الخطأ فيقصر التغذية.
- لمس بطاقات فيها MOSFET ودوائر متكاملة دون حماية من الكهرباء الساكنة.
- استخدام جهاز قياس العزل على كابلات موصولة بإلكترونيات.
- الاعتماد على مرحل ساكن وحده في عزل حمل لأغراض السلامة، مع أن فشله الشائع قصر.
- استبدال النبيطة التالفة دون البحث عن سبب تلفها.
- فتح ثانوي محول تيار تحت الحمل.

43.15 ملخص

المقاومة تحد التيار وتقسم الجهد وتُقرأ بالألوان أو الأرقام، والمكثف يخزن الشحنة وينعّم الجهد ويُفحص بالسعة وESR ويُفرغ قبل لمسه، والملف يخزن الطاقة ويولد جهدًا عكسيًا عند قطع تياره، والديود يمرر في اتجاه واحد بجهد أمامي نحو 0.7 V للسيليكون. والترانزستور ثنائي القطبية مفتاح أو مكبر يتحكم فيه تيار القاعدة ويُفحص بوصفه ديودين، وMOSFET وIGBT يتحكم فيهما جهد البوابة وهما حساسان للكهرباء الساكنة، والثايرستور والترياك والمرحل الساكن للتحكم بالقدرة، والمقرن الضوئي للعزل. والتشخيص الناجح منهجية: أعراض، ومسار، وتغذية، وتقسيم، ثم فحص النبيطة، ثم سبب التلف، ثم الاختبار والتوثيق.

وفي الفصل التالي: ينتقل الفصل 44 «المعالجات الدقيقة والمتحكمات الدقيقة والأنظمة المدمجة» من النبائط المنفردة إلى الرقاقة التي تجمعها وتديرها ببرنامج: المعالج الذي يقرأ المحول وينفذ المنطق داخل كل مرسل وموضّع وPLC.

43.16 أسئلة التقييم الذاتي

1. مقاومة حلقاتها بني، أسود، أحمر، ذهبي. ما قيمتها ومداها المسموح؟
2. احسب القدرة المبددة في مقاومة 250 Ω يمر فيها 22 mA، واختر قدرتها المناسبة.
3. مكثف 470 µF مشحون إلى 325 V وعليه مقاومة تفريغ 47 kΩ. احسب الطاقة المخزنة، والزمن اللازم لينخفض الجهد تحت 5 V تقريبًا.
4. لماذا لا يكفي قياس السعة للحكم على مكثف كيميائي في مصدر تغذية؟
5. في وضع اختبار الديود قرأ الجهاز 0.02 V في الاتجاهين. ما حالة الديود؟
6. صف خطوات تحديد القاعدة ونوع ترانزستور مجهول (NPN أو PNP) بجهاز القياس.

7. ملف مرحل 24 V مقاومته 800 Ω يُشغل بترانزستور NPN أدنى β له 40، وإشارة القيادة من خرج PLC بجهد 24 V (افترض V_BE = 0.7 V)، ومعامل تشبع 2 إلى 3 أضعاف تيار القاعدة الأدنى كما في المثال المحلول في القسم 43.7. احسب مقاومة القاعدة المناسبة (R_B = (V_drive − V_BE) ÷ I_B) واختر أقرب قيمة قياسية، ولماذا نضيف ديودًا على الملف؟

8. لماذا قد يبقى مصباح إشارة صغير مضيئًا بخفوت بعد فصل مرحل ساكن يغذيه؟

9. ما خطوات فحص MOSFET قناة N بجهاز القياس، وما دليل تلف عازل البوابة؟

10. في الحالة 43.13، ما الأداة التي كشفت العطل؟ ولماذا لم يكشفه قياس الجهد العادي؟

11. فني وضع السلك الأحمر في مدخل 10A ثم حاول قياس جهد 24 V على مصدر تغذية: ماذا يحدث ولماذا؟ وما الطريقة الأسلم لمعرفة تيار حلقة 4–20 mA عاملة دون فتحها؟ (القسم 43.2.1)

مراجع الفصل: Floyd، Electronic Devices، الطبعة السابعة: أشباه الموصلات والديودات والترانزستورات ثنائية القطبية وترانزستورات المجال ومكبرات العمليات والثايرستورات؛ ملزمة «إلكترونيات 1» (Power and Communication Engineering): أشباه الموصلات الذاتية والمطعمة، والوصلة PN، وتحليل دوائر الديود بنموذج 0.7 V؛ غازي القريوني، إلكترونيات القدرة: الثايرستورات والترياك وIGBT ودوائر التوحيد المتحكم بها؛ دوائر إلكترونية، الجزء العملي (وزارة التربية والتعليم المصرية): دوائر التوحيد والتثبيت بالزينر والمنظم 7805 وفحص المكونات بالأفوميتر؛ IEC 61010 لسلامة أجهزة القياس؛ IEC 60617 وANSI/IEEE 315 للرموز؛ IEC 61340-5-1 للحماية من الكهرباء الساكنة؛ خبرة المؤلف في صيانة أنظمة التحكم في المحطات.

الفصل 44: المعالجات الدقيقة والمتحكمات الدقيقة والأنظمة المدمجة

> **لمن هذا الفصل:** مهندس التحكم وفني الآلات الدقيقة وأجهزة القياس الذي يتعامل كل يوم مع أجهزة «ذكية»: مرسل HART، وصمام بموضّع رقمي، ووحدة PLC، ومرحل حماية رقمي، ومحلل غاز، ويريد أن يفهم ما يجري داخلها. ويفيد الطالب الذي درس المعالجات في الجامعة ولم يرَ صلتها بالمصنع، والمهندس الذي يصمم بطاقة اكتساب بيانات صغيرة أو يقيّم جهازًا مدمجًا قبل شرائه.
>
> **الفكرة الأساسية:** وراء كل جهاز رقمي في المصنع معالج ينفذ برنامجًا مخزنًا في ذاكرة، ويقرأ العالم عبر محولات ومنافذ، ويعمل بإيقاع ساعة ومؤقتات ومقاطعات. من يفهم هذه اللبنات يعرف لماذا تتأخر قراءة، ولماذا يتوقف PLC حين يطول برنامجه، ولماذا تختلف دقة بطاقتين تناظريتين، ولماذا يُعامل تحديث البرنامج الثابت (Firmware) بوصفه تعديلًا هندسيًا لا عملية روتينية.

44.1 لماذا يحتاج مهندس التحكم إلى فهم المعالجات؟

مساران للقراءة في هذا الفصل: المسار الأساسي لمهندس التحكم والتشخيص الميداني هو 44.1 ثم 44.3 (دورة التنفيذ) و44.4 (الذاكرة) و44.6 (المقاطعات والمؤقتات ومؤقت المراقبة (Watchdog)) و44.7 (تحويل الإشارات) و44.11 إلى 44.14 (الأنظمة المدمجة والزمن الحقيقي، وداخل الأجهزة الصناعية، والبرنامج الثابت (Firmware)، والموثوقية)، ثم الحالة والأخطاء الشائعة. أما 44.2 و44.5 و44.8 إلى 44.10 (بنية المعالج التفصيلية، ونقل البيانات، والمتحكم 8051 ولغة التجميع ومؤقتاته،

والعائلات، والاتصال على مستوى البطاقة) فهي **«للتوسع في الأنظمة المدمجة»** لمن يريد تصميم بطاقة أو قراءة برنامج مدمج، ويمكن تجاوزها دون أن ينقطع تسلسل الكتاب.

انتقلت أجهزة القياس والتحكم خلال أربعة عقود من الدوائر التناظرية والمرحلات إلى الأجهزة المبنية على المعالجات. فالمرسل الذي كان يحول انحراف غشاء إلى تيار بدائرة تناظرية صار يقرأ الحساس بمحول رقمي، ويصحح القراءة بمنحنى معايرة مخزن، ويعوض الحرارة، ثم يولد التيار ويتحدث ببروتوكول HART. والمتحكم الذي كان مضخمًا تناظريًا صار خوارزمية PID تُنفذ كل 100 ms أو أسرع.

ويظهر أثر ذلك في عمل المهندس اليومي:

- **فهم حدود الأداء:** زمن المسح، ودقة التحويل، ومعدل العينات، وزمن الاستجابة للمقاطعات، كلها خصائص للمعالج وبرنامجه.
- **التشخيص:** رسائل مثل «Watchdog Timeout» و«Memory Error» و«Checksum Failure» و«Cycle Time Exceeded» لا تُفهم دون معرفة معناها داخل الجهاز.
- **إدارة البرنامج الثابت:** نسخة البرنامج الثابت تحدد سلوك الجهاز، وتوافقه مع ملفات الوصف DD وDTM، وقد تغير نتائج السلامة الوظيفية.
- **الأنظمة القديمة:** كثير من أنظمة التحكم القديمة في المحطات مبني على معالجات من عائلة 8086 و68000 وبطاقات لم تعد تُصنع.
- **الأنظمة المدمجة الصغيرة:** مسجلات البيانات، ولوحات التحكم المحلية في الحزم (Packages)، وأجهزة إنترنت الأشياء الصناعي، كلها متحكمات دقيقة مبرمجة.

الشكل 44-1: *بطاقة إلكترونية مدمجة نموذجية: متحكم دقيق بغلاف QFP، وبلورة تولد ساعته، وذاكرة EEPROM لبيانات المعايرة، ومحول تناظري رقمي، ومنظم جهد ومكثفات ترشيح، وأطراف توصيل الحلقة، ومنفذ للبرمجة والتنقيح.*

44.2 من الحاسوب إلى المعالج: البنية الأساسية

التعريفات:

- **المعالج الدقيق (Microprocessor):** دائرة متكاملة تضم وحدة الحساب والمنطق، ووحدة التحكم والتوقيت، ومجموعة المسجلات، على رقاقة واحدة. وهو لا يعمل وحده، بل يحتاج إلى ذاكرة ومنافذ ومذبذب خارجية.
- **الحاسوب الدقيق (Microcomputer):** المعالج مع الذاكرة والإدخال والإخراج والتغذية والساعة، أي نظام كامل قادر على تنفيذ برنامج.
- **المتحكم الدقيق (Microcontroller):** حاسوب صغير كامل على رقاقة واحدة: معالج وذاكرة برنامج وذاكرة بيانات ومؤقتات ومنافذ، وغالبًا محول تناظري رقمي ومنافذ اتصال.

- **النظام المدمج (Embedded System):** جهاز يحتوي حاسوبًا مخصصًا لمهمة محددة، ولا يراه المستخدم حاسوبًا: مرسل، أو صمام ذكي، أو مغير سرعة، أو مرحل حماية.

مكونات وحدة المعالجة المركزية:

- **وحدة الحساب والمنطق (ALU):** تجري الجمع والطرح والعمليات المنطقية AND وOR وXOR والإزاحة والمقارنة، وهي تطبيق مباشر للبوابات والجوامع التي شرحها الفصل 17.
- **وحدة التحكم والتوقيت:** تفسر التعليمة وتولد إشارات القراءة والكتابة بالتسلسل الصحيح.
- **المسجلات (Registers):** مواقع تخزين سريعة داخل المعالج. أهمها عداد البرنامج (PC) الذي يحمل عنوان التعليمة التالية، ومؤشر المكدس (SP)، والمركم (Accumulator) الذي تُحفظ فيه نتيجة العمليات، ومسجل الأعلام (Flags) الذي يسجل الصفر والحمل والإشارة والتماثل.

النواقل الثلاثة: يتصل المعالج بالذاكرة والمنافذ عبر مجموعات من الخطوط تسمى النواقل (Buses):

الناقل	الاتجاه	الوظيفة	مثال
ناقل العناوين	من المعالج إلى الخارج	يحدد الموقع المطلوب في الذاكرة أو المنفذ	16 خطًا في 8085، و20 في 8086
ناقل البيانات	بالاتجاهين	ينقل البيانات والتعليمات	8 خطوط في 8085 و 8051، و16 في 8086
ناقل التحكم	خطوط منفردة	إشارات القراءة والكتابة والمقاطعة وإعادة الضبط	RD وWR وINTR وRESET وALE

وعرض المسجلات ووحدة الحساب والمنطق هو ما يحدد وصف المعالج (وقد يضيق عنه ناقل البيانات الخارجي كما في 8088): فالمعالج «8 بت» يعالج بايتًا في كل عملية، و«32 بت» يعالج كلمة من 32 بتًا.

الشكل 44-2: *البنية الأساسية للحاسوب الدقيق: وحدة المعالجة المركزية بمكوناتها، والذاكرة ومنافذ الإدخال والإخراج، وتتصل كلها عبر نواقل العناوين والبيانات والتحكم، بإيقاع مذبذب الساعة.*

بنية فون نيومان وبنية هارفارد: في بنية فون نيومان (Von Neumann) يتقاسم البرنامج والبيانات ذاكرة واحدة وناقلًا واحدًا، كما في معالجات 8085 و8086 وأجهزة الحاسوب الشخصي. وفي بنية هارفارد (Harvard) لكل منهما ذاكرته وناقله، فيمكن جلب التعليمة وقراءة البيانات في الوقت نفسه. وأغلب المتحكمات الدقيقة، مثل 8051 وPIC و AVR، تتبع بنية هارفارد أو صورة معدلة منها.

مجموعة التعليمات المخفضة ومجموعة التعليمات المعقدة: معالجات CISC، مثل عائلة x86، تملك تعليمات كثيرة ومتفاوتة الطول، وقد تنجز التعليمة الواحدة عملًا كبيرًا. ومعالجات RISC، مثل ARM وAVR وPIC، تملك تعليمات قليلة بسيطة بطول ثابت، فيسهل تنفيذها بالتتابع السريع (Pipelining) وتستهلك طاقة أقل. ولذلك تهيمن معالجات RISC على الأجهزة المدمجة والصناعية.

44.3 كيف ينفذ المعالج البرنامج؟

البرنامج في الذاكرة سلسلة من الأعداد الثنائية، تتألف كل تعليمة منها من شيفرة تشغيل (Opcode) تتبعها معاملاتها. ويكرر المعالج دورة من ثلاث مراحل ما دام يعمل:

1. **الجلب (Fetch):** يضع المعالج محتوى عداد البرنامج على ناقل العناوين، ويقرأ الشيفرة من الذاكرة، ثم يزيد العداد ليشير إلى التعليمة التالية.
2. **التفكيك (Decode):** تفسر وحدة التحكم الشيفرة، فتعرف العملية المطلوبة ومعاملاتها.
3. **التنفيذ (Execute):** تُنفذ العملية في وحدة الحساب والمنطق أو بنقل البيانات، وتُحدَّث الأعلام، وتُكتب النتيجة.

لغات البرمجة: لغة الآلة أرقام ثنائية أو ست عشرية. ولغة التجميع (Assembly) رموز مختصرة تقابل كل منها تعليمة آلة، مثل MVI وADD وJMP. واللغات عالية المستوى، مثل C، تُترجم بالمترجم (Compiler) إلى لغة الآلة. وفي الصناعة تُكتب برامج الأجهزة المدمجة غالبًا بلغة C، وتُستخدم لغة التجميع في المقاطع الحرجة زمنيًا وفي برامج الإقلاع.

الشكل 44-3: *دورة الجلب والتفكيك والتنفيذ، ومثال بلغة التجميع للمعالج 8085 يضع عددين في مسجلين ويجمعهما ويخزن الناتج في الذاكرة.*

مثال محلول (تتبع برنامج): في البرنامج المبين في الشكل 44-3:

- بعد MVI A,32H يصبح A = 32H، أي 50 عشريًا.
- بعد MVI B,18H يصبح B = 18H، أي 24.
- بعد ADD B يصبح A = 4AH، أي 74. ولم يتجاوز الناتج FFH، فعلم الحمل (CY) صفر، والناتج غير صفري فعلم الصفر (Z) صفر.
- STA 3000H تنسخ 4AH إلى موقع الذاكرة 3000H.
- عداد البرنامج بعد HLT يشير إلى 2009H، لأن التعليمات شغلت تسعة بايتات من 2000H إلى 2008H.

المكدس والبرامج الفرعية: المكدس (Stack) منطقة في ذاكرة RAM تُدار بمبدأ «آخر من يدخل أول من يخرج». وحين يستدعي البرنامج برنامجًا فرعيًا بتعليمة CALL، يُحفظ عنوان العودة في المكدس، ثم يُستعاد بتعليمة RET. وتستخدم المقاطعات المكدس بالطريقة نفسها. فإذا استُدعيت برامج فرعية متداخلة كثيرة، أو استدعى برنامج نفسه مرارًا دون حد، امتلأ المكدس وكتب فوق بيانات أخرى. وهذا «فيضان المكدس» (Stack Overflow) من أشهر أسباب الأعطال الغامضة في الأجهزة المدمجة.

44.4 الذاكرة

أنواع الذاكرة:

النوع	تحفظ البيانات بعد فصل التغذية؟	الكتابة	الاستخدام في الأجهزة الصناعية
ROM المقنعة	نعم	مرة واحدة في المصنع	نادرة اليوم
EPROM	نعم	تُمحى بالأشعة فوق البنفسجية	الأنظمة القديمة، ولها نافذة زجاجية

النوع	تحفظ البيانات بعد فصل التغذية؟	الكتابة	الاستخدام في الأجهزة الصناعية
EEPROM	نعم	كهربائيًا بايتًا بايتًا، لعدد محدود من المرات	بيانات المعايرة، والوسم، والمدى، والإعدادات
الفلاش (Flash)	نعم	كهربائيًا على شكل كتل	البرنامج الثابت، وسجلات الأحداث
SRAM	لا، إلا ببطارية	سريعة وغير محدودة	المتغيرات، وذاكرة PLC المحفوظة ببطارية
DRAM	لا، وتحتاج إنعاشًا دوريًا	كثيفة ورخيصة	الحواسيب ومحطات التشغيل
FRAM و MRAM	نعم	سريعة وعمرها طويل جدًا	مسجلات البيانات والعدادات الحرجة

كيف أختار؟ ما يجب أن يبقى بعد فصل التغذية ولا يتغير إلا نادرًا (المعايرة والوسم والمدى) يذهب إلى EEPROM، والبرنامج الثابت وسجلات الأحداث الكبيرة إلى الفلاش، والمتغيرات الحية إلى SRAM، وما يُكتب كل ثانية ويجب أن ينجو من الانقطاع (عدادات وتراكمات) إلى FRAM أو MRAM أو SRAM بطارية. والجدول لا يبين عدد دورات الكتابة ولا زمنها، وهما ما يحدد صلاحية النوع للكتابة المتكررة. وأكثر الأخطاء كلفة كتابة قيمة متغيرة إلى EEPROM أو الفلاش في كل دورة مسح، أو إلى جهاز ذكي عبر الشبكة دوريًا، فتتلف الذاكرة خلال أشهر ويُتهم الجهاز.

> **ملاحظة ميدانية:** لذاكرة EEPROM والفلاش عدد محدود من دورات الكتابة، يتراوح عادة بين 10 آلاف و100 ألف دورة لذاكرة الفلاش، وبين 100 ألف ومليون دورة لذاكرة EEPROM. فإذا كتب برنامج PLC أو جهاز ذكي قيمة متغيرة إلى الذاكرة الدائمة في كل دورة مسح، أو كتب نظام التحكم نقطة الضبط إلى صمام ذكي عبر الشبكة كل ثانية، فقد تتلف الذاكرة خلال أيام أو أشهر. ولهذا تنبه أدلة كثير من المرسلات والموضّعات إلى عدم كتابة المعاملات دوريًا.

خريطة الذاكرة وتفكيك العناوين: عدد المواقع التي يستطيع المعالج عنونتها يساوي 2 مرفوعًا لعدد خطوط العنوان. ويقسم المصمم هذا الفضاء بين الشرائح، ويستخدم الخطوط العليا لاختيار الشريحة عبر مفكك (Decoder)، والخطوط الدنيا لاختيار الموقع داخلها.

الشكل 44-4: *خريطة ذاكرة لنظام بستة عشر خطًا للعنوان مقسمة إلى أربع مناطق متساوية، ومفكك 2 إلى 4 يختار الشريحة من الخطين A15 وA14.*

مثال محلول (سعة العنونة):

- المعالج 8085 له 16 خطًا للعنوان: 2^16 = 65 536 موقعًا، أي 64 KB، من 0000H إلى FFFFH.
- المعالج 8086 له 20 خطًا: 2^20 = 1 048 576 موقعًا، أي 1 MB.
- معالج 32 بت: 2^32 موقعًا، أي 4 GB.
- في الشكل 44-4 يختار الخطان A15 وA14 أربع مناطق، كل منها 2^14 = 16 384 موقعًا (16 KB). فمنطقة ROM من 0000H إلى 3FFFH، ومنطقة RAM من 4000H إلى 7FFFH، وهكذا.

مثال محلول (سعة مسجل بيانات): مسجل يخزن كل ثانية سجلًا فيه طابع زمني 4 بايت وأربع قراءات بصيغة الفاصلة العائمة 4 بايت لكل منها.

- حجم السجل = 4 + 4 × 4 = 20 بايت.
- في اليوم: 20 × 86 400 = 1 728 000 بايت، أي نحو 1.73 MB.
- ذاكرة الفلاش سعتها 8 MB، أي 8 × 10^6 بايت، تكفي نحو 4.6 يوم فقط، ثم يجب نقل البيانات أو الكتابة فوق الأقدم. وإذا خُزنت القراءة كل عشر ثوان كفت نحو 46 يومًا.

44.5 الإدخال والإخراج وطرق نقل البيانات

عنونة المنافذ: في «الإدخال والإخراج المعنون كذاكرة» (Memory-mapped I/O) يُعامل المنفذ كأنه موقع ذاكرة، فتُستخدم معه تعليمات الذاكرة كلها. وفي «الإدخال والإخراج المعزول» (I/O-mapped) للمنافذ فضاء عناوين مستقل وتعليمات خاصة، مثل IN وOUT في 8085 و8086. وأغلب المتحكمات الحديثة تعنون وحداتها المحيطية كذاكرة، عبر ما يسمى مسجلات الوظائف الخاصة (SFR).

طرق نقل البيانات:

- **الاستطلاع (Polling):** يسأل البرنامج المنفذ دوريًا: هل عندك بيانات؟ وهي بسيطة، لكنها تستهلك وقت المعالج، وقد تفوت حدثًا قصيرًا يقع بين فحصين.
- **المقاطعة (Interrupt):** يعمل المعالج في مهمته، وحين يقع الحدث ترسل الوحدة إشارة مقاطعة، فيحفظ المعالج مكانه وينفذ برنامج خدمة المقاطعة (ISR) ثم يعود.
- **الوصول المباشر للذاكرة (DMA):** تتولى شريحة متحكم DMA نقل كتلة كبيرة من البيانات بين وحدة سريعة والذاكرة دون مرور كل بايت بالمعالج، كما في الأقراص وبطاقات الشبكة.

الشكل 44-5: *في الأعلى مقارنة الاستطلاع بالمقاطعة في الاستجابة لحدث. وفي الأسفل مؤقت 16 بت يُحمَّل بالقيمة 3CB0H فيفيض كل 50 ms ويولد مقاطعة ثم يُعاد تحميله.*

الشرائح المحيطية الكلاسيكية: بُنيت أنظمة المعالجات الأولى بشرائح مساعدة ما زالت أسماؤها ووظائفها تتردد في الكتب ولوحات الأنظمة القديمة، ثم انتقلت وظائفها إلى داخل المتحكمات الدقيقة:

الشريحة	الوظيفة	ما يقابلها اليوم
8255	منافذ متوازية قابلة للبرمجة، ثلاثة منافذ بثمانية خطوط	منافذ GPIO داخل المتحكم
8253 و8254	مؤقت وعداد فاصل قابل للبرمجة	المؤقتات الداخلية
8259A	متحكم أولويات المقاطعة	متحكم المقاطعات المتداخل NVIC في ARM
8251	اتصال تسلسلي متزامن وغير متزامن	منفذ UART أو USART
8279	واجهة لوحة المفاتيح والشاشة	مكتبات برمجية ووحدات جاهزة
8237 و8257	الوصول المباشر للذاكرة	متحكم DMA داخلي
ADC0808 و DAC0808	تحويل تناظري رقمي ورقمي تناظري	المحولات المدمجة أو شرائح دقيقة خارجية

الربط بالعالم الصناعي: منافذ المتحكم تعمل عادة بجهد 3.3 V أو 5 V وتيار بضعة ملي أمبيرات. ولا تُوصل مباشرة بإشارات 24 V أو ملفات المرحلات. فالمدخل الصناعي يمر بمقسم جهد ومرشح ومقرن ضوئي، والمخرج يمر بترانزستور أو مرحل مع ديود حماية، كما شرح الفصل 43 (القسمان 43.7 و43.10). وهذا ما تفعله بطاقات الإدخال والإخراج في PLC.

44.6 المقاطعات والمؤقتات

المقاطعة: إشارة تطلب من المعالج أن يترك ما يفعله مؤقتًا ليخدم حدثًا. وعند وصولها يكمل المعالج التعليمة الحالية، ويحفظ عداد البرنامج وبعض المسجلات في المكدس،

ويقفز إلى عنوان برنامج الخدمة المحدد في جدول المتجهات (Vector Table)، ثم يعود بتعليمة العودة من المقاطعة (RETI في 8051) إلى حيث توقف.

مصطلحات لازمة:

- **المقاطعة القابلة للحجب وغير القابلة للحجب:** الأولى يمكن تعطيلها برمجيًا، والثانية (NMI) لا تُعطل، وتُخصص لأحداث حرجة مثل انهيار التغذية. ففي 8085 مدخل TRAP غير قابل للحجب، ويُستخدم عادة لحفظ البيانات عند انقطاع الكهرباء.
- **الأولوية:** إذا وقعت مقاطعتان معًا خُدمت الأعلى أولوية أولًا، ويمكن لمقاطعة عالية أن تقاطع خدمة مقاطعة أدنى.
- **زمن الاستجابة (Latency):** الفترة بين وقوع الحدث وبدء خدمته، ويتأثر بطول أطول مقطع برمجي تُعطَّل فيه المقاطعات.
- **القاعدة الذهبية:** برنامج خدمة المقاطعة يجب أن يكون قصيرًا: يسجل الحدث أو يلتقط القيمة، ويترك المعالجة الطويلة للبرنامج الرئيسي.

مصادر المقاطعة في المتحكم 8051: خمسة مصادر: مقاطعتان خارجيتان INT0 و INT1، وفيض المؤقتين Timer 0 وTimer 1، والمنفذ التسلسلي. ولكل منها عنوان ثابت وأولوية قابلة للضبط بمسجل IP.

المؤقتات والعدادات: المؤقت عداد رقمي يزيد بنبضات منتظمة. فإذا جاءت النبضات من مذبذب المعالج صار مؤقتًا يقيس الزمن، وإذا جاءت من طرف خارجي صار عدادًا للأحداث، كنبضات عداد تدفق توربيني أو مشفّر محور. وتُستخدم المؤقتات في توليد المقاطعات الزمنية الدورية لتنفيذ حلقة التحكم، وقياس التردد والسرعة، وتوليد تعديل عرض النبضة (PWM) للتحكم في محرك أو سخان، وضبط سرعة المنفذ التسلسلي.

مثال محلول (حساب قيمة تحميل المؤقت): متحكم 8051 بمذبذب 12 MHz، والمطلوب مقاطعة كل 50 ms من Timer 0 في النمط 1 (16 بت).

- في 8051 يزيد المؤقت مرة كل 12 نبضة من المذبذب، فمعدل العد = 12 000 000 ÷ 12 = 1 000 000 نبضة في الثانية، أي نبضة كل 1 µs.
- عدد النبضات في 50 ms = 50 000.
- المؤقت يفيض عند الانتقال من 65 535 إلى الصفر، فقيمة البدء = 65 536 − 50 000 = 15 536.
- بالست عشري: 15 536 = 3CB0H، فيُحمَّل TH0 = 3CH وTL0 = B0H.
- ولأن النمط 1 لا يعيد التحميل تلقائيًا، يُعاد تحميل القيمتين داخل برنامج خدمة المقاطعة. ولو استُخدمت بلورة 11.0592 MHz الشائعة لأنها تعطي سرعات اتصال قياسية دقيقة، لصار معدل العد 921 600 نبضة في الثانية، ولاحتاجت 50 ms إلى 46 080 نبضة.

مؤقت المراقبة (Watchdog Timer): مؤقت مستقل يعد تنازليًا، وعلى البرنامج أن يصفّره (Kick) دوريًا قبل انتهاء مهلته. فإذا تعلق البرنامج في حلقة لا تنتهي، أو اضطرب المعالج بسبب تشويش كهربائي، انقضت المهلة وأُعيد تشغيل المعالج أو وُضع الجهاز في حالة آمنة. وفي PLC يقابله مراقب زمن الدورة، الذي يوقف المعالج إذا تجاوزت دورة المسح الحد المضبوط.

الشكل 44-6: *دورة المسح في متحكم أو PLC. قراءة المداخل، ثم تنفيذ البرنامج، ثم كتابة المخارج، ثم الاتصال والتشخيص، مع تصفير مؤقت المراقبة في نهاية كل دورة. وحين تطول الدورة الخامسة لا يُصفَّر المؤقت قبل مهلته فيتدخل.*

44.7 التحويل التناظري الرقمي والرقمي التناظري

المعالج لا يفهم إلا الأرقام، والعالم الصناعي تناظري: ضغط وحرارة وتيار. فالمحول التناظري الرقمي (ADC) هو باب القياس، والمحول الرقمي التناظري (DAC) هو باب الأمر.

التمييز (Resolution): محول بعدد N من البتات يقسم مداه إلى 2^N مستوى. فالمحول 12 بت له 4096 مستوى، و16 بت له 65 536، و24 بت أكثر من 16 مليونًا. وأصغر تغير يمكن تمييزه (LSB) = المدى الكامل ÷ 2^N وفق الاصطلاح الشائع في أوراق البيانات، ويُقسم على (2^N − 1) حين يُعرَّف المدى بين أدنى شيفرة وأعلاها.

أنواع المحولات:

النوع	السرعة	الدقة التحليلية المعتادة	أين نجده
التقريب المتتالي (SAR)	متوسطة إلى عالية	10 إلى 18 بت	بطاقات PLC التناظرية، والمتحكمات الدقيقة

النوع	السرعة	الدقة التحليلية المعتادة	أين نجده
التكامل ثنائي الميل (Dual-slope)	بطيئة	عالية، ويرفض ضجيج الشبكة	أجهزة القياس المتعددة الرقمية ولوحات العرض
سيغما دلتا (Σ-Δ)	بطيئة إلى متوسطة	16 إلى 24 بت	المرسلات الذكية، وبطاقات المزدوجات الحرارية وRTD، وخلايا الحمل (Load Cells) في الموازين
الوميضي (Flash)	عالية جدًا	6 إلى 8 بت	راسمات الذبذبات الرقمية والاتصالات عالية السرعة

كيف أختار؟ للإشارات البطيئة الدقيقة (مزدوجات وRTD وخلايا حمل ومرسلات) سيغما دلتا؛ ولبطاقات PLC والمتحكمات العامة التقريب المتتالي؛ ولأجهزة العرض التي يلزم أن ترفض ضجيج الشبكة التكامل ثنائي الميل؛ ولا يُلجأ إلى الوميضي إلا للترددات العالية جدًا حيث تكفي بتات قليلة. والجدول يعطي الدقة التحليلية ولا يعطي الدقة الكلية: المقاومة والمرجع والضجيج والتدريج ودقة المرسل تحد النتيجة قبل عدد البتات، ويلزم مرشح مضاد للتعرج ومعدل عينات مناسب مهما كان النوع. وأكثر الأخطاء كلفة شراء بطاقة أو مسجل بعدد البتات وحده، ثم قراءة إشارة سريعة بمعدل عينات منخفض فيظهر تعرج يُفسَّر تذبذبًا في العملية.

أخذ العينات والتعرج: المحول يقرأ الإشارة في لحظات متباعدة. وتنص نظرية نايكويست (Nyquist) على أن معدل العينات يجب أن يزيد على ضعف أعلى تردد في الإشارة، وإلا ظهرت الترددات العالية في صورة ترددات منخفضة زائفة لا وجود لها، وهذا هو التعرج (Aliasing). ولذلك يسبق المحول مرشح تناظري مضاد للتعرج، ويُختار معدل العينات عمليًا بين خمسة وعشرة أضعاف أعلى تردد مهم.

الشكل 44-7: *إلى اليسار أخذ العينات والتكميم بمحول 4 بت يظهر فيه الدرج بوضوح. وإلى اليمين إشارة 9 Hz تُقرأ بمعدل 10 عينات في الثانية فتبدو كأنها إشارة 1 Hz.*

مثال ميداني للتعرج: نظام اكتساب بيانات يقرأ ضغط خط تصريف مضخة ترددية كل ثانية، والنبضات الحقيقية بتردد نحو 4.1 Hz. قد ترسم الشاشة تذبذبًا بطيئًا منتظمًا يوحي بمشكلة تحكم، مع أنه صورة زائفة للنبضات. والحل مرشح في المرسل، أو تخميد مناسب، أو معدل عينات أعلى في المسجل، حسب الغرض.

مثال محلول (دقة بطاقة تناظرية): مرسل ضغط 0–10 bar بإشارة 4–20 mA، يمر تياره في مقاومة 250 Ω، ويُقرأ الجهد بمحول 12 بت مداه 0–5 V.

- 4 mA تعطي 1 V، و20 mA تعطي 5 V.
- الشيفرة المقابلة: 1 V → 5 ÷ 1 × 4095 = 819، و5 V → 4095.
- عدد المستويات المستخدمة فعلًا = 4095 − 819 = 3276، لأن خُمس مدى المحول ضاع تحت 4 mA.
- دقة القراءة = 10 bar ÷ 3276 ≈ 3.05 mbar لكل مستوى.
- معادلة التحويل: P = (Code − 819) × 10 ÷ 3276. فالشيفرة 2457 تعطي (2457 − 819) × 10 ÷ 3276 = 5.0 bar.
- لو استُخدم محول 16 بت لصارت الدقة نحو 0.19 mbar، لكن الدقة الكلية

> ستحددها عندئذ دقة المرسل والمقاومة، لا المحول.

التدريج في PLC: كثير من بطاقات PLC لا تعطي الشيفرة الخام من الصفر إلى 4095، بل قيمة موحدة. ففي بطاقات Siemens مثلًا يقابل المدى الاسمي من 4 إلى 20 mA القيم من 0 إلى 27 648، مع هامش فوقه لكشف تجاوز المدى، ويُحوَّل بمعادلة خطية: القيمة الهندسية = الحد الأدنى + الخام × (الحد الأعلى − الحد الأدنى) ÷ 27 648. فالقيمة الخام 13 824 في مدى 0–10 bar تعطي 5 bar. وتختلف القيم الموحدة بين الشركات، فيجب الرجوع إلى دليل البطاقة قبل كتابة كتلة التدريج.

المحول الرقمي التناظري: يحول رقمًا إلى جهد أو تيار. وفي المرسل الذكي يحدد قيمة تيار الحلقة، وفي بطاقة المخرج التناظري يولد أمر الصمام. وأبسط أنواعه شبكة المقاومات R-2R. وتُحسب قيمة الخرج بالطريقة نفسها: محول 16 بت لخرج 4–20 mA يقسم المدى 16 mA إلى 65 535 خطوة، أي نحو 0.24 µA لكل خطوة.

44.8 المتحكم الدقيق: حاسوب على رقاقة

المعالج الدقيق والمتحكم الدقيق:

وجه المقارنة	المعالج الدقيق	المتحكم الدقيق
المكونات	وحدة المعالجة المركزية فقط	معالج وذاكرة ومؤقتات ومنافذ ومحولات على رقاقة واحدة
الذاكرة	خارجية وكبيرة	داخلية ومحدودة
الغرض	حوسبة عامة ومهام متنوعة	مهمة محددة في جهاز مدمج
الاستهلاك والتكلفة	أعلى	منخفضان جدًا
البنية الغالبة	فون نيومان	هارفارد
أمثلة	8085 و8086 وx86 وARM Cortex-A	8051 وPIC وAVR وARM Cortex-M

وجه المقارنة	المعالج الدقيق	المتحكم الدقيق
في المصنع	محطات التشغيل وخوادم SCADA ومعالجات PLC الكبيرة	المرسلات والموضّعات والمرحلات والوحدات الصغيرة

كيف أختار؟ إن كان الجهاز مخصصًا لمهمة واحدة ويعيش على تيار الحلقة أو بطارية فالمتحكم الدقيق، وإن احتاج نظام تشغيل كاملًا وذاكرة كبيرة وواجهات مستخدم وشبكات متعددة فالمعالج الدقيق مع ذاكرته الخارجية. والجدول لا يبين الحتمية: الحكم في التحكم الصناعي لأطول زمن استجابة مضمون لا لسرعة المعالج، وهذا ما يجعل متحكمًا صغيرًا بنظام زمن حقيقي أنسب لحلقة تحكم من معالج قوي بنظام تشغيل عام. وأكثر الأخطاء كلفة تحميل وظيفة حرجة زمنيًا على معالج تطبيقات يشارك الاتصال والشاشة، فيتأخر القرار حين يشتد الحمل.

المتحكم 8051: طرحته Intel في 1980، وما زال أساسًا تعليميًا مهمًا، وما زالت شركات كثيرة تصنع نوى متوافقة معه داخل شرائح حديثة. ومواصفاته الأساسية:

- معالج 8 بت، ومسجلان رياضيان A وB، وأربع مجموعات من المسجلات R0 إلى R7 يُختار بينها بالبتين RS0 وRS1 في مسجل PSW.
- ذاكرة برنامج داخلية 4 KB، ويمكن مد فضاء البرنامج والبيانات خارجيًا إلى 64 KB لكل منهما.
- ذاكرة بيانات داخلية 128 بايت: منها منطقة من 20H إلى 2FH يمكن عنونة كل بت فيها منفردًا (128 بتًا)، وهي مفيدة لتخزين الأعلام المنطقية كما تُستخدم الذاكرة الداخلية M في PLC.
- أربعة منافذ P0 إلى P3، في كل منها ثمانية خطوط، أي 32 خطًا للإدخال والإخراج. وللمنفذ P0 خصوصية: ليس فيه مقاومات سحب داخلية، فيحتاج مقاومات خارجية حين يُستخدم مخرجًا.
- مؤقتان بعرض 16 بت، ومنفذ تسلسلي كامل الازدواج، وخمسة مصادر للمقاطعة.
- غلاف بأربعين طرفًا، ولكثير من الأطراف وظيفتان.

الشكل 44-8: *المخطط الداخلي للمتحكم الدقيق 8051: المعالج وذاكرتا البرنامج والبيانات والمذبذب على ناقل داخلي واحد مع المؤقتات والمقاطعات والمنفذ التسلسلي والمنافذ الأربعة، وكلها في رقاقة واحدة.*

44.9 عائلات المتحكمات والمعالجات في الأجهزة الحديثة

العائلة	الخصائص	أين نجدها
8051 ومشتقاتها	8 بت، بسيطة، رخيصة	أجهزة بسيطة، ولوحات مفاتيح، ووحدات قديمة
PIC من Microchip	RISC ببنية هارفارد، من 8 إلى 32 بت، تشكيلة ضخمة	الحساسات، والمؤقتات، والأجهزة الصغيرة
AVR	RISC ببنية هارفارد، 8 بت، مسجلات عامة كثيرة	اللوحات التعليمية مثل Arduino، ووحدات صغيرة
MSP430	استهلاك طاقة منخفض جدًا	الأجهزة العاملة بالبطارية والمرسلات اللاسلكية

العائلة	الخصائص	أين نجدها
ARM Cortex-M	32 بت، استهلاك منخفض، متحكم مقاطعات متقدم	المرسلات الذكية، والموضّعات، ووحدات I/O البعيدة، وإنترنت الأشياء
ARM Cortex-R	32 بت، مصمم للزمن الحقيقي والاعتمادية	مرحلات الحماية، ووحدات التحكم الحرجة
ARM Cortex-A وx86	معالجات تطبيقات تدعم أنظمة تشغيل كاملة	محطات HMI، والبوابات، وPLC الكبيرة، والحواسيب الصناعية
معالجات الإشارة الرقمية (DSP)	عمليات ضرب وترشيح سريعة	تحليل الاهتزاز، ومغيرات السرعة، والعدادات فوق الصوتية
مصفوفات البوابات المبرمجة (FPGA)	منطق مادي قابل للبرمجة، تنفيذ متواز وزمن استجابة ثابت	حمايات السرعة الزائدة، والتحكم بالتوربينات، ووحدات السلامة، والاتصالات السريعة

كيف أختار؟ لجهاز ميداني منخفض الاستهلاك ARM Cortex-M، أو MSP430 إن كان على بطارية؛ ولوحدة تحكم يلزم فيها زمن استجابة مضمون Cortex-R؛ ولمحطة تشغيل أو بوابة تحتاج نظام تشغيل كاملًا Cortex-A أو x86؛ وللترشيح والتحليل الطيفي DSP؛ ولحماية لا يُقبل فيها أن يتغير زمن الاستجابة مع حِمل البرنامج FPGA. والجدول لا يبين ما يحدد الاختيار عمليًا في المنشأة: توافر الأدوات والدعم وقطع الغيار عشرين سنة، وشهادة الجهاز للسلامة الوظيفية لا العائلة وحدها. وأكثر الأخطاء كلفة اختيار العائلة بالسعر أو بالألفة ثم اكتشاف أن المهمة تحتاج حتمية لا توفرها، أو أن الشريحة توقف إنتاجها.

لماذا FPGA في الحمايات؟ المعالج ينفذ التعليمات بالتتابع، فزمن استجابته يعتمد على البرنامج وحِمله. أما FPGA فيبني الدائرة المنطقية فعليًا، فتعمل مسارات كثيرة معًا في وقت ثابت من رتبة الميكروثانية. ولهذا تُستخدم في وحدات الحماية من السرعة الزائدة

للتوربينات، وفي بعض أنظمة السلامة التي تُفضَّل فيها البساطة القابلة للتحقق على مرونة البرمجيات.

النظام على رقاقة (SoC): شرائح حديثة تجمع عدة نوى معالجة، وربما FPGA، مع وحدات اتصال وأمن داخلي. وهي أساس كثير من وحدات التحكم الحديثة وبوابات الحافة (Edge Gateways).

44.10 الاتصال التسلسلي على مستوى البطاقة

قبل أن تصل البيانات إلى الشبكات الصناعية (الفصل 23)، تتنقل داخل الجهاز وبين شرائحه بأساليب تسلسلية بسيطة:

- **UART:** اتصال غير متزامن عبر خطي إرسال واستقبال. يبدأ كل بايت ببت بدء صفري، ثم ثمانية بتات يُرسل الأقل وزنًا منها أولًا، ثم بت توقف واحد أو اثنان، وربما بت تماثل. ولا توجد ساعة مشتركة، فيتفق الطرفان مسبقًا على السرعة، مثل 9600 أو 19 200 bps. وحين تُحوَّل مستويات UART إلى RS-232 أو RS-485 يصبح هذا هو الأساس الفيزيائي لبروتوكول Modbus RTU.
- **SPI:** اتصال متزامن سريع بأربعة أسلاك: ساعة من الطرف السيد (SCK)، وخط بيانات من السيد إلى التابع (MOSI)، وخط في الاتجاه المعاكس (MISO)، وخط اختيار لكل تابع (CS). ويُستخدم لربط المعالج بالمحولات التناظرية الرقمية والذواكر والشاشات.
- **I2C:** سلكان مشتركان للبيانات والساعة، ولكل شريحة تابعة عنوان من 7 بتات، فيمكن توصيل شرائح كثيرة على السلكين نفسيهما. أبطأ من SPI، ويُستخدم للحساسات الصغيرة والذواكر وساعات الزمن الحقيقي.
- **CAN:** ناقل تفاضلي متين بآلية أولويات تمنع التصادم دون فقد رسالة الأولوية الأعلى. نشأ في السيارات، ويُستخدم في الآلات المتحركة والمولدات والرافعات، وتبنى عليه بروتوكولات مثل CANopen وDeviceNet.

الشكل 44-9: *الاتصال التسلسلي على مستوى البطاقة: إطار UART ببت البدء وثمانية بتات بيانات وبت التوقف، وإشارات SPI الثلاث الساعة والاختيار والبيانات، وناقل I2C بسلكين مشتركين بين متحكم سيد وثلاث شرائح لكل منها عنوان.*

مثال محلول (زمن رسالة Modbus RTU): محطة تقرأ 10 سجلات من جهاز بسرعة 9600 bps، بإطار 11 بتًا لكل بايت (بدء، و8 بيانات، وتماثل، وتوقف).

- زمن البايت = 11 ÷ 9600 ≈ 1.15 ms.
- رسالة الطلب 8 بايتات: عنوان، ووظيفة، وعنوان البداية بايتان، والعدد بايتان، وCRC بايتان، فتستغرق نحو 9.2 ms.
- رسالة الرد: عنوان، ووظيفة، وعدد البايتات، و20 بايت بيانات، وCRC بايتان، أي 25 بايتًا تستغرق نحو 28.6 ms.
- مع فاصل صمت 3.5 حرف بعد كل رسالة (نحو 4 ms لكل منها)، وزمن معالجة الجهاز، تستغرق الدورة نحو 50 ms. فإذا كان على الخط 20 جهازًا

> بطلب واحد لكل منها، صار زمن تحديث كل جهاز نحو ثانية واحدة. وهذا الحساب يوضح لماذا لا تصلح الخطوط التسلسلية البطيئة لحلقات تحكم سريعة.

44.11 الأنظمة المدمجة والزمن الحقيقي

خصائص النظام المدمج: مخصص لمهمة واحدة، ويعمل سنوات دون إعادة تشغيل، وموارده من ذاكرة وطاقة محدودة، ويتفاعل مع العالم الفيزيائي، وغالبًا لا يملك شاشة ولا لوحة مفاتيح. وأهم من ذلك أن صحته لا تُقاس بصحة النتيجة وحدها، بل بوصولها في وقتها.

الزمن الحقيقي الصلب والمرن: في النظام الصلب (Hard Real-Time) يُعد فوات الموعد فشلًا للنظام، كقرار فتح مفتاح حماية أو إغلاق صمام توربين عند السرعة الزائدة. وفي النظام المرن (Soft Real-Time) يُقبل تأخر عارض مع تدهور في الجودة، كتحديث شاشة تشغيل أو رسم منحنى. والفيصل ليس طول المهلة، بل عاقبة فواتها: قد تكون المهلة ثانية كاملة والنظام صلب، وقد تكون جزءًا من الملي ثانية والنظام مرن.

الحتمية (Determinism): ما يحتاجه التحكم الصناعي ليس السرعة المجردة، بل أن يكون أطول زمن استجابة معروفًا ومضمونًا. فحلقة PID تُنفذ كل 100 ms بدقة أفضل من حلقة تُنفذ كل 20 ms أحيانًا وكل 300 ms أحيانًا أخرى، لأن معاملات الضبط تفترض فترة عينة ثابتة (الفصل 18).

نظام التشغيل في الزمن الحقيقي (RTOS): برنامج صغير يجدول المهام حسب أولوياتها، ويدير الموارد المشتركة، ويوفر المؤقتات والرسائل بين المهام. ومن أمثلته FreeRTOS و VxWorks وQNX وINTEGRITY. وتعمل فوقه برامج التطبيق، وتحته طبقة دعم اللوحة (BSP) ومشغلات الوحدات. وكثير من معالجات PLC وDCS الحديثة يعمل على نظام من هذا النوع، وتُنفذ فيه مهام التحكم الدورية بأولوية أعلى من مهام الاتصال والتشخيص.

دورة المسح في PLC بوصفه نظامًا مدمجًا: ما يعرفه المهندس باسم «دورة المسح» تطبيق مباشر لما سبق: قراءة صورة المداخل، ثم تنفيذ البرنامج، ثم كتابة المخارج، ثم خدمة الاتصال والتشخيص، مع مراقبة الزمن بمؤقت المراقبة كما في الشكل 44-6. وفي الأنظمة الحديثة يمكن تقسيم البرنامج إلى مهام دورية بفترات مختلفة ومهام تُطلق بالمقاطعة.

44.12 داخل الأجهزة الصناعية

المرسل الذكي: العنصر الحساس يعطي إشارة صغيرة، يكبرها مكبر ويرشحها، ثم يحولها محول سيغما دلتا عالي الدقة، ويقرأ المتحكم أيضًا حساس حرارة داخليًا. ويطبق المتحكم منحنى معايرة الحساس المخزن في المصنع، ويعوض الحرارة والضغط الساكن، ويطبق المدى الذي ضبطه المستخدم والتخميد ودالة الجذر إن طُلبت، ثم يحسب التيار ويكتبه عبر محول رقمي تناظري إلى منظم التيار. ويعمل مودم HART بتعديل الإزاحة الترددية فوق التيار نفسه. ويعمل كل ذلك بقدرة أقل من 10.5 V × 3.6 mA تقريبًا، أي نحو 38 mW، لأن المرسل يجب أن يقدر على خفض التيار إلى قيمة الإنذار المنخفض وفق NE 43، وهذا ما يدفع إلى متحكمات منخفضة الاستهلاك جدًا.

الشكل 44-10: *البنية الداخلية لمرسل ذكي: العنصر الحساس والمكبر والمحول التناظري الرقمي، ثم المتحكم الدقيق الذي يستعين بحساس حرارة للتعويض وبذاكرة EEPROM للمعايرة والوسم، ثم المحول الرقمي التناظري ومنظم التيار ومودم HART.*

وهذا يفسر ظواهر ميدانية معروفة:

- «تقليم الحساس» (Sensor Trim) يعدل معاملات التحويل الرقمية للحساس، و«تقليم الخرج» (Output Trim) يعدل معاملات المحول الرقمي التناظري، ولكل منهما غرض مختلف (الفصل 14).
- قيمة المتغير الرقمي عبر HART قد تختلف قليلًا عن التيار المقاس، لأن بينهما محولًا وخطأه.
- حين يكشف المتحكم عطلًا في الحساس أو الذاكرة يدفع التيار إلى قيمة الإنذار، عند 3.6 mA أو دونها، أو عند 21 mA أو فوقها، حسب إعداد NAMUR NE 43.

الموضّع الرقمي للصمام: متحكم يقرأ الأمر من الحلقة وموضع الساق من حساس مغناطيسي أو مقاومي، وينفذ خوارزمية تحكم في الموضع، ويشغل محولًا كهربائيًا

هوائيًا. ويخزن بصمة الصمام (Valve Signature) ويحسب الاحتكاك والمسافة المقطوعة (الفصل 15).

معالج PLC وDCS: معالج 32 أو 64 بت، وذاكرة الفلاش للبرنامج والبرنامج الثابت، وذاكرة RAM للبيانات قد تُحفظ ببطارية أو مكثف كبير، وساعة زمن حقيقي، ونظام تشغيل للزمن الحقيقي، ومنافذ شبكات. وفي وحدات التحكم الاحتياطية يتزامن معالجان عبر وصلة سريعة، فينتقل التحكم إلى الاحتياطي خلال دورة مسح أو دورات قليلة (القسم 40.5).

PLC السلامة: يستخدم غالبًا معالجين أو أكثر ينفذان البرنامج ويقارنان النتائج، وقد يكونان من نوعين مختلفين لتقليل أعطال السبب المشترك، مع اختبارات ذاتية مستمرة للذاكرة والمنافذ والتوقيت. وهذه الاختبارات هي ما يعطي «التغطية التشخيصية» (DC) التي تدخل في حسابات PFD والتحقق من SIL (القسم 29.4).

مرحل الحماية الرقمي: يأخذ عينات من محولات التيار والجهد بمعدل عشرات العينات في الدورة الواحدة، ويحسب القيم الفعالة والطور بتحويل فورييه، وينفذ منحنيات الحماية، ويسجل الأعطال بطابع زمني دقيق. والتزامن الزمني هنا أساس لتحليل تسلسل الأحداث؛ إذ تُزامَن ساعات الأجهزة كلها بمصدر زمني مرجعي واحد، وإلا تعذّر ترتيب أحداث سُجّلت في أجهزة مختلفة ترتيبًا صحيحًا (يُفصَّل في الفصل 74 من الجزء القادم).

44.13 برمجة الأجهزة المدمجة وإدارة البرنامج الثابت

سلسلة الأدوات: بيئة تطوير متكاملة (IDE) فيها المحرر والمترجم والرابط، ومحمّل يكتب البرنامج إلى الذاكرة، وأداة تنقيح (Debugger) تتصل بالمعالج عبر منفذ JTAG أو SWD لإيقاف البرنامج وقراءة المتغيرات. ومن البيئات المعروفة Keil للمعالج 8051 و ARM، وMPLAB لمتحكمات PIC.

مثال بسيط بلغة C: متحكم يقرأ درجة حرارة من المحول التناظري الرقمي كل 100 ms، ويشغل مرحل سخان بتخلف (Hysteresis) بين 58 و62 °C، ويصفّر مؤقت المراقبة في كل دورة. الدوال المساعدة افتراضية للتوضيح:

```
#define T_ON   58.0f   /* يشغل السخان تحت هذه القيمة */
#define T_OFF  62.0f   /* يطفئه فوق هذه القيمة */

volatile unsigned char tick = 0;   /* يُرفع كل 100 ms من مقاطعة المؤقت */

void timer_isr(void) { tick = 1; } /* خدمة مقاطعة قصيرة */

int main(void) {
    unsigned char heater = 0;
    init_hw();                     /* المنافذ والمؤقت والمحول ومؤقت المراقبة */
    while (1) {
        if (tick) {
            tick = 0;
            float t = adc_read(0) * 150.0f / 4095.0f;
/* 12 بت لمدى 0-150 درجة */
            if (sensor_fault(t))      heater = 0;
/* الحالة الآمنة */
            else if (t < T_ON)        heater = 1;
            else if (t > T_OFF)       heater = 0;
            relay_write(heater);
            watchdog_kick();
        }
    }
}
```

تُظهر هذه الأسطر القليلة أفكار الفصل كلها: مقاطعة مؤقت قصيرة تحدد إيقاع التنفيذ، وقراءة محول وتدريجها، ومنطق تحكم بتخلف يمنع الارتجاف، وحالة آمنة عند عطل الحساس، وتصفير مؤقت المراقبة.

إدارة البرنامج الثابت في المنشأة: البرنامج الثابت جزء من تصميم الجهاز، وتغييره قد يغير سلوكه. ولذلك:

- تُسجل نسخة البرنامج الثابت ونسخة العتاد لكل جهاز ذكي في قاعدة بيانات الأجهزة، مع نسخة ملف الوصف DD أو DTM المستخدم.
- عند استبدال جهاز يُتحقق من أن النسخة الجديدة متوافقة مع نظام إدارة الأصول ومع نسخة نظام التحكم.
- تحديث البرنامج الثابت لأجهزة ضمن وظيفة سلامة يُعامل تعديلًا هندسيًا عبر إدارة التغيير (MOC)، ويُتحقق من أن النسخة مشمولة بشهادة الجهاز أو بتقييم «الاستخدام السابق» (Prior Use).
- لا يُحمَّل برنامج ثابت إلا من مصدر الصانع الموثوق، ويُتحقق من توقيعه الرقمي أو قيمة التحقق، لأن البرنامج الثابت المعدل هدف معروف للهجمات على أنظمة التحكم (الفصل 24).
- تُحفظ نسخ احتياطية من برامج المعالجات وإعداداتها مع كل تعديل، وتُختبر استعادتها.

44.14 الموثوقية والتوافق الكهرومغناطيسي والسلامة

مصادر الأعطال في الأنظمة المدمجة:

- **التغذية:** هبوط لحظي في الجهد قد يعيد تشغيل المعالج أو يفسد كتابة جارية في الذاكرة. والحل كاشف انخفاض الجهد (Brown-out Detector) وتصميم مصدر تغذية بسعة احتياط كافية.

- **التشويش الكهرومغناطيسي:** الملفات والكونتاكتورات وأجهزة الاتصال اللاسلكي تولد اضطرابات قد تقلب بتًا في ذاكرة أو تسبب مقاطعة زائفة. وتُختبر الأجهزة الصناعية وفق سلسلة IEC 61000-4 للتفريغ الكهروستاتيكي والاندفاعات والنبضات السريعة والمجالات المشعة، وتصنف مناعتها وفق IEC 61326-1 لأجهزة القياس والتحكم.
- **الحرارة والتقادم:** المكثفات الكيميائية والبطاريات أول ما يشيخ. وبطارية ذاكرة PLC القديمة المستنفدة سبب كلاسيكي لفقد البرنامج بعد انقطاع كهرباء طويل.
- **أخطاء البرمجيات:** فيضان المكدس، والقسمة على الصفر، والكتابة خارج حدود المصفوفة، وتسرب الذاكرة الذي يستهلكها تدريجيًا حتى يتوقف الجهاز بعد أسابيع.
- **الأخطاء الناتجة عن الإشعاع:** قلب بت مفرد (SEU) نادر، لكنه يؤخذ في الحسبان في الأنظمة الحرجة بذاكرات مصححة للأخطاء (ECC).

وسائل الحماية المدمجة: مؤقت المراقبة، واختبار الذاكرة بقيم التحقق (CRC) عند الإقلاع ودوريًا، ومقارنة نتائج معالجين، ومراقبة زمن تنفيذ المهام، وتخزين البيانات الحرجة في نسختين، والانتقال إلى حالة آمنة معرفة عند أي عطل مكتشف.

البرمجيات والسلامة الوظيفية: يخصص الجزء الثالث من IEC 61508 لمتطلبات البرمجيات في الأنظمة المرتبطة بالسلامة: دورة حياة موثقة، ومعايير برمجة، واختبارات ومراجعات تزداد صرامتها مع مستوى SIL. ولهذا لا يُستخدم متحكم دقيق مبرمج محليًا في وظيفة سلامة إلا ضمن هذا الإطار، ويُفضل مستخدم المنشأة أجهزة معتمدة من طرف ثالث. ويحدد IEC 61511 ما على المستخدم في برمجة التطبيق: لغة محدودة التباين، ومراجعة واختبار موثّقان لكل تعديل تحت إدارة التغيير (يُفصَّل في الفصل 81 من الجزء القادم).

44.15 مثال تطبيقي متكامل: وحدة اكتساب بيانات لخزان

المطلوب: وحدة صغيرة في محطة ضخ بعيدة تقرأ مرسل مستوى 4–20 mA بمدى 0–8 m، ومفتاحي مستوى عال ومنخفض، وتشغل مضخة تعبئة، وترسل البيانات إلى SCADA عبر Modbus RTU على RS-485، وتسجل القراءات محليًا.

الاختيار والتصميم:

1. **المعالج:** متحكم ARM Cortex-M بذاكرة الفلاش 512 KB وRAM 64 KB، ومحول 12 بت داخلي، ومنفذا UART، ومؤقت مراقبة مستقل.
2. **المدخل التناظري:** مقاومة 250 Ω بدقة 0.1%، ومرشح RC، وديود TVS، وتغذية للحلقة 24 V بحد تيار. الدقة: 8000 mm ÷ 3276 ≈ 2.4 mm لكل مستوى، وهي أكثر من كافية لخزان.
3. **المداخل المنفصلة:** مقرنات ضوئية لإشارات 24 V مع مرشح برمجي لإزالة الارتداد (Debounce) يرفض كل تغير أقصر من 20 ms.
4. **المخرج:** ترانزستور يشغل مرحلًا وسيطًا 24 V بديود حماية، ومنه كونتاكتور المضخة.
5. **المنطق:** تشغيل المضخة تحت 2.0 m وإيقافها فوق 6.5 m. ويوقف مفتاح المستوى العالي المضخة مباشرة في الدائرة الكهربائية، لا عبر البرنامج وحده، لأن الحماية الأخيرة لا تُترك لبرنامج غير مصنف (القسم 29.2).
6. **التسجيل:** سجل 12 بايتًا كل دقيقة: 12 × 1440 ≈ 17 KB في اليوم، فتكفي ذاكرة 1 MB نحو شهرين.
7. **الاتصال:** سجلات Modbus للمستوى وحالة المضخة والإنذارات وعداد ساعات التشغيل، مع مهلة اتصال تعيد الوحدة إلى الوضع المحلي إذا انقطع الاتصال.
8. **المتانة:** كاشف انخفاض الجهد، ومؤقت مراقبة 1 s، وحفظ عداد ساعات التشغيل في الذاكرة الدائمة مرة كل ساعة لا كل دورة، وعلبة معدنية مؤرضة.

44.16 دراسة حالة: توقف PLC بعد تعديل برمجي صغير

> **نوع الحالة:** مثال تعليمي مركّب يجمع أنماطًا متكررة من خبرة المؤلف مع تعديل التفاصيل والأرقام لأغراض التعليم وحماية السرية.

في وحدة معالجة غاز أضاف مهندس برنامج PLC كتلة تحسب متوسطات ساعية لعشرين قياسًا، تُكتب في مصفوفة من 3600 عنصر لكل قياس، ويُعاد حساب المتوسط بحلقة تمر على المصفوفة كلها في كل دورة مسح. نجحت التجربة في المحاكاة، ثم نُزل البرنامج إلى المعالج أثناء التشغيل.

بعد دقائق توقف المعالج الرئيسي وانتقل التحكم إلى المعالج الاحتياطي، ثم توقف الاحتياطي بالسبب نفسه، فانتقلت المخارج إلى حالتها الآمنة وتوقفت الوحدة. وأظهر سجل التشخيص خطأ «تجاوز زمن الدورة».

التحليل: كان زمن الدورة قبل التعديل نحو 35 ms، وحد مراقب الدورة 150 ms. والحلقة الجديدة تمر على 72 000 عنصر في كل دورة، ومع عمليات الفاصلة العائمة ارتفع زمن الدورة إلى أكثر من 200 ms. وفي المحاكاة كان الحاسوب أسرع كثيرًا من المعالج الحقيقي، فلم يظهر الأثر. ولأن المعالجين يشغلان البرنامج نفسه، لم يحمِ التكرار الاحتياطي من خطأ برمجي مشترك.

الإصلاح: أُعيدت كتابة الحساب بمتوسط متحرك يضيف القراءة الجديدة ويطرح الأقدم، فصار العمل ثابتًا وصغيرًا في كل دورة. ونُقلت الحسابات غير الحرجة إلى مهمة دورية كل ثانية بأولوية منخفضة، وأُضيفت مراقبة زمن الدورة الفعلي على شاشة الصيانة بإنذار عند 70% من الحد.

الدروس:

- زمن الدورة مورد محدود مثل الذاكرة، ويُقاس قبل التعديل وبعده على المعالج الحقيقي.
- تكرار المعالجات يحمي من أعطال العتاد، لا من أخطاء البرنامج المشتركة.

- الحلقات التي يتناسب زمنها مع حجم البيانات لا مكان لها في مهمة التحكم السريعة.
- تنزيل التعديلات أثناء التشغيل يحتاج تقييم مخاطر وخطة رجوع، لا مجرد نجاح المحاكاة.

> **دور المهندس ودور الفني:** المهندس يقرر ما يتعلق بالمعالج وبرنامجه: يقيس زمن الدورة قبل التعديل وبعده على المعالج الحقيقي، ويختار دقة المحول ومعدل العينات والمرشح بحسب الغرض، ويعتمد تحديث البرنامج الثابت عبر إدارة التغيير (MOC)، ويمنع استعمال متحكم مبرمج محليًا في وظيفة سلامة خارج إطار IEC 61508 و IEC 61511. والفني ينفذ ويسجل: يقرأ نسخة البرنامج الثابت ونسخة العتاد وملف الوصف عند كل استبدال، ويبدّل بطاريات ذاكرة المعالجات في مواعيدها، وينقل رسائل التشخيص (مثل Watchdog Timeout وCycle Time Exceeded) كما هي، ويحفظ نسخًا احتياطية من البرامج والإعدادات.

44.17 الأخطاء الشائعة

- اختيار بطاقة أو مسجل بدقة المحول وحدها، مع إهمال معدل العينات والمرشح والدقة الكلية للسلسلة.
- معدل عينات منخفض يسبب تعرجًا يُفسر خطأً على أنه تذبذب في العملية.
- كتابة قيم متغيرة إلى EEPROM أو الفلاش في كل دورة مسح أو إلى أجهزة ذكية عبر الشبكة دوريًا فتتلف ذاكرتها.
- إطالة برامج خدمة المقاطعة أو تعطيل المقاطعات مدة طويلة.
- تعطيل مؤقت المراقبة أثناء التطوير ونسيان تفعيله.
- توصيل منافذ المتحكم مباشرة بإشارات 24 V أو بأحمال حثية دون عزل وحماية.

- إهمال بطاريات ذاكرة المعالجات القديمة حتى يُفقد البرنامج بعد انقطاع الكهرباء.
- استبدال جهاز ذكي بنسخة برنامج ثابت مختلفة دون التحقق من التوافق وملفات الوصف والشهادة.
- تحميل برنامج ثابت من مصدر غير موثوق، أو ترك منافذ البرمجة والتنقيح مفتوحة في أجهزة ميدانية.
- الثقة بالمحاكاة على الحاسوب بدل قياس زمن الدورة على المعالج الحقيقي.
- استخدام متحكم دقيق مبرمج محليًا في وظيفة سلامة خارج إطار IEC 61508 وIEC 61511.

44.18 ملخص

المعالج الدقيق وحدة حساب ومنطق وتحكم ومسجلات على رقاقة، يتصل بالذاكرة والمنافذ عبر نواقل العناوين والبيانات والتحكم، وينفذ البرنامج بدورة جلب وتفكيك وتنفيذ. والمتحكم الدقيق حاسوب كامل على رقاقة، وهو قلب المرسلات والموضّعات والمرحلات ووحدات التحكم. وتحدد خطوط العنوان سعة العنونة، وتحدد أنواع الذاكرة ما يُحفظ بعد فصل التغذية وكم مرة يمكن الكتابة. والمقاطعات تمنح استجابة سريعة للأحداث، والمؤقتات تعطي الإيقاع وتقيس الزمن والتردد، ومؤقت المراقبة يحمي من تعلق البرنامج. والمحول التناظري الرقمي باب القياس، ودقته تتحدد بعدد البتات والمدى المستخدم، ومعدل عيناته يجب أن يتجاوز ضعف أعلى تردد مع مرشح مضاد للتعرج. والنظام الصناعي يحتاج إلى الحتمية أكثر من السرعة، والبرنامج الثابت جزء من تصميم الجهاز يُدار بالتغيير المضبوط وبحماية سيبرانية.

44.19 أسئلة التقييم الذاتي

1. ما الفرق بين المعالج الدقيق والمتحكم الدقيق؟ ولماذا يُستخدم الثاني في المرسلات الذكية؟
2. معالج بناقل عناوين من 24 خطًا. ما سعة العنونة؟ وإذا قُسم الفضاء بمفكك 3 إلى 8 على الخطوط العليا، فما سعة كل منطقة؟
3. تتبع البرنامج في الشكل 44-3 إذا كانت القيمة في B هي E0H بدل 18H. ما قيمة A وعلم الحمل بعد ADD B؟
4. متحكم 8051 بمذبذب 12 MHz. احسب قيمتي TH1 وTL1 لتوليد مقاطعة كل 20 ms في النمط 1.
5. لماذا يجب أن يكون برنامج خدمة المقاطعة قصيرًا؟ وما أثر إطالته على زمن الاستجابة؟
6. مرسل حرارة 0–200 °C بإشارة 4–20 mA يُقرأ بمقاومة 250 Ω ومحول 10 بت مداه 0–5 V. احسب الدقة بالدرجة لكل مستوى، والحرارة المقابلة للشيفرة 614.
7. اهتزاز بتردد 45 Hz يُقرأ بمعدل 50 عينة في الثانية. ما التردد الذي سيظهر في البيانات؟ وكيف تمنع ذلك؟
8. اذكر ثلاثة أسباب تجعل FPGA مناسبة لحماية التوربين من السرعة الزائدة.
9. ما الإجراءات الواجبة قبل تحديث البرنامج الثابت لمرسل ضمن حلقة SIS؟
10. في الحالة 44.16، لماذا لم يمنع وجود معالج احتياطي توقف الوحدة؟ وما التعديلان الأساسيان في الحل؟

مراجع الفصل: R. S. Kaler، Microprocessors and Microcontrollers، الطبعة الثانية: مقدمة المعالجات والحواسيب، ومعالج 8085 ولغة التجميع، ومعالج 8086، والشرائح المحيطية 8255 و8253 و8259 و8251 و8237، وربط المحولات التناظرية الرقمية

والرقمية التناظرية، ونظم اكتساب البيانات، والمتحكم 8051 بذاكرته ومؤقتاته ومقاطعاته واتصاله التسلسلي، ومقدمة ARM وPIC وAVR، والأنظمة المدمجة والزمن الحقيقي، والبرمجة بلغة C في بيئة Keil؛ IEC 61508-3 لمتطلبات البرمجيات؛ IEC 61511؛ IEC 61000-4 وIEC 61326-1 للتوافق الكهرومغناطيسي؛ NAMUR NE 43؛ مواصفات Modbus over Serial Line؛ خبرة المؤلف في أنظمة التحكم بالمحطات.

الملحق أ: حلول مشروحة لأسئلة مختارة

اختيرت من معظم الفصول المكتوبة مسألة أو أكثر تمثل نوع التفكير المطلوب. كل حل يذكر الافتراضات والوحدات وخطوات الحل ومعنى النتيجة، ويبين حين يلزم لماذا تُستبعد الإجابات الأخرى. الأرقام تعليمية، والقيم المرجعية (جداول المزدوجات، حدود ISO) من المعايير المذكورة في الفصول.

الفصل 2

س1 (خزان 25 m²): الفرق بين الداخل والخارج 15 m³/h = 45 − 60. في 20 دقيقة (ثلث ساعة) يتراكم 5 m³. الارتفاع = الحجم ÷ المساحة = 25 ÷ 5 = **0.20 m**. الافتراض: مقطع ثابت وسائل غير قابل للانضغاط. المعنى: الخزان «مكامل»؛ الفرق الثابت الصغير يرفع المستوى بلا توقف، ولهذا تحتاج حلقات المستوى إلى تحكم لا إلى إنذار فقط.

س2 (تسخين 5 kg/s): $Q = \dot{m} \times Cp \times \Delta T = 5 \times 2.1 \times 15 =$ **157.5 kW**. تحقق الوحدات:

$$\text{kg/s} \times \text{kJ/(kg·K)} \times \text{K} = \text{kJ/s} = \text{kW}.$$

الخطأ الشائع: إدخال Cp بالجول فتخرج النتيجة بالواط وتُقرأ كيلوواط.

س4 (مدى مرسل لخط 8 bar): الحدود: عادي 8، تشغيل 6–10، تصميم 16. المدى المقترح **0–16 barg**: يضع التشغيل العادي عند 50% (وسط الثلث الأوسط)، ويبقي ضغط التصميم داخل المدى فيرى المشغل أي تجاوز. 0–10 مرفوض لأن حد التشغيل الأعلى عند نهاية المدى ولا يظهر ما فوقه؛ 0–25 يضع العادي عند 32% ويخسر دقة دون فائدة إلا إذا كان صمام الأمان مضبوطًا فوق 16.

الفصل 3

س4 (بطاقة 12 بت على 0–100 bar): عدد المستويات $2^{12} = 4096$، فأصغر تغير = $100 \div 4095 \approx$ **0.024 bar (24 mbar)**. الافتراض: المحول يستخدم مداه كاملًا للإشارة 0–100%. لو كان الدخل 4–20 mA على محول 0–5 V (كما في 44.7) لضاع خُمس المستويات وصار الميز نحو 31 mbar.

الفصل 4

س1 (350 psig): 1 psi = 0.06895 bar، فـ 350 psig = **24.13 barg**، والمطلق = $24.13 + 1.013 =$ **25.14 bara**. المعنى: الفرق بين g وa هنا 4% من القيمة، ويصبح كارثيًا في الفراغ.

س2 (مرسل −50 إلى 150 mbar): الاتساع (Span) = 150 − (−50) = **200 mbar**. الصفر (0 mbar) يقع داخل المدى فوق LRV فالمدى **ذو صفر مرفوع (Elevated Zero)**: القيمة الدنيا سالبة. التيار عند

$$0\ \text{mbar} = 4 + 16 \times (0 - (-50))/200 = 4 + 4$$
$$= 8\ \text{mA}.$$

س3 (±0.075% من Span على 0–25 bar): الخطأ = $25 \times 0.00075 =$ **±0.019 bar**؛ نسبته إلى قراءة 5 bar = 0.019/5 = **0.375%** من القراءة. المعنى: الدقة المكتوبة نسبة من المدى تتضخم خمس مرات عند خُمس المدى.

س4 (كوريوليس مقابل DP عند 20% من المدى): كوريوليس ±0.1% من القراءة = ±0.02% من المدى عند 20%؛ ومرسل DP ±0.1% من المدى = ±0.5% من القراءة عند 20%. **كوريوليس أدق بخمس مرات** عند هذا الحمل، ويتساويان فقط عند 100%. (ولو كان DP لقياس تدفق بالجذر فالفارق أكبر لأن 20% من التدفق يعني 4% من ΔP.)

س5 (0.2 و0.1 و0.1%): تربيعيًا

$$(\text{RSS}) = \sqrt{(0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2)} = \sqrt{0.06}$$

= 0.245%؛ جبريًا **= 0.4%**. يُستخدم RSS للمساهمات المستقلة العشوائية، والجمع الجبري حين يمكن أن تتجه كلها في اتجاه واحد (أسوأ حالة) أو حين تكون مترابطة.

س9 (غمد 40 s ومرسل 0.2 s): الزمن الكلي التقريبي ≈ $\sqrt{(40^2 + 0.2^2)}$ ≈ **40 s** (وبالجمع البسيط 40.2 s). العنصر الأبطأ يهيمن؛ تحسين المرسل لا يفيد، وتحسين الغمد (قطر أصغر، ملء حراري، اتصال بالقاع) هو ما يغير الاستجابة.

الفصل 6

س3 (ماء 0.5 m في الجانب المنخفض): عمود الماء يضيف

$$1000 \times 9.81 \times 0.5 = 4905 \text{ Pa}$$

≈ **49 mbar** إلى الجانب المنخفض، فالمرسل يقرأ ΔP **أقل** من الحقيقي بـ 49 mbar. وفي قياس تدفق بمدى 250 mbar عند 50% (125 mbar فعليًا) تصبح القراءة 76 mbar أي تدفق 55% بدل 71% (بالجذر): خطأ كبير من ماء قليل؛ لذلك تُميَّل خطوط الغاز صعودًا وتُصرَّف.

الفصل 7

س1 (K يعطي 12.21 mV والأطراف 25 °C): الجهد المكافئ

$$= 12.21 + 1.000 = 13.21 \text{ mV}.$$

من جدول K: 320 °C = 13.040 mV و330 °C = 13.457 mV، فالاستكمال:

$$320 + 10 \times (13.21 - 13.04)/(13.457 - 13.04) = 320 + 4.1$$

= 324 °C. لا تُجمع الحرارتان لأن العلاقة غير خطية؛ هنا الفرق صغير (300 + 25 = 325) لأن منحنى K شبه خطي في هذا المدى، لكنه يبلغ درجات عند الحرارات المنخفضة والعالية وفي الأنواع الأخرى (R، S، B).

س3 (Pt100 عند 200 °C):

$$R = 100 \times (1 + 3.9083 \times 10^{-3} \times 200 - 5.775 \times 10^{-7} \times 200^2)$$
$$= 100 \times (1 + 0.78166 - 0.0231)$$

= **175.86 Ω** (يطابق جدول IEC 60751). المعامل الثالث (C) في معادلة كالندر–فان دوسن (Callendar–Van Dusen) لا يدخل إلا تحت الصفر.

س4 (RTD بسلكين على 60 m بكابل 18.4 Ω/km): مقاومة السلك الواحد = 0.06 × 18.4 = 1.10 Ω، والحلقة 2.21 Ω. الخطأ ≈ 2.21 ÷ 0.385 Ω/°C ≈ **+5.7 °C** (قراءة أعلى). الحل: ثلاثة أسلاك أو مرسل في الرأس.

الفصل 8

س1 (0–250 ↔ 0 100 t/h·mbar، القراءة 90 mbar): التدفق يتناسب مع الجذر:

$$Q = 100 \times \sqrt{(90/250)} = 100 \times 0.6$$

= **60 t/h**. الخطأ الشائع: الحساب الخطي يعطي 36 t/h.

س3 (1500 m³/h فعلية عند 20 bara و50 °C و$Z = 0.96$): Q_{std}

$$= 1500 \times (20/1.01325) \times (288.15/323.15) \times (1/0.96)$$
$$= 1500 \times 19.74 \times 0.892 \times 1.042$$

≈ **27,500 Sm³/h**. الافتراض: Z عند الظروف القياسية ≈ 1. المعنى: الرقم القياسي يفوق الفعلي 18 مرة؛ خلط الاثنين يجعل الصمام أو العداد أكبر أو أصغر بهذا العامل.

س4 (عنصر DP محسوب عند 60 °C يعمل عند 20 °C): الكثافة الفعلية أعلى بنسبة

$$(273 + 60)/(273 + 20) = 1.137.$$

التدفق الكتلي الحقيقي = المبيّن × 1.066 = المبيّن × √1.137، أي أن القراءة غير المعوضة **أدنى** من الحقيقة بنحو **6%** (القراءة/الحقيقي = 0.938). الافتراض: الضغط نفسه وZ ثابت.

الفصل 9

س1 (خزان مفتوح، ρ = 1050، المرسل 0.4 m تحت القاع): عند 0 m:

$$P = 1050 \times 9.81 \times 0.4 = 4120 \text{ Pa}$$

= **41.2** mbar (LRV)؛ عند 5 m:

$$1050 \times 9.81 \times 5.4 = 55{,}620 \text{ Pa}$$

= **556** mbar (URV)؛ الاتساع = 515 mbar. المدى ذو صفر مكبوت (Suppressed Zero) لأن LRV موجب.

س2 (المثال المحلول في 9.3 بجلايكول 1110 kg/m³): عند 0%:

$$\Delta P = -1110 \times 9.81 \times 3 = -32{,}670 \text{ Pa}$$

= **−326.7** mbar؛ عند 100%:

$$(850 - 1110) \times 9.81 \times 3 = -7{,}650 \text{ Pa}$$

= **−76.5** mbar؛ الاتساع = 250.2 mbar كما في المثال (يحدده سائل العملية وH)، وتتغير القيمتان الحديتان فقط. ملء الساق بسائل أثقل يبعد نقطة الصفر ويقلل خطر التبخر لكنه يفرض معرفة كثافته بدقة.

الفصل 10

س1 (خط عينة 0.8 L عند 20 barg): التدفق الفعلي داخل الخط = 2 ÷ 21 ≈ 0.095 L/min؛ زمن التأخر ≈ 0.8 ÷ 0.095 ≈ **8.4 min**. الحلول: منظم ضغط عند نقطة الأخذ (يصبح الخط عند ضغط منخفض فيزيد التدفق الفعلي نحو عشرين مرة)، أو حلقة سريعة (Fast Loop) تعيد معظم العينة إلى العملية ويأخذ المحلل من فرع قصير؛ والثالث: تقصير الخط أو تصغير قطره.

الفصل 11

س1 (حساس حثي 15 mm والهدف ألمنيوم 0.4): المسافة المضمونة للفولاذ = 0.81 × 15 = 12.15 mm، وللألمنيوم × 0.4 = **4.9 mm**؛ الفجوة المقترحة **3 إلى 3.5 mm** (نحو 70% من المضمونة) لتغطي التمدد والاهتزاز.

س7 (مشفر 2500 PPR عند 3000 rpm): تردد القناة A = 2500 × 3000 ÷ 60 = **125 kHz**؛ العدّات بفك رباعي = 2500 × 4 = **10,000 في الدورة**. تحتاج بطاقة عد سريعة ≤ 250 kHz بهامش.

س9 (72 سنًا عند 9000 rpm): f = 72 × 9000 ÷ 60 = **10,800 Hz**. الحساس المغناطيسي السلبي يولد جهدًا يتناسب مع معدل تغير الفيض، فعند السرعة الصفرية الجهد صفر ولا يمكن التمييز بين «واقف» و«الحساس مقطوع»؛ لكشف السرعة الصفرية يلزم حساس فعال (Hall) أو مجس قرب.

الفصل 12

س1 (ΔP = 19.6 kPa بين مأخذين على 2 m): ρ = 19,600 ÷ (9.81 × 2) = **999 kg/m³** (ماء). تغير 5 kg/m³ يغير القراءة 2 × 9.81 × 5 = **98 Pa** فقط (0.5% من القراءة)؛ فالطريقة تحتاج مرسلًا دقيقًا ومستوى فوق المأخذ العلوي دائمًا.

س2 (45 cP و900 kg/m³): الديناميكية μ تقيس مقاومة القص (Pa·s)، والكينماتيكية ν = μ/ρ تقيس انتشار الزخم

$$\nu = 0.045 \div 900 = 5 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}.$$

= **50 cSt** (1 cSt = 10^{-6} m²/s). قاعدة سريعة: cSt = cP ÷ SG.

س3 (أدنى حرارة 2 °C): يشترط ANSI/ISA-7.0.01 أن تكون نقطة الندى عند ضغط الخط أدنى من أدنى حرارة محيطة بعشر درجات على الأقل: **≤ −8 °C عند الضغط**.

الخطأ الشائع: تفسير «نقطة ندى ℃40−» المكتوبة عند الضغط الجوي على أنها عند 7 bar؛ عند الضغط تكون أعلى بكثير.

س4 (أربع خلايا 5 V 10، 2 mV/V، t): السعة 20 t والخرج عندها 20 mV. فارغًا 3 t ← 3 mV؛ ممتلئًا 13 mV 13 ← t؛ **الإشارة الصافية 10 mV**؛ نسبة الحمل الأقصى 13/20 = **%65** (ضمن 50–80% الموصى بها).

الفصل 13

س1 (أمر الإيقاف ليس عزلًا): (1) يغيّر إشارة أو خرجًا منطقيًا فقط، والجهد باقٍ على أطراف الملامس والمحرك والدائرة. (2) يمكن أن يُعكس بأمر آخر من المشغل أو بمنطق آلي أو بفرض (Force) أو بعطل في البطاقة. (3) لا يُؤمَّن بقفل، ولا يمكن إثبات انعدام الجهد به؛ والعزل فصل مادي مؤمَّن ومتحقق منه.

س2 (مصادر الطاقة حول صمام بخار): ضغط البخار في الخط، والحرارة في الجسم والمعدن، وهواء التغذية للموضّع، والهواء المحبوس في المشغل وخزان الحجم، والنابض المحمّل في المشغل، والتغذية الكهربائية للموضّع (4–20 mA)، وتغذية الصمام الملفي (غالبًا من لوحة أخرى)، والتكثف المحبوس الذي قد يسبب طرقًا مائيًا عند الإعادة.

س3 (DBB مقابل العزل الإيجابي): العزل المزدوج مع التنفيس صمامان مغلقان بينهما تنفيس مفتوح؛ يعتمد على إحكام الصمامات، والتنفيس يثبت إحكام الأول ويصرف تسريبه. والعزل الإيجابي فصل مادي للمسار بلوح عمى أو بإزالة قطعة أنبوب، فلا يعتمد على إحكام أي صمام. ويلزم الثاني عند دخول الأوعية، والعمل الساخن، والمواد شديدة السمية، والعزل الطويل، وحيث يقرر تقييم المخاطر أن تسريب الصمامات غير مقبول.

س4 (مقياس يقرأ صفرًا والخط مضغوط): (1) صمام المقياس نفسه مغلق. (2) المقياس أو وصلته مسدود بالرواسب أو الهيدرات أو التجمد. (3) الضغط محبوس في مقطع لا يراه المقياس، كالمقطع بين صمامين مغلقين. ويضاف: مدى المقياس كبير (0–100 bar) فلا تظهر عليه الضغوط المنخفضة الخطرة.

س5 (المكثف): $E = \tfrac{1}{2} \times 2200 \times 10^{-6} \times 540^2 \approx$ **321 J**. والثابت الزمني

$\tau = 22{,}000 \times 2200 \times 10^{-6} = 48.4\ \text{s}$،

وزمن الهبوط إلى 50 V:

$$t = 48.4 \times \ln(540 \div 50) = 48.4 \times 2.38$$

≈ **115 s**، أي نحو دقيقتين، ثم يُثبت انعدام الجهد بالقياس.

س6 (فك شفة لتركيب لوح عمى): قبل أول صامولة: عزل أولي بالصمامات ومقفل، وتخفيض الضغط والتصريف والتنفيس (والتطهير إن لزم)، والتحقق من زوال الضغط بنقطة تنفيس مفتوحة، وفحص الغاز، وتصريح العمل للفتح. ثم تُرخى الصواميل في الجهة البعيدة عن العامل أولًا، حتى إذا بقي ضغط أو سائل اندفع بعيدًا عنه، ولا تُفك الصواميل الأخيرة حتى تنفصل الشفتان دون اندفاع، ثم يُركَّب لوح بتصنيف ضغط الخط ويُسجل في سجل الألواح.

س7 (صندوق الأقفال الجماعي): يجمع مفاتيح أقفال نقاط العزل الكثيرة في صندوق واحد، ويركّب كل عامل قفله الشخصي على الصندوق، فيحمي كل عامل نفسه بقفل واحد دون أن يقفل كل نقطة. ولا يُفتح الصندوق لإعادة العزل إلا بعد أن يزيل آخر عامل قفله، أي بعد خروج الجميع وانتهاء العمل.

س8 (أطراف الصمام الملفي في خزانة معزولة): التحقق من مصدر تغذية الملف في المخططات؛ فإن كان من لوحة أخرى (جهد أجنبي)، يُفصل قاطعه في تلك اللوحة ويُقفل ويوسم، ثم يُثبت انعدام الجهد عند أطراف الملف نفسها بجهاز فحص معتمد مع اختباره قبل القياس وبعده.

س9 (إعادة مرسل DP): اكتمال العمل وشد الوصلات، ثم إخلاء الأدوات، ثم اختبار التسرب عند المانيفولد، ثم فتح المانيفولد بالتسلسل الصحيح (موازنة مفتوحة، ثم جانب الضغط العالي، ثم إغلاق الموازنة، ثم جانب الضغط المنخفض)، ثم إزالة أقفال العزل وفق

السجل وإعادة التغذية، ثم مقارنة القراءة بالمرسل المكرر أو بحساب العملية، ثم إزالة أي تجاوز أو فرض، ثم إعادة الحلقة إلى الآلي بموافقة المشغل وإغلاق التصريح.

س10 (الحالة 13.12): (1) فتح التنفيس عبر المانيفولد ومراقبته قبل الفك بدل الاعتماد على المقياس. (2) عزل بخار التتبع ضمن مصادر الطاقة وتبريد الخط قبل العمل.

الفصل 14

س5 (±0.5 °C عند 2 ونسبة 4:1): عدم يقين أداة الاختبار ≥ 4 ÷ 0.5 = **±0.125 °C** على المدى المطلوب. أداة «±0.1% من كامل المدى» على 0–500 °C تعطي ±0.5 °C فلا تصلح رغم أن الرقم يبدو صغيرًا.

س3 (12.10 mA عند 50%): المثالي 12.000 mA؛ الخطأ = 16 ÷ 0.10 = **0.625% من المدى**. يتجاوز حد قبول ±0.25% فيلزم الضبط.

س6 (مفتاح يفصل عند 2.0 ويعود عند 2.4): الفرق التشغيلي أو المنطقة الميتة (Dead Band) = **0.4 bar**. الأثر: بعد الإنذار أو الإيقاف لا يُعاد الضبط حتى يرتفع الضغط إلى 2.4؛ فرق كبير يؤخر العودة وفرق صغير يسبب ترددًا (Chattering).

الفصل 17

س1 (16#3A7): 3 × 256 + 10 × 16 + 7 = **935** عشريًا؛ ثنائيًا **0011 1010 0111**.

س3 (CMOS 5 V): بافتراض عتبات CMOS القياسية VIH = 0.7 Vdd = 3.5 V و VIL = 0.3 Vdd = 1.5 V: هامش الواحد = 4.4 − 3.5 = **0.9 V**، وهامش الصفر = 1.5 − 0.5 = **1.0 V**. الهامش هو ما يمكن أن يضيفه الضجيج قبل أن يُساء تفسير المستوى.

س6 (000 و010 و100 و110): في الحالات الأربع C = 0، وA وB يأخذان كل القيم، فتبسّط إلى **F = NOT C**. خريطة كارنو تجمع الأربع في مجموعة واحدة يبقى فيها C وحده.

الفصل 18

س1 (PB = 40%، Ti = 0.5 min): Kc = 100 ÷ 40 = **2.5**؛ Ti = 30 s فالتكرارات = 60 ÷ 30 = **2، أي تكراران في الدقيقة**. الخطأ الشائع: إدخال 40 ككسب في نظام يعمل بالكسب، فيصير الكسب أكبر 16 مرة.

س3 (PV، ΔOP 8% من 40 إلى 52%، t_{28} = 25 s، t_{63} = 46 s): K = 12 ÷ 8 = **1.5**؛ τ = 1.5 × (46 − 25) = **31.5 s**؛ θ = 46 − 31.5 = **14.5 s**. SIMC بـ λ = θ: Kc = 31.5 ÷ (1.5 × 29) = **0.72**، Ti = min(31.5، 4 × 29) = **31.5 s**. ويُلاحظ أن θ/τ = 0.46 فالعملية «صعبة» نسبيًا، ولذلك جاء الكسب صغيرًا.

س5 (متسلسلة Kc' = 1.5، Ti' = 20 s، Td' = 10 s): F = 1 + 10 ÷ 20 = 1.5. المثالية: Kc = **2.25**، Ti = **30 s**، Td = **6.67 s**. المتوازية: Kp = 2.25، Ki = 2.25 ÷ 30 = **0.075** s^{-1}، Kd = 2.25 × 6.67 = **15 s**.

س9 (Kp' = 0.02 %/s لكل 1 %، θ = 10 s، λ = 90 s): Kc = 1 ÷ [0.02 × (90 + 10)] = **0.5**؛ Ti = 4 × 100 = **400 s** (نحو 6.7 min). والتحقق: Kc × Ti × Kp = 0.5 × 400 × 0.02 = 4 ≤ 4 فلا تذبذب بطيء.

س10 (قمتان 63.5 و61.0، نهائي 60، قفزة 10%): التجاوز = (63.5 − 60) ÷ 10 = **35%**؛ نسبة الاضمحلال = 3.5 ÷ 1.0 = **0.29** (قريب من ¼). مقبول لحلقة تدفق أو ضغط تريد رفضًا سريعًا للاضطراب، لكنه **غير مناسب** لحرارة مفاعل حيث قد يقود التجاوز إلى تفاعل هارب؛ يُعاد الضبط بطريقة λ بقيمة λ ≥ 2θ أو يُخفض الكسب إلى النصف مع ترجيح نقطة الضبط.

الفصل 19

س1 (مرشح 5 ms، دورة 40 ms، مخرج 1 ms): زمن الاستجابة الأسوأ = 2 × 5 + 1 + 40 = **86 ms**. وأقصر نبضة يُضمن أن تُرى يجب أن تزيد على 45 ms = 5 + 40،

وبالهامش الآمن (الضعف) **90 ms**. فأمر نبضي بعرض 100 ms مقبول بالكاد، و500 ms أريح.

س5 (مدى −50 إلى 150 °C، القيمة الخام 17280): النسبة = 27648 ÷ 17280 = 0.625، فالحرارة = −50 + 200 × 0.625 = **75 °C**، والتيار = 4 + 16 × 0.625 = **14 mA**. وحدا العطل مستقلان عن مدى المرسل: عند 3.6 mA القيمة الخام **−691**، وعند 21 mA **29376**.

س8 (0–100 mbar يقابل 0–5000 kg/h): عند 16 mbar: Q = 5000 × √0.16 = **2000 kg/h** (40% من التدفق عند 16% من الضغط التفاضلي). وعند 1 mbar: Q = 5000 × √0.01 = **500 kg/h**، أي أن 1% من الضغط التفاضلي يعطي 10% من التدفق؛ فضجيج صغير حول الصفر يظهر تدفقًا وهميًا كبيرًا ويتراكم في المجمِّع، ولذلك يُقطع التدفق تحت نحو 1% من الضغط التفاضلي.

الفصل 20

السؤال 2. 7.9: المخرج 0 (تحت حد التشغيل). 8.1: يصبح 1. 7.8: يبقى 1، لأنه فوق حد الإطفاء 7.7 bar = 8.0 − 0.3، وهنا يظهر أثر التخلف. 7.6: يصبح 0.

السؤال 3. في TON يُصفَّر العدّ حين يسقط المدخل، فالثواني الثلاث الأولى تضيع. ويبدأ العدّ من جديد عند الثانية 4، فيرتفع المخرج عند الثانية 9، ويبقى مرتفعًا حتى الثانية 10 حين يسقط المدخل. أما RTO فيحتفظ بالثواني الثلاث، ويحتاج ثانيتين أخريين، فيرتفع المخرج عند الثانية 6. ويبقى مرتفعًا حتى تُعطى إعادة ضبط، لا حين يسقط المدخل.

السؤال 4. الأعلى 830، والأدنى 512، والوسيط 515 °C. والوسيط يناسب التحكم لأنه يستبعد القراءة الشاذة في أي اتجاه، فالأرجح أن القراءة 830 من مزدوجة معطوبة.

السؤال 5. مع ثلاث قنوات سليمة وحد واحد تتساوى النتيجتان: الوسيط يتجاوز الحد فقط إذا تجاوزته قراءتان. ويظهر الفرق حين تفسد قناة. مثال: فصل بالضغط المنخفض

تحت 2.0 bar، والمرسل C انقطع سلكه، والضغط الحقيقي هبط إلى 1.5 bar والمرسل A يقرؤه صحيحًا، لكن المرسل B منجرف ويقرأ 2.8 bar. الوسيط المضبوط على متوسط القناتين الباقيتين يعطي

(1.5 + 2.8) ÷ 2 = 2.15 bar،

فلا فصل. أما التصويت الذي يعدّ القناة الفاسدة في حالة فصل (فيصبح 1oo2) فيرى القناة A تطلب الفصل، فيفصل. ثم إن التصويت يعرف أي قناة طلبت الفصل، فيعطي إنذار عدم اتفاق ويسمح بتجاوز قناة محددة، والوسيط لا يعطي ذلك.

السؤال 6. 0.75 = 27648 ÷ 20736، فالقيمة 187.5 °C = 250 × 0.75. والتيار 4 + 16 × 0.75 = 16 mA.

السؤال 7. 0.36 = 100 ÷ 36، وجذرها 0.6، فالتدفق 240 m³/h = 400 × 0.6. ويُضبط قطع التدفق المنخفض لأن الجذر يضخم الخطأ قرب الصفر: انزياح 1% في صفر المرسل يظهر تدفقًا 10% أي 40 m³/h والخط متوقف.

السؤال 8. الفرق 45%، وبمعدل 3 %/s يلزم 15 s.

السؤال 9. يرى المتحكم غير المختار انحرافًا دائمًا دون أن يؤثر مخرجه في العملية، فيستمر تكامله حتى يبلغ حده (100% في اختيار الأدنى). وحين يجب أن يسيطر، يحتاج وقتًا طويلًا لينزل من 100% إلى القيمة المطلوبة، فتتجاوز العملية الحد. والحل: تغذية راجعة خارجية للتكامل من مخرج كتلة الاختيار، فيبقى مخرج كل متحكم قريبًا من القيمة المختارة، ويستلم السيطرة فور الحاجة.

السؤال 10 (نموذج إجابة). ثلاثة مفاتيح LSLL مغلقة في الوضع السليم، كل منها مدخل منطقي. ثم NOT على كل قناة (فيصبح 1 عند طلب الفصل أو انقطاع السلك)، ثم تصويت 2 من 3، ثم ممسك بأولوية الضبط يُغذّى مدخل ضبطه من مخرج التصويت. ومدخل الإعادة = أمر المشغل AND NOT مخرج التصويت، فلا تعمل الإعادة ما دام الشرط قائمًا. ومخرج الممسك منفي إلى مخرج يُغذى في الوضع السليم (قطع التغذية للفصل).

والمضخة لا تعود إلا بأمر بدء جديد بعد الإعادة. وإذا فسد مفتاح (انقطع سلكه) فإن قناته تطلب الفصل، فيصبح النظام 1oo2 على القناتين الباقيتين، ويُرفع إنذار عدم اتفاق. وهذا السلوك يُكتب في SRS مع الزمن المسموح لإصلاح القناة.

الفصل 21

س2 (حمل المتحكم): الحلقات: 0.3 = 36 ms × 1 × 120 في الثانية؛ الوحدات المنفصلة: 0.1 = 80 ms × 2 × 400؛ المجموع 116 ms أي 11.6%، ومع الاتصال **23.6%**. وعند نقل الحلقات إلى 250 ms: 0.3 = 144 ms × 4 × 120، فالمجموع 224 ms أي 22.4%، ومع الاتصال **34.4%**، وهو مقبول لكنه يستهلك جزءًا كبيرًا من هامش التوسعة بلا فائدة لحلقات بطيئة.

س4 (ثماني عشرة وحدة): زمن الدورة = (100 + 300) × 18 = **7.2 s**. ولتسريع إنذار حدث مهم: (1) الإبلاغ غير المطلوب في DNP3 فيُرسل الحدث فور وقوعه بطابعه الزمني؛ (2) استطلاع الوحدات المهمة بتكرار أعلى أو فصلها على رابط أسرع، مع إبقاء الحماية في الوحدة الطرفية نفسها.

س7 (سعة المؤرخ): القيم في اليوم = 138.24 = 17280 × 8000 مليون، وبـ 12 بايتًا للقيمة: 12 × 10^6 × 138.24 ≈ **1.66 GB/day**، و**نحو 606 GB** في السنة قبل الضغط، و**نحو 76 GB** بعد ضغط 8:1.

س9 (MTBF 200,000 h، MTTR 12 h): بلا تكرار: عدم التوافر ≈ 200,012 ÷ 12 ≈ **6.0×10^{-5}**، أي نحو 0.53 h في السنة. ومع التكرار، بافتراض فريق إصلاح واحد: ≈ 2 × $(6 \times 10^{-5})^2$ ≈ **7.2×10^{-9}**. ولا يحمي التكرار من أعطال السبب المشترك: خطأ في البرنامج يُنسخ إلى المعالجين، أو تغذية مشتركة، أو حرارة الغرفة، أو احتياطي خامل غير متزامن لم يُكتشف.

الفصل 23

س2 (24 V، 40 Ω + 150 + 250، المرسل يحتاج 12 V): الهبوط عند

$$20\ \text{mA} = 0.02 \times 440 = 8.8\ \text{V}$$

→ الجهد المتاح للمرسل 24 − 8.8 = **15.2 V > 12 V** فتعمل الحلقة. الهامش 15.2 − 12)/0.02 = **160 Ω** يمكن إضافتها (مؤشر محلي 100 Ω مثلًا). ولو انخفض المصدر إلى 23 V يصبح الهامش 110 Ω.

س5 (السجل 30012): المجموعة 3xxxx = سجلات إدخال (Input Registers) → رمز الوظيفة **04**، والعنوان المرسل = 12 − 1 = **11 (000BH)**. الرد 84H = 04H + 80H يعني «استثناء للوظيفة 04»، والرمز **02 = عنوان بيانات غير صالح**: العنوان أو العدد المطلوب خارج ما يملكه الجهاز (غالبًا خلاف الإزاحة بواحد).

س7 (H1 بطول 900 m و12 جهازًا × 20 mA): التيار الكلي 240 mA.

(أ) الحساب المحافظ (كل الأجهزة عند آخر الخط)، مقاومة الموصلين والهبوط عليهما:

$$0.9 \times 88 = 79.2\ \Omega$$
$$79.2 \times 0.24 = 19\ \text{V}$$
$$24 - 19 = 5\ \text{V}$$

وهذا دون الحد الأدنى لجهد الجهاز (9 V)، فالجهاز **لا يعمل**.

(ب) مقطعًا مقطعًا (جهاز كل 75 m)، مقاومة المقطع الواحد:

$$0.075 \times 88 = 6.6\ \Omega$$

والتيار المار في المقطع k يساوي 20 mA × (13 − k)، فمجموع الهبوط على المقاطع الاثني عشر:

$$6.6 \times 0.02 \times (12 + 11 + \ldots + 1) = 6.6 \times 0.02 \times 78 = 10.30\ \text{V}$$

وعند آخر جهاز:

$$24 - 10.30 = 13.70\ \text{V}$$

وهذا فوق الحد الأدنى (9 V)، فالجهاز **يعمل**.

المعنى: توزيع الأجهزة على الخط يغير النتيجة من فشل إلى نجاح، ولذلك تُحسب القطعة بمواقع الأجهزة الفعلية، ويُترك هامش لأن الأجهزة تُضاف لاحقًا.

الفصل 26

س3 (هيدروجين، 560 °C AIT، محيط 45 °C): المجموعة **IIC**؛ الفئة الدنيا المقبولة **T1** (450 °C < 560). الجهاز Ex db IIB T6 Gb **لا يصلح** رغم فئته الحرارية الممتازة لأن IIB لا يغطي الهيدروجين؛ مستوى حماية الجهاز (Gb) والحرارة المحيطة مقبولان لو كانت المجموعة IIC.

س5 (حاجز Uo 25.2 V/Io 93 mA/Po 0.59 W/Co 107 nF/Lo 2.0 mH): Uo ≤ Ui (30) ✓، Io ≤ Ii (120) ✓، Po ≤ Pi (1.0) ✓. ولأن Ci وLi يتجاوزان 1% من Co وLo يُؤخذ نصفهما: السعة المتاحة

$$0.5 \times 107 - 10 = 43.5 \text{ nF}$$

→ 0.36 km؛ المحاثة

$$0.5 \times 2.0 - 0.1 = 0.9 \text{ mH}$$

→ 1.5 km؛ الأقصر يحكم: **نحو 360 m**. الحلقة آمنة بشرط ألا يتجاوز الكابل هذا الطول وألا يُضاف جهاز آخر بلا حساب.

س7 (Ex ia IIC T4 Ga، Ta −20..+70): يصلح للمنطقة **0** و**1** و**2** (Ga)، ولكل مجموعات الغاز (IIC تشمل IIA وIIB)، وللغازات التي حرارة اشتعالها الذاتي أعلى من **135 °C**، في حرارة محيطة بين −20 و+70 °C؛ ويبقى شرط الدائرة الجوهرية كاملة (الحاجز والكابل والمعاملات).

الفصل 28

س5 (احتمالية 3 وشدة 5): الدرجة 15 = 5 × 3: منطقة عالية على مصفوفة 5×5 (تحتاج إجراءً). حماية تخفض الاحتمالية درجتين ← 5 = 5 × 1: متوسطة أو منخفضة بحسب المصفوفة؛ الشدة لا تتغير لأن الحماية تمنع الحدث ولا تخفف نتيجته. ودرجة الحماية المطلوبة تُحدد بـ LOPA لا بالمصفوفة.

الفصل 29

س2 (PFDavg = 0.004): يقع بين 10^{-3} و10^{-2} ← **SIL 2**؛ عامل تخفيض المخاطرة RRF = 1/0.004 = **250**.

س4 (LOPA بمعيار 10^{-6}): التكرار بعد الطبقات القائمة

$$= 0.1 \times 0.1 \times 0.5 \times 0.01 = 5 \times 10^{-5}$$

في السنة. المطلوب 10^{-6} ← تخفيض إضافي 50 ← PFD للوظيفة ≥ 0.02 ← **SIL 1** (لأن 0.02 ضمن نطاق SIL 1: 0.01 إلى 0.1)، لكنه قريب من حد SIL 2 فيُصمم عمليًا بهامش (PFD مستهدف 0.01 أو أقل، أي حافة SIL 2).

س6 (صمام $\lambda DU = 1.5 \times 10^{-6}$/h، اختبار كل سنتين): TI = 17,520 h؛

$$\mathrm{PFDavg} = \lambda \mathrm{DU} \times \mathrm{TI}/2 = 1.5 \times 10^{-6} \times 8760$$

= **0.013** ← يحقق **SIL 1** فقط؛ بفترة سنة يصبح 0.0066 (SIL 2). المعنى: فترة الاختبار جزء من التصميم لا من الصيانة.

الفصل 30

س2 (شبكة 7.5 m):

$$(40 \div 7.5 + 1) \times (25 \div 7.5 + 1) \approx 6.3 \times 4.3$$

← تُقرَّب إلى **35 = 5 × 7** كاشفًا أوليًا. التعديل: نقل الكاشفات إلى الفلنجات والسدادات الفعلية، وتكثيفها في اتجاه الريح السائدة وحول المعدات عالية المخاطر، وإضافة كاشفات خطية على الحدود بدل بعض النقطية، وحذف ما يقع في مساحات خالية من مصادر تسرب، ثم إثبات نسبة التغطية بالأداة.

س4 (HFC-227ea):

$$\begin{aligned} V &= 10 \times 6 \times 3 \\ &= 180\ \text{m}^3.\ W \\ &= (180 \div 0.1373) \times (7 \div 93) \\ &= 1{,}311 \times 0.0753 \end{aligned}$$

= 98.7 kg ≈ 100 kg (تُقرَّب إلى ملء الأسطوانة المتاح، مثل أسطوانة 106 kg).

س5 (كاشفان معطلان من أربعة): بقي كاشفان صالحان، فالتصويت 2oo2. فقاعدة «2oo(N−1)» تعني أن يبقى التأكيد باثنين من الكاشفات الصالحة: 2oo3 بعد العطل الأول، ثم 2oo2 بعد العطل الثاني، ثم 1oo1 مع إنذار متدهور عند بقاء كاشف واحد؛ الخطر أن أي عطل ثالث يجعله 1oo1 فيصبح الإنذار الكاذب إيقافًا، وأن 2oo2 يُبطئ الكشف إن كان الكاشفان الباقيان في جانب واحد من المنطقة. الإجراء: إصلاح خلال المدة المحددة، ومراقبة يدوية مؤقتة.

س7 (تهوية الحاوية): الغاز يحتاج تشتيتًا فتُبقى التهوية لخفض التركيز تحت LEL ومنع التراكم؛ الحريق يحتاج حجب الأكسجين وإبقاء وسيط الإطفاء داخل الحاوية فتُغلق التهوية قبل الإطلاق. عند التزامن يحكم الحريق (إغلاق التهوية بعد إطلاق الوسيط) لأن الحريق القائم أخطر من الغاز غير المشتعل، ويُنص على الأولوية في المصفوفة.

س9 (هرم ESD): التخلي عن المنشأة (APS)، إيقاف المنشأة (ESD-1)، إيقاف الوحدة (ESD-2/USD)، إيقاف العملية (PSD)، إيقاف المعدة. الإيقاف والعزل والتفريغ (ESDV/BDV) وإيقاف الآلات) ينفذها SIS بطلب من F&G أو حماياته؛ والإطفاء والإغراق والتهوية وPAGA وفصل الأحمال غير Ex ينفذها F&G مباشرة.

الفصل 32

س1 (120 سنًا، 3600 rpm): $f = 120 \times 3600/60 = 7200$ Hz؛ عند 110% = **7920 Hz**. البطاقة يجب أن تقبل نحو 10 kHz.

س4 (1480 rpm، 6 mm/s rms): $f = 24.67$ Hz. الإزاحة

$$x = v/(2\pi f) = 6/(155) = 0.0387 \text{ mm rms} = 38.7$$

μm rms → قمة إلى قمة = $38.7 \times 2\sqrt{2} \approx$ **109 μm p-p**. التسارع

$$a = 2\pi f \times v = 155 \times 0.006 = 0.93 \text{ m/s}^2$$

≈ **0.095 g**. عند هذا التردد المنخفض تكون الإزاحة كبيرة والتسارع صغيرًا، ولذلك تُفضَّل السرعة للتقييم.

س10 (مروحة 200 kW، أساس صلب، 5.2 mm/s rms): بتطبيق حدود المجموعة 2 (15 إلى 300 kW) في ISO 20816-3، وحدود الأساس الصلب: A/B = 1.4، B/C = 2.8، C/D = 4.5 mm/s. القراءة 5.2 > 4.5 → **المنطقة D: غير مقبولة**، يُوقف التشغيل المستمر ويُشخّص السبب (الفصل 33) قبل استمرار الخدمة. لو كانت المروحة 400 kW (المجموعة 1) لكان حد C/D 7.1 mm/s والقراءة في المنطقة C (مقبولة لفترة محدودة). وتنبيه: المضخات الدوارة لها معيارها الخاص (ISO 10816-7) بحدود مختلفة، فلا تُطبق عليها حدود هذا المثال.

الفصل 33

س1 (2980 rpm وفصل 2X عن 100 Hz): 1X = 49.67 Hz، 2X = 99.33 Hz، والفرق عن 100 Hz = 0.67 Hz. ليقع بينهما خطان على الأقل يلزم $\Delta f \le 0.22$ Hz؛ مثلًا Fmax = 200 Hz مع 1600 خط ($\Delta f = 0.125$ Hz)، وزمن كل متوسط = $1/\Delta f = 8$ s. بميز أخشن ($\Delta f = 1.25$ Hz) يندمجان في قمة واحدة فيُنسب مكوّن كهرومغناطيسي إلى عدم محاذاة.

س4 (12 كرة، d/D = 0.25، 1500 rpm):

$$f = 25\ \text{Hz}.\ \text{BPFO} = (N/2) \times f \times (1 - d/D) = 6 \times 25 \times 0.75$$

= **112.5 Hz**؛ BPFI = 6 × 25 × 1.25 = **187.5 Hz**؛ FTF = 0.5 × 25 × 0.75 = **9.4 Hz**. (BPFO + BPFI = N × f = 300 Hz: تحقق سريع.)

س7 (Bode: قمة 3600 rpm، نقطتا 0.707 عند 3400 و3850): AF = 3600/(3850 − 3400) = **8.0**. تخميد متوسط؛ وفق API 617 يلزم هامش فصل أكبر عن سرعة التشغيل كلما ارتفع AF.

س8 (اتزان: O = 60 µm ∠ 30°، مع 15 g عند 0° صار 45 µm ∠ 90°): المتجهات (الزوايا بالاتجاه نفسه الذي تُقاس به الكتلة التجريبية): O = (52.0، 30.0)؛ T = (−52.0، 15.0)؛ O + T = (0، 45)؛ فأثر الكتلة التجريبية أي **54.1 µm ∠ 164°**. الكتلة التصحيحية = الكتلة التجريبية × |O|/|T| = 15 × 60/54.1 = **16.6 g**، وزاويتها = زاوية(O) − زاوية164 − (30 + 180) = **+46°** من مرجع الكتلة التجريبية (في اتجاه الدوران نفسه المستخدم للقياس)، **بعد إزالة الكتلة التجريبية**. لو أُبقيت الكتلة التجريبية لوجب حساب التصحيح على المتجه (O + T) بدل O.

س9 (200 kg، 6000 rpm، G2.5):

ω = 6000 × 2π/60 = 628 rad/s؛

الانحراف المسموح

$$e = G/\omega = 2.5/628 = 0.00398\ \text{mm}$$

= **4.0 µm**؛ عدم الاتزان المتبقي

$$U = m \times e = 200{,}000\ \text{g} \times 0.00398\ \text{mm}$$

= **796 g·mm**؛ على نصف قطر 150 mm يقابل **5.3 g**. المعنى: خمسة غرامات على دوّار كتلته 200 kg تكفي لتجاوز الدرجة عند السرعات العالية.

الفصل 34

س2 (60 سنًا، 95% من 3000 rpm): 2850 rpm → **2850 Hz** (بالعجلة ذات 60 سنًا التردد بالهرتز = السرعة بالدورة في الدقيقة).

س5 (60 MW، انحدار 4%، مرجع 103%، 50 Hz): الحمل = 60 × (103 − 100)/4 = **45 MW**. عند 50.1 Hz تصبح السرعة 100.2% فالحمل = 60 × (103 − 100.2)/4 = **42 MW**: ارتفاع تردد الشبكة يخفض حمل الوحدة تلقائيًا، وهذا هو دور الانحدار في استقرار الشبكة.

س7 (عشر مزدوجات): الأعلى 565 والأدنى 530 يُستبعدان؛ مجموع الثماني الباقية = 4484 → TTXM = 560.5 °C. S1 = 565 − 530 = **35**، S2 = 565 − 557 = **8** (ثاني أدنى). S3 = 565 − 558 = **7 °C**. S1 كبير من مزدوجة واحدة منخفضة، وS2 وS3 صغيران: النمط يشير إلى مزدوجة معطوبة (أو شعلة واحدة) لا إلى مشكلة احتراق عامة.

الفصل 35

س4 (Ps 30 bara، ΔPo 250 mbar، خط الانفصال الهوائي 0.0070 (Surge)):

ΔPo/Ps = 0.25/30 = 0.00833؛

$$S = \sqrt{(0.00833/0.0070)} = \sqrt{1.19}$$

= **1.09**. أقل من خط التحكم 1.10 → **يبدأ الصمام بالفتح** قليلًا (المتحكم PI يفتح بقدر الفرق). الضاغط لم يصل إلى الانفصال الهوائي (Surge) إذ S > 1 لكنه دخل هامش التحكم.

س8، (Ps 15 bara/10 m³/s) Pd 60 bara/5 m³/s: ضغط الاستقرار

$$\approx (15 \times 10 + 60 \times 5)/15 = 450/15$$

= **30 bara**. مرسل ضغط السحب بمدى 0–25 bar لا يكفي (يُشبع ويخفي الحالة)؛ يُختار 0–40 bar أو أكثر، وتُصمم أنابيب السحب لتحمل 30 bara على الأقل.

الفصل 36

س4 (6% O_2 عند الحمل الكامل): الهواء الزائد ≈ 6/14.9 ≈ $O_2/(20.9 - O_2)$ ≈ **40%**، وهو مرتفع لمرجل غاز (المعتاد 10 إلى 20%). قبل خفض الهدف: يُشك في **تسرب هواء** إلى الفرن أو المجاري قبل المحلل (Tramp Air)، وفي معايرة المحلل وموقع مأخذه؛ فخفض الهواء بناءً على قراءة مضللة قد يعطي احتراقًا ناقصًا وCO مرتفعًا.

س8 (فرن 1200 m^3 وهواء 80 m^3/s، تطهير 30%): تدفق التطهير 24 m^3/s؛ خمسة تغيرات = 6000 m^3 → 4.2 min ≈ 250 s؛ لكن القاعدة «5 دقائق **أو** 5 تغيرات أيهما أطول» → **5 دقائق**.

الفصل 37

س2 (60 Hz، قطبان، 60 سنًا): السرعة المقننة 3600 rpm → **3600 Hz**.

س4 (300 MW، انحدار 4%، +0.15 Hz): 0.15/50 = 0.3% من السرعة → تغير الحمل = 300 × 0.3/4 = **22.5− MW** (ينخفض الحمل لأن التردد ارتفع).

س9 (مستوى الدرم عند 60 bar): ضغط العمود المرجعي (ماء بارد كثافته 992 kg/m^3 وارتفاعه 0.8 m):

$$992 \times 9.81 \times 0.8 = 7785 \text{ Pa}$$

وضغط جانب الدرم (ماء مشبع 757 kg/m^3 فوقه بخار 30 kg/m^3، كل منهما 0.4 m):

$$757 \times 9.81 \times 0.4 + 30 \times 9.81 \times 0.4 = 2970 + 118 = 3088 \text{ Pa}$$

فيكون فرق الضغط المقاس:

$$\Delta P = 7785 - 3088 = 4697 \text{ Pa}$$

والمستوى إن حُسب بكثافة الماء البارد دون تعويض:

$$(7785 - 4697) \,/\, (992 \times 9.81) = \mathbf{0.317\ m}$$

معنى النتيجة: المستوى الحقيقي 0.40 m، فالقراءة أدنى بنحو 8 cm (وعند 100 bar كانت أدنى بـ 10 cm)؛ والخطأ يكبر مع الضغط لأن كثافة الماء تنخفض وكثافة البخار ترتفع.

الفصل 39

السؤال 3. أصغر k يحقق $2^k \geq 32$ هو 5، فخمسة قياسات تكفي في أسوأ حالة. ولا يُختار المنتصف العددي دائمًا لأن كلفة القياس تختلف من نقطة إلى أخرى (غرفة الأجهزة أسهل من برج)، ولأن احتمال العطل ليس موزعًا بالتساوي (الأطراف في الميدان أرجح من الكابل المدفون). فتُختار النقطة التي تقسم الاحتمال مناصفة بأقل كلفة.

السؤال 4. أقصى مقاومة = 0.022 ÷ (12 − 24) = 545 أوم تقريبًا. وأي عنصر يرفع مقاومة الحلقة فوقها، من مؤشر أو حاجز أو كابل أطول، يمنع المرسل من بلوغ 22 mA، فيضيع إشعار العطل العلوي أو جزء من المدى.

السؤال 5. وضع «المحاكاة» يُستعمل حين تكون في الحلقة تغذية أخرى، كبطاقة فعالة، فيتصرف المعاير كمرسل ثنائي السلك ينظم التيار ولا يولّد جهدًا. ووضع «المصدر» يُستعمل مع مدخل سلبي لا تغذية فيه، فيولّد المعاير التيار من بطاريته. وعكسهما خطأ: «المصدر» على بطاقة فعالة يضع مصدرين في حلقة واحدة، فتكون القراءة خاطئة وقد يُحمَّل أحدهما فوق طاقته. و«المحاكاة» على مدخل سلبي لا تعطي تيارًا أصلًا، لأنه لا مصدر في الحلقة.

السؤال 6. القيمة الأولية صحيحة، فجانب الحساس سليم. والتيار المقيس بالملقط عند المرسل يختلف عن التيار المعلن، فالعطل في مرحلة الخرج، أو في تسرب داخل غلاف المرسل (رطوبة بين الطرفين). الإجراء: افحص الأطراف والرطوبة داخل الغلاف أولًا، ثم نفّذ معايرة الخرج (D/A Trim) بمقياس مرجعي. فإن لم يستقر الخرج، فبدّل وحدة الإلكترونيات.

السؤال 9 (نموذج إجابة). لماذا تأخر الإغلاق؟ لأن ضغط المشغل انخفض ببطء (الدليل: اتجاه ضغط المشغل من الموضّع الذكي أو من مسجل مؤقت). لماذا انخفض ببطء؟ لأن التنفيس يمر عبر الموضّع ومنفذه صغير (الدليل: مخطط مسار الهواء، واختبار الشوط مع قياس الزمن). لماذا لا يوجد صمام تنفيس سريع؟ لأن ورقة المواصفات لم تحدد زمن إغلاق للصمام في خدمة الإيقاف (الدليل: ورقة المواصفات). لماذا لم يُحدد؟ لأن قائمة مراجعة أوراق المواصفات لا تتضمن بند «زمن الشوط المطلوب في الإيقاف» (الدليل: القائمة المعتمدة). السبب الجذري: ثغرة في قائمة المراجعة. والإجراءات: صمام تنفيس سريع وقياس زمن الشوط (مباشر)، ومراجعة الصمامات المماثلة (احتواء)، وإضافة البند إلى القائمة (جذري).

الفصل 41

س1 (فرن باضطرابين): تغير ضغط غاز الوقود يغير تدفق الوقود عند الفتحة نفسها، فيراه متحكم تدفق الوقود الداخلي ويصححه قبل أن تتأثر الحرارة، فهو من اختصاص **التعاقبي**. أما تغير تدفق الشحنة فلا يراه متحكم تدفق الوقود، لأنه لا يغير الوقود بل الحاجة إليه، فيحتاج **تغذية أمامية** من قياس تدفق الشحنة، أو يبقى على المتحكم الرئيسي وحده.

س2 (داخلية 4 s وخارجية 15 s): النسبة 15 ÷ 4 = **3.75**، أي قرب الحد الأدنى للقاعدة (3 إلى 5 مرات). فقد تعمل البنية، لكن يُتوقع تفاعل وتذبذب عند الاضطرابات الكبيرة. ويُقترح أن تُسرّع الداخلية (ضبط أشد بعد التحقق من الصمام وموضّعه) إلى نحو 3 s، أو تُبطأ الخارجية إلى 20 s فأكثر، لتصير النسبة 5 أو أكثر.

س3 (تسخين 8 kg/s من 25 إلى 75 °C): الحمل = 50 × 4.18 × 8 = **1672 kW**؛ تدفق البخار = 2100 ÷ 1672 = **0.796 kg/s** (نحو 2.87 t/h؛ كسب التغذية الأمامية = 2100 ÷ 50 × 4.18 = **0.0995** kg بخار لكل kg ماء؛ الزيادة لـ 1.5 kg/s = 1.5 × 0.0995 = **0.149 kg/s** (نحو 0.54 t/h).

س4 (التعويض الديناميكي): زمن التقديم = الثابت الزمني لمسار الصمام = **40 s**؛ زمن التأخير = الثابت الزمني لمسار الاضطراب = **20 s**؛ التأخير الزمني = 6 − 10 = **4 s**، وهو ممكن لأن زمن الاضطراب الميت أطول من زمن الصمام.

س5 (النسبة بالنسبة المئوية): R بالنسبة المئوية = (20 ÷ 400) × 0.03 = **0.6**. التحقق: 300 m³/h = 75% → 75 × 0.6 = 45% من

$$20\ \mathrm{m^3/h} = 9\ \mathrm{m^3/h} = 0.03 \times 300.$$

✔

س6 (الضرب أفضل من القسمة): (1) كسب حلقة التدفق ثابت في الضرب، أما في القسمة فيتغير عكسيًا مع التدفق الحر فتتذبذب الحلقة عند الأحمال المنخفضة؛ (2) القسمة على تدفق قريب من الصفر غير معرّفة وتضخم الضجيج عند البدء والإيقاف.

س7 (التقييد المتقاطع المزدوج): بالإشارات بعد تحويلها إلى مقياس واحد: نقطة ضبط الوقود = min(الطلب، الهواء المقاس)؛ نقطة ضبط الهواء = max(الطلب، الوقود المقاس). عند زيادة الحمل يرتفع الهواء أولًا، ولا يرتفع الوقود إلا بقدر ما وصل من الهواء. وعند نقصه ينخفض الوقود أولًا، ولا ينخفض الهواء إلا بقدر ما نقص الوقود. فلا يسبق الوقود الهواء في الاتجاهين.

س8 (صمامان Cv 20 وCv 80): نقطة التقسيم عند **20%** من الخرج: الصغير على 0–20% والكبير على 20–100%، فيكون لكل 1% من الخرج Cv واحد في المدى كله. عند 60%: الصغير مفتوح بالكامل (20)، والكبير 50% = 80 ÷ (20 − 60) أي 40، فالمجموع **Cv 60**.

س9 (متحكم حد مشبع): خرجه 100% لأن متغيره بعيد عن حده وتكامله يتراكم دون أن يرى أثرًا، فإذا اقترب المتغير من الحد احتاج التكامل زمنًا لينزل من 100% إلى ما تحت الخرج المختار، وفي هذا الزمن يُتجاوز الحد. والتغذية الراجعة الخارجية تبني تكامل كل متحكم على الخرج المختار، فيبقى خرج غير المسيطر أعلى منه بمقدار فعله التناسبي فقط. **الاختبار:** في وضع المحاكاة أو اختبار مصرح به بإدارة التغيير، يُقرّب

المتغير من حده (أو تُخفض نقطة ضبط الحد مؤقتًا)، ويُسجل زمن استلام السيطرة والتجاوز، ويُتحقق قبل ذلك أن خرج المتحكم غير المسيطر قريب من الخرج الفعلي لا عند 100%.

س10 (خلاط 90 و30 °C، 120 m³/h، 45 °C): من الموازنتين: F1 + F2 = 120، و

90 F1 + 30 F2 = 45 × 120 = 5400،

فـ F1 = **30** و∂T/∂F2 = **90 m³/h**.

F1 = (90 − 45) ÷ 120 = 0.375،

و∂T/∂

$$\mathrm{F2} = (30 - 45) \div 120 = -0.125.$$

للأزواج (التدفق مع الحار، والحرارة مع البارد):

$$\lambda 11 = 1 \div (1 - 0.375 \div (-0.125)) = 1 \div 4$$

= **0.25**، وهو ضعيف. فالأزواج الأفضل المعاكسة (λ = **0.75**): التدفق الكلي بالماء البارد (التيار الأكبر)، والحرارة بالماء الحار (التيار الأصغر)، وهذا يوافق القاعدة.

الفصل 42

س8 (8 من 10 أعطال و120 تنبيهًا كاذبًا): الحساسية = 8/10 = **80%**؛ الدقة = 8/(8 + 120) = **6.3%**: من كل 16 تنبيهًا واحد صحيح. المقترح: إضافة سياق الحمل وحالة التشغيل، وتصفية التنبيهات المتكررة من السبب نفسه، ومراجعة أسباب الـ120 وتصنيفها قبل تضييق العتبة؛ فالهدف رفع الدقة دون خسارة الحساسية.

الفصل 43

س2 (250 Ω و22 mA): $P = I^2R = 0.022^2 \times 250 = \mathbf{0.121\ W}$. تُختار مقاومة **0.5 W** (هامش أربعة أضعاف؛ 0.25 W تعمل لكن بهامش ضعفين فقط وحرارة سطح عالية في خزانة مغلقة).

س3 (470 µF و325 V و47 kΩ): الطاقة $= \tfrac{1}{2} \times 325^2 \times 470 \times 10^{-6} = \mathbf{24.8\ J}$؛

$\tau = 47{,}000 \times 470 \times 10^{-6} = 22.1\ s$؛

للهبوط إلى 5 V:

$$t = \tau \times \ln(325/5) = 22.1 \times 4.17$$

$\approx$ **92 s** (نحو دقيقة ونصف). المعنى: «انتظر خمس دقائق» على الملصق ليست مبالغة.

س7 (ملف 24 V/800 Ω، β = 40، قيادة 24 V): تيار الملف $= 30$ mA؛ أدنى تيار قاعدة $= 30/40 = 0.75$ mA؛ بمعامل تشبع 2.5 $\rightarrow$ 1.9 mA؛ $R_B = (24 - 0.7)/0.0019 \approx$ **12 kΩ** (قيمة قياسية؛ 10 kΩ تعطي معامل 3.1 وهو مقبول أيضًا). مع ديود حماية على الملف.

الفصل 44

س2 (24 خط عنوان): $2^{24} = 16{,}777{,}216$ موقعًا $=$ **16 MB**؛ بمفكك 3 إلى 8 على الخطوط العليا: 8 مناطق $\times$ **2 MB**.

س3 (B = E0H): A = 12H $\rightarrow$ 32H + E0H = 112H والحمل **CY = 1** (تجاوز 8 بتات). الناتج غير صفري فـ Z = 0.

س4 (8051 عند 12 MHz، 20 ms): معدل العد 1 MHz $\rightarrow$ 20,000 نبضة؛ قيمة البدء

$$= 65{,}536 - 20{,}000 = 45{,}536$$

= **B1E0H** ← TH1 = B1H و TL1 = E0H.

س6 (0–200 °C، 4–20 mA، 250 Ω، 10 بت 0–5 V): 1 V ← 4 mA ← شيفرة 1023 ≈ 205 ×؛ 1/5 20 mA ← 1023؛ المستويات المستخدمة 818؛ التمييز = 200/818 = **0.244 °C**. الشيفرة 614 ← 0.2444 × (614 − 204.6) = **100.0 °C**.

س7 (45 Hz بمعدل 50 عينة/ثانية): فوق تردد نايكويست (25 Hz) فيظهر مستعارًا عند |50 − 45| = **5 Hz**. المنع: مرشح تمرير منخفض قبل أخذ العينات (Anti-Aliasing) ورفع معدل أخذ العينات إلى 100 Hz فأكثر (عمليًا 5 إلى 10 أمثال أعلى تردد مهم).

الملحق ب: قائمة المراجع الموحدة

تحيل رموز R في متن الكتاب إلى هذه القائمة، ويدل الرمز الواحد على مصدر واحد في الكتاب كله. تُفصل هنا **مصادر المعلومات** (كتب ومواصفات ووثائق تدريبية) عن **وثائق التأليف** (مسودة المؤلف السابقة وخبرته الميدانية) التي تساعد على التتبع ولا توفر للقارئ توثيقًا مستقلًا. وما نقص من بيانات نشر مرجع ما يعود إلى أن النسخة المتاحة منه وثيقة تدريبية أو مسح ضوئي لا تحمل صفحة نشر كاملة؛ وقد ذُكر منها ما أمكن التحقق منه. ويبين عمود «النوع» درجة قابلية التتبع: «مصدر منشور» كتاب أو مواصفة أو دليل يمكن للقارئ الرجوع إليه، و«مصدر إلكتروني منشور» مقالة أو دليل على الشبكة، و«وثيقة مصنّع» أو «وثيقة شركة» أو «وثيقة مشروع» مستند صادر عن جهة محددة، و«وثيقة تدريبية غير منشورة» مادة من أرشيف المؤلف تُستعمل للفهم لا للاستشهاد، وتُسند الأحكام الفنية المأخوذة منها في المتن إلى مواصفة أو مصدر منشور حيثما أمكن.

صنفا القائمة وعلامتاهما: المراجع في الجدول الآتي صنفان يميزهما رمز في أول خلية «النوع». الصنف الأول (●) مصادر يستطيع القارئ الرجوع إليها والتحقق منها: كتب ومقالات منشورة، ومواصفات ومعايير، ووثائق صادرة عن جهة محددة (مصنّع أو شركة أو مشروع) تحمل اسم الجهة ورقم الوثيقة أو تاريخها، ومواد المؤلف المنشورة أو المستندة إلى مصادر منشورة مسماة. والصنف الثاني (◇) وثائق من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر كاملة (عروض تدريبية، وملازم، ومحاضرات، ومسوح ضوئية بلا صفحة نشر)، ووثائق التأليف نفسها (مسودة المؤلف، وسيرته، ومخطوطاته ومذكراته غير المنشورة، والوثائق الداخلية المجهّلة)؛ وهذا الصنف يُذكر للأمانة في تتبع منشأ المادة وطريقة تكوّنها، ولا يصلح للاستشهاد (Citation) في عمل هندسي أو بحثي، وكل حكم فني أُخذ منه موثق في المتن بالمواصفة أو بالمصدر المنشور الذي يُتحقق منه، ويجمعها جدول «خريطة المواصفات بحسب الموضوع» في آخر هذا الملحق.

R1 — المسودة الموحدة الإصدار 0.1 (iC 1). *النوع:* ◇ مسودة تأليف (وثيقة تتبع للمؤلف، ليست مصدرًا مستقلًا). *ما استُفيد منه:* نصوص الفصول 1–35 السابقة. *الفصول:* 1، 2، 4، 6، 14، 15، 18–21.

R2 — MAPNA Group / Moshanir Power Engineering Consultants، تعليمات اختبار وتشغيل الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم لمحطة دورة مركبة (وثيقة مشروع، إيران) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة مشروع غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* مراحل ومعالم التشغيل، الفحص بعد التركيب، اختبار خطوط النبض، فحص الحلقات، إجراءات المعايرة، معدات الورشة، نماذج الاختبار، توزيع المسؤوليات. *الفصول:* 15، 40.

R3 — مقالة «Instrumentation and Control (I&C) Design Basis» (مقالة إلكترونية تعريفية بلا مؤلف مذكور) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* هيكل وثيقة أساس التصميم وفلسفاتها. *الفصول:* 26، 27.

R4 — عرض تدريبي في إدارة مشاريع الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم مبني على: Nicholas, J. M. & Steyn, H., Project Management for Engineering, Business and Technology, 5th ed., Routledge, 2017. *النوع:* ● وثيقة تدريبية مبنية على مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* الوثائق، ووثيقة المعايير، والموردون المفضلون، ودورة الحياة، وWBS، وهرمية الجداول. *الفصول:* مرجع عام.

R5 — عرض تدريبي «Industrial Control Systems» (أنواع أنظمة التحكم الصناعية) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* مكونات ICS ومناطق التشغيل وPLC وSCADA وDCS. *الفصول:* 1، 19، 21، 24.

R6 — Reif, K. (ed.), Bosch Automotive Mechatronics, Springer Vieweg, 2015. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* الحساسات والمشغلات ووحدات التحكم والشبكات (CAN وLIN وFlexRay). *الفصول:* 12، 32، 33.

R7 — عرض تدريبي «Control Systems» (أساسيات أنظمة التحكم) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* تاريخ هندسة التحكم والتعاريف. *الفصول:* 44.

R8 — Nevase، Control System and PLC (محاضرات تدريبية) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* تصنيف أنظمة التحكم، والاستجابة الزمنية، وRouth، وPLC وLadder. *الفصول:* 19.

R9 — دليل مختبر أنظمة التحكم (تجارب MATLAB/Simulink، دليل جامعي) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* تجارب النمذجة، والرتبة الأولى والثانية، وضبط PID، والتحكم بالسرعة والموضع. *الفصول:* 18.

R10 — الظفري، الشامل في هندسة الميكاترونكس، 2025 (كتاب عربي منشور إلكترونيًا؛ الناشر غير مذكور في النسخة المتاحة). *النوع:* ● مصدر منشور (بيانات النشر ناقصة). *ما استُفيد منه:* تعريف الميكاترونكس ومكوناتها وتطبيقاتها بالعربية. *الفصول:* 1.

R12 — Manesis, S. & Nikolakopoulos, G., Introduction to Industrial Automation, CRC Press, 2018. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* المرحلات، والحساسات المنفصلة، ودوائر الأتمتة، والتصميم المنطقي، والكهروهوائيات، وPLC، وPID. *الفصول:* 18، 19، 23.

R13 — Shardt, Y. A. W., Automation Engineering (ملزمة جامعية في هندسة الأتمتة؛ النسخة المتاحة بلا صفحة نشر، فتُعامل وثيقة تدريبية لا مصدرًا منشورًا، وهي

غير كتاب المؤلف المنشور (Statistics for Chemical and Process Engineers)). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* هرم الأتمتة، والنمذجة، والمخططات، والجبر البولياني، وبرمجة PLC، والسلامة. *الفصول:* 17–19، 21، 23.

R14 — «Introduction to C&I Engineering» (برنامج تدريب المهندسين الجدد في شركة تشغيل) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* دور مهندس C&I وسير الأعمال الهندسية. *الفصول:* 1، 27.

R15 — Anixter Inc., Control and Instrumentation Cables Catalogue (كابلات وفق BS 5308 / EN 50288، كتالوج المصنّع. *النوع:* ● وثيقة مصنّع. *ما استُفيد منه:* بنية الكابلات، وBS 5308، وأكواد الألوان، والخصائص الكهربائية. *الفصول:* 23، 26.

R16 — PAControl.com, Process Control Fundamentals (دليل تعليمي إلكتروني، نحو 2006). *النوع:* ● مصدر إلكتروني منشور. *ما استُفيد منه:* أساسيات التحكم بالعمليات، ومكونات الحلقة، ورموز ISA، وأنماط PID. *الفصول:* 2، 15، 18، 27، 41.

R17 — دورة «Instrumentation and Process Control» (مادة تدريبية، الإصدار rev3) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* P&ID، والضغط، والحرارة، والتدفق، والمستوى، والصمامات، والأنظمة. *الفصول:* 2، 15، 27.

R18 — السيرة المهنية للمؤلف. *النوع:* ◇ خبرة المؤلف الميدانية (حالات مُخفاة البيانات). *ما استُفيد منه:* الحالات الميدانية ومحاور الخبرة: التوربينات، والمنصات البحرية، والترقيات، والتدقيق، والقيادة. *الفصول:* 1، 2، 13، 17–22، 25، 27، 30–33، 35، 39–41.

R19 — Lipták, B. G. (ed.), Instrument Engineers' Handbook, Vol. 1: Process Measurement and Analysis, 3rd ed., Chilton/CRC, 1995. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* موسوعة القياس: الرموز والأداء، والتدفق، والمستوى، والحرارة، والضغط، والكثافة، وحساسات السلامة والوزن، والمحللات. *الفصول:* 8، 25، 30، 32، 33، 35.

R20 — Branan, C., Rules of Thumb for Chemical Engineers / The Process Engineer's Pocket Handbook, Gulf Publishing. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* قواعد الإبهام في جريان الموائع، والمضخات، والضواغط، والفراغ، والمبادلات، والتقطير، والفواصل، والمرافق. *الفصول:* 2.

R21 — Maher، DCS & ESD Seminar (Siemens PCS7)، الجزء الأول، بالفارسية (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* الفرق الوظيفي بين DCS وESD، ومعمارية PCS7، والتكرار، والإدخال والإخراج الموزع. *الفصول:* 21.

R22 — GE، عرض تعريفي لنظام التحكم الموزع OC4000 لمحطات الطاقة (وثيقة مورد؛ استُخدمت للمفاهيم العامة فقط). *النوع:* ● وثيقة مصنّع. *ما استُفيد منه:* معمارية نموذجية لوحدة توليد؛ تُستخدم للمفاهيم العامة فقط دون تفاصيل خاصة بالمورد. *الفصول:* 21.

R23 — El Ahrache، DCS Fundamentals، 2020 (محاضرات تدريبية) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* عناصر وحدة التحكم، ووحدات الإدخال والإخراج، وModbus، ولغات IEC 61131-3، وصيانة DCS. *الفصول:* 19، 21، 23.

R24 — SCADA Training Manual (بيئة Vijeo Citect مع Unity Pro؛ دليل تدريبي مبني على وثائق Schneider Electric) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛

تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* رحلة الإشارة، وإدارة المشاريع، والاتصالات، والرسومات والقوالب، والأوامر، والإنذارات، والاتجاهات. *الفصول:* 24.

R25 — Concept and Architecture of SCADA Systems (عرض تعليمي) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* المصطلحات، والتاريخ، وعناصر SCADA ومستوياتها، وRTU مقابل PLC وDCS، والتطبيقات. *الفصول:* 24.

R27 — HART Communication Foundation, HART Application Guide (HCF_LIT-39), 1999؛ ومذكرة استخدام جهاز اتصال HART (Emerson 475 Field Communicator، دليل المستخدم). *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* بروتوكول HART، والأوامر، والتهيئة، والمعايرة بالمتصل اليدوي. *الفصول:* 23.

R29 — GE Power Systems, Gas Turbine Controls Fundamentals (Speedtronic Mark V)، دليل دورة تدريبية (ممسوح، 639 صفحة؛ الصفحات 19–53 للتحكم والحماية). *النوع:* ● وثيقة تدريبية من مصنّع. *ما استُفيد منه:* حلقات البدء والسرعة والحرارة والتسارع، وبوابة القيمة الصغرى، ونظام الوقود، وIGV، والحمايات ومراقبة الاحتراق. *الفصول:* 36.

R30 — Steam Turbine Control والكامل (عرض تدريبي: DEHC وOPC وIPR والقوس الجزئي) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* أنواع التوربينات البخارية، وحاكم DEHC، والبدء ونقل الصمامات، والقوس الجزئي والكامل، وOPC وEOST وMOST وIPR. *الفصول:* 36.

R31 — الدوائر المنطقية والمعالجات الدقيقة (حقيبة تدريبية، المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني أو ما يماثلها؛ الجهة غير مذكورة في النسخة) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية

غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* البوابات والجبر البولياني وخرائط كارنو والدوائر التوافقية والتتابعية. *الفصول:* 17.

R32 — وزارة التربية والتعليم المصرية، دوائر رقمية ومنطقية (كتاب التعليم الثانوي الصناعي). *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* أنظمة العد والبوابات والقلابات والعدادات. *الفصول:* 17.

R33 — Digital Electronics, Lecture 4: Combinational Circuits (محاضرة جامعية) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* الدوائر التوافقية والمفككات والمجمعات. *الفصول:* 17.

R34 — Floyd, T. L., Electronic Devices, 7th ed., Pearson Prentice Hall, 2005. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* أشباه الموصلات والديودات والترانزستورات ومكبرات العمليات والثايرستورات. *الفصول:* مرجع عام.

R36 — غازي القريوني، «إلكترونيات القدرة» (كتاب جامعي عربي؛ النسخة المتاحة مسح ضوئي بلا صفحة نشر). *النوع:* ● مصدر منشور (بيانات النشر ناقصة). *ما استُفيد منه:* الثايرستورات والترياك وIGBT ودوائر التوحيد المتحكم بها. *الفصول:* مرجع عام.

R39 — Qatar Petroleum, QP-GDL-S-040 HAZID Guideline (دليل شركة). *النوع:* ● وثيقة شركة. *ما استُفيد منه:* منهجية HAZID والأدوار والمخرجات. *الفصول:* مرجع عام.

R41 — Kaler, R. S., Microprocessors and Microcontrollers, 2nd ed., I.K. International Publishing House, New Delhi. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* 8085 و8086 والشرائح المحيطية و8051 وARM وPIC والأنظمة المدمجة. *الفصول:* مرجع عام.

R42 — كتاب المؤلف: «التوربينات الغازية» (مخطوطة، قيد النشر). *النوع:* ◇ كتاب المؤلف. *ما استُفيد منه:* مقدمة التوربين ودورة برايتون والمكونات والأنواع والأمن السيبراني (10.8). *الفصول:* 12، 24، 31–33، 42.

R43 — SANMAX، Boiler Control System (مقدمة تعريفية من مورد، 30 صفحة) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* حلقات المرجل الأساسية. *الفصول:* 36.

R44 — Gilman, G. F. (Jerry), Boiler Control Systems Engineering, 2nd ed., ISA, 2010. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* الدرم والاحتراق والسحب وحرارة البخار. *الفصول:* 36، 41.

R45 — «المقارِنات الكهربائية وLVDT» (صفحتان من مرجع قياسات هندسية بلا غلاف) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* المقارِنات الكهربائية وLVDT. *الفصول:* 12.

R46 — JTB-SF-I-SPE-900-00013, Specification for Fire and Gas System (مواصفة مشروع، 25 صفحة ممسوحة). *النوع:* ● وثيقة مشروع. *ما استُفيد منه:* مواصفة نظام F&G: حلّال المنطق وI/O والإنذارات والتثبيط والمخرجات والإغراق والاختبار. *الفصول:* 29، 30.

R47 — Control Engineering (CFE Media), Flow & Level Instrumentation eBook, 2014 (71 صفحة). *النوع:* ● مصدر إلكتروني منشور. *ما استُفيد منه:* تقنيات التدفق والمستوى. *الفصول:* مرجع عام.

R49 — Shinners, S. M., Modern Control System Theory and Design, 2nd ed., Wiley, 1998. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* نظرية التحكم الحديثة. *الفصول:* 41.

R50 — OISD-STD-152, Safety Instrumentation for Process Systems in Hydrocarbon Industry, Oil Industry Safety Directorate (India). *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* حمايات المعدات النموذجية، الممارسات الموصى بها، EEMUA 191. *الفصول:* 22، 25، 27، 31.

R51 — Field Instrumentation Training Manual, Module GEN-02 (دليل تدريبي لشركة تشغيل، 130 صفحة) (وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستخدم للفهم والتحقق لا للاستشهاد). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* pH/ORP والأقطاب المرجعية، أخطاء نظام المستوى التفاضلي، المرسلات الهوائية. *الفصول:* 3، 9، 10.

R54 — InstrumentationTools.com, «Level Transmitter and Level Gauge Design Tips» (مقالة إلكترونية). *النوع:* ● مصدر إلكتروني منشور. *ما استُفيد منه:* مخطط المستوى Level Sketch. *الفصول:* 9، 27.

R55 — مذكرة المؤلف: «صمام PSV وصمام Relief Valve: الأسماء والمبدأ والضغوط والأنواع» (2026؛ نص أعده المؤلف مستندًا إلى الأدلة الفنية المنشورة لشركات LESER و Spirax Sarco وViking Pump). *النوع:* ● مادة المؤلف (مستندة إلى أدلة مصنّعين منشورة). *ما استُفيد منه:* الأسماء الخمسة، توازن القوى، الفتح القفزي والتدريجي، مصطلحات الضغوط، أنواع التصميم الثلاثة، الضغط الخلفي؛ الرسم التدريبي (الشكل 16-7). *الفصول:* 16.

R56 — مذكرة المؤلف: «أنظمة كشف الحريق والغاز والإطفاء» (2026؛ نص أعده المؤلف مستندًا إلى إرشادات HSE البريطانية وأدلة MSA Safety وDet-Tronics وOSHA وUS EPA وINL). *النوع:* ● مادة المؤلف (مستندة إلى مصادر منشورة). *ما استُفيد منه:* كواشف الغاز (بما فيها PID)، الدخان، الحرارة، اللهب؛ وسائط الإطفاء والهالون؛ ترتيبات التوصيل؛ صيغ التصويت وجدول حقيقة 2oo3؛ مثال C&E لحاوية. *الفصول:* 30.

R57 — مذكرة المؤلف: «التحكم ثلاثي العناصر في مستوى درم البويلر» (2026؛ نص أعده المؤلف مستندًا إلى مواد Yokogawa وEurotherm وM-System وSpirax Sarco وEmerson وOptiControls المنشورة). *النوع:* ● مادة المؤلف (مستندة إلى مصادر منشورة). *ما استُفيد منه:* ثلاثة متغيرات لا ثلاثة حساسات، البنية التعاقبية مع التغذية الأمامية، المعادلة والتحجيم، المثال الرقمي، فتحة الصمام ليست تدفقًا، الانتقال السلس، الأخطاء. *الفصول:* 36، 41.

R58 — Alkhasawneh, H., *Introduction to the Gas Turbine (Operation and Control)*, عرض تدريبي، نقابة المهندسين الأردنيين، 2022. *النوع:* ● عرض المؤلف (مادة تدريبية وصور من أرشيفه). *ما استُفيد منه:* صور لوحات غرفة التحكم المحلية (الشكل 34-8)، أذونات وفحوص البدء، مؤقتات تسلسل بدء الوحدة ثنائية العمود (الشكل 34-12)، بنية الحاكم LSS/HSS (الشكل 34-14)، جداول VIGV/VSV/VBV ونظام IGV الهيدروليكي (الشكل 34-17)، منطق المرحّلات الاحتياطي والتصويت بالوسيط ومخرجات 2oo3 (الشكل 34-23)، أدوات البرمجيات، الاحتراق الانتشاري مقابل DLN. *الفصول:* 34.

R59 — Alkhasawneh, H. H. A., *Three Elements Drum Level Fuzzy Control*, رسالة ماجستير، قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية (إشراف: د. منتصر هادر، د. طارق الدرابسة). *النوع:* ● رسالة المؤلف. *ما استُفيد منه:* نموذج الدرم بموازنتي الكتلة والطاقة، الانتفاخ والانكماش، المتحكم الضبابي ثلاثي العناصر (الدخلان والخرج، دوال الانتماء، 25 قاعدة، مركز الثقل)، مقارنة PID/الضبابي في تتبع نقطة الضبط ورفض الاضطراب، حساب توفير الطاقة بالمضخة متغيرة السرعة (الشكل 36-8). *الفصول:* 36، 37، 41.

R60 — U.S. Department of Energy, *DOE Fundamentals Handbook: Instrumentation and Control*, DOE-HDBK-1013/1-92 و/2-92، 1992 (وثيقة حكومية في الملك العام). *النوع:* ● دليل تدريبي حكومي. *ما استُفيد منه:* مقارنة تغطية الكتاب بوحداته السبع (الحرارة، الضغط، المستوى، التدفق، الموضع، كواشف الإشعاع،

التحكم في العمليات)؛ أعطال كواشف الحرارة وأثر البيئة (الفصل 7)؛ أنبوب Dall وعناصر الضغط التفاضلي (الفصل 8)؛ مناطق الكاشف الغازي وكواشف الإشعاع والأجهزة النووية (9.6.1)؛ السنكرو والريزولفر ومقياس الجهد ومفتاح ريد (الفصل 12)؛ تأخيرات العملية: السعة والمقاومة وتأخر النقل (3.6.1). *الفصول:* 3، 7–9، 12.

R61 — مذكرة المؤلف: «قراءة وفهم مخطط P&ID» (2026؛ نص أعده المؤلف مع دليل رموز P&ID لمشروع صناعي من خمس صفحات كمثال تعليمي، دون إعادة إنتاج صفحاته). *النوع:* ◇ مادة المؤلف. *ما استُفيد منه:* الطريقة العشرية لقراءة P&ID: الوثائق، مفتاح الرموز، مسار المائع ثم الإشارة، الخطوط والحدود، الوسوم، أشكال الرموز وإمكانية الوصول، قراءة الصمام (NO/NC) مقابل (FO/FC/FL/LO/LC/NT، الحلقة الكاملة، ترقيم الخطوط، الصمامات الاتجاهية ورمز التعشيق؛ الشكل 5-5. *الفصول:* 5.

R62 — مذكرة المؤلف: «مخطط السبب والنتيجة (2026) «(C&E) مع وثيقة مصفوفة سبب ونتيجة لوحدة تحكم توربين غازي ثنائي العمود من أرشيف المؤلف (وثيقة مصنّع، 2013؛ استُخدمت بنيتها ومفاتيحها مجهّلة دون أوسام أو أسماء المشروع). *النوع:* ◇ مادة المؤلف + وثيقة مشروع مجهّلة. *ما استُفيد منه:* تعريف C&E والغرض والمصفوفة والمثال المبسط؛ بنية وثيقة C&E الفعلية: الاختصارات، التفسيرات (تغذية MCC، العامل/الاحتياطي، المرحّلات الاحتياطية، التثبيط، إحالات P&ID)، مفاتيح الأسباب (AHH/WH/BX/YF/BCH/Y/DEV/DER)، قائمة النتائج المرقمة، أوراق المصفوفة؛ الشكل 17-8. *الفصول:* 17.

R63 — عرض تدريبي: «قياس درجة الحرارة» (52 شريحة؛ وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستعمل مصدر خبرة، وأحكامها الفنية موثقة بـ ITS-90 وIEC 60584 وIEC 60751 وASTM E230 وSAMA RC 6-10). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* وحدات الطاقة الحرارية والحرارة النوعية، والمقاييس الحرارية ونقاطها الثابتة، وتصنيف الأنظمة المملوءة وبصيلاتها، وتركيب

المزدوجات النبيلة والمعدنية، وخطأ أسلاك التوصيل، والثرمومترات ثنائية المعدن والزجاجية، وأساس البيرومتري. *الفصول:* 4، 7، 11، 14.

R64 — *Instrumentation Principles* (مرجع هندسي لمنشآت إنتاج النفط والغاز، 2006؛ وثيقة من أرشيف المؤلف بلا ناشر مذكور؛ تُستعمل مصدر خبرة، وأحكامها الفنية الأساسية موثقة بـ API RP 14C وAPI Spec 6A وAPI Spec 14A وAPI RP 14B). *النوع:* ◇ وثيقة هندسية. *ما استُفيد منه:* منظومة إيقاف رأس البئر وصماماتها وطياراتها ولوحتها ومنظومتها الهيدروليكية، والحلقة الهوائية للإيقاف والوصلات القابلة للانصهار، ومنهج API RP 14C، والتحكم المحلي الهوائي والمديان 20–100 و40–200 kPa، وغاز الأجهزة، وتركيب أجهزة المستوى على جسر، ومواد خدمات الإنتاج. *الفصول:* 3، 9، 11، 15، 18، 25، 30، 31، 38.

R65 — عرض تدريبي: «منع حلقات الأرضي» في أنظمة حماية الآلات الدوارة (16 شريحة؛ وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ تُستعمل مصدر خبرة، وأحكامها الفنية موثقة بـ IEEE Std 1100 وIEC 61000-5-2 وIEC 60079-14 وAPI 670). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* التمييز بين الأرضي الوقائي وأرضي الأجهزة وأرضي الأمان الجوهري، وتولّد حلقة الأرضي، والنقطة النجمية مقابل التأريض التسلسلي، وقاعدة تأريض الحجب من طرف واحد وطرق توصيله عند الحساس. *الفصول:* 25، 26، 32.

R66 — معيار كفاءات وتقييم لوظيفة مهندس أجهزة وتحكم في شركة تشغيل (وثيقة داخلية مجهّلة من أرشيف المؤلف؛ استُخلصت بنيتها المهنية دون نقل أي اسم أو بند). *النوع:* ◇ وثيقة مؤسسية. *ما استُفيد منه:* تدرّج المسؤولية بالدرجة الوظيفية، ومقياس الإتقان الأربعي، وتصنيف مجالات الكفاءة السلوكية والمساندة والتقنية. *الفصول:* 1.

R67 — Lovell, D., *Troubleshooting Instrumentation & Control Systems*، عرض تدريبي، International Society of Automation (ISA) (39 شريحة؛ وثيقة من أرشيف المؤلف بلا تاريخ نشر؛ أحكامها الفنية موثقة بـ NAMUR NE43 وNE107

ومواصفات HART وISA-5.1). *النوع:* ● عرض تدريبي لجمعية مهنية. *ما استُفيد منه:* أهداف استكشاف الأعطال وكلفته، والإطار الخماسي (التحقق، وتحديد الموضع، والإصلاح، والتحقق من الإصلاح، والمتابعة)، وطرق تحديد الموضع، والوثائق وأدوات DCS في التشخيص، وأدوات الاختبار الهوائية والإلكترونية والرقمية، وخصائص حلقة التيار وجدول NE43، وأوامر HART، وNE107، وفحوص الحساسات والمتحكم والصمامات. *الفصول:* 39.

R68 — عرض تدريبي: «Diagnosing and Troubleshooting Instrumentation and Control Devices»، المستوى 3 (42 شريحة؛ وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ أحكامها الفنية موثقة بـ IEC 60079-17 وIEC 60364-6). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* خطوات التشخيص من الوحدة إلى الدائرة إلى المكوّن، ودائرة القدرة ثم التحكم، والاختبار الميت والحي، ودرجات الفحص، واختبارات العزل والاستمرارية، ومصادر العطل، وأعطال المحركات وأسبابها، وأسباب حفظ السجلات. *الفصول:* 39.

R69 — مذكرات المؤلف المجمعة من مصادر منشورة على الشبكة (2026): أدلة استكشاف أعطال أجهزة القياس وPLC وDCS وصمامات التحكم، والنموذج السباعي لاستكشاف الأعطال، وطريقة «لماذا» الخمس (MasterClass)، ومواقع تعليمية منها (instrumentcontrolsystem.com) و(automationforum.co)، والمنطق الآمن عند الفشل، ومقارنة PLC وDCS، والجدار الناري في أنظمة التحكم، والفرق بين كابل Ethernet النحاسي والألياف الضوئية. *النوع:* ● مادة المؤلف (مستندة إلى مصادر منشورة). *ما استُفيد منه:* النموذج السباعي، والمنهج الخماسي لأعطال PLC وجداول المداخل والمخارج وسجل التشخيص، وفئات أعطال DCS وطرق كشفها، وقائمة فحص الصمام في حلقة DCS، وخطوات «لماذا» الخمس؛ وجدول مقارنة PLC و(21.5) DCS، والجدار الناري (24.6.1)، والنحاس والألياف (23.8.1)، والمنطق الآمن عند الفشل (20.13). *الفصول:* 20، 21، 23، 24، 39.

R70 — مذكرة: «What is Troubleshooting in PLC and Process» (3 صفحات؛ وثيقة من أرشيف المؤلف بلا مؤلف مذكور). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* مشكلات PLC وأسبابها، وخطوات تشخيص PLC (المؤشرات، والأجهزة الميدانية، والاتصال المباشر بالمتحكم، والاتصالات، والبيئة)، وخطوات استكشاف أعطال العملية (النطاق، والمنبع والمصب، والأساسيات، وإعادة إنتاج السبب). *الفصول:* 39.

R71 — محاضرات جامعية: «Actuators» (113 صفحة؛ وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ أحكامها الفنية موثقة بكتب الميكاترونكس القياسية مثل Bolton, *Mechatronics*). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* تعريف المشغل وتصنيفه (كهروميكانيكي، وبقدرة الموائع، وبالمواد الفعالة)، ومعايير الاختيار، والملف اللولبي وقوته، والمرحّل ومزاياه وحدوده، ومحرك التيار المستمر ومعادلات العزم والقوة الدافعة العكسية ومبدأ المؤازر، والمحرك الخطوي وأنواعه ومواصفاته. *الفصول:* 15.

R72 — عرض تدريبي: «Actuators» (20 ،K. Varun شريحة؛ مراجعه: Bolton, *Mechatronics*، وDoddannavar & Barnard, *Practical Hydraulic Systems*، و Bishop, *The Mechatronics Handbook*). *النوع:* ● وثيقة تدريبية مبنية على مصادر منشورة. *ما استُفيد منه:* المشغلات الهيدروليكية وقانون باسكال وصمام التوجيه 4/3، والمشغلات الهوائية، ومكونات المحرك الكهربائي، والمشغلات الكهروضغطية وثنائية الطبقة، ومشغلات MEMS. *الفصول:* 15.

R73 — عرض تدريبي: «Valves» (141 شريحة؛ وثيقة من أرشيف المؤلف بلا بيانات نشر رسمية؛ أحكامها الفنية موثقة بمواصفات ASME B16.34 وAPI 600 و602 وD6 و 594 و609 و598 و607). *النوع:* ◇ وثيقة تدريبية غير منشورة (للفهم لا للاستشهاد). *ما استُفيد منه:* مشغلات الصمامات، والمواصفات القياسية، وكيفية تحديد الصمام، وتصنيف الصمامات بالحركة والحجم والفئة، وأجزاء الصمام ووصلات الغطاء وتصاميم

الساق والمقعد الخلفي، ومواد الجسم والتريم والحشوة والمطاطيات، وأنواع البوابي والكروي وعدم الرجوع وصمام الكرة ومزاياها وعيوبها. *الفصول:* 16.

R74 — GE Industrial Control Systems, *HMI Turbine Screen Standards* (الإصدار 1.0، 1998؛ 80 صفحة؛ وثيقة من أرشيف المؤلف من تدريب فعلي على نظام تحكم؛ استُعملت مبادئها دون نسخ شاشاتها). *النوع:* ● معيار شاشات لمورد. *ما استُفيد منه:* هرمية الملاحة بأربعة مستويات، والقيم الحرجة في كل شاشة، وشاشات الحالة القصوى، ومقاسات أزرار اللمس، وقواعد التسمية، وعناصر البيانات والتحكم والمحركات، والأعمدة البيانية والاتجاهات، وألوان حالات الإنذار. *الفصول:* 21، 22.

R75 — عرض تدريبي «Mark VI HMI Software» (GE Energy Services، 2001) مع وثيقة «HMI Configuration File Setup and Use» (من أرشيف المؤلف؛ تدريب فعلي على نظام تحكم). *النوع:* ● وثيقة تدريبية من مصنّع. *ما استُفيد منه:* بنية منظومة Mark VI وشبكاتها (IONet وUDH وPDH وEGD)، وملفات خادم HMI، وسلسلة تطابق قواعد البيانات، وتسلسل الأخذ والتحقق والبناء، وخطة العناوين، وطريقتا تعريف الإنذارات. *الفصول:* 8، 34.

R76 — Woodward, *GAP 3 Training* (دليل تدريبي، 2012 و2016، 281 صفحة) مع عرض «Introduction to GAP3» (2013) (من أرشيف المؤلف؛ للفهم فقط دون نقل، وفق شروط المصنّع). *النوع:* ● دليل تدريبي لمصنّع. *ما استُفيد منه:* لغة GAP ومفاهيمها: تسمية الكتل، والمداخل القابلة للضبط، والأدوات المرافقة والمحاكي، ومجموعات معدل التنفيذ وتأخير العبور بينها، والكتل النموذجية. *الفصول:* 19، 20، 34.

R77 — GE Energy, *Mark VIe Standard Block Library* (GEI-100682)، و*DCS Block Libraries* (GEI-100679)، و*Mark VIe SIL Block Library* (GEI-100691) (2008)، مع مذكرة «How to add a logic block to the Mark VIe from the Library» (من أرشيف المؤلف؛ للفهم دون نسخ). *النوع:* ● أدلة مصنّع. *ما استُفيد منه:*

تصنيف مكتبات الكتل وأمثلتها، والمكتبة المقيدة لمتحكم السلامة، وأنواع البيانات والقيم غير العددية، والمتغيرات العامة والمحلية، وخطوات إضافة كتلة. *الفصول:* 19، 20، 34.

R78 — Shinskey, F. G., *Process Control Systems: Application, Design, and Tuning*, 4th ed., McGraw-Hill, 1996. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* التعاقبي، والتغذية الأمامية، والتحكم بالنسبة، والتقييد المتقاطع، والانتقاء والتغذية الراجعة الخارجية للتكامل، وتحكم موضع الصمام. *الفصول:* 41.

R79 — Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A. & Doyle, F. J., *Process Dynamics and Control*, 4th ed., Wiley, 2016. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* التغذية الأمامية والتعويض الديناميكي، ومتنبئ سميث، ومصفوفة الكسب النسبي، والتحكم التنبؤي. *الفصول:* 41.

R80 — Skogestad, S., «Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning», *Journal of Process Control*, 13 (2003) 291–309. *النوع:* ● مصدر منشور. *ما استُفيد منه:* قواعد الضبط SIMC. *الفصول:* 41.

R81 — Woodward, Inc., *Digital Valve Positioner (DVP)* 03376، نشرة مواصفات المنتج (وثيقة مصنّع). *النوع:* ● وثيقة مصنّع. *ما استُفيد منه:* وظائف محدد الموضع الرقمي، والمحركات والحساسات المدعومة، وخيارات الواجهات والتغذية. *الفصول:* 34.

R82 — Moog Inc., *Electrohydraulic Valves: A Technical Look* (مقدمة الصمامات الكهروهيدروليكية، وثيقة مصنّع). *النوع:* ● وثيقة مصنّع. *ما استُفيد منه:* مبدأ الصمام المؤازر ذي المرحلتين وتصميم الفوهة والصفيحة والقيادة المباشرة. *الفصول:* 34.

المواصفات والمعايير المشار إليها في المتن (بلا رموز): ISA-5.1/5.2/5.3/5.4، ISA-TR20.00.01، ISA-18.2/IEC 62682، ISA-84/IEC 61511، IEC 61508، IEC 60079 (السلسلة)، IEC 61298/60770، ISA-7.0.01، IEC 60529، IEC 62443، IEC 61131-3، ISA-101/ISO 11064، ISO 5167، ISO 20816/10816/7919، ISO 21940-11، API 520/521/526/576، API 551، API 670/612/614/617، API 2000/2350، API

MPMS، AGA 3/7/8/9، NFPA 85/86/68/69/58، ASME B31.3/B16.5/PTC 10/BPVC، NACE MR0175/ISO 15156، BS EN 50288-7، IEC 60332/60331، NAMUR NE43، EEMUA 191، OIML R137، NIST CSF 2.0، ISA-77 (السلسلة: OISD-STD-108/111/141/144/150/152/241، ASME TDP-1، ISO 4406، EN 12952/12953، EN ،77.41/77.42/77.43/77.44) (تقييم ISA-TR84.00.07، NIST SP 800-82، ISA-95، IEC 60584/60751، 50156، فعالية كشف الحريق والغاز)، EN 54، NFPA 72/12/2001/15/11/10، API RP 14C، FM 3260، ISO 3941، NEMA SM 23، API 611، ISO 4126، ASME BPVC Sec. VIII، ISA-75.25، ANSI/FCI 70-2، EN 1434، OIML R75، ISO 16852، IEC 60534-2-1/8-3، ISO 15848-1، ISO/IEC 17025. تُذكر كل مواصفة بإصدارها السائد عند التأليف، ويُتحقق من الإصدار الساري قبل الاعتماد عليها في مشروع.

جدول: خريطة المواصفات بحسب الموضوع (يجد القارئ لكل جدول أو معادلة مهمة في المتن المواصفة والبند الذي يتحقق منه؛ وما ذُكر بلا سنة يُرجع فيه إلى الطبعة السارية)

| الموضوع | المواصفة وطبعتها | البند أو الجزء الذي يُرجع إليه | | رموز مخططات الأجهزة وتعريفها (P&ID) | ANSI/ISA-5.1-2022 | جدول أحرف التعريف (Identification Letters)، ورموز الأجهزة والخطوط والوظائف | | إدارة الإنذارات | ANSI/ISA-18.2-2016 / IEC 62682:2022 | دورة حياة الإنذار: الفلسفة، والترشيد، والتصميم، ومقاييس الأداء (معدل الإنذارات لكل مشغل) | | السلامة الوظيفية لصناعات العمليات (SIS) | IEC 61511-1:2016 + AMD1:2017 | البنود 8–12 (تقييم المخاطر، وتخصيص الوظائف، ومواصفة متطلبات السلامة SRS، والتصميم، والبرنامج التطبيقي) والبند 16 (التشغيل والصيانة)؛ جداول SIL مقابل PFDavg وتحمّل أعطال العتاد (HFT) | | السلامة الوظيفية العامة | IEC 61508 (الأجزاء 1–7، الطبعة 2، 2010) | الجزء 1 (دورة حياة السلامة)، والجزء 2 (العتاد ونسبة الأعطال الآمنة)، والجزء 3 (البرمجيات)، والجزء 6 (طرق حساب PFD) | | كشف الحريق والإنذار | NFPA 72 | متطلبات كواشف

الدخان والحرارة واللهب وتباعدها، ودوائر الإنذار ومراقبتها | | فعالية كشف الحريق والغاز | ISA-TR84.00.07 | تقييم التغطية (Coverage) والفعالية بأسلوب طبقات الحماية | | المناطق الخطرة: المتطلبات العامة والتصنيف | IEC 60079-0:2017، IEC 60079-10-1:2020 | مجموعات الغاز والفئات الحرارية ومستويات حماية الجهاز (EPL)؛ -10-1: تصنيف المناطق 0/1/2 ومدى الانتشار | | المناطق الخطرة: الأمان الجوهري والتركيب والفحص | 11- | IEC 60079-17، IEC 60079-14، IEC 60079-11: معاملات الدائرة الجوهرية (Uo/Io/Po/Co/Lo)؛ -14: اختيار الأجهزة وتركيب الكابلات والتأريض؛ -17: درجات الفحص الدوري | | أداء أجهزة القياس واختباره | IEC 61298 (الأجزاء 1–4)، IEC 60770 (الأجزاء 1–3) | 61298: إجراءات اختبار الدقة والتخلف والمنطقة الميتة وزمن الاستجابة؛ 60770: طرق تقييم أداء المرسلات | | المزدوجات الحرارية | IEC 60584-1:2013 | جداول القوة الدافعة الكهربائية المرجعية (EMF) والمعادلات للأنواع K وJ وT وE وN وR وS وB | | مقاومات الحرارة البلاتينية | (RTD) IEC 60751:2022 | معادلة كالندر–فان دوسن (Callendar–Van Dusen) ومعاملاتها، وفئات التفاوت (AA/A/B/C) وجدول المقاومة–الحرارة | | قياس التدفق بلوح الفتحة والعناصر التفاضلية | 1- | ISO 5167-2:2022، ISO 5167-1:2022: المعادلة العامة وشروط التركيب؛ -2: معادلة معامل التصريف (Reader-Harris/Gallagher) ومعامل التمدد وحدود β وعدد رينولدز | | صمامات التحكم: تحجيم السعة والتوصيف | IEC 60534-2-1 | ANSI/ISA-75.25.01، 60534-2-1: معادلات التحجيم للسوائل والغازات ومعامل استعادة الضغط FL؛ 75.25.01: اختبار الاستجابة الديناميكية (المنطقة الميتة والدقة) | | صمامات الأمان وتخفيف الضغط | API 520 (الجزء I، الطبعة 10، 2020)، API 521 (الطبعة 7، 2020)، 520 | 526 API: تحجيم فتحة الصمام للغاز والبخار والسائل ومعامل الضغط الخلفي؛ 521: حالات التخفيف والتصرف ونظام الشعلة؛ 526: الفتحات القياسية (D إلى T) والشفاه | | حماية الآلات الدوارة ومراقبة اهتزازها | API 670 (الطبعة 5، 2014) | مجسات القرب والحساسات وأنظمة المراقبة، وحدود الإنذار والفصل والتصويت وزمن التأخير | | تقييم الاهتزاز على الأغلفة | ISO 20816-1:2016،

1- | ISO 20816-3:2022: التعاريف والمناطق A/B/C/D؛ -3: حدود السرعة (mm/s rm s) للآلات الصناعية بحسب القدرة والأساس الصلب أو المرن | | اتزان الدوّارات | ISO 21940-11:2016 | درجات الجودة G ومعادلة عدم الاتزان المتبقي المسموح (e = G/ω | | التوربينات الغازية والبخارية | 616 | API 612، API 616: التوربين الغازي ونظام التحكم والحماية والأجهزة؛ 612: التوربين البخاري ونظام الحاكم والإيقاف والسرعة الزائدة | | الضواغط الطاردة المركزية | API 617 (الطبعة 8، 2014) | السرعات الحرجة وعامل التضخيم (AF) وهوامش الفصل، والأجهزة والحماية | | المراجل وأنظمة الاحتراق | NFPA 85:2023 | تطهير الفرن ومتطلباته (خمسة تغيرات للحجم)، وتعشيقات أنظمة إدارة المرجل (BMS) وتسلسل الإشعال والإيقاف | | لغات برمجة المتحكمات المنطقية القابلة للبرمجة (PLC) | IEC 61131-3:2013 | اللغات الخمس (LD، FBD، ST، IL، SFC) وأنواع البيانات وكتل الوظائف | | الأمن السيبراني لأنظمة الأتمتة الصناعية | IEC 62443-1-1، IEC 62443-2-1 | 62443-3-3:2013: برنامج الأمن لمالك المنشأة؛ -3-3: متطلبات الأمن للنظام ومستويات الأمن (SL 1–4) والمناطق والقنوات | | الشبكات الحقلية الرقمية | IEC 61158 (السلسلة) | تعريف بروتوكولات الحافلات الحقلية (Fieldbus) ومنها Foundation Fieldbus وPROFIBUS وPROFINET وEtherNet/IP | | حماية معدات العمليات في صناعة الهيدروكربونات | OISD-STD-152 | الحمايات النموذجية لكل معدة (المضخات والضواغط والأفران والأوعية) والممارسات الموصى بها | | حلقة التيار 4–20 mA وإشارات العطل | NAMUR NE43 | حدود الإشارة الصالحة (3.8–20.5 mA) وإشارة العطل (≤ 3.6 أو ≥ 21 mA) | | كابلات الأجهزة والتحكم | BS 5308 / EN 50288-7 | بنية الأزواج والحجب، وأكواد الألوان، والخصائص الكهربائية (السعة والمقاومة) | | حماية أغلفة المعدات من الغبار والماء | IEC 60529:1989 + A1:1999 + A2:2013 | الرقمان في رمز IP: الأول للأجسام الصلبة والغبار (0–6) والثاني للماء (0–9) |

الملحق ج: تجهيزات الورشة وأدوات الاختبار

يجمع هذا الملحق قائمة التجهيز التفصيلية التي يحتاجها مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس عند إنشاء ورشة ومختبر متكاملين. وقد فُصلت عن فصل المعايرة، لأنها مرجع يُعاد إليه عند الحاجة، لا مادة تُقرأ متصلة.

قائمة تفصيلية لتجهيز ورشة ومختبر متكامل: الآلات الدقيقة والتحكم والأجهزة والإلكترونيات

جدول القسم 14.9 يكفي لورشة ميدانية؛ أما **ورشة ومختبر متكامل** يخدمان محطة طاقة أو منشأة صناعية (قياس ومعايرة ومحاكاة وإصلاح أجهزة وأعمال ميكانيكية دقيقة) فتُفصَّل القائمة بحسب الأقسام الآتية. كلمة **أساسي** تعني أساسيًا للقسم المعني، أما المعدات المتخصصة فتُختار بحسب أجهزة الموقع ونطاق الصيانة الذي يُنفَّذ داخليًا. وقبل تحويل أي قائمة إلى أمر شراء يلزم تحديد عدد الفنيين، وأنواع أجهزة الموقع، ومديات الضغط والحرارة، والدقة المطلوبة (نسبة TUR في القسم 14.3)، وما سيُعاير داخليًا وما سيُرسل إلى مختبر خارجي؛ فهذه المعلومات تحدد الكميات والمواصفات وتمنع شراء أجهزة مكررة أو غير مناسبة.

(1) أجهزة القياس الكهربائي والإلكتروني:

الجهاز	الاستخدام	الأولوية
جهاز قياس متعدد صناعي (Digital Multimeter)	الجهد والتيار والمقاومة والاستمرارية والديود (القسم 43.2)	أساسي

الجهاز	الاستخدام	الأولوية
جهاز قياس متعدد مكتبي دقيق (Bench Multimeter)	القياسات الدقيقة على الطاولة والتحقق من الإشارات	أساسي للمختبر
مقياس تيار كلابي (Clamp Meter) AC/DC	قياس تيار الأحمال دون فتح مسارها	أساسي
مقياس mA كلابي لحلقات العمليات	قياس 4–20 mA دون قطع الحلقة	مهم
فاحص جهد مع وحدة إثبات (Voltage Tester + Proving Unit)	التحقق من وجود الجهد أو غيابه والتحقق من صلاحية الفاحص نفسه	أساسي
جهاز قياس العزل (Megger)	عزل الكابلات والمعدات بعد عزل الإلكترونيات الحساسة (القسم 43.2)	أساسي إن كان ضمن النطاق
مقياس LCR	المحاثة والسعة والمقاومة	أساسي لإصلاح الإلكترونيات
مقياس ESR	المقاومة المكافئة للمكثفات	مهم لإصلاح البطاقات
ميكروأوميتر بأربعة أسلاك	مقاومات التلامس والوصلات الصغيرة جدًا	متخصص
عداد تردد (Frequency Counter)	التردد والنبضات بدقة	بحسب متطلبات الدقة
مسجل بيانات / DAQ	تسجيل الإشارات والحرارة والجهد مع الزمن	مهم
كاميرا حرارية	كشف السخونة غير الطبيعية في اللوحات والبطاقات	مهم

لا يلزم شراء فولتميتر وأميتر وأوميتر منفصلة لكل طاولة؛ جهاز القياس المتعدد يغطي أغلب هذه الوظائف.

(2) أجهزة المعايرة والحقن والمحاكاة:

الجهاز	الاستخدام	الأولوية
معاير عمليات متعدد الوظائف	توليد وقياس mA وV وΩ وHz ومحاكاة RTD وTC بحسب الطراز (القسم 14.13)	أساسي
معاير حلقة mA	مصدر (Source) / محاكاة (Simulate) / قياس (Measure) لإشارات 4–20 mA	أساسي للعمل الميداني
مصدر تغذية حلقة 24 V DC	تغذية المرسلات والحلقات أثناء الاختبار	أساسي؛ قد يكون مدمجًا
معاير تردد / نبضات	محاكاة إشارات السرعة والتدفق والعدادات	أساسي إن وُجدت هذه الإشارات
محاكي RTD / مزدوج حراري	محاكاة حساسات الحرارة	أساسي؛ قد يغطيه المعاير المتعدد
صندوق مقاومات دقيق (Decade Box)	توليد مقاومات معلومة واختبار مداخل المقاومة	مهم
جهاز اتصال HART أو مودم وبرنامج	إعداد أجهزة HART وتشخيصها وقراءة متغيراتها (القسم 14.11)	أساسي عند وجود HART
أدوات Foundation Fieldbus / PROFIBUS PA	إعداد وتشخيص الأجهزة والشبكات المطابقة (الفصل 23)	بحسب الموقع
معاير موثِّق (Documenting Calibrator)	تنفيذ إجراءات المعايرة وتسجيل نتائجها إلكترونيًا	مهم عند كثرة الأجهزة

جهاز اتصال HART وحده لا يعوّض مرجع المعايرة: تغيير الإعدادات أو تنفيذ الضبط الدقيق (Trim) يحتاج إلى فهم الوظيفة وإلى مرجع مناسب (القسم 14.5).

(3) معدات معايرة الضغط والضغط التفاضلي:

الجهاز أو الأداة	الاستخدام	الأولوية
معاير ضغط مرجعي / وحدات ضغط	مرجع بمديات تناسب أجهزة الموقع	أساسي
مرجع ضغط تفاضلي منخفض	معايرة فروق الضغط الصغيرة (ضغط الهواء والمرشحات)	أساسي عند وجودها
مضخة يدوية هوائية	توليد ضغط هوائي للاختبار	أساسي
مضخة تفريغ / معاير تفريغ	اختبار أجهزة الفراغ	بحسب الموقع
مضخة هيدروليكية	ضغوط أعلى بسائل متوافق	بحسب المديات
مقارن ضغط (Comparator)	توصيل الجهاز والمرجع على مصدر ضغط واحد	مهم
متحكم ضغط آلي	توليد الضغط وضبطه آليًا	متقدم
ميزان الأثقال الميتة	مرجع ضغط عالي المستوى	لمختبر المعايرة المتخصص
صمامات ضبط دقيق وتنفيس وعزل	التحكم الدقيق والعزل والتنفيس	أساسي
خراطيم ومانيفولدات ومهايئات	توصيل الأجهزة بمختلف المقاسات والسنون	أساسي
معدات اختبار التسرب	فحص تسرب الوصلات والدوائر	أساسي

يلزم توفير وصلات NPT وBSP وغيرها بحسب الموقع مع الالتزام بتصنيف الضغط وتوافق الوسط، وأجهزة الضغط المنخفض جدًا لا تُوصل عرضًا بمصدر ضغط عالٍ.

(4) معدات معايرة الحرارة:

الجهاز	الاستخدام	الأولوية
كتلة جافة (Dry Block)	تطبيق حرارة فعلية على RTD والمزدوجات	أساسي إن كانت معايرة الحساسات داخلية
مقياس حرارة مرجعي مع مجس PRT	قياس الحرارة المرجعية	أساسي
أطواق الكتلة الجافة (Inserts)	تثبيت الحساسات بأقطار وأعماق مناسبة	أساسي
حمّام حرارة	حساسات تتطلب تجانسًا أو أشكالًا لا تناسب الكتلة الجافة	متخصص
معاير RTD/TC	اختبار كهربائي للحساسات والمرسلات ومداخل النظام	أساسي
أسلاك تمديد ووصلات المزدوجات	توصيل أنواع المزدوجات المختلفة بطريقة صحيحة (الفصل 7)	أساسي
أسلاك RTD بسلكين وثلاثة وأربعة	اختبار توصيلات RTD المختلفة	أساسي
معاير الجسم الأسود	معايرة مقاييس الحرارة بالأشعة تحت الحمراء	عند الحاجة

محاكاة Pt100 كهربائيًا تختبر المدخل أو المرسل؛ أما اختبار الحساس نفسه فيحتاج إلى حرارة فعلية ومرجع مناسب (القسم 14.10).

(5) أجهزة فحص التدفق والمستوى والتحليل:

الجهاز أو المجموعة	الاستخدام	الأولوية
مولد نبضات / فاحص مجمّع	اختبار إشارات التدفق وتجميع النبضات	مهم

الجهاز أو المجموعة	الاستخدام	الأولوية
أدوات التحقق من عدادات التدفق (OEM)	تشخيص إلكترونيات عدادات التدفق وفحصها	بحسب الأنواع
عمود أو وعاء اختبار مستوى	اختبار العوامات ومفاتيح المستوى وبعض أجهزة المستوى	بحسب الموقع
تجهيزات اختبار الرادار والموجات فوق الصوتية	وفق تعليمات المصنّع	متخصص
محاكي pH/ORP ومحاليل منظِّمة	اختبار الإلكترونيات ومعايرة الأقطاب (القسم 10.6)	عند وجود المحللات
محاليل ومحاكي التوصيلية	معايرة حساسات ومداخل التوصيلية	عند وجودها
أطقم غازات معايرة معتمدة	معايرة أجهزة الغاز بغازات معلومة التركيز (القسم 30.5)	عند وجودها
منظمات وأنابيب ومقاييس تدفق للغاز	توصيل غاز المعايرة بالمعدل والضغط المناسبين	مع معدات الغاز
أغطية اختبار كواشف الغاز / محطة إرساء	اختبار ومعايرة الكواشف المتوافقة	بحسب الموقع
مصباح اختبار كواشف اللهب المعتمد	اختبار كواشف اللهب المتوافقة (القسم 30.4)	بحسب الموقع

منصة معايرة التدفق الفعلية (Flow Calibration Rig) مشروع مستقل نسبيًا؛ حقن النبضات أو mA لا يثبت دقة قياس التدفق الحقيقي، ويمكن إسناد المعايرات المتخصصة إلى مختبر خارجي (القسم 14.10).

(6) الصمامات والمشغلات والأنظمة الهوائية:

الجهاز أو الأداة	الاستخدام	الأولوية
مصدر هواء أجهزة نظيف وجاف	تشغيل الأجهزة الهوائية واختبارها (القسم 25.8.2)	أساسي
مرشح-منظم مع مقاييس	ضبط ضغط هواء الاختبار ومراقبته	أساسي
تجهيزة اختبار محول I/P	اختبار تحويل 4–20 mA إلى ضغط هوائي	أساسي
أدوات تهيئة الموضّع	إعداد الموضّع وتشخيصه (القسم 15.9)	أساسي بحسب الأنواع
منصة اختبار مشغلات وصمامات ملفية	اختبار الحركة والإشارات والصمامات الملفية (القسم 15.11)	مهم
جهاز قياس الشوط	قياس شوط الصمام أو زاوية الحركة	مهم
نظام تشخيص الصمامات	تحليل أداء الصمام وبصمته (القسم 15.15)	متقدم
منصة اختبار التسرب والكرسي	اختبار التسرب وفق فئة محددة (القسم 15.6)	متخصص
قاطع أنابيب وثنّاية ومزيل نتوءات	تجهيز أنابيب الأجهزة	أساسي
أدوات تجميع وفحص وصلات الأنابيب	التجميع والفحص بحسب المصنّع	أساسي

منصة اختبار المشغلات تحتاج إلى تثبيت وحواجز تتناسب مع قوة الحركة والطاقة المخزونة في النابض والهواء.

(7) أجهزة السرعة والاهتزاز وحماية الآلات:

الجهاز	الاستخدام	الأولوية
محاكي تردد / سرعة	اختبار إشارات السرعة ومداخلها (الفصل 32)	أساسي إن كانت ضمن النطاق

في اختبار مجسات التيارات الدوامية يجب أن تتوافق مجموعة المجس والكابل ووحدة التحويل والهدف المرجعي مع متطلبات النظام (القسم 32.4).

(8) مختبر PLC وDCS وSIS والاتصالات:

الجهاز أو التجهيز	الاستخدام	الأولوية
حاسوب هندسي محمول / محطة عمل	البرمجة والتشخيص وحفظ النسخ	أساسي
برمجيات هندسية مرخّصة	التعامل مع أنظمة الموقع وإصداراتها	أساسي
رف اختبار I/O / PLC خارج الخدمة	اختبار البطاقات والبرامج خارج النظام العامل	مهم
لوحة محاكاة AI/AO/DI/DO	محاكاة المداخل ومراقبة المخارج	أساسي
محاكي تلامس جاف / رطب	اختبار الإشارات المنفصلة بمستوياتها الصحيحة (القسم 3.3.2)	أساسي
أحمال وهمية محمية	اختبار المخارج تحت حمل مناسب	مهم
تجهيزة اختبار مرحلات ومؤقتات	اختبار مرحلات التحكم والتوقيت	مهم
مهايئات USB–RS232/RS485 معزولة	الاتصال بالأجهزة التسلسلية (القسم 23.5)	أساسي
مبدّل Ethernet صناعي	شبكة اختبار معزولة	أساسي
فاحص كابلات Ethernet	فحص التوصيل وأعطال الكابلات	أساسي
برمجيات تشخيص البروتوكولات	تشخيص Modbus والبروتوكولات الموجودة (القسم 23.12)	بحسب الموقع
طقم فحص وتنظيف الألياف	فحص وصلات الألياف وتنظيفها	عند وجودها

الجهاز أو التجهيز	الاستخدام	الأولوية
مقياس قدرة ضوئية مع مصدر ضوء	اختبار فقد المسار الضوئي	عند وجودها
OTDR	تحديد أعطال الألياف والمسافات	متخصص
أدوات اختبار تزامن الوقت	التحقق من NTP/PTP/IRIG-B بحسب النظام	متخصص

اختبارات SIS والفصل تحتاج إلى إجراءات تغطي الوظيفة كاملة (القسم 29.5)؛ توفر أدوات الحقن وحده لا يجعل الاختبار مكتملًا.

(9) طاولة إصلاح الإلكترونيات والبطاقات:

الجهاز أو التجهيز	الاستخدام	الأولوية
راسم ذبذبات رقمي	شكل الإشارات والنبضات والتشويش	أساسي
مجسات تفاضلية / معزولة	قياسات تفاضلية وعائمة ضمن تصنيف المجس	أساسي بحسب الدوائر
مجس تيار	شكل التيار على الراسم	مهم
مولد دوال / موجات اعتباطية	توليد موجات للاختبار	أساسي
مصدر تغذية DC مكتبي منظَّم	تغذية الدوائر مع تحديد التيار	أساسي
حمل إلكتروني DC	اختبار مزودات القدرة تحت حمل قابل للضبط	مهم
محطة لحام	لحام المكونات بحرارة مضبوطة	أساسي
محطة إزالة لحام	إزالة اللحام والمكونات	أساسي
محطة هواء ساخن	استبدال مكونات SMD	أساسي

الجهاز أو التجهيز	الاستخدام	الأولوية
مجهر مجسّم	فحص اللحامات والمسارات والمكونات الصغيرة	أساسي
شفط أبخرة اللحام	الشفط عند المصدر	أساسي
حامل لوحات وسخّان أولي	تثبيت اللوحات وتسخينها عند الإصلاح	مهم
محلل منطقي	تحليل الإشارات والبروتوكولات الرقمية (الفصل 17)	متخصص
مبرمج شرائح / IC EEPROM	قراءة الشرائح المدعومة وبرمجتها	بحسب نطاق الإصلاح
محطة إصلاح BGA	المكونات ذات اللحام السفلي	متخصص
محلل طيف	إشارات الترددات الراديوية	إن كانت صيانة RF ضمن النطاق

لا يُفصل أرضي حماية راسم الذبذبات لجعله عائمًا؛ يُستخدم تجهيز القياس المناسب للدائرة (مجس تفاضلي أو راسم معزول).

(10) أدوات القياس الميكانيكي والعدة اليدوية:

المجموعة	الأدوات المطلوبة
قياس الأبعاد	قدمة رقمية/ورنية، ميكرومتر خارجي، مقياس عمق، مسطرة معدنية (القسم 12.8)
الخلوص والمحاذاة	شرائح قياس الخلوص (Feeler Gauge)، ساعة قياس وقاعدة مغناطيسية، ميزان استواء
السنون والزوايا	مشط قلاوظ، مقياس نصف قطر، زاوية هندسية

المجموعة	الأدوات المطلوبة
القياس المتخصص	مقياس أقطار داخلية، مقياس ارتفاع، سطح مرجعي، كتل قياس عند الحاجة
الشد	مفاتيح عزم ومفكات عزم بمديات مناسبة
عدة كهربائية	مفكات معزولة، كماشات، قواطع، أدوات تعرية الأسلاك
التوصيلات	كبّاسات للأطراف الأنبوبية (Ferrules) وأطراف الكابلات (Lugs) بقوالب مطابقة، أدوات فك الأطراف
الإلكترونيات	ملاقط ESD، مفكات دقيقة، أدوات فتح البطاقات وفحصها
الألياف والشبكات	أدوات تجهيز الكابلات والتنظيف والتركيب بحسب الأنواع
الأعمال الميكانيكية الخفيفة	ملزمة بفكوك لينة، مفاتيح، ألن، سحّابات صغيرة، أدوات إزالة النتوءات

(11) ملحقات الاختبار والمواد الاستهلاكية (نقصها من أكثر ما يعطّل العمل): مجسات وأسلاك قياس سليمة ومشابك معزولة ووصلات اختبار محمية؛ كابلات BNC ومهايئات وإنهاءات؛ كابلات مزدوجات بحسب النوع وRTD بسلكين وثلاثة وأربعة؛ صناديق تفريع (Breakout) وأطراف اختبار مؤمَّنة بفيوزات؛ مقاومات دقيقة ومنها 250 Ω لحلقات HART؛ مقاومات أحمال بقدرات تبديد مناسبة. فيوزات أجهزة القياس بالنوع والتصنيف المحددين من المصنّع؛ الأطراف الأنبوبية والأطراف الحلقية وأطراف توصيل وغدد وأنابيب انكماش حراري؛ خراطيم ضغط ووصلات وسدادات وجوانات متوافقة؛ أسلاك لحام ومادة مساعدة للصهر (Flux) وفتيل إزالة اللحام ومواد تنظيف إلكترونية؛ أكياس وصناديق ESD وفرش ومناديل خالية من الوبر؛ طابعة ملصقات للكابلات والأجهزة وملصقات حالة المعايرة؛ مكونات إلكترونية وقطع غيار مختارة بحسب الأجهزة المسموح بإصلاحها.

(12) تجهيز الورشة والمختبر وإدارة المعايرة:

التجهيز	الغرض
منطقة معايرة نظيفة مستقرة بيئيًا	تقليل أثر الحرارة والرطوبة والاهتزاز على القياس
طاولات ESD ونظام تحقق من التأريض	حماية المكونات أثناء العمل على الإلكترونيات غير المكهربة
توزيع كهربائي محمي وإيقاف طوارئ	تغذية منصات الاختبار بأمان
مصادر تغذية AC/DC مناسبة	تشغيل معدات الاختبار والأجهزة
مصدر هواء نظيف وجاف	اختبارات الأجهزة الهوائية
تهوية وشفط موضعي	اللحام والمواد المستخدمة
مراقبة الحرارة والرطوبة	توثيق ظروف المعايرة
خزائن للمراجع وأخرى للأجهزة الواردة	الفصل بين المرجع والأجهزة قيد الإصلاح أو المرفوضة
حوامل وتثبيت وحواجز اختبار	احتواء مخاطر الحركة والضغط
معدات LOTO ومعدات الوقاية	عزل مصادر الطاقة أثناء العمل
نظام إدارة معايرة ونسخ احتياطي	حفظ التاريخ والنتائج والشهادات والاستحقاقات (القسم 14.7)
إجراءات ونماذج اختبار	تسجيل «كما وُجد» و«كما تُرك» والخطأ والقبول
مراجع بمعايرة قابلة للتتبع	دعم موثوقية النتائج (القسم 14.2)
تقييم عدم اليقين وقواعد القبول	تقرير صلاحية المرجع والنتيجة للسماحية المطلوبة (القسم 14.3)

ترتيب الشراء المقترح على مراحل:

1. **المرحلة الأولى:** السلامة والطاولات، أجهزة قياس متعددة، معاير متعدد الوظائف، معاير حلقة، مصادر تغذية، معدات الضغط والحرارة المطلوبة، HART، حاسوب وبرمجيات، عدة يدوية وملحقات.

2. **المرحلة الثانية:** طاولة إصلاح إلكترونيات كاملة، منصة I/O، أجهزة تسجيل وتشخيص شبكات، ومقياس mA كلابي.
3. **المرحلة الثالثة:** معدات الصمامات والاهتزاز والغاز والتحليل بحسب أجهزة الموقع.
4. **المرحلة الرابعة:** مراجع المعايرة المتقدمة والمنصات الآلية إن كان حجم العمل يبررها.

تخطيط مختبر المعايرة يشمل نطاق العمل والبيئة والمراجع والإجراءات إضافة إلى شراء الأجهزة (تُراجع في ذلك أدلة الشركات المصنّعة للمعايرات مثل Beamex وFluke، والمواصفة ISO/IEC 17025 إن كان الاعتماد هدفًا).

(13) حزمة HART كاملة (تُحسب حزمة تشغيل لا جهازًا وحده، إن كانت أجهزة الموقع تدعم HART):

البند	المطلوب
جهاز اتصال HART محمول	إعداد المرسلات والموضّعات وتشخيصها في الميدان
مودم HART	واجهة اتصال للحاسوب المحمول مع عزل كهربائي بحسب التطبيق
برنامج التهيئة	متوافق مع أجهزة الموقع وتراخيصه
مكتبات تعريف الأجهزة (DD / DTM)	ملفات تعريف الأجهزة بدعم طرازاتها وإصداراتها
اشتراك التحديثات والدعم	بحسب سياسة المورّد
أسلاك اختبار ومشابك	مهايئات اتصال وقطع احتياطية
تغذية حلقة ومقاومة اتصال	تغذية 24 V ومقاومة 250 Ω مناسبة بحسب مخطط الجهاز
بطارية وشاحن وحقيبة	ملحقات التشغيل والحماية

البند	المطلوب
اعتماد المناطق الخطرة	إن كان الجهاز سيُستخدم داخل مناطق مصنفة (الفصل 26)
نسخ احتياطي للتهيئة	حفظ إعدادات الأجهزة قبل العمل وبعده وربطها برقم الوسم
أدوات WirelessHART	إعداد الشبكة وتشخيصها إن كانت موجودة (القسم 23.10)

لا يُفترض أن جهاز اتصال HART يدعم Foundation Fieldbus أو PROFIBUS؛ تُحدد هذه الوظائف منفصلة في المواصفات.

(14) تجهيزات لا يصح نسيانها في الحساب:

المجموعة	البنود التي تُدرج
البرمجيات	برامج PLC وDCS وHMI وSIS، وبرامج الأجهزة والموضّعات والاهتزاز بحسب أنظمة الموقع
التراخيص	تفعيل البرامج والاشتراكات ومفاتيح الترخيص وتجديدات الدعم
كابلات البرمجة	الكابلات الأصلية أو المعتمدة، USB والتسلسلية (Serial)، محولات معزولة، ومهايئات الأنظمة القديمة
مقاعد الاختبار	طاولات معايرة الضغط والحرارة والكهرباء، وطاولة إلكترونيات ومنصة I/O
واجهات الإشارات	عوازل إشارة ومقسّمات وحواجز ومحولات I/P ومحولات RTD/TC للاختبار
اختبار المداخل والمخارج	محاكاة PNP/NPN والتلامس الجاف والنبضات وNAMUR بحسب الموجود
مصادر التغذية	مصادر محدودة التيار، تغذية حلقات، وأحمال اختبار مناسبة

المجموعة	البنود التي تُدرج
معدات الحقل	حقائب محمولة، أدوات معتمدة للمناطق الخطرة عند الحاجة، وفوانيس عمل مناسبة
الأجهزة البصرية	عدسة مضيئة، مجهر، منظار فحص (Borescope)، وأدوات تنظيف الألياف
مناولة الأجهزة	عربات وحوامل وملزمة وتجهيز رفع مناسب للأجهزة والصمامات الثقيلة
التنظيف	شفط أبخرة ومنظفات مناسبة وأدوات تنظيف منفصلة عن منطقة المعايرة
التخزين	خزائن مراجع وقطع غيار وصناديق ESD وفصل الأجهزة السليمة عن المعطّلة
التوثيق	طابعة عادية وطابعة ملصقات، قارئ باركود عند الحاجة، ونظام أرشفة ونسخ احتياطي
القطع الاستهلاكية	فيوزات وبطاريات ورؤوس لحام ومجسات وخراطيم وجوانات ووصلات وأسلاك
قطع الغيار	بحسب قائمة أجهزة الموقع: مزودات قدرة ومرحلات وأطراف توصيل وحساسات وبطاقات معتمدة

(15) التجهيزات المتخصصة تُحسب أيضًا مع تحديد مسؤولية القسم: معدات الحريق والغاز (غازات معايرة ومنظمات وأغطية اختبار وأجهزة اختبار كواشف اللهب والدخان والحرارة المتوافقة، الفصل 30)؛ ومعدات محللات المياه والغاز (محاليل وغازات مرجعية وأدوات أخذ العينات)؛ ومعدات حماية التوربينات والآلات (محاكاة السرعة والاهتزاز والخلوص وأدوات الأنظمة الأصلية)؛ ومعدات الصمامات (اختبار الموضّع والشوط والتسرب والمشغلات)؛ ومعدات الألياف والشبكات الصناعية؛ ومعدات العدادات والتدفق والمستوى (أدوات المصنّع ومنصات الاختبار)؛ وأجهزة اختبار مرحلات الحماية الكهربائية

والتأريض وجودة القدرة ونسبة محولات التيار إن كانت ضمن مسؤولية الورشة، وإلا أُدرجت ضمن تجهيزات القسم الكهربائي المشترك.

(16) التكلفة لا تقتصر على سعر الجهاز: يُحسب أيضًا الشحن والتركيب والتشغيل الأولي، وشهادات المعايرة، وتدريب الفنيين، والتراخيص والتحديثات، والملحقات، وقطع الغيار، والمعايرة الدورية، والصيانة، ومصاريف التجهيزات الكهربائية والهواء والتهوية. ولكل بند في قائمة الشراء تُوضع الحقول الآتية:

حقول بند الشراء
الاسم العربي والإنجليزي — الاستخدام — الكمية — المدى — الدقة المطلوبة — التوافق مع أجهزة الموقع — الملحقات — الترخيص — شهادة المعايرة — التدريب — الأولوية — التكلفة

بهذا يكون HART حزمة تشغيل كاملة، وكل جهاز آخر محسوبًا بما يلزم لاستخدامه فعليًا لا الجهاز الأساسي وحده.

الملحق د: مسرد المصطلحات عربي-إنجليزي

يجمع هذا المسرد المصطلحات التي عُرّفت في متن الكتاب (المصطلح العربي كما استُخدم عند أول ورود، ومقابله الإنجليزي)، مرتبةً هجائيًا بالإنجليزية لأن المهندس يلتقي المصطلح أولًا على الشاشة أو في وثيقة المصنّع. عدد المصطلحات: 757.

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
A/M Station	محطة يدوي/آلي
AC Vibration Signal	إشارة الاهتزاز المتناوبة
Accuracy	الدقة
Actions	أفعال
Actuator	المشغل
Adaptive Control	التحكم التكيفي
Adder	الجامع
Adjustable Choke	الخانق القابل للضبط
Adjustable Range	المدى القابل للضبط
Advanced Regulatory Control – ARC	التحكم التنظيمي المتقدم
Alarm	الإنذار
Alarm Deadband	منطقة ميتة للإنذار
Alert	التنبيه
Aliasing	التعرج

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
ALU	وحدة الحساب والمنطق
Analog Output Trim	ضبط الخرج التناظري
Analysis	التحليل
AND	التفرع المتوازي
Anti-Windup	منع تشبع التكامل
Architectural Constraints	قيود البنية
Armour	التسليح
As-Found / As-Left	الحالة كما وُجدت / كما تُركت
Associated Apparatus	جهاز مرافق
Attemperation / Desuperheating	خفض حرارة البخار بالرش
Audit Trail	سجل التدقيق
Automation System – AS	أنظمة الأتمتة
Auxiliary Console	المنصة المساعدة
Averaging Bulb	بصيلة المتوسط
Axial (Thrust) Position	الموضع المحوري
Back Ferrule	الحلقة الخلفية
Back Pressure	الضغط الخلفي
Back Seat	المقعد الخلفي
Backup Relay Logic	منطق المرحّلات الاحتياطي

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Bad PV	سلوك القياس السيئ
Balanced Bellows Relief Valve	صمام الأمان المتوازن بمنفاخ
Balanced Draft	السحب المتوازن
Balanced Trim	الترم المتوازن
Ball Velocity Check	كرة الإغلاق الآلي
Base-Metal Thermocouples	المزدوجات الحرارية من المعادن الأساسية
Bearing Metal / Drain Temperature	حرارة معدن المحمل وزيت التصريف
Bench Set	ضبط المنضدة
BFILT	المرشح المنطقي
Bias	الانحياز
Bidirectional	ثنائي الاتجاه
Bimetallic	ثنائي المعدن
Binary	النظام الثنائي
Block-and-Bleed Relay	مرحّل الحجب والتنفيس
Blowdown Staging	تسلسل التفريغ
BMS (Burner Management System)	نظام إدارة الحارقات
Boiler Master	المتحكم الرئيسي للمرجل
Bonnet	الغطاء
Bounce	الارتداد

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Breakout Torque	عزم الانفكاك
Bridle	الجسر
Brownfield Project	مشروع التوسعة أو التجديد
BTU Meter	عداد الطاقة الحرارية
Bubbler	القياس الفقاعي
Bump Test	اختبار الاستجابة
Bumpless Transfer	التحويل السلس
Bus Topology	طوبولوجيا الناقل
Bypass	التجاوز
Bypass / Spill	صمام تجاوز أو إرجاع
Cable Segregation	فصل الكابلات
Calibration	المعايرة
Capacitance	السعة
Capacitance / RF Admittance	القياس السعوي
Capillary Bulb	البصيلة الشعرية
Cascade Control	التحكم التعاقبي
Case Expansion	تمدد الغلاف
Case Terminal	طرف الغلاف
Catalytic Bead	الحبيبة الحفازة

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Cause & Effect Matrix	مصفوفة السبب والنتيجة
Cavitation	التكهف
Centralized Control	التحكم المركزي
CFB (Circulating Fluidized Bed)	مرجل الطبقة المميعة الدوّارة
Characterizer	كتلة التوصيف
Check Valve	صمام عدم الرجوع
Chemiluminescence	اللمعان الكيميائي
Chilled Mirror	المرآة المبردة
Choked Flow	التدفق المختنق
Clamp-On Meter	العداد المثبّت خارجيًا
Close-Coupled	التركيب المتقارب
Close-Coupled Assembly	التجميعة المتقاربة
Closed Loop	الحلقة المغلقة
Closed-Loop / Feedback Control	التحكم بالحلقة المغلقة
COD/BOD	الطلب الكيميائي والبيولوجي للأكسجين
Code	الكود
Command	الأمر
Common Cause Failure	الفشل بالسبب المشترك
Comparator	المقارن

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
COMPHYS	المقارن بتخلف
Compression	الضغط
Compressor Inlet Temperature	حرارة هواء دخول الضاغط
Computer Numerical Control – CNC	آلة التحكم الرقمي بالحاسوب
Condensate Pot	وعاء التكثيف
Conductivity Probe	مجس الموصلية
Conduit	المجرى الأنبوبي للكابلات
Cone of Vision	مخروط الرؤية
Consistency	القوام
Contact Wetting Current	تيار ترطيب التلامس
Contactor	المرحّل والملامس
Controller Output (OP)	خرج المتحكم
Conventional Relief Valve	صمام الأمان التقليدي المحمّل بنابض
Coordinated Control	التحكم المنسق
Coriolis Mass Flowmeter	عداد كوريوليس الكتلي
Corrosion Coupons	قسائم التآكل
Counter	العداد الرقمي
Cracking Pressure	ضغط البدء
Cross Reference	الإسناد الترافقي

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Cross-Correlation Flowmeter	عداد الارتباط المتقاطع
Cross-Limiting	التقييد المتقاطع في الاحتراق
Cross-Limiting Control	التحكم بالتقييد المتقاطع
Custody Transfer	القياس التجاري (نقل الملكية)
Damping	التخميد
Danger (Trip) Setpoint	حد الخطر (الفصل)
Data Diode	ديود البيانات
DC Gap Voltage	جهد الفجوة المستمر
DCS (Distributed Control System)	نظام التحكم الموزع
De-Energize-to-Trip	قطع التغذية للفصل
Dead Time (Transportation Lag)	الزمن الميت (تأخر النقل)
Deadband	المنطقة الميتة
Deadweight Tester	ميزان الأثقال الميتة
Decay Ratio	نسبة الاضمحلال
Decode	فك الترميز
Decoupling	فك الارتباط
Dedicated Control Room	غرفة التحكم المخصصة
Default Deny	الأصل المنع
Degraded Mode	التشغيل المنقوص

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Deluge System	الإغراق المائي
Demilitarized Zone – DMZ	منطقة منزوعة السلاح
Demultiplexer	مُزيل التجميع
Depressurize	تخفيض الضغط
Derivative Time	زمن التفاضل
Design Freeze	تجميد التصميم
Design Intent	غرض التصميم
Determinism	الحتمية
Deviation	الانحراف
Dew Point	نقطة الندى
Dial Indicator	ساعة القياس
Diaphragm / Rotary / Turbine Gas Meters	عدادات الغاز الغشائية والدوّارة والتوربينية
Diaphragm Level Detector	كاشف المستوى الغشائي
Diaphragm Seal	الحاجز الغشائي
Dielectric Constant	ثابت العزل الكهربائي
Differential Expansion	التمدد التفاضلي
Differential Gap	الفجوة التفاضلية
Differential Travel	الفرق الحركي
Digital Twin	التوأم الرقمي

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Digital Valve Controller (DVC)	الموضع الرقمي الذكي
Dipstick / Slip Tube	عصا القياس وأنبوب الانزلاق
Direct Acting	الفعل المباشر
Direct Methods	الطرق المباشرة
Direct Mount	تركيب مباشر
Direct Signal Path	المسار المباشر للإشارة
Discrepancy	عدم التطابق
Discrete Signal	الإشارة المتقطعة
Displacer	المُزاح
DMA	الوصول المباشر للذاكرة
Doppler	دوبلر
Double Block and Bleed	العزل المزدوج مع التنفيس
Double Cross-Limiting	التقييد المتقاطع المزدوج
Drain	التصريف
Drift	الانجراف
Drilled Barstock Thermowell	الغمد المثقوب من قضيب مصمت
Driver	المشغل الإلكتروني
Droop	الانحدار
Dry Contact	التلامس الجاف

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Dry Gas Seal	سدادة الغاز الجاف
Dry Leg	الساق الجافة
Duct Burner	حارق المجرى
Dump Valve	صمام التفريغ
Dynamic Torque	العزم الديناميكي
Eccentricity	اللامركزية
Eddy-Current Proximity Probe	مجس القرب بالتيارات الدوامية
Edge Computing	الحوسبة الطرفية
Elbow Taps	مآخذ الكوع
Electric Actuator (MOV)	المشغل الكهربائي
Electrical Runout	الجريان الكهربائي
Electro-Hydraulic	المشغل الكهروهيدروليكي
Electro-Pneumatic Positioner	الموضع الكهروهوائي
Electrochemical Sensor	الحساس الكهروكيميائي
Elevated Zero	الصفر المرفوع
Embedded System	النظام المدمج
Emissivity	الانبعاثية
Energize-to-Activate	التفعيل بالتغذية
Energize-to-Trip	التغذية للفصل

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Energized-to-Run	التشغيل بالتغذية
Engineering Station – ES	محطة الهندسة
Entity Parameters	المعاملات الكيانية
EOST (Electronic Overspeed Trip)	الفصل الإلكتروني بالسرعة الزائدة
Equal Percentage	خاصية النسبة المتساوية
Equipotential Bonding	شبكة تساوي الجهد
ESD	الإيقاف الطارئ
Exception Reporting	الإبلاغ بالاستثناء
Excess Gain	هامش الكسب
Execute	التنفيذ
Exhaust Temperature	حرارة العادم
Exhaust Temperature Spread	انتشار حرارة العادم
Exposed	المكشوف
Extension Cable	كابل التمديد
External Reset Feedback	التغذية الراجعة الخارجية للتكامل
Faceplate	صفحة الحلقة
Fail Action	وضع الفشل
Fail to Light	فشل الإشعال
Fail-Closed	الإغلاق عند الفشل

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Fail-in-Place (Fail-Freeze)	التجميد في الموضع عند الفشل
Fail-Last	الثبات على آخر وضع
Fail-Safe	الفشل الآمن
Fast Loop	الحلقة السريعة
FAT	اختبار القبول في المصنع
Feedback	التغذية الراجعة
Feedforward	التغذية الأمامية
Feeler Gauge	مقياس الخلوص بالشرائح
Fetch	الجلب
FFT (Fast Fourier Transform)	تحويل فورييه السريع
Fiber Optic	الألياف الضوئية
Filter Regulator	المرشح المنظم
Filtering	الترشيح
Fire & Gas Mapping	دراسة تغطية كواشف الحريق والغاز
Fire Detection	كشف الحريق
Fire-Tube Boiler	المرجل ذو أنابيب النار
Fired Shutdown	الإيقاف باللهب
Firing Rate Demand	طلب معدل الإحراق
First Scan	الدورة الأولى

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
First-Out	أول سبب
First-Out Alarm	إنذار السبب الأول
Fixed Choke	الخانق الثابت
Fixed Orifice	الفتحة الثابتة المعايرة
Flame Scanner	ماسح اللهب
Flameproof (Ex d)	الغلاف المقاوم للانفجار
Flapper-Nozzle	الفوهة والصفيحة
Flashing	الوميض
Float	العوامة
Flow	التدفق
Flow Conditioner	مكيّف الجريان
Flow Nozzle	الفوهة
Flow Switch	مفتاح التدفق
Flume	المجرى المضيَّق
Fmax	أقصى تردد
Force Balance	اتزان القوى
Forcing	افحص الفرض
Front Ferrule	الحلقة الأمامية
Frozen (Stuck) Signal	تجمد الإشارة

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
FSNL	السرعة الكاملة بلا حمل
Full Arc	القوس الكامل
Full Spectrum	الطيف الكامل
Fully Metered Control	التحكم المقاس الكامل
Function	الدالة
Function Block	الكتلة الوظيفية
Function Block Diagram (FBD)	مخطط الكتل الوظيفية
Function Block Diagram – FBD	مخطط الكتل الوظيفية
Functional Design	التصميم الوظيفي
Functional Safety Assessment – FSA	تقييم السلامة الوظيفية
Fused Terminals	الأطراف المصهرة
Fusible Plug	السدادة القابلة للانصهار
Fuzzification	التضبيب
Fuzzy Logic Controller	متحكم منطق ضبابي
Gain	الكسب
Galvanically Isolated IS Barrier	العازل الجلفاني
Gap Voltage	جهد الفجوة
Gas Chromatograph (GC)	الكروماتوغراف الغازي
Gateway	بوابة

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Gauge Cocks	محابس المقياس
Gauge Glass	المقياس الزجاجي
Geographic Coverage	التغطية الجغرافية
Globe	الكروي
Gray	رمز غراي
Gray Code	شيفرة غراي
Greenfield Project	المشروع الجديد كليًا
Gross Error	الخطأ الجسيم
Ground Loop	الحلقة الأرضية
Grounded	المؤرَّض
Group Lock Box	صندوق الأقفال الجماعي
Guide Word	الكلمة الإرشادية
Guided Wave Radar (GWR)	الرادار الموجّه
Handwheel	العجلة اليدوية
Hardwired	التوصيل السلكي المباشر
HART	بروتوكول HART
Hazard Tree	شجرة الخطر
Hazardous Area Classification – HAC	تصنيف المناطق الخطرة
Heartbeat	نبض حياة

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Heat	الحرارة
Heat Tracing	التسخين المصاحب
Hexadecimal	النظام السداسي عشري
Hierarchy of Controls	تسلسل الضوابط
High Select	اختيار الأعلى
High-Low Pilot	الطيار العالي–المنخفض
High-Speed Counter	العدادات السريعة
Historian	المؤرخ
HMI	أين تقف الواجهة
Hold-up Time	زمن الاحتفاظ
Hook-up Drawing	مخطط التركيب
HRSG	مولد البخار باستعادة الحرارة
HSS (High Signal Selector)	منتقي الإشارة الأعلى
Hygienic Design	التصميم الصحي
Hysteresis	التخلف
I&C Design Basis	أساس التصميم للأجهزة والتحكم
I/O Packs	حزم المداخل والمخارج
I/P Converter	محوّل التيار إلى ضغط
IGV (Inlet Guide Vanes)	ريش التوجيه عند المدخل

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
IMP (First-Stage Pressure Control)	تحكم ضغط المرحلة الأولى
Imperial	النظام الإمبراطوري
Implosion Protection	الحماية من الانفجار الداخلي
Impulse Lines	خطوط النبض
Increased Safety (Ex e)	الأمان المتزايد
Inductor	الملف
Industrial Robot	الروبوت الصناعي
Inferential Methods	الطرق الاستنتاجية
Influence Coefficients	معاملات التأثير
Inherent Characteristic	الخاصية المتأصلة
Inhibit	التثبيط
Input Image	صورة المداخل
Installed Characteristic	الخاصية المركبة
Instruction List – IL	قائمة التعليمات
Instrument Clean Earth	تأريض الأجهزة النظيف
Instrument Gas	غاز الأجهزة
Instrument Index	فهرس الأجهزة
Integral Sensor Cable	الكابل المدمج بالحساس
Integral Time	زمن التكامل

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Integral Windup	تشبع التكامل
Integrator Windup	تشبع التكامل
Interface	الواجهة البينية
Interface List	جدول الربط
Interlock	التعشيق
Interrupt	المقاطعة
Intrinsic Safety	الأمان الجوهري
Invar	الإنفار
Invariant Coordinates	إحداثيات ثابتة
IPL (Independent Protection Layer)	طبقة الحماية المستقلة
IPR	منظم الضغط الابتدائي
IS Earth	تأريض دوائر الأمان الجوهري
Isochronous	عديم الانحدار
Junction Boxes	صناديق التوصيل
K-Factor	معامل K
Keyphasor	المرجع الطوري
Labeling	الوسم
Ladder Diagram – LD	مخطط السلّم
Laminar Flowmeter	العداد الصفائحي

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Last Good Value	آخر قيمة جيدة
Latch	الممسك
Latching	الإمساك الذاتي
Latency	زمن التأخير
Lead Acetate Tape	شريط أسيتات الرصاص
Lead-Lag	تقديم وتأخير
Leak Test	اختبار الإحكام
LED	الثنائي الباعث للضوء
LEL (Lower Explosive Limit)	الحد الأدنى للانفجار
Level	المستوى
Level Trim	تصحيح المستوى
Life-Cycle Cost	تكلفة دورة الحياة
Light-On / Dark-On	التشغيل بالضوء أو بالظلام
Limit Cycle	الدورة الحدية
Line Monitoring	مراقبة الخط
Linear Characteristic	الخاصية الخطية
Linearity	الخطية
Lines of Resolution	عدد الخطوط
Live Zero	الصفر الحي

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Load Acceptance	اختبار قبول الحمل
Load Rejection	اختبار رفض الحمل
Local/Remote Selector	مفتاح الاختيار محلي/بعيد
Lock	القفل
Lock-Up Valve	صمام القفل
Lockout	الإقفال
Logic Solver	حلّال المنطق
Loop	الحلقة
Loop Check	اختبار الحلقة كاملة
Loop Diagram	مخطط الحلقة
Loop Test	اختبار الحلقة
Loop-Powered	المغذّى من الحلقة
LOPA	تحليل طبقات الحماية
Low Flow Cut-off	قطع التدفق المنخفض
Low Flow Cutoff	قطع التدفق المنخفض
Low Select	اختيار الأدنى
LSH	مفتاح المستوى المرتفع
LSL	مفتاح المستوى المنخفض
LSS (Low Signal Selector)	منتقي الإشارة الأدنى

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
mA Clamp Meter	مقياس التيار بالملقط
Magnetic Flowmeter	العداد الكهرومغناطيسي
Magnetic Level Gauge	المقياس المغناطيسي
Magnetoelastic	المغناطيسي المرن
Magnetostrictive	المغناطيسي التضييقي
Mainline Pumps	مضخات الخط الرئيسي
MAN	صمام في الوضع اليدوي
Managed Switches	المبدلات المدارة
Management of Change – MOC	إدارة التغيير
Manifold	المشعب
Manipulated Variable	الوقود هو المتغير المعدَّل
Manual Override	التجاوز اليدوي
Marshalling Cabinet	خزانة التجميع
Master Control Panel	لوحة تحكم رئيسية
Master Meter	العداد المرجعي
Master Terminal Unit – MTU	المحطة الرئيسية
Matched System	النظام المطابق
MAWP (Maximum Allowable Working Pressure)	أقصى ضغط عمل مسموح
Median	الوسيط

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Median Select	الوسيط
Median Voting	التصويت بالقيمة الوسطى
Meter Factor	معامل العداد
Meter Run	خط العداد
Metering / Control	القياس والتنظيم
Metering Pumps	مضخات القياس
MFT (Master Fuel Trip)	فصل الوقود الرئيسي
Microcomputer	الحاسوب المصغر
Microcontroller	المتحكم الدقيق
Micrometer	الميكرومتر
Microprocessor	المعالج الدقيق
Mimic Display	المخطط التمثيلي
Minimum Fuel Limit	حد الوقود الأدنى
Minimum Gate / Low Select	بوابة القيمة الصغرى
Minimum Position	وضع الفتح الأدنى
Minimum Span	المدى الأدنى
Modbus Register Map	خريطة سجلات Modbus
Mode Shedding	الانحدار إلى وضع أبسط
Modes	الأوضاع

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Modification	تعديل
Modifier Letters	الحروف المعدِّلة
Monitoring	المراقبة
MOST (Mechanical Overspeed Trip)	الفصل الميكانيكي بالسرعة الزائدة
MOV/ROV	الصمام المشغّل بمحرك / عن بعد
MPC	التحكم التنبؤي بالنموذج
MSV	صمام الإيقاف الرئيسي
Multi-Turn	متعدد الدورات
Multimeter	جهاز القياس المتعدد
Multimode	متعدد الأنماط
Multipair Cables	الكابلات متعددة الأزواج
Multiphase Flow Meter (MPFM)	عداد التدفق متعدد الأطوار
Multiplexer	المُجمِّع الرقمي
Negative Feedback	سالبة
Network Segmentation	تقسيم الشبكة
Noble-Metal Thermocouples	المزدوجات الحرارية من المعادن النبيلة
Node	العقدة
Noise	الضوضاء
Noise Margin	هامش الضوضاء

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Non-Contact Radar	الرادار غير الملامس
NOT	النفي
NTC Thermistor	ثرمستور NTC
Nuclear (Gamma) Level Measurement	القياس الإشعاعي
Nut	الصامولة
Offset	الانحراف الدائم
Oil Mist Detector	كاشف رذاذ الزيت
Once-Through Boiler	المرجل ذو المرور الواحد
Online Condition Monitoring	المراقبة المستمرة
Online Edit	وضع التعديل الحي
Op-Amp	مكبر العمليات
OPC (Overspeed Protection Control)	التحكم بمنع السرعة الزائدة
Open Loop	الحلقة المفتوحة
Open-Loop Control	التحكم بالحلقة المفتوحة
Open-Loop Step	الفتح القفزي بالحلقة المفتوحة
Operator Station – OS	محطات التشغيل
Optocoupler	المقرن الضوئي
Orbit	المدار
Orifice Flanges	شفاه لوح الفتحة

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Orifice Plate	لوح الفتحة
Out of Range	خارج المدى
Output Image	صورة المخارج
Over-travel	الشوط الزائد
Overall Screen	الحجب الإجمالي
Override Control	التحكم الانتقائي
Overshoot	تجاوز الهدف
Oxygen Analyzer	محلل الأكسجين
Paddle (Vane) Switch	مفتاح الريشة
Parallel	التوازي
Parallel / Jackshaft Positioning	التموضع المتوازي
Paramagnetic	البارامغناطيسي
Parameter	المتغير
Parameter Locking	قفل المعاملات
Parity	التكافؤ
Partial Arc	القوس الجزئي
Partial Stroke Test	اختبار الشوط الجزئي
Passive Magnetic (Variable Reluctance) Pickup	المجس المغناطيسي السلبي
Patching	تحديثات الترقيع

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Performance Map	خريطة الأداء
Permissive	السماحية
Permit to Work – PTW	تصريح العمل
PFD (Probability of Failure on Demand)	احتمال الفشل عند الطلب
PFD (Process Flow Diagram)	مخطط تدفق العملية
Phishing	التصيد
Piezoelectric	الكهرضغطية
Piezoelectric Accelerometer	مقياس التسارع الكهرضغطي
Pilot	الطيار
Pilot-Operated Relief Valve	صمام الأمان المقاد بطيار
Piping Geometry Factor	عامل هندسة الأنابيب
Piston Actuator	المشغل المكبسي
Plain Bulb	البصيلة العادية
PLC (Programmable Logic Controller)	المتحكم المنطقي المبرمج
Pneumatic	الهوائي
Polar (Nyquist) Plot	المخطط القطبي
Polling	الاستطلاع
Positioner	الموضع
Positive Displacement	الإزاحة الموجبة

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Positive Feedback	التغذية الراجعة الموجبة
Positive Opening	الفتح القسري
Post-Purge	التطهير اللاحق
Potentiometer	مقياس الجهد
PPR (Pulses per Revolution)	عدد النبضات لكل دورة
Pre-Startup Safety Review – PSSR	مراجعة السلامة قبل البدء
Pre-travel	الشوط المسبق
Pressure	الضغط
Pressure Drop Ratio	نسبة هبوط الضغط
Pressurized-to-Run	التشغيل بالضغط
Primary / Master	المتحكم الرئيسي
Process Calibrator	معاير العمليات
Process Safety Time	زمن سلامة العملية
Process Variable (PV)	متغير العملية
Program	البرنامج
Proof Pressure	ضغط الإثبات
Proof Test	اختبار الإثبات
Proportional Band (PB)	النطاق التناسبي
Protective/Safety Earth	تأريض السلامة

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Prover	المُثبِت
Proving	الإثبات
Proximitor (Driver)	وحدة التشغيل
PTC Thermistor	ثرمستور PTC
Purge	التطهير
Pyrolysis Furnace	فرن التكسير الحراري
Quartz Crystal	بلورة الكوارتز
Quick Exhaust Valve	صمام التفريغ السريع
Quick Opening	الفتح السريع
R77	خطوات إضافة كتلة منطقية
Random Error	الخطأ العشوائي
Range	المدى
Range Limits	حدود المدى
Rangeability	نسبة المدى
Ratchet	السقاطة
Rate Groups	مجموعات معدل التنفيذ
Rate Limiter	محدد المعدل
Ratio Control	التحكم بالنسبة
Ratiometric Measurement	القياس النسبي

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Rationalization	الترشيد
Raw Counts	القيمة الخام
Re-ranging	إعادة تحديد المدى
Read-Only	القراءة فقط
Real-Time Trend	الاتجاه اللحظي
Recycle Trip Line (RTL)	خط الفتح القفزي لإعادة التدوير
Redundancy	التكرار
Redundant Sensor	الحساس المكرَّر
Reed Switch	مفتاح القصبة
Refractometer	مقياس الانكسار
Registers	المسجلات
Regulatory Requirement	المتطلب التنظيمي
Relative Gain Array – RGA	مصفوفة الكسب النسبي
Relay Auto-Tuning	الضبط الذاتي بطريقة المرحّل
Relay Ladder Logic	منطق سلّم المرحّلات
Remote Mount	التركيب البعيد
Remote Terminal Unit – RTU	الوحدات الطرفية البعيدة
Repeats per Minute	التكرارات في الدقيقة
Requested Mode	الوضع المطلوب

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Reset	إعادة الضبط
Reset Point	نقطة الإرجاع
Resistance	المقاومة
Resistance Tape	الشريط المقاوم
Resolution	الميز
Resolver	المحلل الزاوي
Restrictor	المقيِّد
Return Path	مسار العودة
Reverse Acting	الفعل العكسي
Ring Topology	الطوبولوجيا الحلقية
Rise Time	زمن الارتفاع
Risk Assessment	تقييم المخاطر
Risk Graph	مخطط المخاطر
Rotating Paddle	المجداف الدوار
Rotational Viscometer	مقياس اللزوجة الدوّار
Route-Based Monitoring	المراقبة الدورية بالمسارات
RSV	صمام إيقاف إعادة التسخين
RTD (Resistance Temperature Detector)	مقاومة القياس الحراري
Rub Check	فحص الاحتكاك

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Sa (Assured Sensing Distance)	مسافة الاستشعار المضمونة
Safe Default Value	القيمة الآمنة الافتراضية
Safety Instrumented System (SIS)	نظام السلامة الآلي
Safety Integrity Level (SIL)	مستوى تكامل السلامة
Safety Pattern Gauge	مقياس الضغط الآمن
Safety-On Line	خط هامش الأمان
Sample Conditioning	تهيئة العينة
Sample Probe	مجس أخذ العينة
Sand Probe	مسبار الرمل
SAT	اختبار القبول في الموقع
SCALE	التحجيم
Scale Factor	معامل القياس
Scan Cycle	دورة المسح
Scenario-Based Coverage	التغطية المبنية على السيناريو
Schottky Diode	ديود شوتكي
SCR (Silicon-Controlled Rectifier)	الثايرستور
Screen	الحجب
Seal Gas	غاز السدادة
Seating Torque	عزم الإغلاق

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Secondary / Slave	المتحكم الثانوي
Seismic Velocity Transducer	مجس السرعة السيزمي
Selected / In Control	المسار المسيطر
Selectivity	التمييز
Self-Validating Sensor	الحساس ذاتي التحقق
Sensor Trim	ضبط الحساس
Separation Gas	غاز الفصل
Sequence	التسلسل
Sequential Function Chart – SFC	مخطط الوظائف التتابعية
Serial Grounding	التأريض التسلسلي
Serial Link	الربط التسلسلي
Servo Tape Gauge	مقياس الشريط المؤازر
Servo Valve	الصمام المؤازر
Set Pressure	ضغط الضبط
Setpoint	نقطة الضبط
Setpoint Ramping	تدرج نقطة الضبط
Settle-Out Pressure	ضغط الاستقرار
Settling Time	زمن الاستقرار
Shaft Centerline	الموضع المركزي للعمود

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Shape Memory Alloys	سبائك ذاكرة الشكل
Shelving	التعليق
Shift Registers	مسجلات الإزاحة
Shop Test	اختبار المصنع
Shutdown Valve (SDV)	صمام الإيقاف
Shutoff / Stop	العزل والإيقاف
Sight Flow Indicators	مؤشرات التدفق المرئية
Signal Isolator	عازل الإشارة العادي
Signal Status	حالة الإشارة
SIL Determination	تحديد المستوى المطلوب
SIL Validation	المصادقة على الوظيفة المنفذة
SIL Verification	التحقق من التصميم
SIMC / IMC Tuning	ضبط لامدا (SIMC / IMC)
Simplex	التكوين الأحادي
Simulation	المحاكاة
Single-Element Control	التحكم أحادي العنصر
Single-Mode	أحادي النمط
Single-Turn	أحادي الدورة
Siphon	أنبوب السيفون الملفوف

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
SIT (Site Integration Test)	اختبار التكامل في الموقع
Sn (Nominal Sensing Distance)	مسافة الاستشعار الاسمية
Snubber	مخمّد النبضات
SoC	النظام على رقاقة
SOE	تسلسل الأحداث
Solenoid	الملف اللولبي
Solenoid Valve	الصمام الملفي
Solid State	الحالة الصلبة
Span	اتساع المدى
Spatial Design	التصميم المكاني
Specific Heat	الحرارة النوعية
Spikes	القفزات
Split Range	تقسيم المدى
Spool Valve	الصمام المغزلي
Spring-and-Diaphragm Actuator	المشغل الغشائي النابضي
SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometer)	المقياس الحراري البلاتيني المقاوم المعياري
SQRT	الجذر التربيعي
SRU	وحدة استرداد الكبريت
SSR (Solid-State Relay)	مرحّل الحالة الصلبة

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Standard	المواصفة القياسية
Star Point Grounding	التأريض بالنقطة النجمية
Star Topology	الطوبولوجيا النجمية
Start Checks	فحوص البدء
Start Permissives	أذونات البدء
Start-up Bypass	تجاوز البدء
Statutory Requirement	المتطلب التشريعي
Stepper Motor	المحرك الخطوي
Steps	خطوات
Stiction	الالتصاق
Stilling Well	أنبوب التهدئة
Storage Oscilloscope	راسم الإشارات بذاكرة
Storm Choke	خانق العاصفة
Strapping Table	جدول معايرة الخزان
Stream Switching	تبديل تيارات العينة
Structured Text – ST	النص المهيكل
Style Guide	دليل الأسلوب
Suction Pyrometer	بيرومتر الشفط
Suction Throttling	خنق السحب

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Suppressed Zero	الصفر المكبوت
Surface Safety Valve (SSV)	صمام الأمان السطحي
Surge	الانفصال الهوائي
Surge Control Line (SCL)	خط التحكم بالانفصال الهوائي
Surge Limit Line (SLL)	خط حد الانفصال الهوائي
Surge Proximity	القرب من الانفصال الهوائي
Swell & Shrink	الانتفاخ والانكماش
Synchro	السنكرو
Synchronizing	المزامنة
System Cabinets	خزائن النظام
Systematic Capability	القدرة المنهجية
Systematic Error	الخطأ المنهجي
Tag	الوسم
Target Meter	عداد الهدف
TCD (Thermal Conductivity Detector)	كاشف التوصيل الحراري
Temperature	درجة الحرارة
Temperature Valve	صمام الحرارة
TEST	طرفا الاختبار
Thermal Dispersion	التشتت الحراري

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Thermal Mass Flowmeter	عداد التدفق الحراري الكتلي
Thermocouple	المزدوجة الحرارية
Thermowell	الغمد الحراري
Three-Element Control	التحكم ثلاثي العناصر
TOC	الكربون العضوي الكلي
TOF (Off-Delay Timer)	مؤقت تأخير الإيقاف
TON (On-Delay Timer)	مؤقت تأخير التشغيل
Toolbox Talk	اجتماع السلامة
Torque	العزم
Total Installed Error	خطأ التركيب الكلي
Totalizer	المجمّع
Tracking	التتبع
Tracking / Anti-Windup	التتبع ومنع التشبع
Transformer	المحول
Transit-Time Ultrasonic Flowmeter	عداد زمن العبور فوق الصوتي
Transitions	انتقالات
Transmitter	المرسل
Transport Line	خط النقل
Tree	الشجرية

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Trend	منحنى الاتجاه
TRIAC	الترياك
Trip	الفصل
Trip Multiply	مضاعف الفصل
Trip Oil	زيت الفصل
Triple Point	النقطة الثلاثية
Troubleshooting	تشخيص الأعطال
TSI (Turbine Supervisory Instrumentation)	أجهزة الإشراف على التوربين
Tunables	المداخل القابلة للضبط
Turbine Meter	العداد التوربيني
Turndown Ratio	نسبة الخفض
TVS	ديود كبت الجهد العابر
Twisted Pair	الكابل النحاسي
Two-Element Control	التحكم ثنائي العنصر
Ultrasonic	فوق الصوتي
Ungrounded	غير المؤرَّض
Unsolicited Reporting	الإبلاغ غير المطلوب
Upper Sensor Trim	ضبط أعلى الحساس
User-Defined Type – UDT	أنواع بيانات يعرّفها المستخدم

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
V-Cone Flowmeter	العداد المخروطي
Validation	التحقق
Valve Body	جسم الصمام
Valve Packing	حشوة الصمام
Valve Signature	بصمة الصمام
Valve Station	محطة الصمام
Valve Stem	ساق الصمام
Valve Transfer	نقل الصمامات
Valve Travel / Reversals	مجموع حركة الصمام وانعكاساته
Valve Trim	الأجزاء الداخلية للصمام
VBV (Variable Bleed Valves)	صمامات النزف المتغيرة
Vent	التنفيس
Venturi Tube	أنبوب فنتوري
Vernier Caliper	القدمة ذات الورنية
Vibrating Fork	الشوكة الهزازة
Vibrational Viscometer	مقياس اللزوجة الاهتزازي
Voltage Walking	تتبّع الفولتية
Volume Booster	المعزز الحجمي
Volume Bottle	وعاء الحجم

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Vortex Shedding Flowmeter	العداد الدوامي
Voting (MooN)	التصويت (M من N)
VSV (Variable Stator Vanes)	ريش الجزء الثابت المتغيرة
Warm-up	التسخين
Watchdog Timer	مؤقت المراقبة
Water-Tube Boiler	المرجل ذو أنابيب الماء
Waterfall Plot	المخطط الشلالي
Wedge Element	عنصر الإسفين
Welded Thermowell	الغمد الملحوم
Wet Calibration	المعايرة بالتعبئة
Wet Contact	التلامس الرطب
Wet Leg	الساق الرطبة
Wetted Parts	الأجزاء المبللة
Wheel Space	فراغ العجلة
Wild	الحر
Window Function	دالة النافذة
Wobbe Index	مؤشر ووب
Zener Barrier	حاجز زينر
Zener Diode	ديود زينر

المصطلح الإنجليزي	المقابل العربي المعتمد في الكتاب
Zirconia Oxygen Analyzer	محلل الأكسجين بالزركونيا
Zone	المنطقة

الملحق هـ: خطة الأجزاء القادمة

الفصول الآتية جزء من خطة الكتاب (120 فصلًا) وستصدر في الأجزاء اللاحقة بالأرقام المذكورة هنا؛ تُذكر هنا ليعرف القارئ موضع كل موضوع من الخطة، ولتبقى الإحالات إليها في هذا الجزء صحيحة.

الإشارات والصمامات وأسس التحكم: 45 الإشارات الصناعية والتوصيلات؛ 46 الريليهات ونقاط التلامس؛ 47 الحلقة المفتوحة والمغلقة وديناميكا العملية؛ 48 التحكم الضبابي والتنبؤي والتكيفي؛ 49 دوائر الأتمتة الكلاسيكية بالمرحلات والكونتاكتورات؛ 50 الأنظمة الكهروهوائية للأتمتة المنفصلة؛ 51 النمذجة الرياضية وتحليل الاستقرار (لابلاس، دوال التحويل، Bode/Nyquist، Routh).

الأنظمة والمشاريع والسلامة: 52 الوثائق والرسومات الهندسية؛ 53 دورة حياة المشروع؛ 54 الدراسات وورش العمل الهندسية؛ 55 SIS وESD وF&G وBMS؛ 56 عتاد PLC وتركيبه (الوحدات، CPU، الذاكرة، EMI، التأريض، الصواعق).

الآلات والتشغيل والتطبيقات: 57 التحكم في محطات توليد الطاقة؛ 58 FAT وSAT وفحص الحلقات (Loop Check) والتشغيل التجريبي (Commissioning)؛ 59 التشغيل والصيانة وإدارة الأصول؛ 60 مشروع تطبيقي متكامل لوحدة ضغط غاز؛ 61 تطبيقات الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في القطاعات الصناعية؛ 62 المعايير والأكواد الدولية؛ 63 النماذج والتمارين والمصطلحات.

أنظمة الحقل والمرافق والقياس التجاري: 64 هواء الأجهزة والأنظمة الهوائية؛ 65 الأنظمة الهيدروليكية؛ 66 لوحات التحكم برؤوس الآبار WHCP؛ 67 تهيئة غاز الوقود والتحكم به؛ 68 القياس التجاري للغاز وحساب الطاقة؛ 69 أنظمة مراقبة الانبعاثات CEMS.

بنية الأنظمة وجودة التشغيل والتحديث: 70 التغذية الكهربائية لأنظمة التحكم وUPS؛ 71 هندسة لوحات التحكم؛ 72 الاعتمادية والتوافر والتكرار الاحتياطي؛ 73 إدارة الإنذارات وواجهة المشغل؛ 74 مزامنة الوقت وتسلسل الأحداث؛ 75 تحديث الأنظمة القديمة ومشاريع المنشآت القائمة (Brownfield).

التصميم التفصيلي واختيار الأجهزة: 76 حسابات وتصميم الصمامات المتقدم؛ 77 هندسة تركيب الأجهزة في الموقع؛ 78 الكابلات والحواجز والأمان الجوهري؛ 79 عدم اليقين والمترولوجيا المتقدمة؛ 80 المشتريات والموردون وأنظمة الحزم (Packages).

السلامة الوظيفية ودراسات المخاطر بالتفصيل: 81 دورة حياة SIS وكتابة SRS؛ 82 حسابات SIL والتحقق من بنية الحماية؛ 83 اختبارات الإثبات وإدارة التجاوزات؛ 84 سلامة العمل الميداني في أعمال الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم (PTW، LOTO، SIMOPS، البحري).

البرمجيات والشبكات والأمن الصناعي: 85 هندسة برمجيات PLC وDCS؛ 86 SCADA والاتصالات البعيدة وخطوط الأنابيب؛ 87 هندسة HMI والمؤرخات وإدارة البيانات؛ 88 التحقق والمحاكاة والتوأم الرقمي؛ 89 الدعم الفني البعيد والمراقبة عن بُعد.

التوربينات والآلات الدوارة ومحطات الطاقة: 90 التحكم المتقدم بالتوربينات الغازية؛ 91 حماية التوربينات والأنظمة المساعدة؛ 92 واجهات التحكم مع المولدات والمحركات؛ 93 التحكم المتكامل بالمضخات والضواغط؛ 94 منصات التحكم بالتوربينات الغازية (Woodward، Speedtronic وغيرها)؛ 95 ترقية أنظمة التحكم بالتوربينات؛ 96 أنظمة الاحتراق DLN/DLE والتحكم بها؛ 97 دور مهندس التحكم في الصيانات الكبرى للتوربين (CI/HGPI/MI).

التطبيقات القطاعية: 98 إنتاج النفط والغاز ومعالجة الآبار؛ 99 معالجة الغاز والغاز المسال؛ 100 المصافي والبتروكيماويات والأسمدة؛ 101 الخزانات وخطوط الأنابيب ومحطات التحميل؛ 102 المياه والتحلية والمرافق الصناعية؛ 103 الطاقة المتجددة

وأنظمة الطاقة الهجينة؛ 104 الصناعات التصنيعية والتحكم الدفعي؛ 105 الأتمتة على المنصات البحرية.

التنفيذ والتشغيل والصيانة والممارسة المهنية: 106 إدارة تنفيذ أعمال الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في الموقع؛ 107 FAT وIFAT وSAT بالتفصيل؛ 108 إدارة فحص الحلقات وإكمال الأنظمة (System Completion)؛ 109 التشغيل التجريبي وبدء التشغيل (Start-Up) واختبارات الأداء؛ 110 استراتيجيات الصيانة وCMMS؛ 111 دليل تشخيص الأعطال الميداني المتقدم؛ 112 تحسين الأداء باستخدام البيانات؛ 113 إدارة المعايير والامتثال الفني؛ 114 التكلفة والتخطيط وإدارة المخاطر الهندسية؛ 115 دراسات حالة متكاملة؛ 116 مشاريع تدريبية شاملة لمهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم؛ 117 التطوير المهني والشهادات والأسئلة الشائعة؛ 118 تدقيق أنظمة الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم ومؤشرات الأداء؛ 119 كتابة إجراءات التشغيل والصيانة (SOP) والتدريب الفني؛ 120 قيادة فريق الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم وإدارة العقود.

والملاحق المخططة للأجزاء القادمة: قاموس موسّع، الاختصارات الهندسية، الرموز والرسومات، الوحدات والتحويلات، نماذج وثائق التصميم والدراسات والاختبارات والتشغيل، قوائم التحقق الميدانية، ومسائل تدريبية.

الملحق و: ثبت الأشكال

الشكل	العنوان	الصفحة
1-1	التصميم الوظيفي والتصميم المكاني نصفان مختلفان في طبيعتهما، لكل منهما سؤاله ومخرجاته…	22
1-2	مهندس الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم في مركز تبادل المعلومات مع التخصصات الأخرى	24
1-3	القياس الواحد في مثال غاز الوقود وقد صار أربع وظائف: مرسل PT-101 للعرض والتنظيم عبر…	26
1-4	سلّم الكفاءة المهنية: أربع درجات وثلاث نقلات، وكل نقلة تغيير في طبيعة العمل لا في كميته	30
1-5	ورقة الفجوة بمقياس الإتقان الأربعي لمهندس واحد (مثال توضيحي): الفجوة هي المطلوب ناقص…	34
1-6	دورة حياة المنشأة من الدراسة إلى الإحلال، وتحت كل مرحلة أهم مخرجات مهندس الآلات الدقيقة…	38
1-7	عدم اليقين في قياس التدفق بلوح الفتحة في المثال المحلول: خطأ المرسل ±0.075% من المدى)…	45
1-8	الحالة الميدانية: مزدوجة حرارية سليمة ومعايَرة، لكن قطبية كابل التمديد معكوسة في صندوق…	46
2-1	ظروف التشغيل والتصميم لوعاء واحد على محور الضغط: نطاق التشغيل حول القيمة العادية، ثم…	54

الشكل	العنوان	الصفحة
2-2	موازنة الكتلة في خزان المثال: فرق 10 m^3/h بين الداخل والخارج يرفع المستوى مترًا كل ساعة…	55
2-3	استجابة الخطوة في نوعي العمليات: (أ) ذاتية التنظيم تستقر عند قيمة جديدة ويُقرأ منها…	59
3-1	حلقة القياس والتحكم: مسار القياس من العملية إلى المتحكم، ومسار الأمر من المتحكم إلى…	65
3-2	ثلاث بنى للتحكم: (أ) الحلقة المفتوحة تحسب الأمر من الهدف أو من جدول مسبق ولا تقيس الناتج	67
3-3	استجابة السخان في المثال المحلول لاضطراب قدره 12 °C عند الدقيقة 5: الحلقة المفتوحة تبقى…	72
3-4	نموذج ثلاثي الأبعاد لخزانة توزيع وتجميع الإشارات: كابلات الحقل تدخل من الأسفل عبر لوحة…	76
3-5	حلقة 4–20 mA ثنائية الأسلاك: مصدر 24 V في بطاقة الإدخال يغذي المرسل، والتيار نفسه يمر…	78
3-6	الإشارات المنفصلة: (أ) تلامس جاف تبلّله بطاقة الدخل، مقابل تلامس رطب يأتي جهده من…	83
3-7	ما يضيع في التحويل التناظري الرقمي: (أ) ما بين العيّنات حين يكون زمن المسح أبطأ من التغير	85
3-8	مقاييس الإشارات القياسية متراصفة: كل مستوى أفقي يقابل النسبة نفسها من المدى في كل إشارة	89
3-9	هرم الأتمتة وفق ISA-95 من الحساسات في المستوى 0 إلى تخطيط الأعمال في المستوى 4	92

الشكل	العنوان	الصفحة
3-10	ميزانية التأخير على طول سلسلة القياس من الحساس إلى تصرف المشغل: الغمد والحساس أكبر...	94
3-11	تأخيرات العملية: (أ) استجابة الرتبة الأولى لسعات مختلفة	96
4-1	مراجع الضغط الثلاثة: المطلق يُقاس من الفراغ التام، والنسبي من الضغط الجوي، والتفاضلي...	112
4-2	تحويل الضغط إلى تيار لمرسل مداه من −100 إلى +300 mbar	113
4-3	الفرق بين الخطأ المنهجي والخطأ العشوائي: جهاز متكرر لكنه منزاح يُصحَّح بالمعايرة، أما...	115
4-4	(أ) الخطأ المركب لحلقة من أربعة مصادر مستقلة...	118
5-1	رموز الأجهزة وفق ANSI/ISA-5.1: شكل الرمز يبيّن نوع التنفيذ، والخط داخله يبيّن مكان الوصول	127
5-2	أنواع خطوط الإشارة على مخطط P&ID كما في الجدول السابق	128
5-3	تشريح الوسم FIC-101A-20: رقم الوحدة، ثم الحرف الأول للمتغير المقاس، ثم حروف الوظائف...	131
5-4	أوضاع الفشل لصمام التحكم	133
5-5	أدوات قراءة P&ID: (أ) الاتصال والتقاطع، وحدود الحزمة والنطاق ونقطة الواجهة	139
6-1	القواعد الأساسية لتركيب خطوط النبض: المرسل فوق نقطة الأخذ في الغاز، وأسفلها في السائل...	153
6-2	ثلاثة تصاميم شائعة لمانيفولد مرسل الضغط التفاضلي: الثلاثي، والخماسي بتنفيس لكل جانب...	157

الشكل	العنوان	الصفحة
6-3	مقطع ثلاثي الأبعاد في مرسل ضغط تفاضلي سعوي: غشاءا العزل HP وLP، وسائل الملء الذي ينقل…	160
6-4	اختيار مدى المقياس بحيث يقع التشغيل العادي في الثلث الأوسط، وثلاثة ملحقات شائعة…	163
6-5	مقطع ثلاثي الأبعاد في مقياس ضغط بأنبوب بوردون: يدخل الضغط من الوصلة الملولبة إلى أنبوب…	164
6-6	مجالات عمل حساسات الفراغ الشائعة على مقياس لوغاريتمي، مع النطاق النموذجي لضغط مكثف…	167
6-7	تتبع الحالة الميدانية 6.11: مآخذ لوح الفتحة متصالبة على منفذي المرسل، وعمود متكثف في خط…	169
7-1	استجابة حساس الحرارة لقفزة في حرارة الوسط وفق نموذج الرتبة الأولى: تبلغ القراءة 63.2%…	174
7-2	دائرة المزدوج الحراري من الوصلة الساخنة إلى أطراف المرسل، حيث تقع الوصلة الباردة ويقيس…	178
7-3	منحنيات الجهد مقابل الحرارة للأنواع الشائعة من المزدوجات الحرارية بوصلة مرجعية عند 0…	178
7-4	توصيل RTD بسلكين وثلاثة وأربعة أسلاك	184
7-5	مخروطا الطاقة 90% و99% لبيرومتر تحت الأحمر: عند البؤرة (نحو 915 mm) قطر البقعة نحو 15…	197
7-6	تجميعة غمد حراري مشفه على أنبوب: فوهة ملحومة، وشفة الغمد بمساميرها، وغمد مستدق يمتد…	198
7-7	أبعاد الغمد الحراري الملولب المستدق ومصطلحاتها في ورقة الطلب: طول الغمر U، وبدل السن…	201

الشكل	العنوان	الصفحة
7-8	أقصى سرعة مائع مقبولة كفحص تمهيدي لأغماد الفولاذ المقاوم للصدأ الملولبة 3/4 in NPT بحسب…	205
7-9	ترتيبان لفحص حلقات الحرارة: محاكاة الحساس بمعاير mV أو صندوق مقاومات لفحص المرسل وحده…	211
7-10	المديات النموذجية لحساسات الحرارة الصناعية والمخبرية	215
8-1	توزيع الضغط على طول الأنبوب عبر لوح الفتحة: أدنى ضغط عند الانقباض الأعظمي، ثم يستعيد…	226
8-2	منظر ثلاثي الأبعاد للوح فتحة بين شفتين مع مأخذي الشفة والمانيفولد ومرسل الضغط التفاضلي…	227
8-3	علاقة الجذر التربيعي بين الضغط التفاضلي والتدفق، وأثر تطبيق الجذر مرتين، وضيق الإشارة…	229
8-4	مقطع ثلاثي الأبعاد في عداد تدفق كهرومغناطيسي: ملفان مغناطيسيان فوق الأنبوب وتحته يولدان…	232
8-5	مقياسان بسيطان لا يحتاجان إلى تغذية: مقياس المساحة المتغيرة، والهدار ذو الفتحة V الذي…	237
8-6	مبدأ عداد كوريوليس: أنبوبان يهتزان بلا تدفق بطور واحد، ومع التدفق تلوي قوة كوريوليس…	242
8-7	نموذج ثلاثي الأبعاد لعداد كوريوليس ثنائي الأنبوب مقطوع: المقسم عند المدخل، والأنبوبان…	243
8-8	هندسة عداد زمن العبور: محولان بزاوية θ على مسار طوله L، والنبضة مع التيار أسرع من…	246
8-9	العداد التوربيني ومنحنى معامل K مقابل التدفق مع المدى الخطي، والعداد الدوامي وشارع…	251

الشكل	العنوان	الصفحة
8-10	أثر نوع الخطأ على الدقة عبر المدى: خطأ ثابت بالنسبة إلى المدى الكامل يتضخم عند التدفقات…	254
8-11	خمس طرق للتحقق من عداد التدفق في الموقع، مرتبة من الأدق إلى الأبسط: الطريقة الوزنية…	263
8-12	عداد التدفق الحراري الكتلي: نمط القدرة الثابتة (يُقاس فرق الحرارة الذي ينخفض مع التدفق)…	268
8-13	عدادات أقل شيوعًا: الدوّامي اللولبي، والموائعي، والترس البيضاوي، والقرص المتأرجح، ولوح…	273
9-1	وعاء واحد وست تقنيات لقياس المستوى: مرسل ضغط تفاضلي بساق مرجعية رطبة، ورادار غير تلامسي…	280
9-2	ترتيب المثال المحلول: وعاء مغلق بساق رطبة مملوءة بالماء، ومرسل بمدى سالب من 294.3− إلى…	284
9-3	مبدأ الرادار غير التلامسي: يقيس المسافة من الهوائي إلى السطح فيُحسب المستوى بطرحها من…	288
9-4	كواشف الإشعاع في القياس الصناعي: (أ) مناطق عمل الكاشف الغازي مع الجهد (مقتبس من R60)	292
9-5	توضيح نوعي للانتفاخ: بعد زيادة مفاجئة في الطلب ينخفض ضغط الدرم ويرتفع المستوى المقاس…	294
9-6	مصفوفة اختيار تقنية المستوى بحسب الخدمة: أخضر مناسب، أصفر ممكن بشروط، أحمر غير مناسب	302
9-7	منحنى الحجم مقابل المستوى لوعاء أفقي أسطواني: العلاقة غير خطية، وميلها…	306

الشكل	العنوان	الصفحة
10-1	مكونات نظام التحليل الاستخلاصي من نقطة الأخذ إلى المحلل ثم إلى التصريف، مع الحلقة السريعة	312
10-2	زمن النقل في خط المثال بدلالة ضغطه	314
10-3	مخطط لنظام أخذ عينات كامل: المجس وصمام العزل الأول على الأنبوب، وخط العينة المسخّن، ثم…	316
10-4	مبدأ الكروماتوغراف الغازي: صمام حقن يُدخل حجمًا ثابتًا من العينة في تيار الغاز الحامل…	317
10-5	أربعة مبادئ شائعة في محللات الغاز: الامتصاص في الأشعة تحت الحمراء لغازات مثل CO وCO_2…	319
10-6	مجس pH المركّب ومعادلة نرنست: قطب زجاجي بمحلول منظّم داخلي pH 7، وقطب مرجعي Ag/AgCl في…	323
10-7	مسقط تخطيطي لغرفة محللات وفق IEC 61285: تهوية ميكانيكية بضغط موجب ومراقبة تدفقها…	328
10-8	مخطط قرار التحقق والمعايرة الدورية لمحلل غاز: لا يُضبط المحلل إلا إذا خرج التحقق بغازي…	330
10-9	العلاقة بين نقطة ندى الماء ومحتوى الماء (ppmv) في الغاز عند ضغوط مختلفة…	333
11-1	مسافات الكشف الاسمية والحقيقية والمضمونة لحساس حثّي M18، وأثر عامل تصحيح المادة على…	345
11-2	توصيل حساس قرب ثلاثي الأسلاك: الخرج PNP يصل الحمل بالموجب، والخرج NPN يصله بالسالب	347
11-3	مستويات التيار في دائرة NAMUR، وكيف يميّز المضخّم الفاصل بين حالتي الحساس وأعطال الخط	348

الشكل	العنوان	الصفحة
11-4	مفتاح ضغط زيت التزييت في المثال: يفتح التلامس عند 1.0 bar ولا يعود إلا بعد تجاوز 1.2…	354
11-5	ترتيب اختبار مفتاح ضغط على المنضدة: مضخة يدوية ومرجع ضغط رقمي على خط واحد مع المفتاح…	356
11-6	إشارات المشفّر التزايدي: القناتان A وB بإزاحة 90°، والنبضة المرجعية Z مرة في كل دورة	364
11-7	تركيب LVDT ومنحنى خرجه: سعة الجهد تعطي مقدار الإزاحة عن نقطة الوسط، والطور يعطي اتجاهها	367
12-1	قياس الكثافة بمرسل ضغط تفاضلي موصول بمأخذين على الخزان بينهما مسافة رأسية ثابتة h	377
12-2	قنطرة ويتستون داخل خلية الحمل، ونظام وزن خزان بثلاث خلايا وصندوق جمع ومؤشر وزن	382
12-3	محول LVDT: الملف الابتدائي بين ملفين ثانويين موصولين بتعاكس الطور وقلب متحرك، وجهدا…	386
12-4	نموذج ثلاثي الأبعاد لمحول LVDT مقطوع: الغلاف الفولاذي، والملفات الثلاثة على الأنبوب…	387
12-5	مبادئ أربع تقنيات للإزاحة والمسافة: المقاومة المتغيرة، والمغناطيسي التضييقي بزمن عودة…	391
12-6	(أ) السنكرو: نقل زاوية عن بعد بثلاثة أسلاك ستاتور	394
12-7	طبقات الحماية من الضغط الزائد على وعاء وترتيبها بالضغط: التحكم الأساسي، إنذار الضغط…	403
12-8	قراءات نموذجية لأدوات القياس الميكانيكية الدقيقة: (أ) قدمة بورنية 0.05 mm تقرأ 24.25 mm	407

الشكل	العنوان	الصفحة
13-1	مصادر الطاقة حول عمل أجهزة نموذجي على خط غاز فيه كبريتيد الهيدروجين: التغذية الكهربائية...	418
13-2	هرمية طرق العزل الميكانيكي: العزل بصمام واحد للأعمال منخفضة الخطورة، ثم العزل المزدوج...	423
13-3	الطاقة المختزنة التي لا يطفئها زر الإيقاف: (أ) تفريغ مكثف ناقل التيار المستمر في محرك...	427
13-4	تسلسل العزل والقفل من التحضير إلى إعادة الخدمة في عشر خطوات، مع صندوق الأقفال الجماعي...	432
14-1	سلسلة التتبعية المترولوجية من وحدات SI إلى جهاز المصنع	442
14-2	أخطاء «كما وُجد» في المثال صعودًا ونزولًا مقابل حد القبول	448
14-3	مراحل المرسل الذكي والضبط الخاص بكل مرحلة: ضبط الحساس بضغط مرجعي، وتغيير المدى تهيئة...	448
14-4	التسلسل العام لأي معايرة، من مراجعة بيانات الجهاز إلى إعادته للخدمة وإصدار الشهادة	455
14-5	معايرة حلقة الحرارة بطريقتين: المنظومة الكاملة في فرن جاف مع مجس مرجعي، أو محاكاة...	457
14-6	ثلاث طرق لمعايرة عداد التدفق بتمرير كمية حقيقية: الوزنية، والحجمية، والعداد المرجعي	460
14-7	معايرة مرسل مستوى بالضغط التفاضلي في خزان مفتوح، ومبدأ التحقق من مرسل الرادار بالمسافة...	462
14-8	ترتيب معايرة مرسل الضغط التفاضلي بجهاز HART: مضخة ومرجع ضغط على الجانب العالي، والجانب...	465

الشكل	العنوان	الصفحة
14-9	أوضاع صمامات مانيفولد الصمامات الثلاثة لمرسل الضغط التفاضلي: في الخدمة، ثم معزولًا...	469
14-10	معاير العمليات: (أ) أوضاع SOURCE وSIMULATE وMEASURE ومن يغذي الحلقة في كل منها	480
15-1	الأنواع الشائعة لصمامات التحكم بمقاطع تخطيطية: الكروي بقفص، والفراشة، والكرة القطاعية...	489
15-2	مقطع تخطيطي لصمام تحكم كروي بقفص، الجريان إلى الفتح، مع مشغل غشائي نابضي هواء للفتح...	490
15-3	الخصائص المتأصلة الثلاث عند ضغط تفاضلي ثابت (اليسار)، والخاصية المركبة لصمام نسبة...	495
15-4	التدفق مقابل جذر الضغط التفاضلي لصمام كروي على سائل: خط مستقيم حتى حد الاختناق ثم ثبات...	497
15-5	اختيار حجم الصمام في مثال السائل: المطلوب Cv 33.8 عاديًا و44 أقصى	499
15-6	مسار الضغط في مثال توضيحي: في الترم أحادي المرحلة يهبط الوريد المنقبض دون ضغط البخار...	505
15-7	أنواع المشغلات ووضع الفشل: الغشائي المباشر (هواء فوق الغشاء) والعكسي (هواء تحته) يحددان...	509
15-8	مخطط الجسم الحر لقوى الساق والكباس في صمام كروي غير متوازن بمشغل غشائي نابضي: قوة...	512
15-9	منحنى العزم المطلوب لصمام فراشة على الشوط مقابل عزم مشغلين: الرف والترس بعزم ثابت...	513
15-10	حلقة الموضّع داخل حلقة التحكم: يقارن الموضّع بين المطلوب من المتحكم والموضع الفعلي من...	519

الشكل	العنوان	الصفحة
15-11	ترتيب ملحقات صمام التحكم في مسار الهواء والإشارة: من هواء الأجهزة عبر المرشح والمنظم…	523
15-12	الصمام الملفي: (أ) مقطع تخطيطي لصمام 3/2 مباشر الفعل في وضعي عدم التغذية…	525
15-13	محطة صمام التحكم (Control Valve Station) برموز ISA: صماما عزل قبل الصمام وبعده، وتجاوز…	533
15-14	(أ) تصنيف المشغلات: كهروميكانيكية، وبقدرة الموائع، وبالمواد الفعالة	545
15-15	الحالة في القسم 15.16: تذبذب المستوى بدورة ثابتة مع خرج منشاري (اليسار)، واختبار…	552
16-1	تصنيف الصمامات الصناعية بالحركة (خطية، ودورانية ربع لفة، وذاتية التشغيل) وبالوظيفة…	558
16-2	مقطع تخطيطي لصمام بوابي بغطاء مربوط بالبراغي وساق صاعدة بلولب خارجي ونير (OS&Y) وهو…	561
16-3	خمسة أنواع من صمامات عدم الرجوع بمقاطع تخطيطية: المتأرجح (Swing)، والرفعي (Lift)…	563
16-4	منظم مخفض للضغط (يمين): ارتفاع ضغط المصب P2 تحت الغشاء يرفعه ضد النابض فيغلق الكباس	566
16-5	(أ) منحنى المنظم: ضغط الإغلاق عند التدفق الصفري، والانحدار مع التدفق، وانهيار الضغط عند…	569
16-6	محطة تخفيض ضغط غاز الوقود على مرحلتين (60 ← 10 ← 2 barg) بمنظمات ذاتية التشغيل: مرشح…	572
16-7	صمامات الأمان وتنفيس الضغط: صمام الأمان مغلقًا (1) ومنفّسًا (2) مع أجزائه…	578

الشكل	العنوان	الصفحة
16-8	(أ) حدث تنفيس على محور الزمن: ارتفاع من ضغط التشغيل، والفتح عند الضبط، وبلوغ السعة عند…	581
16-9	(أ) تركيب صمام الأمان على وعاء: خط دخول قصير فقده أقل من 3% من ضغط الضبط، وصماما عزل…	584
17-1	البوابات المنطقية الأساسية برمزها الأمريكي (ANSI/IEEE 91) ورمزها الدولي (IEC 60617-12)…	595
17-2	تبسيط دالة بثلاثة متغيرات بخريطة كارنو: مجموعة من أربع خانات تعطي C، ومجموعة من خانتين…	598
17-3	قلاب SR من بوابتي NOR متقاطعتين، والمخطط الزمني للقلاب D الذي لا يتغير خرجه إلا عند…	601
17-4	سلوك المؤقتات القياسية الثلاثة لإشارة دخل واحدة بزمن ضبط 3 ثوانٍ	602
17-5	دائرة البدء والإيقاف بالإمساك بشكليها: سلّم المرحلات، والبوابات المكافئة التي تعيد فيها…	604
17-6	منطق التصويت اثنان من ثلاثة (2oo3) مبنيًا من ثلاث بوابات «و» وبوابة «أو»، مع جدول حقيقته	605
17-7	مخطط منطق ثنائي مبسط لحماية مضخة: تصويت اثنين من ثلاثة على المستوى المنخفض جدًا، وأسباب…	606
17-8	مقتطف تعليمي مجهّل من مصفوفة السبب والنتيجة لوحدة تحكم توربين غازي…	612
18-1	التحكم On-Off بمنطقة محايدة 1 °C± حول 80 °C: الحرارة تتأرجح بين الحدين، والخرج مربع الموجة	620
18-2	الفعل التناسبي وحده على عملية من الرتبة الأولى بزمن ميت: إلى اليسار استجابة قفزة نقطة…	621

الشكل	العنوان	الصفحة
18-3	تشبع الفعل التكاملي: نقطة ضبط 95% لا يستطيع الصمام بلوغها	625
18-4	أشكال خوارزمية PID الثلاثة: المتوازية بثلاثة كسوب مستقلة، والمثالية (ISA) بكسب واحد…	626
18-5	تجربة قفزة في الحلقة المفتوحة على حلقة PIC-102: قفزة 10% في الخرج تعطي تغيرًا 15% في…	633
18-6	الطرق الأربع على العملية نفسها (K = 1.5، τ = 40 s، θ = 8 s): زيغلر–نيكولز وكوهين–كون…	635
18-7	خريطة الأداء ثلاثية الأبعاد لمتحكم PI على العملية نفسها: تكامل الخطأ المطلق (IAE) مقابل…	636
18-8	حلقة مستوى وعاء الشفط LIC-101 كعملية تكاملية: (أ) خطوة في الخرج تعطي ميلًا ثابتًا لا…	639
18-9	ستة أنماط شائعة على شاشة المؤرخ (PV بالأزرق وOP بالبرتقالي): كسب عالٍ، زمن تكامل قصير…	640
18-10	حلقة تدفق FIC-101 في التشغيل التجريبي بالقيم الافتراضية للنظام (يمين) ثم بعد ضبط SIMC…	646
18-11	التحويل من اليدوي إلى الآلي: بلا تتبع يقفز الخرج إلى القيمة التي تركها المتحكم قبل…	648
18-12	خريطة تهيئة كتلة PID: إلى جانب معاملات الضبط الثلاثة تحتاج الكتلة إلى تهيئة مدخل PV…	650
19-1	دورة المسح في PLC وزمن الاستجابة الأسوأ: التغير الذي يصل بعد قراءة المداخل مباشرة ينتظر…	666
19-2	منطق تشغيل محرك بالإمساك الذاتي مكتوبًا بأربع لغات: LD وFBD وST وIL	670

الشكل	العنوان	الصفحة
19-3	توزيع منطق مضخة حقن الماء P-201 على اللغات الأربع بحسب طبيعة كل جزء: السماحيات…	673
19-4	المخططات الزمنية للمؤقتات الثلاثة على المدخل نفسه (ضبط 5 s): TON لا يرى النبضة القصيرة…	680
19-5	سطر تشغيل مضخة في LD: البدء المحلي أو البعيد على التوازي مع تلامس الإمساك، وعلى التوالي…	682
19-6	مخطط SFC لتسلسل بدء المضخة الاحتياطية P-102 في مشروع الكتاب: من الانتظار إلى فتح صمام…	685
19-7	سلسلة التحجيم من تيار الحلقة إلى القيمة الخام إلى الضغط الهندسي (0– 10 bar) على بطاقة…	689
19-8	هيكل برنامج مقترح: مهمة مستمرة لمعالجة المداخل والمنطق والمخارج بهذا الترتيب، ومهمة…	693
19-9	المنطق نفسه بمخطط الكتل الوظيفية: مقارنتان تغذيان ممسكًا RS أولويته للإيقاف، ثم كشف…	697
20-1	تشريح كتلة وظيفية: المداخل إلى اليسار والمخارج إلى اليمين، والمعاملات الثابتة، واسم…	710
20-2	البوابات المنطقية الست برموز IEC 60617 وجداول حقيقتها	714
20-3	(أ) مقارن عادي يرتجف قرب الحد، ومقارن بتخلف 0.3 bar يعطي انتقالًا واحدًا في كل اتجاه	717
20-4	المخططات الزمنية على المدخل نفسه: تأخير التشغيل TON يتجاهل النبضة القصيرة، وتأخير…	718
20-5	الممسك بأولوية الضبط (SR) والممسك بأولوية الإعادة (RS)	720

الشكل	العنوان	الصفحة
20-6	(أ) ثلاث مزدوجات لحرارة العادم وثلاث كتل اختيار: حين تنقطع المزدوجة C وتقرأ أعلى المدى…	722
20-7	أربع كتل تشكّل الإشارة: (أ) مرشح التأخير بثابت زمني 2 s يؤخر وصول القراءة إلى حد الفصل…	729
20-8	(أ) التحجيم من 0–27648 إلى 0–10 bar	733
20-9	حلقة تحكم بالكتل: PID ثم محطة يدوي/آلي ثم حاصر إلى الصمام PV-302	733
20-10	منطق تشغيل المضخة P-101 بالكتل: AND للسماح، وAND للبدء المسموح، وOR لأسباب الإيقاف…	743
20-11	حلقة ضغط بثلاثة مرسلات: فحص جودة لكل مرسل، ثم الوسيط، ثم PID ومحطة يدوي/آلي وحاصر إلى…	745
20-12	(أ) ثلاث قراءات لضغط واحد، ومخرج اختيار الأعلى والأدنى والوسيط حين ينهار أحد المرسلات…	753
20-13	سلسلة حماية نموذجية لضغط الشفط المنخفض جدًا للضاغط K-301: ثلاث قراءات إلى كتلة الوسيط…	757
21-1	معمارية DCS نموذجية: متحكمات مكررة في غرف أجهزة ميدانية، كل منها مع إدخال وإخراج محلي…	767
21-2	وحدة تحكم مكررة: مصدرا تغذية من مغذيين مستقلين، ومعالج أساسي واحتياطي بينهما وصلة…	771
21-3	نظام SCADA لخط أنابيب: مركز تحكم بخادمين مكررين، ووحدات طرفية في محطات الضخ والصمامات…	772
21-4	شجرة قرار مبسطة لاختيار نوع النظام: المسافة وجودة الرابط أولًا، ثم نسبة التحكم المستمر…	774

الشكل	العنوان	الصفحة
21-5	الضغط في المؤرخ: القيم الخام كل ثانية (رمادي)، والنقاط المحفوظة بسماحية 0.5% (أزرق)…	780
21-6	توزيع الغرف في وحدة نموذجية: غرفة أجهزة ميدانية قرب الوحدة تستقبل الكابلات الميدانية…	783
21-7	معمارية التحكم لوحدة ضغط الغاز: DCS للحلقات والعرض، وPLC الحزمة للضاغط ومضختيه برابط…	791
22-1	صفحة الحلقة (Faceplate) وعناصرها: القيمة المقاسة (PV) ونقطة الضبط (SP) وخرج المتحكم…	801
22-2	نظام السلامة في واجهة التشغيل: مسار عرض في اتجاه واحد من حلّال منطق السلامة إلى نظام…	806
22-3	عبء الإنذار في المثال المحلول: 12 إنذارًا في الساعة لكل مشغّل مقابل المرجع 6، وثلاثة…	811
22-4	(أ) هرمية الشاشات في أربعة مستويات وفق ISA-101، من النظرة العامة إلى التشخيص	813
22-5	دورة حياة الإنذار وحالاته مع ألوان العرض في معيار الشاشات المذكور: طبيعي، ثم إنذار غير…	815
22-6	معايير EEMUA 191 لأداء نظام الإنذار: معدل الإنذار في التشغيل المستقر والاضطراب…	818
23-1	في الأعلى رحلة الإشارة من المرسل إلى محطة التشغيل: جزؤها الأول تناظري بزوج كابل لكل…	827
23-2	طبقات النموذج المرجعي OSI السبع، وكيف يستخدم كل من Modbus RTU وModbus TCP وPROFINET…	829

الشكل	العنوان	الصفحة
23-3	طبولوجيا الشبكات الصناعية الأربع: الخطية بمقاومات الإنهاء، والنجمية حول مبدل، والحلقية…	830
23-4	توصيل خط RS-485 ثنائي الأسلاك: سيد وثلاثة توابع في سلسلة متتابعة، ومقاومتا إنهاء في…	831
23-5	بنية إطار Modbus RTU، ومثال كامل لطلب قراءة سجلين من التابع رقم 3 والرد عليه بالبايتات…	834
23-6	إلى اليمين قطعة Foundation Fieldbus H1 بمكيف التغذية والخط الرئيسي وصناديق التوصيل…	837
23-7	منظر ثلاثي الأبعاد لقطعة شبكة حقلية: الخط الرئيسي على حامل الكابلات من خزانة التحكم…	837
23-8	إشارة HART مركبة فوق تيار الحلقة: موجة FSK بسعة ±0.5 mA متوسطها صفر فلا تغير القيمة…	839
23-9	(أ) مقطع كابل نحاسي بأربعة أزواج مجدولة وحجب شامل، ومقطع ليف بصري بقلبه وغلافه	844
23-10	شبكة WirelessHART متشابكة: سبعة أجهزة وبوابة، ولكل جهاز أكثر من جار، فإذا انقطع مسار…	853
23-11	إشارة RS-485 على راسم الذبذبات في ثلاث حالات: سليمة بحواف حادة، ورنين عند غياب الإنهاء…	855
24-1	إلى اليسار اختلاف الأولويات بين أمن تقنية المعلومات وأمن التقنيات التشغيلية مع فروق…	863
24-2	مثال لتقسيم منشأة إلى مناطق وقنوات وفق IEC 62443: منطقة المؤسسة، والمنطقة المنزوعة…	867

الشكل	العنوان	الصفحة
24-3	مسار هجوم نموذجي من بريد تصيد في شبكة المؤسسة إلى PLC والصمامات، وطبقات الدفاع في العمق…	868
24-4	مواضع الجدران النارية بين مناطق نموذج بيردو: جدار بين المؤسسة والمنطقة المنزوعة السلاح…	874
24-5	مسار الوصول البعيد الآمن: مهندس الصانع يدخل عبر بوابة VPN بتحقق ثنائي إلى خادم قفز في…	879
24-6	إلى اليمين شجرة قرار التحديث في بيئة OT، وإلى اليسار دورة الاستجابة للحوادث بمراحلها الست	880
25-1	وثيقة أساس التصميم بين مدخلاتها (مواصفات المالك، تصنيف المناطق الخطرة، بيانات التصميم…)	896
25-2	هرم الوثائق وترتيب الأسبقية عند التعارض: من التشريعات في القمة إلى توصيات المصنّعين في…	897
25-3	أنماط تشغيل المصنع الثلاثة في مخطط موقع مبسّط: تحكم مركزي من غرفة تحكم واحدة (CCR) تضم…	902
25-4	معماريات التكرار في حلّال المنطق: 1oo1 و1oo2D و2oo3 و2oo4D	908
25-5	قرار نوع الربط بين DCS ولوحة الحزمة: ما يُوقف المعدة سلكي مباشر (Hardwired)، وما يُعرض…	910
25-6	توزيع التغذية الكهربائية لأنظمة الآلات الدقيقة وأجهزة القياس والتحكم: مصدرا UPS مستقلان…	912
25-7	(أ) مقطع في الوصلة الضاغطة ذات الحلقتين: عند الشد باليد تكون الحلقتان حرتين على…	922
25-8	الفصل بين الكابلات (Segregation): (أ) مسافة لا تقل عن 300 mm (12 in) بين كابلات القوى…	927

الشكل	العنوان	الصفحة
25-9	تأريض الحجب من طرف واحد: يُترك الحجب معزولًا (مقطوعًا ومغلفًا) عند الجهاز، ويُمرَّر في…	928
25-10	هبوط ضغط خزان هواء الأجهزة بعد توقف الضواغط في المثال المحلول: خزان 16.9 m³ يهبط من 8…	934
26-1	مثلث الاشتعال: تصنيف المناطق يصف الوقود والأكسجين، وأجهزة Ex تمنع مصدر الاشتعال	944
26-2	مثال لتصنيف المناطق حول خزان تخزين بتنفيس إلى الجو: المنطقة 0 داخله، والمنطقة 1 حول…	946
26-3	مجموعات الغازات من IIA إلى IIC بتصاعد الخطورة، وفئات الحرارة من T1 إلى T6 بأقصى حرارة…	948
26-4	خمسة مبادئ مختلفة لمنع الاشتعال: الغلاف المقاوم للهب يحتوي الانفجار، والأمان الجوهري…	951
26-5	مقطع ثلاثي الأبعاد في غلاف مقاوم للهب: جدران سميكة تتحمل ضغط الانفجار الداخلي، وشفة…	952
26-6	التحقق من حلقة أمان جوهري بالمعاملات الكيانية: خرج الحاجز مقابل ما يتحمله المرسل، وسعة…	954
26-7	(أ) حاجز زينر: المصهر F والمقاومة R على التوالي، وديودا زينر على التوازي إلى قضيب أرضي…	958
26-8	ترتيب نموذجي لخزانة التجميع: كابلات الميدان الجوهرية الزرقاء تدخل أطرافًا زرقاء في…	963
26-9	منحنى الزمن والتيار لمصهر سريع (F) ومصهر بطيء (T) بالتيار المقنن نفسه: عند تيار…	965

الشكل	العنوان	الصفحة
26-10	قراءة علامة جهاز Ex نموذجية: العلامة، ونوع الحماية بمستواه، ومجموعة الغاز، وفئة…	971
27-1	قمع اختيار الجهاز: المرشح الأول طبيعة المقاس والمائع، والثاني العملية والوظيفة والأداء…	986
27-2	المصفوفة المرجّحة لاختيار عداد غاز الوقود مرسومة أشرطة مكدسة: مساهمة كل معيار…	995
27-3	تكلفة دورة الحياة لعشر سنوات لأربعة عدادات على خط غاز الوقود في المثال: الشراء والتركيب…	996
27-4	اختيار المدى المعاير للمرسل: المدى المعاير من LRV إلى URV داخل حدود الحساس LRL وURL…	998
27-5	بنية ورقة بيانات مرسل ضغط تفاضلي وفق ISA-TR20.00.01: رأس ببيانات الوثيقة، ثم البيانات…	1000
27-6	مخطط مستوى لوعاء فاصل: خط المرجع والفوهات بارتفاعاتها، ومرسل الضغط التفاضلي ومؤشر…	1002
27-7	دورة حياة ورقة البيانات: بيانات عمليات أولية في مرحلة FEED ومراجعات بالحروف، ثم تجميد…	1003
28-1	تسلسل الضوابط (Hierarchy of Controls): من الأكثر فاعلية، وهو إزالة الخطر بتغيير…	1009
28-2	دراسات المخاطر على امتداد دورة حياة المشروع، من HAZID في المرحلة المفاهيمية إلى HAZOP…	1010
28-3	مصفوفة مخاطر نموذجية بخمس درجات للاحتمالية وخمس للشدة	1011
28-4	خطوات HAZOP لكل عقدة: تحديد غرض التصميم، ثم المتغير والكلمة الإرشادية والانحراف، ثم…	1015

الشكل	العنوان	الصفحة
28-5	عقدة HAZOP نموذجية: فاصل ثلاثي الطور مع صمام الإيقاف الطارئ على الدخل، وصمامي التحكم...	1016
28-6	مخطط ربطة العنق (Bow-Tie) لسيناريو ضغط زائد في الفاصل V-501: التهديدات يسارًا تمنعها...	1023
28-7	مراحل دراسة SIL، وهي ليست خطوة واحدة: من دراسة المخاطر إلى تحديد المستوى، ثم مواصفة...	1028
28-8	ميزانية زمن استجابة وظيفة الفصل بالضغط العالي: المرسل 0.5 s والمنطق 0.3 s وتنفيس الصمام...	1031
28-9	حالة السخان H-201: (أ) قبل الدراسة كان التحكم والإنذار والإيقاف من مزدوجة واحدة وبطاقة...	1033
29-1	التحكم الأساسي ونظام السلامة الآلي سلسلتان مستقلتان على العملية نفسها: لكل منهما...	1038
29-2	طبقات الحماية حول خطر العملية، من التصميم الآمن بطبيعته والتحكم الأساسي والإنذارات، إلى...	1042
29-3	مثال LOPA: كل طبقة مستقلة تخفض تكرار الحدث، والفجوة المتبقية بين التكرار الناتج...	1045
29-4	احتمال فشل الوظيفة عند الطلب يرتفع خطيًا بين اختبارات الإثبات ويعود إلى قرب الصفر بعد...	1046
29-5	نموذج ثلاثي الأبعاد للعنصر النهائي لوظيفة سلامة: صمام كروي للإغلاق الطارئ بمشغل هوائي...	1048
29-6	تسلسل اختبار الإثبات لوظيفة سلامة، من التصريح والتجاوز إلى الحساسات فالمنطق فالعنصر...	1052

الشكل	العنوان	الصفحة
29-7	هرم مستويات الإيقاف من إيقاف المعدة إلى التخلي عن المنشأة، وما يشمله كل مستوى، ومن يطلقه	1056
30-1	مبدأ الطاقة في مخرجات نظام الحريق والغاز: (أ) خرج الإطفاء والصفارات يُنشَّط عند الحدث…	1064
30-2	مقياس إشارة كاشف الغاز على دخل 0 إلى 22 mA: العطل عند 3.6 mA فأقل أو 21 mA فأكثر…	1073
30-3	مخطط توزيع نموذجي لمنطقة ضاغطين في الهواء الطلق: كاشفات غاز نقطية على شبكة مع تكثيف حول…	1074
30-4	توضيح نوعي لنافذتي كشف اللهب: فوق البنفسجية القصيرة ونطاق ثاني أكسيد الكربون عند 4.4…	1075
30-5	ثلاث سحب غازية مختلفة الطول والتركيز تعطي القراءة نفسها 1 LEL·m في الكاشف الخطي	1079
30-6	ترتيب اختبار الاستجابة ومعايرة كاشف غاز نقطي: أسطوانة غاز معايرة ومنظم تدفق ثابت وغطاء…	1082
30-7	(أ) خريطة اختيار وسيط الإطفاء حسب المكان ونوع الحريق ووجود الأفراد	1089
30-8	منطق التصويت في منطقة واحدة: ثلاثة كاشفات غاز بعتبتين ومنطق 1oo3 للإنذار و2oo3 للإجراء…	1094
30-9	سلسلة السبب والنتيجة لغاز مؤكد في منطقة الضاغط K-201 ضمن مشروع الكتاب: من تحقق التصويت…	1103
30-10	مسقط علوي لحاوية التوربين في الحالة الميدانية 30.14: (أ) كاشفا لهب على الجدار نفسه…	1105

الشكل	العنوان	الصفحة
31-1	الحمايات الدنيا لفاصل ثلاثي الأطوار: مرسلات مستقلة للضغط والمستوى وسطح الماء، وصمامات...	1115
31-2	الحمايات الدنيا لبرج التلامس في وحدة تجفيف الغاز بالجلايكول مرقمة كما في القائمة: الضغط...	1116
31-3	الحمايات الدنيا لبرج تقطير: ضغط القمة العالي جدًا ومستوى القاع (مرسلان بفوهات منفصلة)...	1119
31-4	حمايات فرن عمليات متعدد الممرات متوازن السحب: قسم التغذية...	1120
31-5	الحمايات النموذجية لمفاعل التكسير الهيدروجيني: مزدوجات حرارية متعددة النقاط في كل طبقة...	1124
31-6	حمايات ضاغط غاز عمليات مع وعاء الشفط: مستوى عالٍ جدًا في الوعاء...	1126
31-7	حمايات وحدة التكسير الحفزي المائع (FCC): يُحفظ المجدد عند ضغط أعلى من المفاعل بنحو 0.5...	1128
31-8	المثال المحلول لوعاء شفط الضاغط: (أ) مرسل التحكم LT-201 بالضغط التفاضلي ومرسل الحماية...	1137
32-1	أجهزة مجموعة توربين وعلبة تروس وضاغط: مجسا قرب X-Y عند كل محمل انزلاقي، ومجسا الإزاحة...	1148
32-2	إشارتا مجس السرعة: المغناطيسي السلبي يعطي موجة تكبر سعتها مع السرعة وتختفي عند الدوران...	1150
32-3	نموذج ثلاثي الأبعاد لعجلة مسننة على عمود التوربين مع ثلاثة مجسات سرعة مستقلة لحماية...	1152
32-4	نظام مجس القرب: المجس وكابل التمديد ووحدة التشغيل بطول كهربائي مطابق، ومنحنى الجهد...	1156

الشكل	العنوان	الصفحة
32-5	مجسات الغلاف: بنية مقياس التسارع IEPE ومجس السرعة الزلزالي، وأثر طريقة التثبيت على الحد…	1159
32-6	(أ) ثلاثة مجسات على محمل واحد: مجس القرب يرى حركة العمود نسبةً إلى البيت، ومقياس…	1163
32-7	الموضع المحوري للعمود: (أ) مجسا قرب مستقلان يواجهان نهاية العمود، وطوق الدفع بين وسادات…	1165
32-8	بنية نظام حماية الآلات وفق API 670: المجسات ووحدات التشغيل في الحقل، والرف بوحدات…	1168
32-9	كيف تولّد الحلقة الأرضية اهتزازًا وهميًا: مرجع وحدة التشغيل (Proximitor) مؤرض عند هيكل…	1174
32-10	قاعدة تأريض حجب كابل الإشارة: (أ) التأريض من طرف واحد عند الرف مع عزل الحجب وتغليفه عند…	1181
32-11	تشخيص الحالة الميدانية (32.8.7) بالطيف: خط 1X الميكانيكي يتحرك مع السرعة من 49.42 إلى…	1188
32-12	مناطق تقييم الاهتزاز وفق ISO 20816-3 لاهتزاز الغلاف بالسرعة (rms) للمجموعتين 1 و2 على…	1194
33-1	من الموجة الزمنية إلى الطيف: إشارة تجمع عدم اتزان عند 1X وعدم محاذاة عند 2X وصدمات محمل…	1203
33-2	أشكال المدار الشائعة ودلالاتها، ومخطط الموضع المركزي للعمود داخل دائرة الخلوص من الوقوف…	1206
33-3	بصمات طيفية لستة أعطال شائعة: عدم الاتزان عند 1X، وعدم المحاذاة عند 2X، والارتخاء…	1211

الشكل	العنوان	الصفحة
33-4	رسم لمحمل دحرجة بمنظر أمامي ومقطع محوري يبين الحلقة الخارجية والداخلية والكرات والقفص...	1212
33-5	مخطط بود لبدء تشغيل: قمة السعة وتغير الطور عند السرعة الحرجة الأولى وحساب عامل التضخيم...	1213
33-6	الاتزان في مستوى واحد بطريقة معاملات التأثير: المتجه الأصلي، والمتجه مع الكتلة...	1216
33-7	بنية مراقبة الحالة: من رف الحماية عبر المخارج المخزّنة إلى خادم مراقبة الحالة، والمجسات...	1218
34-1	المكونات الرئيسية الثلاثة للتوربين الغازي، الضاغط وغرفة الاحتراق والتوربين، ومسار...	1226
34-2	دورة برايتون المثالية على مخطط الحرارة مقابل الإنتروبي: الضغط، والاحتراق، والتمدد، وطرح...	1228
34-3	مقطع ثلاثي الأبعاد مبسط لتوربين غازي ثقيل أحادي العمود: أدلة التوجيه والضاغط المحوري...	1229
34-4	الضاغط المحوري بمراحله المتعاقبة من الريش الدوارة والثابتة، وأدلة التوجيه عند المدخل	1230
34-5	مقطع في غرفة احتراق حلقية: منطقة الاحتراق الأولى، وهواء التخفيف، والهواء المحيط الذي...	1231
34-6	مقطع في ريشة توربين مبردة: هواء من الضاغط يمر في قنوات داخلية ثم يخرج من ثقوب السطح...	1232
34-7	أهم نقاط القياس والتحكم في توربين غازي أحادي العمود	1238
34-8	لوحات من غرفة تحكم محلية لتوربين غازي (صور من أرشيف المؤلف): (أ) رف حاكم التوربين...	1241

الشكل	العنوان	الصفحة
34-9	بوابة القيمة الصغرى تختار أصغر طلب وقود من الحلقات الست	1243
34-10	انتقال السيطرة في بوابة القيمة الصغرى (قيم توضيحية): طلب الحاكم يرتفع من 40% إلى 75%...	1246
34-11	مراحل بدء توربين غازي ثقيل، وتغير السرعة وطلب الوقود خلالها (قيم توضيحية)	1250
34-12	تسلسل بدء توربين ثنائي العمود مشتق من الطيران: مؤقتات كل مرحلة، وسرعة مولد الغاز N25...	1253
34-13	خطوط الانحدار 4%	1256
34-14	بنية حاكم توربين ثنائي العمود كما تظهر على شاشته: متحكم وقود البدء، ومحدد حرارة العادم...	1259
34-15	مرجع حرارة العادم مقابل ضغط تصريف الضاغط: حد أفقي عند الضغوط المنخفضة يحمي منظومة...	1262
34-16	أدوات التحكم بالهواء على امتداد الضاغط: أدلة التوجيه المتغيرة عند المدخل (IGV)، والريش...	1265
34-17	(أ) نظام IGV الهيدروليكي المؤازر: مرجع الزاوية من الحاكم، الصمام المؤازر، الأسطوانة...	1267
34-18	حلقة التحكم بموضع صمام التحكم بالغاز: من مرجع الوقود FSR، إلى متحكم الموضع، فالصمام...	1269
34-19	مبدأ عمل محول LVDT: ملف ابتدائي بين ملفين ثانويين وقلب متحرك، ومنحنى الجهد التفاضلي...	1270
34-20	نوعان من تحريك صمام الوقود: (أ) مشغل كهربائي يقوده موضّع رقمي (DVP) يقارن الموضع...	1274

الشكل	العنوان	الصفحة
34-21	منحنيات اتجاه لصمام الوقود (قيم توضيحية لا معيار قبول لأي طراز): (أ) الطلب يقفز من 20%…	1278
34-22	الفصل بالسرعة الزائدة عبر قناتين مستقلتين: متحكمات التحكم الثلاثة، ووحدة الحماية…	1281
34-23	(أ) ثلاثة حساسات على ثلاث قنوات مع تبادل القيم واختيار الوسيط، مقابل مدخل واحد إلى…	1285
34-24	(أ) منظومة تحكم توربين ثلاثية التكرار: معالجات R وS وT على شبكة الإدخال والإخراج، وشبكة…	1287
35-1	خريطة أداء ضاغط طارد مركزي: منحنيات السرعة الثابتة، وخط الانفصال الهوائي على اليسار…	1302
35-2	دورة الانفصال الهوائي: على الخريطة تقفز نقطة التشغيل من خط الانفصال الهوائي إلى جريان…	1304
35-3	خريطة منع الانفصال الهوائي في الإحداثيات الثابتة: المحور الأفقي ΔPo/Ps والرأسي Pd/Ps…	1307
35-4	استجابات نظام منع الانفصال الهوائي بالزمن أثناء اضطراب: تقترب نقطة التشغيل من خط التحكم…	1310
35-5	ضاغطان متوازيان مع تقاسم الحمل بالتساوي في البعد عن الانفصال الهوائي: متحكم ضغط المجمع…	1317
35-6	نموذج ثلاثي الأبعاد لضاغط طارد مركزي متعدد المراحل مقطوع طوليًا: الدافعات على العمود…	1318
35-7	مخطط سدادة جافة ترادفية: غاز السدادة النظيف يُحقن قبل المتاهة الداخلية، والسدادة…	1320

الشكل	العنوان	الصفحة
36-1	بنية التحكم في المرجل: الطلب الرئيسي من ضغط البخار يقود نظام الاحتراق (الوقود والهواء)...	1331
36-2	نموذج ثلاثي الأبعاد مقطوع لمرجل أنبوبي الماء: الفرن والحارقات، وأنابيب الجدران والدرم...	1332
36-3	الطلب الرئيسي: متحكم ضغط المجمع مع تغذية أمامية من تدفق البخار يعطي طلب معدل الإشعال...	1335
36-4	التحكم المقاس في الاحتراق مع التقييد المتقاطع: طلب الهواء من المختار الأعلى وطلب الوقود...	1338
36-5	التحكم في سحب الفرن: متحكم ضغط الفرن من الأوسط بين ثلاثة مرسلات، بتغذية أمامية من خرج...	1341
36-6	مستوى الدرم: استجابة المستوى للانتفاخ والانكماش عند تغير الحمل، ومخطط التحكم ثلاثي...	1343
36-7	(أ) مسار الإشارات في التحكم ثلاثي العناصر بالأرقام: LIC الرئيسي يعطي تصحيح المستوى...	1347
36-8	التحكم الضبابي ثلاثي العناصر بمستوى الدرم (خلاصة دراسة المؤلف، R59): (أ) دوال الانتماء...	1351
36-9	التحكم في حرارة البخار المحمّص: ترتيب المحمّص بمرحلتين وبينهما مرش، والحلقة التعاقبية...	1355
36-10	تسلسل نظام إدارة الحارقات: شروط ما قبل التطهير، والتطهير بتدفق ومدة محددين، وتجربة...	1357
36-11	التحكم ثلاثي العناصر بمستوى الدرم: خرج متحكم المستوى يُجمع مع تدفق البخار ليصبح نقطة...	1360

الشكل	العنوان	الصفحة
36-12	مقطع ثلاثي الأبعاد لدرم مولد بخار: سطح الماء وفيه فقاعات البخار التي تسبب الانتفاخ…	1362
37-1	صمامات توربين بخاري بإعادة التسخين: الإيقاف الرئيسي والتحكم على خط الضغط العالي…	1376
37-2	توربين بخاري يدير ضاغطًا: متحكم العملية PIC-301 يعطي نقطة ضبط السرعة للحاكم، والحاكم…	1379
37-3	منحنى بدء نموذجي لتوربين بخاري على شبكة 50 هرتز: إعادة ضبط الفصل، وفحص الاحتكاك…	1386
37-4	مخطط مبسط لتحكم السرعة والحمل في حاكم DEH: مرجع الحمل مع تصحيح الانحدار، ومحدد الحمل…	1387
37-5	فتح صمامات التحكم مقابل طلب البخار في القوس الجزئي، حيث تفتح بالتتابع، وفي القوس…	1390
37-6	فك الترابط في توربين الاستخلاص المنظم: لزيادة الاستخلاص 10 t/h مع ثبات القدرة يزيد…	1392
37-7	مستويات حماية السرعة الزائدة للتوربين البخاري: وظيفة منع السرعة الزائدة (OPC) بين نحو…	1394
37-8	مطابقة حرارة البخار مع حرارة معدن المرحلة الأولى قبل الدوران: المعدن عند 380 °C والنطاق…	1397
37-9	تسلسل الحالة الميدانية لفصل الوحدة بارتفاع مستوى الدرم: فتح صمام التجاوز عالي الضغط…	1400
38-1	الحواجز الثلاثة في رأس البئر: الصمام تحت السطحي المتحكَّم به من السطح (SCSSV) داخل…	1409

الشكل	العنوان	الصفحة
38-2	ترتيب الإغلاق والفتح في رأس البئر: عند الإيقاف الطارئ أو الحريق يُغلق الجناح (SDV)…	1412
38-3	لماذا يلزم طيار ضغط منخفض (PSL) لكل مقطع طويل قبل الخانق: التسريب قبل الخانق يُنقص ضغط…	1416
38-4	معمارية لوحة تحكم رأس بئر هوائية/هيدروليكية مضغوطة لتعمل (Pressured to Run): تغذية…	1423
38-5	ميزانية الضغط في المثال المحلول 1: الضغط المطلوب عند الصمام تحت السطحي 285 bar يوفّر…	1426
38-6	تسلسل إعادة تشغيل البئر بعد إيقاف كامل: قراءة «أول سبب» (First-Out) قبل أي إعادة ضبط…	1431
38-7	دائرة التوقيت الهوائية (زجاجة حجم ومقيّد مع صمام لارجعي) في وضعيها: المقيّد في خط…	1439
39-1	الإطار المنهجي لاستكشاف الأعطال: السلامة أولًا، ثم التحقق من العطل وتحديد موضعه وإصلاحه…	1457
39-2	أنماط منحنيات الاتجاه في مثال تبريد الغرفة (قيم توضيحية): (أ) تشغيل طبيعي تنخفض فيه…	1465
39-3	تسلسل تحليل ارتفاع الحرارة بمنحنيات الاتجاه: هل صدر أمر بزيادة التبريد؟ ثم هل استجاب…	1467
39-4	التتبع التسلسلي مقابل التنصيف على مسار إشارة من ثمانية عناصر، والعطل في الحاجز: ستة…	1470
39-5	نقاط القياس الأربع في حلقة 4–20 mA: أطراف المرسل، وصندوق التوصيل، وما بعد الحاجز، وطرفا…	1472

الشكل	العنوان	الصفحة
39-6	ميزانية الفولتية لحلقة بتغذية 24 V: الحلقة الأصلية (554 أوم) تترك للمرسل 11.8 V عند 22…	1474
39-7	سلسلة قرار لقراءة مشكوك فيها: هل تتفق مع متغير مرتبط؟ هل يقرأ المرسل العملية صحيحًا؟ هل…	1478
39-8	بصمة الصمام لصمام يفتح بالهواء: مدى النابض بين 0.8 و2.4 بار، والمسافة بين منحنى الفتح…	1484
39-9	مجموعة صمام التحكم ومواضع أسباب مروره وهو مغلق: (أ) مشكلات المشغل والموضّع التي تمنع…	1489
39-10	شجرة تشخيص الصمام المار: يُستبعد المسار الموازي أولًا، ثم يُفحص ضغط المشغل وشوط الموضّع…	1493
39-11	تتبّع الفولتية على سلسلة سماح تشغيل مضخة: الفولتية 24 V حتى مفتاح مستوى السحب، ثم صفر بعده	1496
39-12	تسلسل التشخيص في أنظمة PLC وDCS: التغذية، ثم المعالج، ثم الاتصالات، ثم البطاقة، ثم…	1498
39-13	لماذا يُخفض زمن التسجيل عند نصب فخ لعطل متقطع: هبوط لحظي مدته 300 ms في إشارة 4–20 mA…	1509
39-14	مخطط عظم السمكة لفصل كاذب للضاغط K-201 على المرسل PZT-104: ست فئات تجمع الفرضيات قبل…	1516
39-15	تحليل «لماذا» الخمس لفصل الضاغط K-201: من انخفاض لحظي في إشارة PZT-104، إلى انقطاع عند…	1518
39-16	تشخيص LT-101 على الورق: المدى من −250 إلى +150 mbar يقابل 0 إلى 100%، فالقراءة الثابتة…	1524

الشكل	العنوان	الصفحة
39-17	الحالة الميدانية لمفتاح الضغط الذي بُدّل مرتين: ضغط الزيت الطبيعي 2.5 bar يهبط لحظيًا…	1527
40-1	أنماط عطل الحساس الستة كما تظهر على منحنى الاتجاه: خارج المدى (Out of Range)، والتجمد…	1536
40-2	التعامل مع عطل حساس أثناء التشغيل: كشف العطل ووسم القيمة، ثم قيمة بديلة مقيدة المعدل أو…	1539
40-3	أربعة تذبذبات متشابهة ظاهريًا وفحصها الحاسم: التصاق الصمام…	1543
40-4	الرسم المتقاطع PV مقابل OP لثلاثة أسباب للتذبذب: (أ) التصاق الصمام، (ب) كسب زائد في…	1544
40-5	تحويل طلب «شغّل المضخة الاحتياطية تلقائيًا» إلى مخطط حالات: شروط البدء والموانع…	1547
40-6	أربعة مؤشرات مستقلة قبل تحسين حلقة مستوى وعاء الشفط وبعده: الانحراف المعياري σ من 1.8%…	1553
40-7	معمارية قياس مستوى الوعاء V-101 في مشروع الكتاب: ثلاثة مرسلات بمآخذ مستقلة…	1555
40-8	مسار الحالة الميدانية: تتجمد قراءة PT-402 عند 20.4 barg من الساعة 02:10 بعد تركها في…	1557
41-1	البنى الأربع الأكثر استعمالًا برموز مخطط الأنابيب والأجهزة: (أ) التعاقبي: متحكم الحرارة…	1564
41-2	هبوط ضغط البخار (قيم محاكاة): أعلى: حرارة المخرج بحلقة واحدة (انحراف أقصى 3.4 °C)…	1568
41-3	زيادة تدفق المنتج 20% (قيم محاكاة): أعلى: حرارة المخرج بالراجعة وحدها…	1572

الشكل	العنوان	الصفحة
41-4	قفزة الحمل من 50% إلى 80% ثم عودته (قيم محاكاة): (أ) بلا تقييد متقاطع يسبق الوقود…	1576
41-5	ثلاثة أشكال لتقسيم المدى: (أ) تبريد وتسخين بتقسيم متساوٍ حول فجوة 48–52% لا يعمل فيها…	1578
41-6	حد حرارة العادم باختيار الأدنى (قيم محاكاة) بعد رفع نقطة ضبط الحمل من 40% إلى 60% عند…	1583
41-7	عملية زمنها الميت ضعف ثابتها الزمني (قيم محاكاة): PI وحده يستقر في s 242	1586
42-1	طبقات «الذكاء» في التحكم عبر الزمن، من PID والمنطق المتسلسل إلى الذكاء التوليدي: كل…	1605
42-2	كشف الشذوذ في حرارة محمل: النموذج يتوقع الحرارة من الحمل والحرارة المحيطة، والبواقي بين…	1607
42-3	مجموعة مضخة ومحرك مراقبة: مقاييس الاهتزاز على محامل المحرك والمضخة، وحرارة المحمل…	1609
42-4	الحساس الافتراضي: نموذج استدلالي يقدر تركيز المنتج من خمسة قياسات متاحة كل دقيقة…	1611
42-5	مكان الذكاء الاصطناعي في بنية التحكم: فوق طبقة التحكم الحتمية، يستقبل البيانات من…	1612
42-6	منهجية تجربة الذكاء الاصطناعي في المنشأة بسبع خطوات، من تحديد المشكلة بالأرقام إلى…	1623
42-7	مهارات مهندس التحكم والقياس: ما يبقى من فهم العملية وأجهزة القياس وأنظمة التحكم، وما…	1626

الشكل	العنوان	الصفحة
42-8	من الأتمتة إلى الاستقلالية التدريجية: خمس درجات من التشغيل اليدوي إلى التشغيل شبه…	1627
43-1	أشكال شائعة للنبائط الإلكترونية المنفصلة: مقاومة بحلقات ألوان، ومكثف سيراميكي، ومكثف…	1638
43-2	جهاز القياس المتعدد: (أ) الواجهة النموذجية بالمفتاح الدوّار والمداخل الأربعة	1645
43-3	عشرون مكوّنًا إلكترونيًا شائعًا بشكلها الخارجي ورمزها في المخططات	1647
43-4	خمس عشرة عائلة إضافية من المكونات برمزها وشكلها الخارجي الشائع (رسوم توضيحية): ديود…	1653
43-5	جدول ألوان المقاومات، ومثال لمقاومة حلقاتها أصفر وبنفسجي وبني وذهبي، أي 470 Ω بتفاوت ±5%	1659
43-6	شحن المكثف وتفريغه عبر مقاومة بمضاعفات ثابت الزمن، وطريقة التفريغ الآمن بمقاومة معزولة…	1661
43-7	فحص الديود بجهاز القياس المتعدد في الاتجاهين، وموجات الجهد في قنطرة توحيد مع مكثف تنعيم	1665
43-8	رمز الترانزستور NPN ونموذج فحصه بديودين متصلين بالقاعدة، ودائرة تشغيل مرحل من خرج منطقي…	1666
43-9	نبائط التبديل القدرية الشائعة ورموزها وأطرافها: MOSFET وIGBT والثايرستور والترياك	1669
43-10	منهجية من سبع خطوات لتشخيص عطل في دائرة إلكترونية، تبدأ بالأعراض والتغذية وتنتهي…	1671
43-11	حصر عطل في حلقة 4–20 mA بمرسل ثنائي الأسلاك: نقاط قياس الجهد V1 وV2 على طرفي المصهر وV3…	1673

الشكل	العنوان	الصفحة
44-1	بطاقة إلكترونية مدمجة نموذجية: متحكم دقيق بغلاف QFP، وبلورة تولد ساعته، وذاكرة EEPROM…	1681
44-2	البنية الأساسية للحاسوب الدقيق: وحدة المعالجة المركزية بمكوناتها، والذاكرة ومنافذ…	1683
44-3	دورة الجلب والتفكيك والتنفيذ، ومثال بلغة التجميع للمعالج 8085 يضع عددين في مسجلين…	1684
44-4	خريطة ذاكرة لنظام بستة عشر خطًا للعنوان مقسمة إلى أربع مناطق متساوية، ومفكك 2 إلى 4…	1687
44-5	في الأعلى مقارنة الاستطلاع بالمقاطعة في الاستجابة لحدث	1689
44-6	دورة المسح في متحكم أو PLC: قراءة المداخل، ثم تنفيذ البرنامج، ثم كتابة المخارج، ثم…	1693
44-7	إلى اليسار أخذ العينات والتكميم بمحول 4 بت يظهر فيه الدرج بوضوح	1695
44-8	المخطط الداخلي للمتحكم الدقيق 8051: المعالج وذاكرتا البرنامج والبيانات والمذبذب على…	1698
44-9	الاتصال التسلسلي على مستوى البطاقة: إطار UART ببت البدء وثمانية بتات بيانات وبت التوقف…	1701
44-10	البنية الداخلية لمرسل ذكي: العنصر الحساس والمكبر والمحول التناظري الرقمي، ثم المتحكم…	1704

الملحق ز: الكشاف الموضوعي

يدل الكشاف على الصفحات التي يُعالَج فيها كل مصطلح أكثر من غيرها (خمس صفحات على الأكثر)، مرتبًا هجائيًا بالعربية دون اعتبار «ال» التعريف، ومع كل مصطلح مقابله الإنجليزي. وللبحث بالمصطلح الإنجليزي يُرجع إلى المسرد في الملحق د.

ا

المصطلح	الصفحات
الإبلاغ بالاستثناء (Exception Reporting)	772، 779، 794
الإبلاغ غير المطلوب (Unsolicited Reporting)	773
اتزان القوى (Force Balance)	78
اتساع المدى (Span)	53، 112، 113، 116، 120
الإثبات (Proving)	254، 255، 275، 443، 1707
اجتماع السلامة (Toolbox Talk)	416، 417
الأجزاء المبللة (Wetted Parts)	917، 984، 993، 997، 1414
أحادي الدورة (Single-Turn)	365
أحادي النمط (Single-Mode)	843، 846
احتمال الفشل عند الطلب (PFD، Probability of Failure on Demand)	519، 527، 906، 1029، 1039
إحداثيات ثابتة (Invariant Coordinates)	1305، 1326، 1327
اختبار الإثبات (Proof Test)	25، 519، 1029، 1051، 1052

المصطلح	الصفحات
اختبار الإحكام (Leak Test)	291، 431، 1051، 1382
اختبار الاستجابة (Bump Test)	1080، 1081، 1082، 1105، 1209
اختبار الحلقة (Loop Test)	73، 91، 462، 474، 479
اختبار الحلقة كاملة (Loop Check)	20، 37، 48، 73، 748
اختبار الشوط الجزئي (Partial Stroke Test)	519، 521، 527، 544، 1052
اختبار القبول في المصنع (FAT)	614، 748، 1101
اختبار القبول في الموقع (SAT)	20، 1102
اختبار المصنع (Shop Test)	506، 507، 1061، 1101
اختبار رفض الحمل (Load Rejection)	1260، 1381، 1383
اختبار قبول الحمل (Load Acceptance)	1260
اختيار الأدنى (Low Select)	723، 752، 760، 1258، 1581
اختيار الأعلى (High Select)	722، 724، 747، 752، 753
آخر قيمة جيدة (Last Good Value)	1537، 1594
إدارة التغيير (Management of Change – MOC)	47، 360، 788، 1002، 1028
أذونات البدء (Start Permissives)	1251
الارتداد (Bounce)	82، 350، 692، 1093، 1415
الإزاحة الموجبة (Positive Displacement)	56، 234، 252، 269، 276
أساس التصميم للأجهزة والتحكم (I&C Design Basis)	124، 171، 374، 414، 893
الاستطلاع (Polling)	699، 772، 773، 835، 1689

المصطلح	الصفحات
الإسناد الترافقي (Cross Reference)	698، 1503
إشارة الاهتزاز المتناوبة (AC Vibration Signal)	1156
الأصل المنع (Default Deny)	874
الأطراف المصهرة (Fused Terminals)	964
إعادة الضبط (Reset)	449، 600، 623، 651، 652
إعادة تحديد المدى (Re-ranging)	440، 449، 471، 482
الإغراق المائي (Deluge System)	1083
الإغلاق عند الفشل (Fail-Closed)	515، 874، 1406
افحص الفرض (Forcing)	699
أفعال (Actions)	685
أقصى تردد (Fmax)	1200، 1201، 1204، 1221، 1222
الإقفال (Lockout)	425، 426، 432، 437، 671
الالتصاق (Stiction)	74، 97، 551، 1544، 1620
آلة التحكم الرقمي بالحاسوب (Computer Numerical Control – CNC)	697
الألياف الضوئية (Fiber Optic)	350، 843، 844
الأمان الجوهري (Intrinsic Safety)	914، 915، 956، 957، 982
الأمان المتزايد (Increased Safety، Ex e)	915، 927، 950، 951، 968
الأمر (Command)	1464، 1466
الإمساك الذاتي (Latching)	524، 670، 681، 683، 1094

المصطلح	الصفحات
الانبعاثية (Emissivity)	193، 194، 195، 197، 220
أنبوب التهدئة (Stilling Well)	287، 297، 603
أنبوب السيفون الملفوف (Siphon)	163، 988
انتشار حرارة العادم (Exhaust Temperature Spread)	218، 1236
الانتفاخ والانكماش (Swell & Shrink)	293، 294، 308، 1346، 1370
انتقالات (Transitions)	362، 365، 613، 685، 686
الانجراف (Drift)	74، 114، 122، 207، 451
الانحدار (Droop)	566، 568، 587، 1257، 1382
الانحدار إلى وضع أبسط (Mode Shedding)	1594
الانحراف (Deviation)	295، 368، 621، 628، 1014
الانحراف الدائم (Offset)	69، 70، 115، 247، 621
الانحياز (Bias)	323، 324، 621، 831، 1663
الإنذار (Alarm)	25، 53، 60، 817، 823
أنظمة الأتمتة (Automation System – AS)	786، 866
الإنفار (Invar)	216، 1654
الانفصال الهوائي (Surge)	57، 508، 1305، 1323، 1327
الأوضاع (Modes)	677، 734، 1025، 1212، 1245
أول سبب (First-Out)	592، 683، 684، 738، 805
الإيقاف الطارئ (ESD)	608، 698، 806، 903، 1099

المصطلح	الصفحات
الإيقاف باللهب (Fired Shutdown)	1251
أين تقف الواجهة (HMI)	676

ب

المصطلح	الصفحات
البارامغناطيسي (Paramagnetic)	318، 319، 325، 333، 339
البرنامج (Program)	615، 672، 692، 1705، 1707
بروتوكول HART (HART)	828
بصمة الصمام (Valve Signature)	518، 519، 521، 1483، 1705
البصيلة الشعرية (Capillary Bulb)	191
البصيلة العادية (Plain Bulb)	191
بصيلة المتوسط (Averaging Bulb)	191
بلورة الكوارتز (Quartz Crystal)	320
بوابة (Gateway)	779، 847، 1244، 1248، 1667
بوابة القيمة الصغرى (Minimum Gate / Low Select)	1242، 1243، 1244، 1246، 1247
بيرومتر الشفط (Suction Pyrometer)	215

ت

المصطلح	الصفحات
تأريض الأجهزة النظيف (Instrument Clean Earth)	927، 929، 956

المصطلح	الصفحات
التأريض التسلسلي (Serial Grounding)	1175
تأريض السلامة (Protective/Safety Earth)	927، 928، 956
التأريض بالنقطة النجمية (Star Point Grounding)	1175
تأريض دوائر الأمان الجوهري (IS Earth)	928، 982
تبديل تيارات العينة (Stream Switching)	313
التتبع (Tracking)	419، 441، 647، 1247، 1470
تتبّع الفولتية (Voltage Walking)	1496
التثبيط (Inhibit)	609، 809، 1081، 1093، 1094
التجاوز (Bypass)	267، 287، 1051، 1057، 1433
تجاوز البدء (Start-up Bypass)	353
تجاوز الهدف (Overshoot)	538، 653، 1324
التجاوز اليدوي (Manual Override)	60، 526، 573، 1489، 1492
تجمد الإشارة (Frozen، Stuck Signal)	1534، 1536
التجميد في الموضع عند الفشل (Fail-in-Place، Fail-Freeze)	520
التجميعة المتقاربة (Close-Coupled Assembly)	920
التحجيم (SCALE)	688، 689، 692، 729، 753
تحديثات الترقيع (Patching)	880
تحديد المستوى المطلوب (SIL Determination)	1028
التحقق (Validation)	256، 261، 328، 429، 1029

المصطلح	الصفحات
التحقق من التصميم (SIL Verification)	1025، 1029
التحكم أحادي العنصر (Single-Element Control)	1342، 1370، 1402
التحكم الانتقائي (Override Control)	723، 735، 752، 1580
التحكم التعاقبي (Cascade Control)	54، 57، 378، 777، 1564
التحكم التكيفي (Adaptive Control)	1589، 1590
التحكم التنبؤي بالنموذج (MPC)	1590، 1605، 1633
التحكم التنظيمي المتقدم (Advanced Regulatory Control – ARC)	1590، 1592
التحكم المركزي (Centralized Control)	88، 782، 783
التحكم المنسق (Coordinated Control)	1335، 1387، 1388
التحكم بالحلقة المغلقة (Closed-Loop / Feedback Control)	66، 68
التحكم بالحلقة المفتوحة (Open-Loop Control)	66، 67
التحكم بالنسبة (Ratio Control)	1562، 1573، 1574، 1600
التحكم بمنع السرعة الزائدة (OPC، Overspeed Protection Control)	1393
التحكم ثلاثي العناصر (Three-Element Control)	70، 294، 308، 309، 1601
التحكم ثنائي العنصر (Two-Element Control)	1342
تحكم ضغط المرحلة الأولى (IMP، First-Stage Pressure Control)	1388، 1390
التحليل (Analysis)	128، 311، 324، 1022، 1155

المصطلح	الصفحات
تحليل طبقات الحماية (LOPA)	1024، 1043، 1137
التحويل السلس (Bumpless Transfer)	646، 647، 649، 652، 735
تحويل فورييه السريع (FFT، Fast Fourier Transform)	1201، 1615
تخفيض الضغط (Depressurize)	426، 436، 492، 572، 576
التخلف (Hysteresis)	114، 120، 171، 446، 717
التخميد (Damping)	93، 152، 210، 1325، 1477
تدرج نقطة الضبط (Setpoint Ramping)	644، 647
التدفق (Flow)	54، 125، 236، 252، 267
التدفق المختنق (Choked Flow)	496، 528، 1277
الترشيح (Filtering)	97، 115، 123، 690، 913
الترشيد (Rationalization)	818، 819، 821، 822، 1027
التركيب البعيد (Remote Mount)	155، 920
التركيب المتقارب (Close-Coupled)	155، 920
تركيب مباشر (Direct Mount)	154، 920، 925، 988، 992
الترم المتوازن (Balanced Trim)	512، 513
الترياك (TRIAC)	1650، 1655، 1657، 1668، 1669
التسخين (Warm-up)	338، 1250، 1374، 1375، 1579
التسخين المصاحب (Heat Tracing)	62، 153، 312
التسلسل (Sequence)	671، 738، 909، 1175، 1470

المصطلح	الصفحات
تسلسل الأحداث (SOE)	715، 738، 769، 851، 1462
تسلسل التفريغ (Blowdown Staging)	1055
تسلسل الضوابط (Hierarchy of Controls)	1008، 1009، 1035
التسليح (Armour)	919، 929، 938، 1179
تشبع التكامل (Integral Windup)	624، 652، 660، 758، 759
تشبع التكامل (Integrator Windup)	624، 652، 660، 758، 1247
التشتت الحراري (Thermal Dispersion)	356
تشخيص الأعطال (Troubleshooting)	608، 1145، 1206، 1448، 1453
التشغيل المنقوص (Degraded Mode)	726، 740
التشغيل بالضوء أو بالظلام (Light-On / Dark-On)	351
تصحيح المستوى (Level Trim)	1343، 1344، 1347
تصريح العمل (Permit to Work – PTW)	40، 416، 417، 441، 467
التصريف (Drain)	206، 313، 426، 429، 1314
التصميم الصحي (Hygienic Design)	778
التصميم المكاني (Spatial Design)	21، 22، 48
التصميم الوظيفي (Functional Design)	21، 22، 47، 48، 100
تصنيف المناطق الخطرة (Hazardous Area Classification – HAC)	40، 895، 896، 914، 1027
التصويت (M من N) (Voting، MooN)	605، 724، 1019، 1091، 1093
التصويت بالقيمة الوسطى (Median Voting)	1284

المصطلح	الصفحات
التصيد (Phishing)	867
التضبيب (Fuzzification)	1349، 1350
التطهير (Purge)	52، 152، 1249، 1356، 1365
التطهير اللاحق (Post-Purge)	1356، 1357
تعديل (Modification)	47، 360، 704، 902، 1710
التعرج (Aliasing)	84، 85، 1201، 1694، 1695
التعشيق (Interlock)	86، 134، 676، 683، 736
التعليق (Shelving)	28، 29، 380، 815، 818
التغذية الأمامية (Feedforward)	57، 68، 1561، 1569، 1570
التغذية الراجعة (Feedback)	68، 736، 1468، 1597، 1600
التغذية الراجعة الخارجية للتكامل (External Reset Feedback)	736، 1581، 1600
التغذية الراجعة الموجبة (Positive Feedback)	68
التغذية للفصل (Energize-to-Trip)	525، 596، 616، 739، 740
التغطية الجغرافية (Geographic Coverage)	1069
التفرع المتوازي (AND)	686
التفعيل بالتغذية (Energize-to-Activate)	1063، 1064
تقديم وتأخير (Lead-Lag)	1337، 1564، 1569، 1571، 1572
تقسيم الشبكة (Network Segmentation)	842، 861، 886
تقسيم المدى (Split Range)	517، 520، 735، 1561، 1576

المصطلح	الصفحات
التقييد المتقاطع المزدوج (Double Cross-Limiting)	1574، 1576، 1600
التقييد المتقاطع في الاحتراق (Cross-Limiting)	1337، 1574، 1598
تقييم السلامة الوظيفية – Functional Safety Assessment) FSA)	1028، 1050
تقييم المخاطر (Risk Assessment)	40، 417، 424، 866، 1010
التكافؤ (Parity)	103، 104، 617، 831، 854
التكرار (Redundancy)	114، 784، 905، 1044، 1241
التكرارات في الدقيقة (Repeats per Minute)	623، 644، 657، 658
تكلفة دورة الحياة (Life-Cycle Cost)	39، 985، 987، 995، 1005
التكهف (Cavitation)	57، 492، 504، 553، 1207
التكوين الأحادي (Simplex)	906
التلامس الجاف (Dry Contact)	81
التلامس الرطب (Wet Contact)	81
التمدد التفاضلي (Differential Expansion)	395، 1166، 1395، 1396، 1398
تمدد الغلاف (Case Expansion)	395، 1146، 1166، 1395
التموضع المتوازي (Parallel / Jackshaft Positioning)	1336
التمييز (Selectivity)	29، 363، 389، 966، 1616
التنبيه (Alert)	1011، 1040، 1167، 1485، 1630
التنفيذ (Execute)	866، 1094، 1291، 1292، 1684
التنفيس (Vent)	426، 572، 914، 1421، 1446

المصطلح	الصفحات
تهيئة العينة (Sample Conditioning)	312
التوازي (Parallel)	75، 191، 627، 1012، 1316
التوأم الرقمي (Digital Twin)	1615، 1623
التوصيل السلكي المباشر (Hardwired)	907، 909، 910

ث

المصطلح	الصفحات
ثابت العزل الكهربائي (Dielectric Constant)	287، 984
الثايرستور (SCR، Silicon-Controlled Rectifier)	1650، 1651، 1656، 1668، 1677
الثبات على آخر وضع (Fail-Last)	508، 515، 516
ثرمستور NTC (NTC Thermistor)	186، 1658
ثرمستور PTC (PTC Thermistor)	187، 1658
ثنائي الاتجاه (Bidirectional)	272، 1653، 1654
الثنائي الباعث للضوء (LED)	1663، 1665
ثنائي المعدن (Bimetallic)	175، 187، 190، 200، 212

ج

المصطلح	الصفحات
الجامع (Adder)	117، 118، 383، 599، 1344
جدول الربط (Interface List)	832، 854، 857، 859، 883

المصطلح	الصفحات
جدول معايرة الخزان (Strapping Table)	304
الجذر التربيعي (SQRT)	43، 91، 229، 728، 730
الجريان الكهربائي (Electrical Runout)	1155، 1175، 1198
الجسر (Bridle)	87، 296، 297، 298، 792
جسم الصمام (Valve Body)	132
الجلب (Fetch)	349، 560، 1519، 1522، 1684
جهاز القياس المتعدد (Multimeter)	474، 1637، 1639، 1644، 1648
جهاز مرافق (Associated Apparatus)	957
جهد الفجوة (Gap Voltage)	1156، 1176، 1184، 1190، 1195
جهد الفجوة المستمر (DC Gap Voltage)	1156

ح

المصطلح	الصفحات
الحاجز الغشائي (Diaphragm Seal)	51، 152، 154، 163، 171
حاجز زينر (Zener Barrier)	953، 957، 959، 961، 962
الحاسوب المصغر (Microcomputer)	1681
حالة الإشارة (Signal Status)	827
الحالة الصلبة (Solid State)	358، 360، 1653، 1655
الحبيبة الحفازة (Catalytic Bead)	334، 1078، 1105
الحتمية (Determinism)	1612، 1628، 1697، 1702، 1712

المصطلح	الصفحات
الحجب (Screen)	919، 929، 930، 1179، 1182
الحجب الإجمالي (Overall Screen)	929، 1178، 1179
الحد الأدنى للانفجار (LEL، Lower Explosive Limit)	1077
حد الخطر (الفصل) (Danger، Trip Setpoint)	25، 53، 63، 295، 479
حد الوقود الأدنى (Minimum Fuel Limit)	1247
حدود المدى (Range Limits)	112، 124، 151، 1477
الحر (Wild)	1573
الحرارة (Heat)	51، 102، 104، 109، 153
حرارة العادم (Exhaust Temperature)	206، 218، 1261، 1264، 1581
الحرارة النوعية (Specific Heat)	102، 104، 105، 500، 502
حرارة هواء دخول الضاغط (Compressor Inlet Temperature)	221
حزم المداخل والمخارج (I/O Packs)	1241
الحساس المكرَّر (Redundant Sensor)	1534، 1537
حلّال المنطق (Logic Solver)	1025، 1029، 1038
الحلقة (Loop)	20، 37، 48، 65، 66
الحلقة الأرضية (Ground Loop)	1171، 1172، 1174، 1184، 1188
الحلقة الأمامية (Front Ferrule)	923
الحلقة الخلفية (Back Ferrule)	922، 923
الحلقة السريعة (Fast Loop)	312، 316، 329، 338، 1584

المصطلح	الصفحات
الحلقة المغلقة (Closed Loop)	65، 66، 70، 73، 1612
الحلقة المفتوحة (Open Loop)	66، 67، 69، 73، 1612
الحوسبة الطرفية (Edge Computing)	1615

خ

المصطلح	الصفحات
خارج المدى (Out of Range)	79، 93، 180، 384، 396
الخاصية الخطية (Linear Characteristic)	555
الخاصية المتأصلة (Inherent Characteristic)	493، 494
الخاصية المركبة (Installed Characteristic)	494، 495، 520
خاصية النسبة المتساوية (Equal Percentage)	494، 1311
الخانق الثابت (Fixed Choke)	536
خانق العاصفة (Storm Choke)	1406، 1407
الخانق القابل للضبط (Adjustable Choke)	536
خرج المتحكم (Controller Output، OP)	73، 95، 551، 647، 1581
خريطة الأداء (Performance Map)	57، 636، 1301
خزائن النظام (System Cabinets)	901، 917، 931، 932
خزانة التجميع (Marshalling Cabinet)	75، 433، 957، 963، 1240
خط التحكم بالانفصال الهوائي (Surge Control Line، SCL)	1306
خط الفتح القفزي لإعادة التدوير (Recycle Trip Line، RTL)	1306

المصطلح	الصفحات
خط النقل (Transport Line)	312، 337
خط حد الانفصال الهوائي (Surge Limit Line، SLL)	1306، 1307
خط هامش الأمان (Safety-On Line)	1306
خطأ التركيب الكلي (Total Installed Error)	120
الخطأ العشوائي (Random Error)	115
الخطأ المنهجي (Systematic Error)	115، 123
خطوات (Steps)	261، 538، 552، 684، 686
خطوات إضافة كتلة منطقية (R77)	1290
خطوط النبض (Impulse Lines)	51، 152، 419، 425، 920
الخطية (Linearity)	114، 120، 365، 538، 1589
خفض حرارة البخار بالرش / (Attemperation Desuperheating)	1396
خنق السحب (Suction Throttling)	1315

د

المصطلح	الصفحات
الدالة (Function)	126، 230، 591، 1264، 1267
دراسة تغطية كواشف الحريق والغاز (Fire & Gas Mapping)	1076
درجة الحرارة (Temperature)	45، 54، 102، 171، 173
الدقة (Accuracy)	114، 119، 120، 363، 1005

المصطلح	الصفحات
دليل الأسلوب (Style Guide)	808، 812
دوبلر (Doppler)	233، 245، 266
الدورة الأولى (First Scan)	683، 700، 703، 704
الدورة الحدية (Limit Cycle)	520، 538
دورة المسح (Scan Cycle)	660، 665، 666، 668، 1703
ديود البيانات (Data Diode)	865
ديود زينر (Zener Diode)	958، 1649، 1663، 1665
ديود شوتكي (Schottky Diode)	1649، 1653، 1663
ديود كبت الجهد العابر (TVS)	1663

ر

المصطلح	الصفحات
الرادار الموجّه (Guided Wave Radar، GWR)	287، 310
الرادار غير الملامس (Non-Contact Radar)	281، 287، 309
راسم الإشارات بذاكرة (Storage Oscilloscope)	1508
الربط التسلسلي (Serial Link)	779، 793، 795، 909، 934
رمز غراي (Gray)	365، 593، 617
الروبوت الصناعي (Industrial Robot)	698
ريش التوجيه عند المدخل (IGV، Inlet Guide Vanes)	367، 1596

ز

المصطلح	الصفحات
زمن الاحتفاظ (Hold-up Time)	913، 933، 935، 937، 940
زمن الارتفاع (Rise Time)	653
زمن الاستقرار (Settling Time)	453، 652، 653، 654، 659
زمن التأخير (Latency)	326، 806، 1107، 1190، 1691
زمن التفاضل (Derivative Time)	625، 626، 734
زمن التكامل (Integral Time)	376، 619، 623، 627، 1585
الزمن الميت (تأخر النقل) (Dead Time، Transportation Lag)	95، 1562، 1584، 1585، 1586
زمن سلامة العملية (Process Safety Time)	719، 751، 756، 907، 1030
زيت الفصل (Trip Oil)	1232، 1249، 1268، 1270، 1280

س

المصطلح	الصفحات
ساعة القياس (Dial Indicator)	403، 405، 409، 1294
الساق الجافة (Dry Leg)	283، 286، 308
الساق الرطبة (Wet Leg)	283، 284، 285، 286، 1364
ساق الصمام (Valve Stem)	367، 1269، 1456، 1566
سالبة (Negative Feedback)	68، 112، 113، 168، 283
سبائك ذاكرة الشكل (Shape Memory Alloys)	549

المصطلح	الصفحات
سجل التدقيق (Audit Trail)	802، 1460
السحب المتوازن (Balanced Draft)	1339
السدادة القابلة للانصهار (Fusible Plug)	1417
السرعة الكاملة بلا حمل (FSNL)	1250، 1256
السعة (Capacitance)	95، 166، 381، 406، 810
السقاطة (Ratchet)	404، 410، 1249
سلوك القياس السيئ (Bad PV)	741، 1594
السماحية (Permissive)	183، 674، 676، 683، 736
السنكرو (Synchro)	392، 394، 414

ش

المصطلح	الصفحات
شبكة تساوي الجهد (Equipotential Bonding)	928، 929
شجرة الخطر (Hazard Tree)	1439، 1440، 1448
الشجرية (Tree)	830، 1025، 1407، 1440، 1514
شريط أسيتات الرصاص (Lead Acetate Tape)	318، 334
شفاه لوح الفتحة (Orifice Flanges)	918
الشوط الزائد (Over-travel)	342
الشوط المسبق (Pre-travel)	341
الشوكة الهزازة (Vibrating Fork)	295، 376

المصطلح	الصفحات
شيفرة غراي (Gray Code)	365، 373

ص

المصطلح	الصفحات
الصامولة (Nut)	202، 922، 923، 924، 925
صفحة الحلقة (Faceplate)	800، 801
الصفر الحي (Live Zero)	77، 79، 859
الصفر المرفوع (Elevated Zero)	112
الصفر المكبوت (Suppressed Zero)	112
صمام الأمان السطحي (Surface Safety Valve، SSV)	1408
صمام الإيقاف (Shutdown Valve، SDV)	130، 1016، 1047، 1382، 1408
صمام الإيقاف الرئيسي (MSV)	1375، 1403
صمام التفريغ (Dump Valve)	1123، 1124، 1137، 1138، 1267
صمام القفل (Lock-Up Valve)	522، 523
الصمام المؤازر (Servo Valve)	1267، 1268، 1269، 1275، 1487
الصمام المغزلي (Spool Valve)	1446
الصمام الملفي (Solenoid Valve)	514، 522، 524، 525، 741
صمام إيقاف إعادة التسخين (RSV)	1375
صمام تجاوز أو إرجاع (Bypass / Spill)	1276
صمام عدم الرجوع (Check Valve)	557، 1311، 1321، 1415

المصطلح	الصفحات
صمام في الوضع اليدوي (MAN)	68
صناديق التوصيل (Junction Boxes)	837، 908، 915، 917، 932
صندوق الأقفال الجماعي (Group Lock Box)	425، 432، 437
صورة المخارج (Output Image)	666
صورة المداخل (Input Image)	666، 1703

ض

المصطلح	الصفحات
ضبط أعلى الحساس (Upper Sensor Trim)	464، 471
ضبط الحساس (Sensor Trim)	345، 449، 464، 471، 482
ضبط الخرج التناظري (Analog Output Trim)	449، 464، 482
الضبط الذاتي بطريقة المرحّل (Relay Auto-Tuning)	633
ضبط المنضدة (Bench Set)	509، 510، 542، 553، 1483
ضبط لامدا (SIMC / IMC Tuning) (SIMC / IMC)	456، 660
الضغط (Compression)	152، 202، 779، 920، 921
الضغط (Pressure)	54، 128، 130، 151، 158
ضغط الإثبات (Proof Pressure)	352، 354
ضغط الاستقرار (Settle-Out Pressure)	1314، 1320، 1322، 1326
ضغط البدء (Cracking Pressure)	562
الضغط الخلفي (Back Pressure)	400، 566، 567، 581، 587

المصطلح	الصفحات
ضغط الضبط (Set Pressure)	400، 403، 555، 577، 582
الضوضاء (Noise)	492، 501، 503، 506، 593

ط

المصطلح	الصفحات
طرف الغلاف (Case Terminal)	1183
طرفا الاختبار (TEST)	1473
الطرق الاستنتاجية (Inferential Methods)	281
الطرق المباشرة (Direct Methods)	281، 282، 309
الطلب الكيميائي والبيولوجي للأكسجين (COD/BOD)	336
طلب معدل الإحراق (Firing Rate Demand)	1334
الطيار (Pilot)	389، 400، 524، 1233، 1413
الطيار العالي–المنخفض (High-Low Pilot)	1413
الطيف الكامل (Full Spectrum)	1213

ع

المصطلح	الصفحات
عازل الإشارة العادي (Signal Isolator)	960
العازل الجلفاني (Galvanically Isolated IS Barrier)	956، 957، 958، 959، 960
عامل هندسة الأنابيب (Piping Geometry Factor)	502

المصطلح	الصفحات
العجلة اليدوية (Handwheel)	523، 542، 560
عداد الارتباط المتقاطع (Cross-Correlation Flowmeter)	268
عداد التدفق الحراري الكتلي (Thermal Mass Flowmeter)	267، 268
عداد التدفق متعدد الأطوار (Multiphase Flow Meter، MPFM)	234
العداد التوربيني (Turbine Meter)	232، 247، 251، 668
العداد الدوامي (Vortex Shedding Flowmeter)	251
العداد الرقمي (Counter)	362، 667، 713
العداد الصفائحي (Laminar Flowmeter)	269
العداد الكهرومغناطيسي (Magnetic Flowmeter)	231، 260، 261، 276، 984
العداد المثبّت خارجيًا (Clamp-On Meter)	260
العداد المرجعي (Master Meter)	249، 254، 255، 262، 460
عداد الهدف (Target Meter)	238، 363
عداد كوريوليس الكتلي (Coriolis Mass Flowmeter)	233
العدادات السريعة (High-Speed Counter)	362، 667
عدد الخطوط (Lines of Resolution)	136، 1200، 1201، 1204، 1221
عدد النبضات لكل دورة (PPR، Pulses per Revolution)	363، 478
عدم التطابق (Discrepancy)	186، 342، 371، 596، 725
عديم الانحدار (Isochronous)	1257، 1296، 1382، 1384
العزل المزدوج مع التنفيس (Double Block and Bleed)	255، 313، 339، 423، 1100

المصطلح	الصفحات
العزل والإيقاف (Shutoff / Stop)	1273
العزم (Torque)	286، 399، 414، 512، 513
عزم الإغلاق (Seating Torque)	512
عزم الانفكاك (Breakout Torque)	512
العزم الديناميكي (Dynamic Torque)	512
العقدة (Node)	1014، 1016، 1035
عنصر الإسفين (Wedge Element)	238
العوامة (Float)	235، 281، 283، 286، 295

غ

المصطلح	الصفحات
غاز الأجهزة (Instrument Gas)	913، 940، 1419
غاز السدادة (Seal Gas)	1319، 1320، 1321، 1322، 1326
غاز الفصل (Separation Gas)	1319، 1320، 1321
غرض التصميم (Design Intent)	1013، 1014، 1015، 1016، 1024
الغطاء (Bonnet)	488، 531، 560، 567، 975
الغلاف المقاوم للانفجار (Flameproof، Ex d)	152، 342، 526، 914، 915
الغمد الحراري (Thermowell)	54، 93، 124، 130، 198
الغمد الملحوم (Welded Thermowell)	203
غير المؤرَّض (Ungrounded)	177

ف

المصطلح	الصفحات
الفتح السريع (Quick Opening)	494، 495، 1309، 1311
الفتح القسري (Positive Opening)	342
الفتح القفزي بالحلقة المفتوحة (Open-Loop Step)	1306
الفتحة الثابتة المعايرة (Fixed Orifice)	1418
فحص الاحتكاك (Rub Check)	1385، 1386، 1402
فحوص البدء (Start Checks)	1252
فراغ العجلة (Wheel Space)	206
الفرق الحركي (Differential Travel)	342
فرن التكسير الحراري (Pyrolysis Furnace)	1131، 1133
فشل الإشعال (Fail to Light)	1251، 1255، 1368
الفشل الآمن (Fail-Safe)	82، 353، 524، 529، 739
الفشل بالسبب المشترك (Common Cause Failure)	926، 927
الفصل (Trip)	25، 53، 63، 295، 479
الفصل الميكانيكي بالسرعة الزائدة (MOST، Mechanical Overspeed Trip)	1393، 1402، 1403
فصل الوقود الرئيسي (MFT، Master Fuel Trip)	1355
الفعل العكسي (Reverse Acting)	629
الفعل المباشر (Direct Acting)	629
فك الارتباط (Decoupling)	1310، 1316، 1325، 1327، 1391

المصطلح	الصفحات
فك الترميز (Decode)	1684
فهرس الأجهزة (Instrument Index)	21، 36، 983
فوق الصوتي (Ultrasonic)	116، 214، 233، 245، 303
الفوهة (Flow Nozzle)	78، 303، 576، 651، 652
الفوهة والصفيحة (Flapper-Nozzle)	78، 650، 1276

ق

المصطلح	الصفحات
قائمة التعليمات (Instruction List – IL)	669، 670، 697
القدرة المنهجية (Systematic Capability)	906، 1029، 1046، 1059
القدمة ذات الورنية (Vernier Caliper)	404
القراءة فقط (Read-Only)	264، 805، 821، 874، 878
القرب من الانفصال الهوائي (Surge Proximity)	1305
قسائم التآكل (Corrosion Coupons)	1417
قطع التدفق المنخفض (Low Flow Cut-off)	230، 248، 255، 261، 690
قطع التدفق المنخفض (Low Flow Cutoff)	230، 248، 255، 261، 473
قطع التغذية للفصل (De-Energize-to-Trip)	525، 596، 739، 740، 745
القفزات (Spikes)	397، 654، 1401، 1534، 1536
القفل (Lock)	133، 425، 426، 432، 671
قفل المعاملات (Parameter Locking)	802

المصطلح	الصفحات
القوام (Consistency)	337
القوس الجزئي (Partial Arc)	1389، 1390، 1403
القوس الكامل (Full Arc)	1389، 1390، 1403
القياس الإشعاعي (Nuclear، Gamma Level Measurement)	281، 289، 301، 376، 990
القياس التجاري (نقل الملكية) (Custody Transfer)	32، 106، 233، 248، 254
القياس السعوي (Capacitance / RF Admittance)	288
القياس الفقاعي (Bubbler)	283، 299
القياس والتنظيم (Metering / Control)	1273
القيمة الخام (Raw Counts)	96، 383، 688، 689، 690
قيود البنية (Architectural Constraints)	906، 1038، 1045، 1053، 1058

ك

المصطلح	الصفحات
كابل التمديد (Extension Cable)	45، 46، 182، 219، 221
الكابل النحاسي (Twisted Pair)	843، 846
الكابلات متعددة الأزواج (Multipair Cables)	906، 932، 1179
كاشف التوصيل الحراري (TCD، Thermal Conductivity Detector)	316
كاشف رذاذ الزيت (Oil Mist Detector)	1117
كتلة التوصيف (Characterizer)	304، 730، 1589

المصطلح	الصفحات
الكتلة الوظيفية (Function Block)	669، 692، 709، 710، 760
الكربون العضوي الكلي (TOC)	336
كرة الإغلاق الآلي (Ball Velocity Check)	298
الكروماتوغراف الغازي (Gas Chromatograph، GC)	316، 317، 335
الكروي (Globe)	304، 487، 489، 490، 491
الكسب (Gain)	241، 351، 621، 622، 630
كشف الحريق (Fire Detection)	903، 1018، 1040، 1069، 1074
الكلمة الإرشادية (Guide Word)	1014، 1015
الكهرضغطية (Piezoelectric)	149، 398، 549، 1158، 1160
الكود (Code)	40، 365، 873، 895، 896

ل

المصطلح	الصفحات
اللامركزية (Eccentricity)	559، 1146، 1165، 1205، 1385
اللمعان الكيميائي (Chemiluminescence)	318، 334
لوح الفتحة (Orifice Plate)	225، 260، 261، 277، 995
لوحة تحكم رئيسية (Master Control Panel)	1419

م

المصطلح	الصفحات
المؤرخ (Historian)	75، 765، 781، 794، 865
المؤرَّض (Grounded)	177، 854، 1172، 1178، 1179
مؤشر ووب (Wobbe Index)	316، 337، 1235
مؤشرات التدفق المرئية (Sight Flow Indicators)	270
مؤقت المراقبة (Watchdog Timer)	666، 700، 1502، 1692، 1706
مؤقت تأخير التشغيل (TON، On-Delay Timer)	602، 679
مآخذ الكوع (Elbow Taps)	238، 269
المبدلات المدارة (Managed Switches)	842
المتحكم الثانوي (Secondary / Slave)	1564، 1565
المتحكم الدقيق (Microcontroller)	1681، 1696، 1697، 1698، 1704
المتحكم الرئيسي (Primary / Master)	1564، 1566، 1580
المتحكم الرئيسي للمرجل (Boiler Master)	1334، 1335
المتحكم المنطقي المبرمج (PLC، Programmable Logic Controller)	136، 659، 663، 665
متحكم منطق ضبابي (Fuzzy Logic Controller)	1349
المتطلب التشريعي (Statutory Requirement)	897، 939
المتطلب التنظيمي (Regulatory Requirement)	898، 939
متعدد الأنماط (Multimode)	843
متعدد الدورات (Multi-Turn)	365

المصطلح	الصفحات
المتغير (Parameter)	54، 128، 129، 802، 1014
متغير العملية (Process Variable، PV)	1374
المُثبِت (Prover)	233، 254، 260، 562، 1187
المجداف الدوار (Rotating Paddle)	299
المجرى الأنبوبي للكابلات (Conduit)	866
المجرى المضيِّق (Flume)	236
مجس أخذ العينة (Sample Probe)	312
مجس السرعة السيزمي (Seismic Velocity Transducer)	1158
مجس القرب بالتيارات الدوامية (Eddy-Current Proximity Probe)	1149
المجس المغناطيسي السلبي (Passive Magnetic، Variable Reluctance Pickup)	1148، 1197
المجمّع (Totalizer)	460، 478، 1334، 1336، 1667
المُجمِّع الرقمي (Multiplexer)	599
مجموعات معدل التنفيذ (Rate Groups)	1291
محابس المقياس (Gauge Cocks)	298
المحاكاة (Simulation)	477، 479، 1507، 1511، 1556
محدد المعدل (Rate Limiter)	712، 713، 729، 731، 754
المحرك الخطوي (Stepper Motor)	549
محطات التشغيل (Operator Station – OS)	92، 763، 786، 870، 889

المصطلح	الصفحات
المحطة الرئيسية (Master Terminal Unit – MTU)	771، 772
محطة الصمام (Valve Station)	533
محطة الهندسة (Engineering Station – ES)	764، 768، 786، 876، 885
محطة يدوي/آلي (A/M Station)	733، 734، 745، 755
محلل الأكسجين (Oxygen Analyzer)	340، 1367، 1369
المحلل الزاوي (Resolver)	365، 392، 393، 1274، 1275
المحول (Transformer)	366، 367، 702، 1353، 1693
محوّل التيار إلى ضغط (I/P Converter)	130
مخروط الرؤية (Cone of Vision)	1076
مخطط التركيب (Hook-up Drawing)	37، 155، 168، 169
مخطط الحلقة (Loop Diagram)	37، 476، 894، 930، 935
مخطط السلّم (Ladder Diagram – LD)	669، 709
المخطط القطبي (Polar، Nyquist Plot)	1200، 1212، 1694
مخطط الكتل الوظيفية (Function Block Diagram، FBD)	669، 697، 709، 710
مخطط الكتل الوظيفية (Function Block Diagram – FBD)	669، 697، 709، 710
مخطط المخاطر (Risk Graph)	1028، 1043
مخطط الوظائف التتابعية (Sequential Function Chart – SFC)	670، 738
مخطط تدفق العملية (PFD، Process Flow Diagram)	125، 1012
مخمّد النبضات (Snubber)	162

المصطلح	الصفحات
المداخل القابلة للضبط (Tunables)	1291
المدار (Orbit)	842، 860، 1155، 1200، 1205
المدى (Range)	52، 53، 119، 252، 446
المدى الأدنى (Minimum Span)	120
المدى القابل للضبط (Adjustable Range)	352، 354
مراجعة السلامة قبل البدء – (Pre-Startup Safety Review PSSR)	1028
المراقبة (Monitoring)	525، 739، 818، 841، 842
مراقبة الخط (Line Monitoring)	86، 525، 529، 556، 739
المراقبة المستمرة (Online Condition Monitoring)	1216، 1217، 1623
المرآة المبردة (Chilled Mirror)	320، 332، 379، 380
المرجع الطوري (Keyphasor)	1146، 1147، 1148، 1149، 1197
المرجل ذو المرور الواحد (Once-Through Boiler)	1330
مرحّل الحجب والتنفيس (Block-and-Bleed Relay)	1421
المرحّل والملامس (Contactor)	548، 619، 667، 1115
المرسل (Transmitter)	74، 99، 121، 168، 1473
المرشح المنطقي (BFILT)	720
المرشح المنظم (Filter Regulator)	522
المُزاح (Displacer)	281، 286، 461، 990
المزامنة (Synchronizing)	802، 1254، 1257

المصطلح	الصفحات
المزدوجة الحرارية (Thermocouple)	74، 174، 1314
مُزيل التجميع (Demultiplexer)	599
مسار العودة (Return Path)	1169
المسار المباشر للإشارة (Direct Signal Path)	1177
المسار المسيطر (Selected / In Control)	1245
مسافة الاستشعار الاسمية (Sn، Nominal Sensing Distance)	343
مسافة الاستشعار المضمونة (Sa، Assured Sensing Distance)	343
مسبار الرمل (Sand Probe)	1410، 1412، 1417، 1428
المستوى (Level)	54، 57، 92، 297، 1343
مستوى تكامل السلامة (Safety Integrity Level، SIL)	1037، 1060
المسجلات (Registers)	213، 600، 601، 617، 833
مسجلات الإزاحة (Shift Registers)	601
المشعب (Manifold)	1252، 1255، 1273، 1413، 1524
المشغل (Actuator)	23، 93، 513، 524، 545
المشغل الإلكتروني (Driver)	130، 240، 1272، 1275، 1278
المشغل الغشائي النابضي (Spring-and-Diaphragm Actuator)	507
المشغل الكهربائي (Electric Actuator، MOV)	508، 1274، 1275
المشغل الكهروهيدروليكي (Electro-Hydraulic)	508، 1268، 1377
المشغل المكبسي (Piston Actuator)	508، 517

المصطلح	الصفحات
المصادقة على الوظيفة المنفذة (SIL Validation)	1029
مصفوفة السبب والنتيجة (Cause & Effect Matrix)	21، 37، 134، 1096، 1136
مصفوفة الكسب النسبي (Relative Gain Array – RGA)	1587، 1600
مضاعف الفصل (Trip Multiply)	1167، 1191، 1195، 1196، 1198
مضخات الخط الرئيسي (Mainline Pumps)	1117
مضخات القياس (Metering Pumps)	269
المعالج الدقيق (Microprocessor)	1681، 1696، 1697، 1712، 1713
معامل K (K-Factor)	247، 248، 251، 255، 261
معامل العداد (Meter Factor)	248، 249، 255، 262، 460
معامل القياس (Scale Factor)	1154، 1157، 1162، 1189، 1195
معاملات التأثير (Influence Coefficients)	1186، 1214، 1216، 1222
المعاملات الكيانية (Entity Parameters)	915، 942، 954، 960، 968
معاير العمليات (Process Calibrator)	474، 480، 1475
المعايرة (Calibration)	241، 270، 439، 483، 1080
المعايرة بالتعبئة (Wet Calibration)	462
المعزز الحجمي (Volume Booster)	514، 522، 1311، 1324
المغذّى من الحلقة (Loop-Powered)	79
المغناطيسي التضييقي (Magnetostrictive)	282، 286، 388، 395، 397
المغناطيسي المرن (Magnetoelastic)	399، 414

المصطلح	الصفحات
مفتاح الاختيار محلي/بعيد (Local/Remote Selector)	799
مفتاح التدفق (Flow Switch)	300، 810، 1086
مفتاح الريشة (Paddle، Vane Switch)	269، 299، 356، 1207، 1209
مفتاح القصبة (Reed Switch)	393
مفتاح المستوى المرتفع (LSH)	297
مفتاح المستوى المنخفض (LSL)	297
المقارن (Comparator)	599، 711، 716، 752، 1656
المقارن بتخلف (COMPHYS)	716، 752، 753، 1289
المقاطعة (Interrupt)	694، 1682، 1689، 1690، 1691
المقاومة (Resistance)	95، 300، 397، 1648، 1659
المقرن الضوئي (Optocoupler)	1655، 1669، 1676
المقعد الخلفي (Back Seat)	560، 561
مقياس الانكسار (Refractometer)	337
مقياس التسارع الكهرضغطي (Piezoelectric Accelerometer)	1158
مقياس التيار بالملقط (mA Clamp Meter)	1473، 1643
مقياس الجهد (Potentiometer)	388، 389، 392، 393، 394
مقياس الخلوص بالشرائح (Feeler Gauge)	366، 404، 405، 1239
المقياس الزجاجي (Gauge Glass)	281، 282، 295، 308، 309
المقياس المغناطيسي (Magnetic Level Gauge)	282

المصطلح	الصفحات
المقيِّد (Restrictor)	1421، 1632
مكبر العمليات (Op-Amp)	1670
المكشوف (Exposed)	176، 214، 215، 908، 1085
مكيّف الجريان (Flow Conditioner)	253
الملف (Inductor)	524، 526، 527، 529، 1662
الملف اللولبي (Solenoid)	522، 524، 547، 741، 894
الممسك (Latch)	361، 606، 711، 720، 744
منحنى الاتجاه (Trend)	75، 1200، 1247، 1463، 1536
المنصة المساعدة (Auxiliary Console)	907
منطق المرحّلات الاحتياطي (Backup Relay Logic)	1283
المنطقة (Zone)	351، 433، 620، 951، 976
المنطقة الميتة (Deadband)	352، 355، 357، 537، 538
منطقة منزوعة السلاح (Demilitarized Zone – DMZ)	765، 767، 856، 888
منطقة ميتة للإنذار (Alarm Deadband)	690
منظم الضغط الابتدائي (IPR)	1388، 1389
منع تشبع التكامل (Anti-Windup)	623، 624، 652، 660، 1346
المواصفة القياسية (Standard)	56، 102، 126، 560، 565
الموضع (Positioner)	97، 488، 1274، 1482، 1483
الموضع الرقمي الذكي (Digital Valve Controller، DVC)	517

المصطلح	الصفحات
الموضع المحوري (Axial، Thrust Position)	390، 395، 563، 1146، 1164
الموضع المركزي للعمود (Shaft Centerline)	1200، 1205، 1206، 1222
مولد البخار باستعادة الحرارة (HRSG)	293، 1255، 1330، 1359، 1397
الميز (Resolution)	53، 95، 114، 846، 1388
ميزان الأثقال الميتة (Deadweight Tester)	451، 457
الميكرومتر (Micrometer)	396، 403، 404، 410، 1189

ن

المصطلح	الصفحات
نبض حياة (Heartbeat)	740، 779، 793، 794، 854
نسبة الاضمحلال (Decay Ratio)	653، 654، 661
نسبة المدى (Rangeability)	90، 112، 120، 252، 491
نسبة هبوط الضغط (Pressure Drop Ratio)	494، 499، 500، 502، 539
النص المهيكل (Structured Text – ST)	603، 613، 669، 673، 674
النطاق التناسبي (Proportional Band، PB)	621، 622، 644، 651، 652
نظام إدارة الحارقات (BMS، Burner Management System)	1074، 1099، 1329، 1330، 1355
النظام الإمبراطوري (Imperial)	900
نظام التحكم الموزع (DCS، Distributed Control System)	362، 415، 420، 663، 759
النظام الثنائي (Binary)	77، 81، 592

المصطلح	الصفحات
النظام السداسي عشري (Hexadecimal)	592
نظام السلامة الآلي (Safety Instrumented System، SIS)	413، 417، 676، 873، 1037
النظام المدمج (Embedded System)	1682، 1702
النظام المطابق (Matched System)	1154، 1162، 1195، 1197، 1198
النظام على رقاقة (SoC)	1700
النفي (NOT)	595، 596، 603، 617، 715
نقطة الإرجاع (Reset Point)	342، 345، 352، 355، 449
النقطة الثلاثية (Triple Point)	443، 444، 445
نقطة الضبط (Setpoint)	66، 355، 358، 647، 651
نقطة الندى (Dew Point)	56، 319، 379، 380، 937
نقل الصمامات (Valve Transfer)	1386، 1403

ه

المصطلح	الصفحات
هامش الضوضاء (Noise Margin)	593
هامش الكسب (Excess Gain)	350، 351، 373
الهوائي (Pneumatic)	77، 127، 1305، 1323، 1327

و

المصطلح	الصفحات
الواجهة البينية (Interface)	92، 292، 797، 848، 849
الوحدات الطرفية البعيدة (Remote Terminal Unit – RTU)	772، 851
وحدة استرداد الكبريت (SRU)	1129، 1131
وحدة التشغيل (Proximitor، Driver)	74، 130، 1154، 1156، 1171
وحدة الحساب والمنطق (ALU)	1681، 1682، 1683، 1684
الوسم (Labeling)	131، 142، 417، 467، 1606
الوسم (Tag)	128، 131، 142، 417، 467
الوسيط (Median)	713، 723، 726، 746، 753
الوسيط (Median Select)	726، 746، 753، 1284، 1555
الوصول المباشر للذاكرة (DMA)	1689، 1690
وضع التعديل الحي (Online Edit)	695
وضع الفتح الأدنى (Minimum Position)	1309
وضع الفشل (Fail Action)	137، 143، 508، 529، 553
الوضع المطلوب (Requested Mode)	1245
وعاء التكثيف (Condensate Pot)	51، 153، 283
وعاء الحجم (Volume Bottle)	1421
الوقود هو المتغير المعدَّل (Manipulated Variable)	54، 66، 1234
الوميض (Flashing)	241، 501، 505، 1488، 1694