مرجع عملي وهندسي للمهندسين والفنيين والطلاب

التوربينات الغازية

مرجع شامل في التوربينات الغازية



هاشم حسين الخصاونة

Hashem Hussein Al-Khasawneh

التوربينات الغازية

مرجع عملي وهندسي للمهندسين والفنيين والطلاب

هاشم حسين الخصاونة

رقم الايداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2026/8/5258)

بيانات الفهرسة الأولية للكتاب:

عنوان الكتاب	التوربينات الغازية: مرجع عملي وهندسي للمهندسين والفنيين والطلاب.
تأليف	الخصاونة، هاشم حسين علي
بيانات النشر	عمان: هاشم حسين علي الخصاونة ، 2026
الوصف المادي	586 صفحة
رقم التصنيف	621.3124
الواصفات	/التوربينات الغازية//الصيانة//أنظمة التحكم//توليد الطاقة// الهندسة الكهربائية/
الطبعة	الطبعة الأولى

ISBN 978-9923-0-2783-7 (ردمك)

يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبّر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى.

التوربينات الغازية

مرجع عملي وهندسي للمهندسين والفنيين والطلاب — من إعداد هاشم حسين الخصاونة

كلمة المؤلف

هذا الكتاب خلاصة رحلة امتدت لأكثر من اثنين وعشرين عامًا في مجال التوربينات الغازية، عملتُ خلالها مع شركات متعددة، وعلى أنواع مختلفة من التوربينات، وفي تطبيقات وبيئات تشغيل متنوعة. وطوال تلك السنوات لمستُ نقصًا واضحًا في المراجع العربية المتخصصة في هذا المجال، ونقصًا أكبر في المراجع التي تتناول الجانب العملي والميداني — حتى باللغة الإنجليزية — فكان هذا الكتاب محاولتي لسدّ شيء من ذلك النقص.

حاولتُ فيه، قدر استطاعتي، أن أوضّح المعلومة وأبسّطها، وأن أربط الجانب النظري بالتطبيق العملي، وأن أنقل إلى القارئ ما لا يُكتب عادةً في الكتب: ما يحدث فعلًا في الميدان.

وأعتذر مقدمًا عن أي خطأ أو نقص قد يرد في هذا الكتاب؛ فما هذا العمل إلا محاولة متواضعة لنقل جزء من المعرفة والخبرة التي اكتسبتها خلال سنوات العمل والتعلّم.

وفي الختام، أتقدم بخالص الشكر والتقدير لكل من علّمني ودرّبني، ولكل من عمل معي وشاركني خبرته، ولكل من ساعدني أو قدّم لي معلومة أو نصيحة خلال مسيرتي المهنية؛ فقد كان لكل واحد منهم أثر في تكوين هذه الخبرة التي أحاول اليوم أن أضع جزءًا منها بين أيديكم.

والحمد لله أولًا وآخرًا، وما توفيقي إلا بالله.

هاشم حسين الخصاونة

المقدمة

لماذا هذا الكتاب؟

بدأت هذا الكتاب من ملاحظة تكررت أمامي طوال سنوات العمل الميداني الطويلة على التوربينات الغازية وأنظمة تحكمها: المهندس أو الفني العربي الذي يقف أمام وحدة توربين غازي لأول مرة يجد نفسه بين خيارين، كلاهما ناقص.

الخيار الأول: كتب أجنبية ممتازة لكنها أكاديمية — تشرح دورة برايتون بعمق رياضي، لكنها لا تجيب عن السؤال الذي يواجهه فعلًا في الساعة الثالثة فجرًا: لماذا لم تشتعل الوحدة؟ ولماذا ارتفعت قراءة واحدة من بين عشرين؟ ومن أين أبدأ؟

الخيار الثاني: أدلة المصنّعين — دقيقة وموثوقة، لكنها مكتوبة لمعدة بعينها، ولا تشرح لماذا صُمّم الشيء بهذه الطريقة، ولا تصلح للانتقال من منصة إلى أخرى.

وبينهما تبقى الفجوة الحقيقية: مرجع عربي واحد يربط المبدأ الفيزيائي بالمكوّن، والمكوّن بنظام التحكم، ونظام التحكم بالحماية، والحماية بما يحدث فعلًا في الميدان حين تسوء الأمور. هذا الكتاب محاولة لسدّ تلك الفجوة.

لمن كُتب؟

- مهندس أو فني في بداية الطريق يحتاج إلى بناء صورة كاملة ومتماسكة من الصفر.
- مهندس تشغيل أو تحكم أو صيانة ذو خبرة يبحث عن ترتيب لما يعرفه، وعن الزوايا التي لم يمر بها بحكم تخصصه.
- مهندس منتقل من مجال آخر — من العمليات، أو من الكهرباء، أو من الأتمتة الصناعية — يحتاج مدخلًا سريعًا وعمليًا لعالم التوربينات.
- الدارس أو المتدرّب الذي يريد فهمًا يتجاوز حفظ التعريفات.

كيف كُتب؟ خمسة مبادئ التزمت بها

1. **لغة عربية واضحة،** ومصطلح إنجليزي بين قوسين. فالمهندس في الموقع يتعامل عمليًا بالمصطلح الإنجليزي — والكتاب يجب أن يهيّئه لذلك، لا أن يعزله عنه.
2. **الربط قبل التفصيل.** لن تجد قسمًا يقف وحده: كل موضوع مرتبط صراحةً بما قبله وما بعده بإشارات مرجعية (مثل "راجع 7.2")، لأن الأعطال الحقيقية لا تحترم حدود الفصول.
3. **"لماذا" قبل "كيف".** معرفة أن التصميم يفعل شيئًا ما لا تكفي؛ المفيد هو معرفة ما الذي يحدث إن لم يفعله.
4. **صدق في حدود المعرفة.** حيث يختلف السلوك من منشأة لأخرى — منطق السبب والأثر، فلسفة القطع، أوقات التأخير — قلت ذلك صراحةً بدل تقديم قاعدة عامة زائفة. لا تفترض أن وحدتك تتصرف كما في أي كتاب، بما فيه هذا الكتاب.

ماذا يغطي الكتاب؟

سبعة وعشرون فصلًا وسبعة ملاحق، موزّعة على **ستة أبواب** تتدرج من المبدأ إلى الممارسة:

الباب	يغطي	الفصول
الأول: الأساسيات	التعريف، دورة برايتون، التطبيقات، المزايا والقيود	1–4
الثاني: المكونات والأنظمة	الضاغط والاحتراق والتوربين والعمود، السحب والعادم، الأنظمة المساعدة	5–6
الثالث: الحماية والسلامة	فلسفة الحماية، السرعة الزائدة، الحرارة، الاهتزاز، اللهب، الحريق والغاز، زيت القطع	7
الرابع: التشغيل والصيانة والتشخيص	التشغيل والصيانة، مؤشرات الأداء، الحالات الميدانية، تلف المسار الساخن	8، 10، 13، 16
الخامس: التحكم والقياس	منطق التحكم، التكامل مع DCS، بنية النظام وبرمجته، سلسلة الإشارة، PID والتحكم المتقدم، تدريبات تشخيصية	9، 11، 12، 15، 19–21

الباب	يغطي	الفصول
السادس: المولد والمشروع والبيئة والمستقبل	المولد والشبكة، التشغيل التجريبي، الانبعاثات، الذكاء الاصطناعي، التوربينات المشتقة من الطيران، هواء السحب، البدء، الدورة المركبة	14، 17، 18، 22–27

كيف تقرأ هذا الكتاب؟

الكتاب مصمَّم ليُقرأ **انتقائيًا** لا بالضرورة بالترتيب.

المحتويات

الباب الأول: الأساسيات

الفصل الأول: ما هو التوربين الغازي؟ 17

1.1 التعريف 18
1.2 الفكرة الأساسية بأبسط شكل 19
1.3 التوربين الغازي مقابل غيره من المحركات 20
1.4 لمحة سريعة عن تطوره عبر الزمن 21
1.5 لماذا هذا المحرك بالذات؟ 21

الفصل الثاني: مبدأ عمل التوربين الغازي 23

2.1 المراحل الثلاث الأساسية لعمل التوربين الغازي 24
2.2 دورة برايتون: الإطار النظري 25
2.3 الفرق بين الدورة النظرية والدورة الفعلية 27
2.4 العوامل المؤثرة في الأداء 29
2.5 لماذا الكفاءة أقل من المتوقع أحيانًا؟ وطرق تحسينها 30
2.6 أمثلة محلولة على دورة برايتون: من المعادلة إلى القرار الهندسي 32

الفصل الثالث: تطبيقات واستخدامات التوربين الغازي 37

3.1 توليد الكهرباء 38
3.2 الطيران 43
3.3 النقل البحري 44
3.4 النفط والغاز 45
3.5 معايير اختيار النوع المناسب لكل تطبيق 50

الفصل الرابع: إيجابيات وسيئات التوربين الغازي 55

4.1 أبرز الإيجابيات 56
4.2 أبرز السلبيات والتحديات 57
4.3 موازنة عملية: متى يكون الخيار الأفضل؟ 59

الباب الثاني: المكونات والأنظمة

الفصل الخامس: مكونات التوربين الغازي 61

5.1 نظرة عامة على البنية العامة 62
5.2 الضاغط 64
5.3 غرفة الاحتراق 69
5.4 قسم التوربين 73
5.5 العمود والمحامل 75
5.6 السحب والعادم 81
5.7 لماذا صُمّم التوربين هكذا؟ من المشكلة إلى الحل التصميمي 84
5.8 نظام العادم بالتفصيل: آخر ما يراه الغاز، وأول ما يُهمَل 87

الفصل السادس: الأنظمة المساعدة 95

6.1 نظام التزييت 96
6.2 نظام الوقود 99
6.3 نظام التبريد والتهوية 104
6.4 نظام بدء التشغيل 105
6.5 نظام التحكم بالسرعة (الحاكم) 701
6.6 نظام الإثارة والمولد 110
6.7 حجرة التوربين ونظام التهوية (Turbine Enclosure and Ventilation System) 112
6.8 التغذية الكهربائية المساعدة: التيار المستمر والبطاريات والUPS 118

الباب الثالث: الحماية والسلامة

الفصل السابع: حماية التوربين الغازي 121

7.1 فلسفة الحماية: لماذا طبقات متعددة؟ 122
7.2 الحماية من السرعة الزائدة (Overspeed Protection) 124
7.3 الحماية من الحرارة الزائدة (Overtemperature Protection) 131
7.4 مراقبة الاهتزاز (Vibration Monitoring) 135
7.5 مراقبة اللهب والاحتراق (Flame Monitoring) 142
7.6 نظام الحريق والغاز (Fire & Gas System) 144
7.7 تسلسل الإنذارات والقواطع (Alarm & Trip Hierarchy) 147
7.8 فلسفة الإيقاف الطارئ (Emergency Shutdown — ESD) 150
7.9 نظام زيت القطع (Trip Oil System): الواجهة التي يلتقي عندها كل شيء 158
7.10 مراقب الاحتراق ومعادلة الفارق المسموح 161
7.11 حمايات "سلامة الإشارة": حين تحمي المنظومة نفسها من عماها 163

الباب الرابع: التشغيل والصيانة والتشخيص

الفصل الثامن: تشغيله وصيانته 165

8.1 أنواع الصيانة: مفاهيم أساسية 166
8.2 الصيانة الوقائية الدورية 167
8.3 الصيانة التصحيحية وأسلوب التشخيص 169
8.4 الفحوصات الدورية الكبرى 171
8.5 مراقبة الأداء (Performance Monitoring) 174
8.6 السلامة أثناء العمل: العزل والتصريح وإدارة التغيير 178
8.7 مراقبة حالة الزيت: أرخص نافذة على صحة المعدة 181

الباب الخامس: التحكم والقياس

الفصل التاسع: التحكم في التوربين الغازي 187

9.1 نظرة عامة على منطق التحكم 188
9.2 التحكم بكمية الوقود لضبط السرعة وحرارة العادم 191
9.3 التحكم بالتشغيل والإيقاف 194
9.4 المعطيات الأساسية: نقاط الضبط والمراقبة 200
9.5 التحكم بكمية الهواء الداخل 203
9.6 أجهزة القياس وتكرارها 206
9.7 حسّاس LVDT: أهم حسّاس موضع بالتحكم 209
9.8 الأمن السيبراني لأنظمة التحكم (OT Cybersecurity) 211
9.9 داخل منطق التوربين: مستويات السرعة، الإذن الرئيسي، ومنحنى تحكم الحرارة 214

الفصل العاشر: استكشاف الأعطال والتحقيق في مشاكل التوربين الغازي 219

10.1 منهجية التحقيق المنظّم 220
10.2 ارتفاع حرارة العادم (High Exhaust Gas Temperature) 221
10.3 ارتفاع فارق حرارة العادم (High Exhaust Temperature Spread) 221
10.4 ارتفاع الاهتزاز (High Vibration) 222
10.5 انخفاض ضغط تفريغ الضاغط (Low Compressor Discharge Pressure) 222
10.6 انحباس/ترنح الضاغط (Compressor Surge / Stall) 223
10.7 فشل بدء التشغيل (Failure to Start) 223
10.8 فشل التسارع (Failure to Accelerate) 224
10.9 فشل الإشعال (Flame Failure) 224
10.10 ارتفاع حرارة المحمل (High Bearing Temperature) 225

10.11 انخفاض ضغط زيت التزييت (Low Lubricating Oil Pressure) 225
10.12 مشاكل صمام/محرك الوقود (Fuel Valve / Actuator Problems) 225
10.13 فقدان اتصال نظام التحكم (Loss of Control-System Communication) 226
10.14 قاطع السرعة الزائدة (Overspeed Trip) 226
10.15 سرعة مولد الغاز غير طبيعية (Abnormal Gas Generator Speed) 227
10.16 مشاكل سرعة توربين القدرة (Power Turbine Speed Problems) 227
10.17 ارتفاع استهلاك الوقود / انخفاض الأداء (High Fuel Consumption / Low Performance) 227
10.18 قواطع متكررة وقواطع كاذبة (Frequent and Nuisance Trips) 228

الفصل الحادي عشر: التكامل والاتصال بين نظام التحكم بالتوربين والـ DCS 229

11.1 الفرق بين Turbine Control System وDCS 230
11.2 طرق الاتصال بين النظامين 230
11.3 الإشارات المتبادلة بين TCS وDCS 231
11.4 فلسفة التحكم 232
11.5 الاعتمادية والردّية بالاتصال (Redundancy and Communication Reliability) 232
11.6 استكشاف أعطال الاتصال (Troubleshooting Communication Problems) 233
11.7 الأمن السيبراني (Cybersecurity) 234
11.8 البنية النموذجية للاتصال 235

الفصل الثاني عشر: بنية نظام التحكم بالتوربين وبرمجته 237

12.1 بطاقات الإدخال والإخراج ومسار الإشارة داخل نظام التحكم 238
12.2 لماذا هذا الموضوع يهم مهندس التوربينات؟ 245
12.3 (LD) Ladder Diagram 245
12.4 (FBD) Function Block Diagram 247
12.5 (ST) Structured Text 247
12.6 (IL) Instruction List 248
12.7 (SFC) Sequential Function Chart 248
12.8 البرمجة التقليدية/الخاصة بالمصنّع (Traditional/Proprietary Coding) 248
12.9 مثال تطبيقي: نفس المنطق بثلاث طرق 249
12.10 من المنطق البسيط إلى التسلسل الكامل 250
12.11 مكتبة الكتل الوظيفية القياسية: أمثلة عملية 250
12.12 داخل خزانة التحكم: الرفوف والبطاقات ولوحات الأطراف 257
12.13 بيئة الهندسة والبرمجة: كيف يُعدَّل المنطق فعليًا؟ 260
12.14 الإنذارات: تصنيفها وتتبّعها حتى المنطق الذي أطلقها 262
12.15 التصويت عمليًا: أين يحدث بالبرمجيات وأين بالأسلاك؟ 264

الفصل الثالث عشر: الحالات العملية والخبرة الميدانية 269

13.1 منهجية توثيق الحالات: قالب ثابت لكل حالة 270
13.2 من مجتمعات المهندسين حول العالم: مشاكل متداولة ودروسها 290
13.3 أخطاء شائعة في تشخيص أعطال التوربينات 292

الفصل الرابع عشر: التطورات الحديثة 295

14.1 التوربين الغازي الرقمي (Digital Gas Turbine) 296
14.2 المراقبة عن بعد (Remote Monitoring) 297
14.3 الحسّاسات الذكية وإنترنت الأشياء الصناعي (Smart Sensors & Industrial IoT) 298
14.4 تحديث وترقية أنظمة التحكم القديمة (Controller Modernization) 299
14.5 اتجاهات ناشئة بالوقود والتصنيع 300

الفصل الخامس عشر: مقارنة عملية بين أنظمة التحكم بالتوربين الغازي 303

15.1 لماذا هذه المقارنة تحديدًا؟ 304
15.2 جدول المقارنة الشامل 305
15.3 GE Speedtronic Mark VIe — فلسفة «التوربين أولًا» 307
15.4 Woodward MicroNet Plus وبيئة GAP 307
15.5 Allen-Bradley ControlLogix — منصة عامة تُبنى عليها تطبيقات التوربين 308
15.6 لغات البرمجة عبر الأنظمة الثلاثة 309
15.7 البنية والردّية عبر الأنظمة الثلاثة 310
15.8 التكامل مع DCS والتشخيص 310
15.9 اختيار المنصة المناسبة: منظور ميداني 311

الفصل السادس عشر: آليات تلف مكونات المسار الساخن والفحص بالمنظار 313

16.1 لماذا تتلف مكونات المسار الساخن أصلًا؟ 314
16.2 آليات التلف الرئيسية 315
16.3 الفحص بالمنظار (Borescope Inspection) 318
16.4 من الملاحظة إلى القرار 320
16.5 اهتزاز الشفرات والإجهاد وتقدير العمر 320
16.6 تلف الشفرات الناتج عن الوقود ومنظومة الاحتراق 324
16.7 قطع الغيار والترميم: عندما تصير الجودة مسألة سلامة 327
16.8 خلاصة عملية: ما الذي يطيل عمر المسار الساخن فعليًا؟ 328

الفصل السابع عشر: التشغيل التجريبي والاختبارات ومؤشرات الموثوقية 329

17.1 تسلسل التشغيل التجريبي 330
17.2 اختبار الأداء: لماذا لا يكفي أن "نقرأ الرقم"؟ 333

17.3 مؤشرات الموثوقية والإتاحية 334
17.4 اقتصاديات دورة الحياة: ما الذي يكلّف فعلًا؟ 335
17.5 من واقع الميدان: أكثر ما يتعثّر أثناء التشغيل التجريبي 336

الباب السادس: المولد والمشروع والبيئة والمستقبل

الفصل الثامن عشر: المولد والشبكة — التزامن والحماية الكهربائية 339

18.1 التزامن مع الشبكة (Synchronization) 341
18.2 من يتحكم بماذا: القدرة الفعّالة مقابل الرَّدّية 342
18.3 أهم حمايات المولد 342
18.4 الترابط: من يقطع من؟ 344
18.5 من واقع الميدان 344
18.6 الحاكم ومنظّم الجهد: من يتحكم بماذا — قبل القاطع وبعده 345
18.7 دروب أم أيزوكرونس؟ خاصية الحاكم التي تحدد سلوك الوحدة على الشبكة 349
18.8 الخريطة الكاملة: من الوقود إلى الشبكة 352

الفصل التاسع عشر: سلسلة الإشارة الكاملة — من الحقل إلى الشاشة والعودة إلى العنصر النهائي 355

19.1 لماذا نفكّر بـ"سلسلة" لا بـ"جهاز"؟ 357
19.2 مسار الدخل: من العملية إلى المشغّل 357
19.3 مسار الخرج: من القرار إلى العملية 359
19.4 مفاهيم عرضية تسري على السلسلة كلها 361
19.5 منهجية تشخيص السلسلة: التنصيف بدل المشي 362
19.6 من واقع الميدان 363

الفصل العشرون: حلقات التحكم المغلقة، المتحكم PID، الضبط والتحكم المتقدم 365

20.1 النظام المغلق والتغذية الراجعة (Closed Loop and Feedback) 366
20.2 اختبار أداء نظام التحكم (Control Performance Test) 368
20.3 المتحكم PID: ماذا يفعل كل حدّ فعليًا؟ 369
20.4 مشكلة التشبّع التكاملي (Integral Windup) 371
20.5 ضبط المتحكم (PID Tuning) 372
20.6 ما بعد PID: التحكم المتقدم 374
20.7 تطبيق متكامل: التحكم بمستوى الطبلة في مرجل استرداد الحرارة (HRSG Drum Level Control) ... 377

الفصل الحادي والعشرون: تدريبات تشخيصية في التحكم والقياس — من العرض إلى السبب الجذري 385

21.1 المنهجية الموحدة: عشر خطوات لأي مشكلة 386
21.2 التدريبات الخمسة عشر 387
21.3 مصفوفة التشخيص السريع 393

الفصل الثاني والعشرون: الانبعاثات وحماية البيئة — تطور تقني بأربعة عقود 397

22.1 لماذا يعني هذا الفصل مهندس التحكم تحديدًا؟ 398
22.2 ما الذي يخرج من المدخنة فعلًا؟ 398
22.3 الخريطة التاريخية الكاملة 400
22.4 المرحلة الأولى: Diffusion Flame — الثبات مقابل NOx 402
22.5 الحل الأول: حقن الماء (Water Injection) 402
22.6 حقن البخار (Steam Injection) 403
22.7 الثورة الحقيقية: DLN / DLE والاحتراق الفقير المُعدّ مسبقًا 404
22.8 ما بعد الاحتراق: الاختزال الحفزي الانتقائي (SCR) 407
22.9 ولم يعد NOx وحده المشكلة: محفّز أكسدة CO 408
22.10 ماذا عن SOx والجسيمات؟ دور نوعية الوقود 411
22.11 الدورة المركبة والهيدروجين: البُعد المناخي 411
22.12 القياس المستمر: CEMS 413
22.13 التنبؤ بدل القياس: PEMS 414
22.14 المرحلة الحالية: من المراقبة إلى التنبؤ والتحسين بالذكاء الاصطناعي 415
22.15 من الميدان: مشاكل شائعة في منظومة الانبعاثات 417
22.16 خلاصة الفصل 418

الفصل الثالث والعشرون: الذكاء الاصطناعي ومستقبل التحكم بالتوربينات الغازية 421

23.1 هل بدأ هذا فعلًا، أم أنه حديث مستقبلي؟ 422
23.2 الذكاء الاصطناعي مقابل التحكم التقليدي: ليسا بديلين 424
23.3 تعلّم الآلة: ما الذي يناسب التوربين فعلًا؟ 425
23.4 التوأم الرقمي (Digital Twin) 426
23.5 المراقبة الذكية للحالة وكشف الشذوذ 427
23.6 الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance) 428
23.7 التحسين: احتراق، وقود، وأداء 429
23.8 التشخيص المُعان بالذكاء الاصطناعي 430
23.9 الضبط الذاتي (Autonomous Tuning) 431
23.10 الحوسبة الطرفية (Edge AI) والتكامل مع TCS/DCS 432
23.11 الأمن السيبراني في عصر الذكاء الاصطناعي 433

23.12 الإنسان داخل الحلقة (Human-in-the-Loop) 434
23.13 حدود الذكاء الاصطناعي: ما لا يستطيع فعله 435
23.14 الذكاء الاصطناعي ومنظومة الحماية: الخط الذي لا يُتجاوَز 436
23.15 التوربين الذاتي: كيف سيبدو المستقبل واقعيًا؟ 437
23.16 خلاصة الفصل 438

الفصل الرابع والعشرون: التوربينات المشتقة من الطيران (Aeroderivative) والآلات ثنائية العمود 439

24.1 لماذا يستحق هذا الموضوع فصلًا مستقلًا؟ 440
24.2 البنية: مولّد الغاز والتوربين الحر 441
24.3 السرعات: N1 وN2 وNPT — وماذا تقول كل واحدة 442
24.4 ما الذي يتغيّر في منظومة التحكم؟ 443
24.5 الانحباس والترنح (Surge and Stall) — وصمامات النزف 445
24.6 قراءة البدء: التوقيعات الأربعة 446
24.7 مصفوفة تشخيص: مشاكل البدء 448
24.8 مصفوفة تشخيص: مشاكل التشغيل 449
24.9 فلسفة الصيانة: استبدال بدل الإصلاح 450
24.10 متى تختار هذه وليس تلك؟ ومنطقة الوسط بينهما 451
24.11 خلاصة الفصل 454

الفصل الخامس والعشرون: منظومة هواء السحب — الفلترة ومنع التجمد والتبريد 455

25.1 لماذا يستحق مدخل الهواء فصلًا كاملًا؟ 456
25.2 حقيقة أساسية تُغفَل: معظم الهواء الداخل لا يحترق أصلًا 456
25.3 أربع آليات ضرر مختلفة — لا واحدة 458
25.4 مراحل منظومة السحب: كل مرحلة تزيل شيئًا مختلفًا 460
25.5 الفلاتر: ساكنة أم ذاتية التنظيف؟ 463
25.6 التجمد: لماذا يحدث في جو فوق الصفر؟ 464
25.7 أنظمة منع التجمد — والمفاجأة: الفلتر نفسه أحدها 467
25.8 تبريد هواء السحب: الفيزياء أولًا 470
25.9 طرق التبريد الخمس ومقارنتها 471
25.10 البيئات الخاصة 474
25.11 من الميدان: مصفوفة تشخيص لمنظومة السحب 475
25.12 خلاصة الفصل 476

الفصل السادس والعشرون: تسلسل بدء التشغيل — من الفحص القبلي إلى التحميل 479

26.1 لماذا فصل كامل لعملية البدء؟ 480
26.2 لغة الأرقام: كيف تقرأ مخططات المعدات المساعدة 480
26.3 الفحص القبلي (Pre-Start Checks) — لماذا كل بند موجود 482
26.4 المراحل: ما يحدث فعلًا وما يجب أن تراقبه 485
26.5 البدء البارد والساخن والدافئ 491
26.6 من الميدان: أكثر ما يفشل في البدء 492
26.7 خلاصة الفصل 493

الفصل السابع والعشرون: الدورة المركبة والتوليد المشترك 495

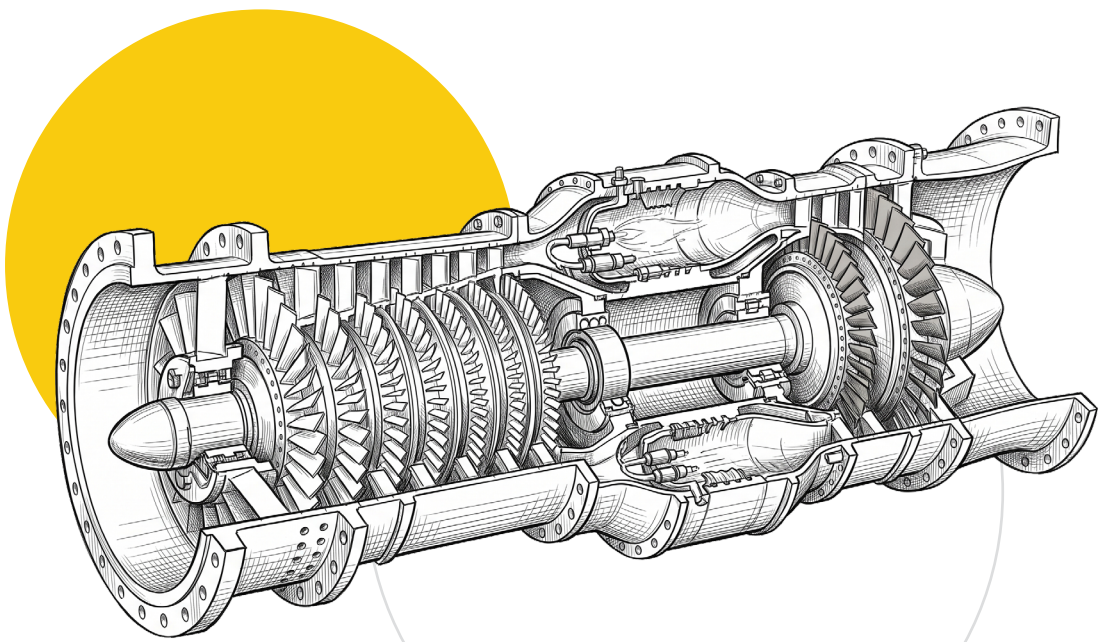
27.1 الفكرة في سطر واحد 496
27.2 الدورتان: لماذا تتكاملان بهذا الشكل؟ 497
27.3 مرجل استرداد الحرارة (HRSG): قلب الدورة السفلى 498
27.4 الجانب البخاري: التوربين والمكثف والماء 500
27.5 التكوينات: كيف تُرتَّب الآلات؟ 501
27.6 الحرق الإضافي (Duct Firing) 502
27.7 التوليد المشترك (Cogeneration / CHP) 502
27.8 ما الذي يتغيّر لمهندس التحكم؟ 503
27.9 كيمياء الماء والبخار: لماذا تهمّ مهندس التوربينات؟ 505
27.10 من الميدان: أعراض تخصّ الدورة المركبة 506
27.11 خلاصة الفصل 507
الخاتمة 508

الملاحق

ملحق أ: مسرد المصطلحات والاختصارات 510
ملحق ب: جدول تشخيص سريع للأعراض الشائعة 516
ملحق ج: مقارنة عامة بين منصات التحكم الشائعة 518
ملحق د: أهم المعايير والمواصفات القياسية المتعلقة بالتوربينات الغازية 520
ملحق هـ: المراجع والقراءات الإضافية 524
ملحق و: وحدات القياس والتحويلات الشائعة 527
ملحق ز: عرض تقديمي 530
ملحق ح: الفهرس الهجائي 578
فهرس المصطلحات العربية 578

الفصل الأول:

ما هو التوربين الغازي؟

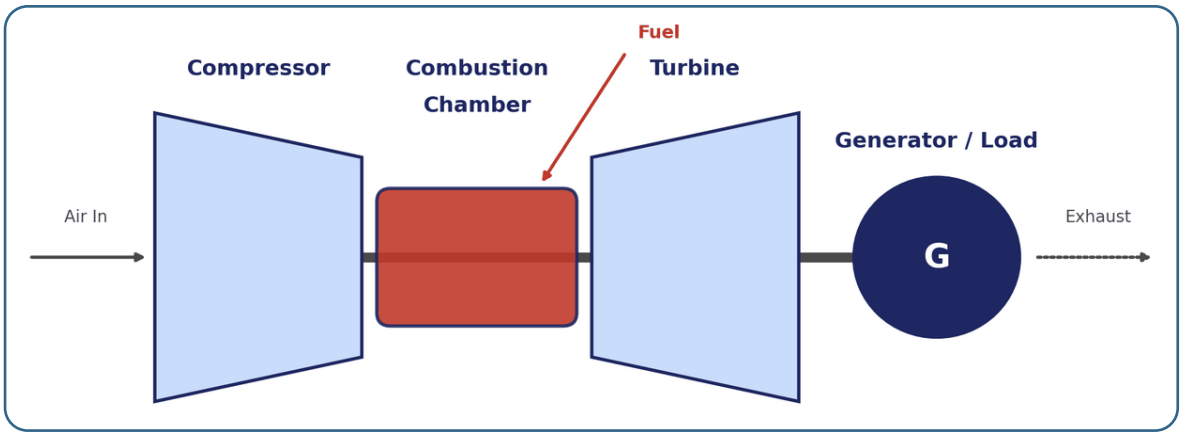


قبل أي تفصيل، يحتاج القارئ إلى صورة واحدة واضحة في ذهنه: **ما هذه الآلة، وما الذي يميّزها عن غيرها، ولماذا وُجدت أصلًا؟** وهذا كل ما يفعله هذا الفصل — يضع الأساس الذي تُبنى عليه الفصول الستة والعشرون التالية: تعريف دقيق (1.1)، ثم الفكرة الأساسية بأبسط صورة ممكنة (1.2)، ثم موقعها بين المحركات الأخرى (1.3)، وأخيرًا كيف وصلت إلى شكلها الحالي عبر قرن من التطوير (1.4).

1.1 التعريف

التوربين الغازي (Gas Turbine) هو محرك حراري دوّار، وظيفته الأساسية تحويل الطاقة الكيميائية المخزّنة في الوقود إلى طاقة ميكانيكية على شكل دوران عمود (Shaft). وهذا الدوران يُستخدم بعد ذلك لأي غرض تقريبًا: تدوير مولد كهربائي في محطة طاقة، تدوير ضاغط أو مضخة في منشأة نفط وغاز، أو توفير دفع في محرك طائرة.

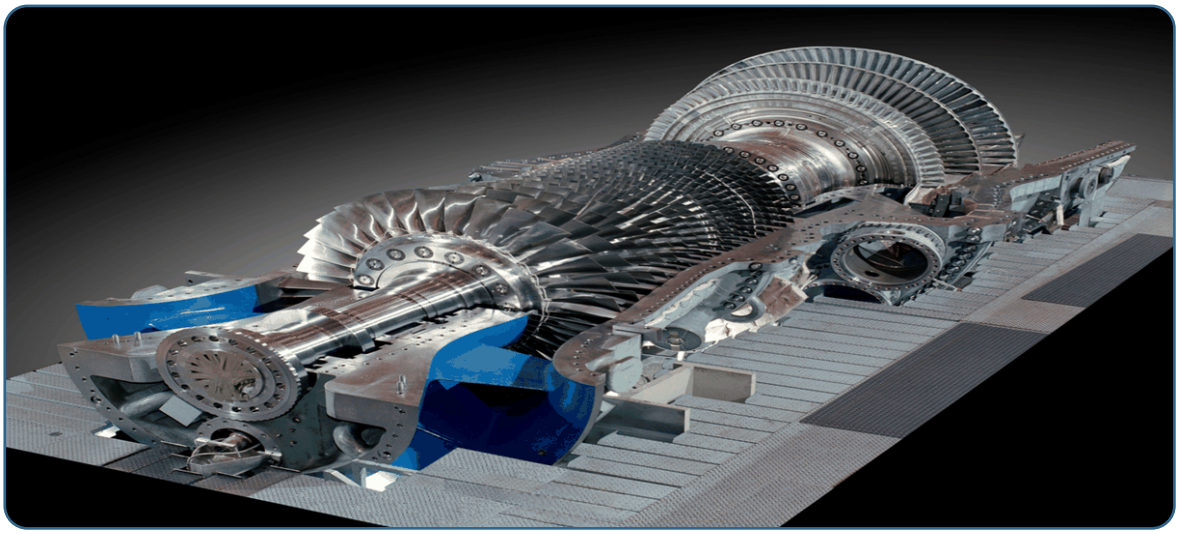
الفكرة التي يقوم عليها التوربين الغازي بسيطة في جوهرها رغم أن التنفيذ الهندسي معقّد: هواء يُسحب من المحيط، يُضغط، يُخلط بالوقود ويُحرق، والغاز الساخن الناتج يتمدد بسرعة عالية ويدوّر شفرات التوربين. جزء من هذه الطاقة يعود لتشغيل الضاغط نفسه (لأنه يجب أن يستمر في سحب الهواء)، والباقي هو «الشغل المفيد» الذي نستفيد منه.



الشكل 1.1 — المكونات الرئيسية الثلاثة (الضاغط، غرفة الاحتراق، التوربين) ومسار الهواء والوقود والعادم.

من ناحية التصنيف الهندسي، يندرج التوربين الغازي ضمن عائلة محركات الاحتراق الداخلي (Internal Combustion Engines) — أي أن عملية الاحتراق تحدث داخل المحرك نفسه، بعكس التوربين البخاري الذي يُصنَّف كمحرك احتراق خارجي (External Combustion)، لأن الاحتراق فيه يحدث في مرجل منفصل تمامًا عن التوربين. وهذا التصنيف ليس مجرد تفصيل نظري — فهو الذي يفسّر كثيرًا من خصائص التوربين الغازي العملية التي سنتطرق لها في الكتاب، مثل سرعة استجابته وحساسية أدائه لظروف الهواء المحيط.

المخطط أعلاه يبسّط الفكرة لغرض الشرح، لكن الصورة التالية تعطي إحساسًا أوضح بالحجم والتعقيد الميكانيكي الفعلي: وحدة توربين غازي صناعية حقيقية مقطوعة طوليًا (Cutaway)، يظهر فيها بوضوح تعاقب صفوف ريش الضاغط على اليسار، ثم قسم التوربين بريشه الأكبر على اليمين، والعمود المشترك الذي يربطهما ميكانيكيًا من الداخل.



الشكل 1.2 — مقطع طولي حقيقي لتوربين غازي صناعي، يوضح تعاقب مراحل الضاغط (يسار) وقسم التوربين (يمين) على نفس العمود.

1.2 الفكرة الأساسية بأبسط شكل

لو أردنا تبسيطها أكثر، يمكن تشبيه التوربين الغازي بعملية التنفس: شهيق (سحب الهواء وضغطه)، ثم «احتراق» الطاقة داخليًا (الاحتراق الفعلي للوقود)، ثم زفير قوي (خروج الغازات الساخنة المتمددة التي تنتج الحركة). والفرق أن هذه العملية في التوربين الغازي مستمرة وثابتة، وليست نبضية مثل محرك السيارة العادي (Reciprocating Engine) الذي يعمل بأشواط متتالية.

هذا الاستمرار (Continuous Flow) هو أحد أهم ما يميّز التوربين الغازي عمليًا: لا توجد صمامات تفتح وتُغلق بسرعة، ولا مكابس تتحرك جيئة وذهابًا — فقط أجزاء دوّارة. وهذا سبب رئيسي وراء نعومة تشغيله، وقدرته على الوصول لسرعات دوران عالية جدًا مقارنة بمحركات الاحتراق الداخلي التقليدية.

من واقع الميدان: أول ما يلاحظه أي فني أو مهندس جديد عندما يقف قريبًا من توربين غازي يعمل هو الصوت — أزيز عالٍ وثابت النبرة، بدون النقرات أو الاهتزازات المتقطعة التي تميّز محرك ديزل كبير. هذا «الثبات» الذي تسمعه وتشعر به فعليًا في الاهتزاز هو انعكاس مباشر لكون الحركة دوّارة ومستمرة، لا ترددية. ومع مرور الوقت، أي تغيّر بسيط في هذا الصوت أو الاهتزاز يصبح أول مؤشر ميداني يلتقطه المهندس المتمرّس قبل أن تصل الإنذارات في غرفة التحكم — وهذا موضوع سنعود إليه بالتفصيل في فصل الحماية.

1.3 التوربين الغازي مقابل غيره من المحركات

من واقع العمل الميداني، أكثر سؤال يتكرر من المهندسين الجدد هو: ما الفرق بينه وبين محرك الديزل أو التوربين البخاري؟ الجدول التالي يلخّص الفروق العملية الأهم:

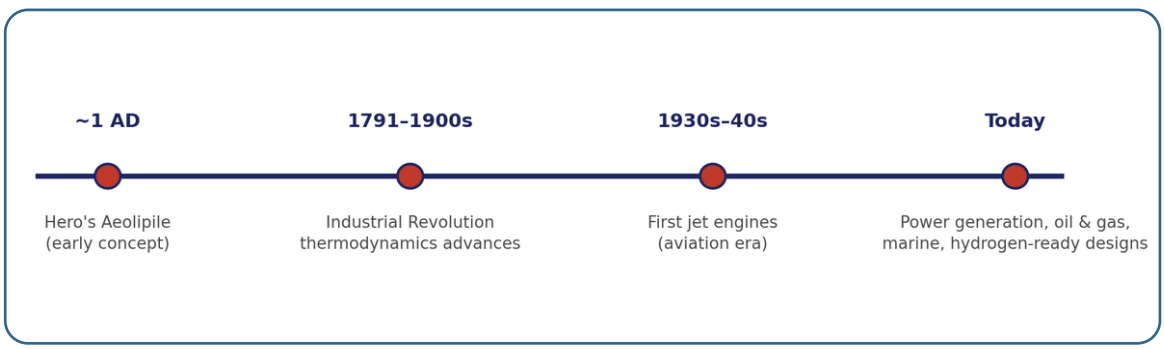
المعيار	التوربين الغازي	محرك الديزل	التوربين البخاري
نوع الحركة	دوّارة مستمرة	ترددية (مكبسية)	دوّارة مستمرة
نوع الاحتراق	داخلي (Internal Combustion)	داخلي (Internal Combustion)	خارجي، عبر مرجل منفصل (External Combustion)
الوقود	غاز طبيعي أو سائل	ديزل	أي مصدر حرارة (يحتاج مرجل)
زمن بدء التشغيل	سريع (دقائق)	سريع	بطيء (يحتاج تسخين تدريجي)
الكفاءة في الحمل الجزئي	أضعف	أفضل	متوسطة
الحجم مقابل القدرة	خفيف نسبيًا	ثقيل	ثقيل جدًا

هذا الجدول ليس للحفظ، لكنه يعطي إحساسًا عمليًا: التوربين الغازي يتفوق عندما تحتاج قدرة عالية بوزن وحجم أقل، واستجابة سريعة، وهذا سبب انتشاره الواسع في توليد الكهرباء والطيران والنقل البحري، كما سنرى بالتفصيل في فصل التطبيقات.

1.4 لمحة سريعة عن تطوره عبر الزمن

فكرة استخدام غاز متمدد لإنتاج حركة ليست جديدة — أقدم إشارة معروفة لها ترجع لجهاز «الأيوليبايل» (Aeolipile) الذي وصفه هيرو الإسكندري قبل حوالي ألفي سنة، لكنه كان مجرد فضول علمي بلا تطبيق عملي. التطور الحقيقي بدأ مع الثورة الصناعية وتقدّم علم الديناميكا الحرارية، وتسارع بشكل كبير في القرن العشرين مع الحرب العالمية الثانية (محركات الطائرات النفاثة) ثم بعدها في قطاع توليد الكهرباء والنفط والغاز.

والذي نقل التوربين الغازي من فكرة نظرية إلى محرك عملي هو تطور المواد بشكل أساسي: السبائك القادرة على تحمّل حرارة عالية جدًا وسرعات دوران هائلة دون أن تنهار. وهذا التطور مستمر إلى اليوم، وهو نفسه الذي يفتح الباب لتحديات المستقبل مثل حرق الهيدروجين، وهو موضوع سنعود إليه لاحقًا في الكتاب.



الشكل 1.3 — محطات رئيسية في تطور التوربين الغازي عبر التاريخ.

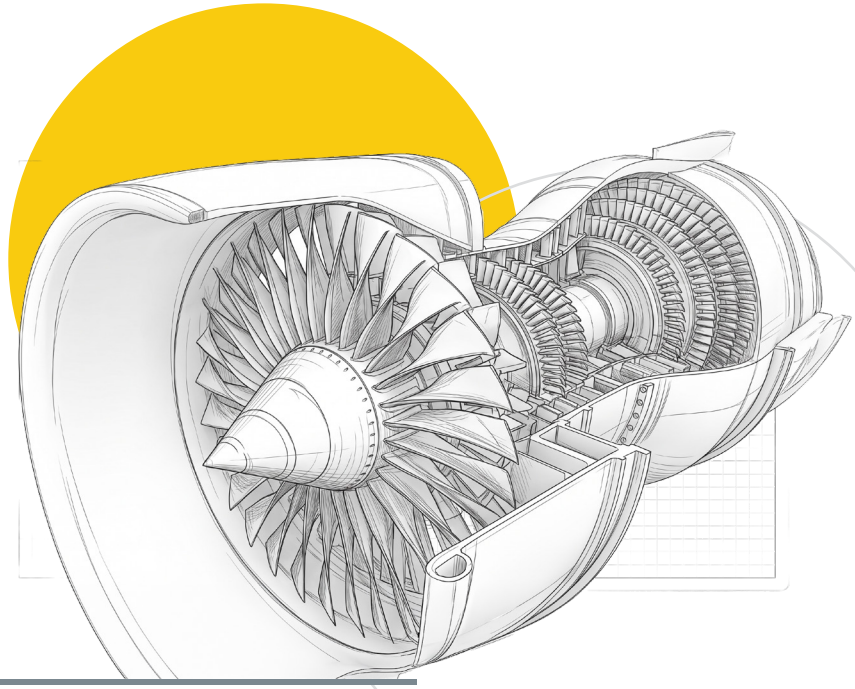
1.5 لماذا هذا المحرك بالذات؟

قبل أن نكمل في التفاصيل التقنية، يجدر بنا الوقوف عند سؤال بسيط: لماذا أصبح التوربين الغازي بهذه الأهمية الصناعية؟ الإجابة المختصرة: نسبة قدرة عالية جدًا مقابل وزنه وحجمه، وإمكانية التشغيل السريع، والمرونة في نوع الوقود. هذه المزايا هي التي جعلته الخيار المفضّل في محطات الطاقة، والطائرات، ومنصات النفط والغاز، وأكثر من ذلك.

وبقية هذا الكتاب ستشرح كل جزء من هذه الصورة بالتفصيل — بدءًا من مبدأ عمله (دورة برايتون)، مرورًا بمكوناته وأنظمته المساعدة، ووصولًا لتشغيله وصيانته وحمايته من واقع خبرة عملية مباشرة.

الفصل الثاني:

مبدأ عمل التوربين الغازي



2.1 المراحل الثلاث الأساسية لعمل التوربين الغازي

في الفصل الأول تعرّفنا على الفكرة العامة: سحب هواء، حرق وقود، تمدد غازات. والآن نغوص قليلًا أعمق ونشرح كل مرحلة من الثلاث بالتفصيل، لأن فهمها فهمًا صحيحًا هو الأساس الذي تُبنى عليه بقية أبواب هذا الكتاب — من المكونات إلى التشغيل والصيانة.

المرحلة الأولى: السحب والضغط (Intake & Compression)

الهواء الجوي يدخل من فتحة السحب (Air Inlet) بضغط ودرجة حرارة الجو المحيط تقريبًا، ثم يمر عبر الضاغط (Compressor) الذي يرفع ضغطه بشكل متتالي عبر عدة مراحل دوّارة (Rotor) وثابتة (Stator). وكلما زاد عدد المراحل، ازدادت نسبة الضغط النهائية.

نسبة الضغط (Pressure Ratio) هي أهم رقم يصف أداء الضاغط، ويُرمز له عادة rp أو PR، وتُحسب ببساطة:

نسبة الضغط = الضغط عند خروج الضاغط ÷ الضغط عند دخوله (P2 ÷ P1)

في التوربينات الغازية الحديثة، تتراوح هذه النسبة غالبًا بين 15:1 و 40:1 تقريبًا، وكلما ارتفعت (مع تحسينات أخرى في التصميم) ازدادت الكفاءة الحرارية للوحدة — وهذا سنعود إليه بالتفصيل في 2.4.

ملاحظة مهمة من واقع التشغيل: عملية الضغط هذه تستهلك جزءًا كبيرًا من الطاقة التي ينتجها التوربين لاحقًا — عادة بين 55% و65% من إجمالي القدرة التي يولّدها قسم التوربين تعود لتشغيل الضاغط نفسه. أي لو أنتج التوربين 100 ميجاواط «إجمالي» على عموده الداخلي، فإن 60 منها تقريبًا تعود للضاغط، ويتبقى لنا حوالي 40 ميجاواط «شغل صافٍ» (Net Work) هو الذي نستفيد منه فعليًا. هذا الرقم يفسر لماذا ينعكس أي تدهور بسيط في كفاءة الضاغط (مثل اتساخ الفلاتر) بشكل واضح وسريع على القدرة الصافية المتوفرة.

المرحلة الثانية: الاحتراق (Combustion)

الهواء المضغوط يدخل غرفة الاحتراق (Combustion Chamber)، ويُحقن فيها الوقود (غاز طبيعي أو سائل) ويشتعل في عملية احتراق مستمرة وثابتة (وليست انفجارية كما قد يتخيل البعض). والهدف من هذه المرحلة رفع درجة حرارة الغازات بشكل كبير جدًا، بينما يبقى الضغط ثابتًا تقريبًا (وهذا افتراض مهم في الدورة النظرية، سنوضحه في 2.2).

درجة الحرارة عند خروج غرفة الاحتراق ودخول التوربين تُسمى درجة حرارة دخول التوربين (Turbine Inlet Temperature، ويُختصر TIT، أو أحيانًا Firing Temperature)، وهي من أهم الأرقام في عالم التوربينات الغازية كلها — لأنها العامل الأكبر المحدد للكفاءة والقدرة، وفي الوقت نفسه المحدد الرئيسي لعمر شفرات التوربين. وكلما ارتفعت، ازدادت الكفاءة والقدرة، لكن ازداد معها الإجهاد الحراري على المعادن — وهذا التوازن الدقيق هو الذي يفسر لماذا تستثمر صناعة التوربينات الغازية باستمرار في تطوير سبائك جديدة وأنظمة تبريد للشفرات (سنتوسع فيه في فصل المكونات).

المرحلة الثالثة: التمدد والطرد (Expansion & Exhaust)

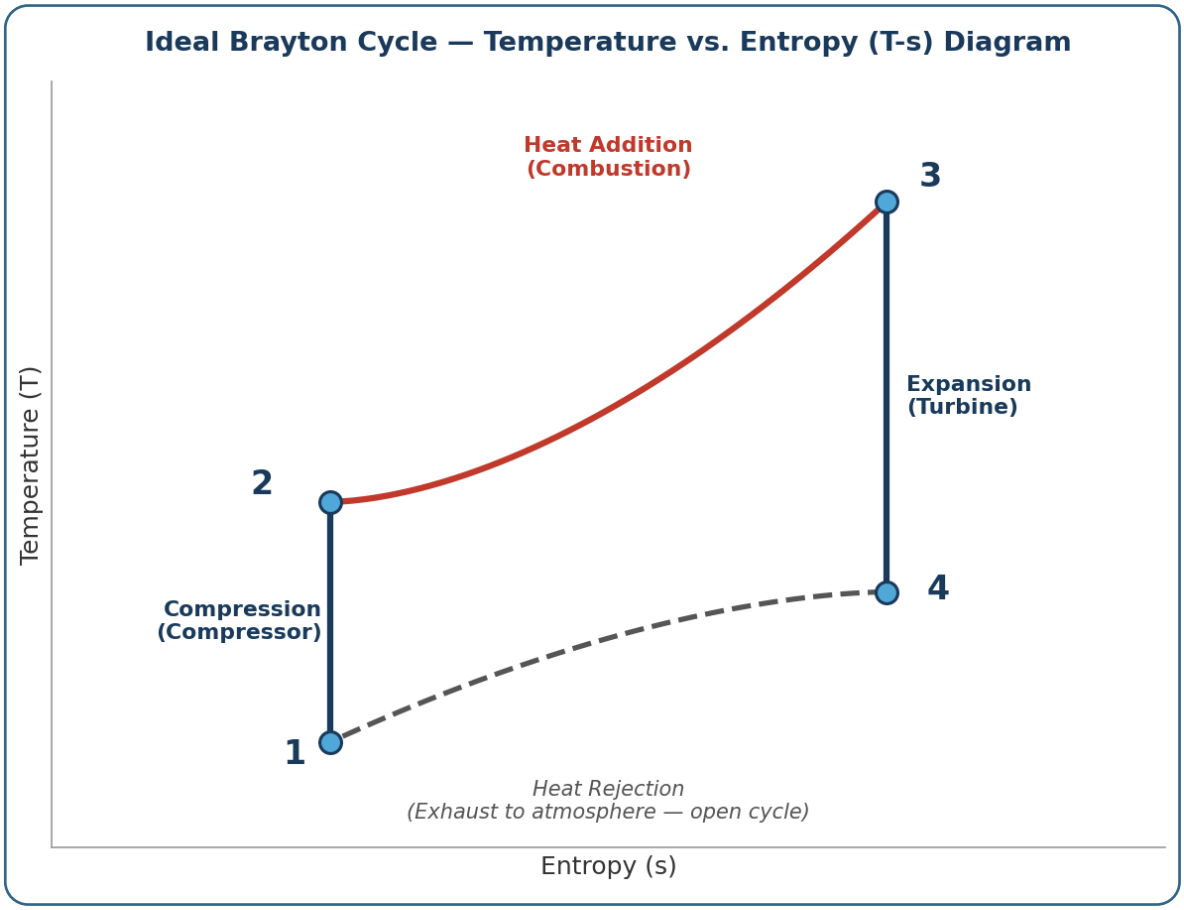
الغازات الساخنة عالية الضغط تدخل قسم التوربين (Turbine Section)، وتتمدد بسرعة وهي تمر عبر صفوف من الشفرات الدوّارة، وهذا التمدد هو الذي يولّد الحركة الدورانية الفعلية على العمود. جزء من هذه الطاقة (كما ذكرنا) يعود لتدوير الضاغط، والباقي يخرج كـ«شغل صافٍ» متاح على العمود — يُستخدم لتدوير مولد كهربائي، أو ضاغط منفصل، أو مروحة طائرة، حسب التطبيق.

بعد أن تفقد الغازات جزءًا كبيرًا من طاقتها وحرارتها، تخرج من التوربين عبر فتحة العادم (Exhaust) — وما زالت هذه الغازات تحمل حرارة معتبرة (غالبًا بين 450 و650 درجة مئوية في الوحدات الصناعية). وهذه الحرارة المتبقية بالذات هي الأساس الذي تقوم عليه محطات الدورة المركّبة (Combined Cycle)، التي تستفيد منها لتوليد بخار وإنتاج كهرباء إضافية — وهو موضوع سنتوسع فيه لاحقًا في فصل التطبيقات.

2.2 دورة برايتون: الإطار النظري

المراحل الثلاث التي شرحناها في 2.1 (ضغط، احتراق، تمدد) هي التطبيق العملي لدورة حرارية نظرية تُسمى «دورة برايتون» (Brayton Cycle)، نسبة للمهندس الأمريكي جورج برايتون. وهذه الدورة هي الأساس النظري الذي يشرح لنا كفاءة التوربين الغازي ولماذا يتصرف بالشكل الذي يتصرف به.

الطريقة المعتادة لرسم أي دورة حرارية هي عبر مخطط «الحرارة مقابل الإنتروبي» (Temperature–Entropy، ويُختصر T-s)، والإنتروبي هنا مجرد مقياس هندسي/رياضي لحالة الغاز، وما يهمنا عمليًا هو شكل المسار:



الشكل 2.1 — دورة برايتون النظرية على مخطط الحرارة-الإنتروبي (T-s): 1→2 ضغط، 2→3 احتراق، 3→4 تمدد، 4→1 طرح الحرارة (عادم).

لاحظ أن المخطط يحوي أربع مراحل لا ثلاثًا — لأن الدورة النظرية تفترض وجود مرحلة رابعة (4→1) هي «طرح الحرارة» التي تُغلق فيها الدورة نظريًا وتعود الغازات إلى حالتها الأولى. لكن في الواقع، التوربين الغازي **دورة مفتوحة** (Open Cycle): الهواء يدخل من الجو، والعادم يخرج للجو مباشرة ولا يعود ليدور في المسار نفسه — ونحن نستخدم مخطط الدورة «المغلقة» فقط كأداة نظرية لتحليل الأداء والكفاءة، وهذا افتراض شائع ومقبول هندسيًا لأنه يعطي نتائج دقيقة بما يكفي للتصميم والتحليل.

النقطة المهمة التي تفيدنا عمليًا من هذا المخطط: كلما زادت المسافة الرأسية بين النقطتين 2 و3 (أي كلما رفعنا درجة حرارة دخول التوربين TIT إلى أقصى ما تتحمله المعادن)، وكلما ازدادت نسبة الضغط (تباعد النقطة 1 عن 2)، ازدادت مساحة الدورة كلها — وهذه المساحة تمثل فعليًا «الشغل الصافي» الذي تنتجه الوحدة. هذا هو المبدأ الذي يفسر كل التطور الذي شهدناه في صناعة التوربينات الغازية عبر العقود: رفع TIT ونسبة الضغط، بأقل زيادة ممكنة في الفواقد.

من الناحية الرياضية، الكفاءة الحرارية النظرية لدورة برايتون المثالية (بدون فواقد) تُحسب من نسبة الضغط فقط، بمعادلة مبسطة:

الكفاءة النظرية ≈ 1 − (1 ÷ نسبة الضغط^((k−1)/k))

حيث k نسبة الحرارة النوعية للهواء (قيمتها تقريبًا 1.4). ولا داعي لحفظ هذه المعادلة أو تطبيقها يدويًا في الميدان — المهم أن تفهم مدلولها: **الكفاءة النظرية دالة في نسبة الضغط فقط**، وكلما رفعناها ازدادت الكفاءة، لكن بمعدل متناقص (أي أن الفائدة من رفعها تقل تدريجيًا كلما كانت مرتفعة أصلًا). وهذه غير الكفاءة الفعلية الحقيقية، التي فيها فواقد إضافية سنشرحها في القسم التالي.

2.3 الفرق بين الدورة النظرية والدورة الفعلية

المعادلة والمخطط اللذان شرحناهما في 2.2 يمثلان دورة «مثالية» بافتراضات نظرية بحتة — ولو عدنا إلى الشكل 2.1، فالدورة الفعلية على أرض الواقع لا تظهر بالخطوط المستقيمة الحادة نفسها التي رأيناها، لأن كل مرحلة فيها فواقد حقيقية. ومن واقع التشغيل، أهم أسباب الفجوة بين الكفاءة النظرية والفعلية:

1. الضغط والتمدد ليسا مثاليين فعليًا (Isentropic Efficiency)

الدورة النظرية تفترض أن الضغط في الضاغط والتمدد في التوربين يحدثان دون أي احتكاك أو اضطراب (Isentropic — بدون توليد إنتروبي إضافي). أما عمليًا، فهناك دائمًا احتكاك بين الهواء والشفرات، ودوامات هواء صغيرة (Turbulence)، وتسريبات بسيطة بين المراحل. وهذا يُقاس بمقياس عملي يُسمى «الكفاءة الإنتروبية» (Isentropic Efficiency) لكل من الضاغط والتوربين على حدة — ببساطة: نسبة الشغل الذي كان يُفترض أن يُنتج أو يُستهلك في الحالة المثالية، مقابل الشغل الفعلي الحقيقي. وكلما اقتربت هذه النسبة من 100%، كان تصميم الضاغط أو التوربين وحالته أفضل.

2. انخفاض الضغط بغرفة الاحتراق (Combustor Pressure Drop)

الدورة النظرية تفترض أن الاحتراق يحدث بضغط ثابت تمامًا. أما فعليًا، فمرور الهواء عبر فوهات الحقن وخلاطات الوقود ومنطقة اللهب يسبب انخفاضًا بسيطًا في الضغط، عادة بين 2% و5% تقريبًا — أي أن التوربين لا يستقبل كامل الضغط الذي أنتجه الضاغط، وهذا فاقد إضافي.

3. هواء التبريد المسحوب من الضاغط (Cooling Air Bleed)

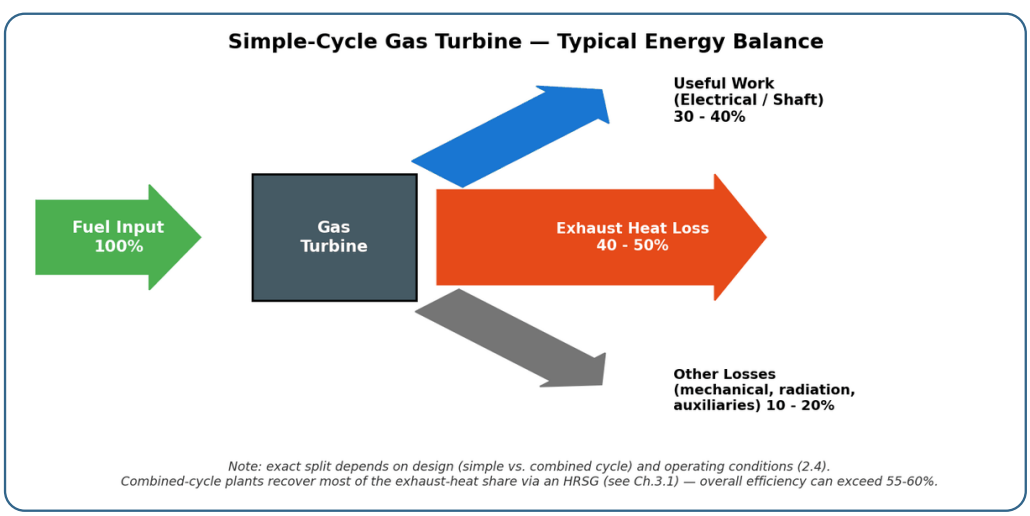
هذه نقطة خاصة جدًا بالتوربينات الغازية الحديثة التي ترفع درجة حرارة دخول التوربين (TIT) لمستويات عالية جدًا: جزء من الهواء المضغوط (قد يصل إلى 15-20% منه في الوحدات المتقدمة) يُسحب مباشرة من الضاغط ويُمرَّر داخل شفرات التوربين لتبريدها، بدلًا من أن يدخل غرفة الاحتراق ويشارك في إنتاج الشغل الكامل. وهذا الهواء «المسروق» ضروري لحماية الشفرات من الانصهار، لكنه فاقد حقيقي في الكفاءة — وهو مثال ممتاز على أن أي تحسين هندسي (رفع TIT) يجلب معه تحديًا جديدًا يجب أن نديره.

4. فواقد ميكانيكية وأنظمة مساعدة

حتى بعد أن يصل الشغل الصافي إلى العمود، هناك فواقد إضافية قبل أن تصل الطاقة فعليًا إلى الحمل النافع: احتكاك المحامل (Bearings)، وأختام الزيت، ومضخات وأنظمة مساعدة تستهلك جزءًا من الطاقة لتشغيل نفسها (زيت التزييت، التبريد، أنظمة التحكم). وكل هذه تُخصم قبل أن نصل إلى الرقم الذي يهم صاحب المحطة: القدرة الصافية الفعلية المتاحة على المولد.

النتيجة العملية

بسبب كل هذه الفواقد مجتمعة، تكون الكفاءة الحرارية الفعلية للتوربين الغازي في دورة بسيطة (Simple Cycle) عادة بحدود 30-40% تقريبًا، بعيدة عن الرقم النظري المثالي. وهذا بالذات هو سبب وجود محطات «الدورة المركّبة» (Combined Cycle) التي ذكرناها في 2.1 — لأنها تستفيد من حرارة العادم المهدورة وترفع الكفاءة الإجمالية لتتجاوز 55-60% في كثير من المحطات الحديثة.



الشكل 2.2 — توازن الطاقة التقريبي بتوربين غازي بدورة بسيطة: من كل 100% طاقة وقود داخلة، حوالي 30-40% يخرج كشغل نافع، وحوالي 60-65% يضيع بحرارة العادم، والباقي (نحو 1-2%) فواقد ميكانيكية ومساعدة. الدورة المركّبة (تفصيلها في الفصل الثالث، 3.1) تستعيد أغلب حصة حرارة العادم هذه.

من واقع الميدان: أوضح مثال عملي يراه أي مهندس تشغيل على هذه الفجوة هو تأثير اتساخ فلاتر الهواء أو تلوث شفرات الضاغط (Compressor Fouling) — فكلما قلّت كفاءة الضاغط ولو بنسبة بسيطة، انعكس ذلك فورًا على القدرة الصافية والاستهلاك النوعي للوقود (Heat Rate)، وهذا سبب رئيسي وراء أهمية برامج التنظيف الدوري للضاغط (Compressor Washing)، وهو موضوع سنتوسع فيه لاحقًا في فصل التشغيل والصيانة.

2.4 العوامل المؤثرة في الأداء

قدرة وكفاءة التوربين الغازي ليست أرقامًا ثابتة — هي أرقام «مصمَّمة» عند ظروف مرجعية معينة، وتتغير باستمرار حسب ظروف التشغيل الفعلية. وهذا مفهوم أساسي يجب أن يفهمه أي مهندس تشغيل، لأنه يفسر لماذا تنتج الوحدة نفسها قدرة مختلفة صيفًا عن شتاءً رغم أنها «نفس الماكينة».

ظروف التصنيف المرجعية (ISO Conditions)

الشركات المصنّعة تعطي أرقام القدرة والكفاءة على لوحة البيانات (Nameplate) عند ظروف معيارية موحّدة عالميًا تُعرف بظروف ISO: حرارة هواء 15 درجة مئوية، ضغط جوي عند مستوى سطح البحر، ورطوبة نسبية 60%. وهذه الأرقام مفيدة للمقارنة بين موديلات مختلفة، لكنها نادرًا ما تنطبق فعليًا على موقع التشغيل الحقيقي — وهذا سبب رئيسي وراء استخدام مصطلح «القدرة المصححة حسب الموقع» (Site-Corrected Rating) في أي دراسة جدوى أو تقرير أداء.

1. حرارة الهواء المحيط (Ambient Temperature)

هذا أكثر عامل يلاحظه أي مهندس تشغيل ميدانيًا، خصوصًا في مناخنا في منطقة الخليج. التوربين الغازي يعمل بحجم ثابت من الهواء (Volumetric Flow) يسحبه الضاغط تقريبًا بغض النظر عن الحرارة، لكن كثافة الهواء تقل كلما ارتفعت الحرارة — أي أن الحجم نفسه يحمل كتلة هواء أقل. وبما أن القدرة الناتجة مرتبطة بكتلة الهواء المتدفقة لا بحجمه، فكلما ارتفعت حرارة الجو قلّت القدرة الناتجة، وازداد الاستهلاك النوعي للوقود بشكل طفيف.

وهذا هو التفسير الفني وراء ظاهرة معروفة لكل مهندسي التشغيل: «تراجع القدرة بأيام الصيف الحارة» (Hot Day Derate) — ففي بعض التصاميم قد تخسر الوحدة 10% أو أكثر من قدرتها الاسمية مع فرق حرارة كبير بين الصيف والشتاء، وهذا رقم مهم جدًا عند التخطيط لالتزامات القدرة في محطات التوليد.

2. ارتفاع الموقع عن سطح البحر (Altitude)

المبدأ نفسه بالضبط: كلما ارتفع الموقع، قلّ الضغط الجوي وبالتالي كثافة الهواء المتاحة للضاغط، فتقل القدرة الناتجة. ولهذا السبب يجب أن تحدد مواصفات أي مشروع توربين غازي جديد ارتفاع الموقع بدقة من البداية — فهو رقم تصميمي أساسي لا تفصيل ثانوي.

3. فواقد الضغط في مسارات السحب والعادم (Inlet/Exhaust Losses)

فلاتر الهواء، ومكاتم الصوت، والقنوات (Ducting) عند دخول وخروج الهواء تسبب انخفاضًا بسيطًا في الضغط قبل أن يصل إلى الضاغط وبعد أن يخرج من التوربين. وهذا الانخفاض يقلل الأداء بشكل مباشر، وهو سبب إضافي وراء أهمية صيانة الفلاتر ونظافتها بشكل دوري — فأي انسداد تدريجي في الفلتر يزيد هذا الفاقد أكثر فأكثر مع الوقت.

4. الرطوبة (Humidity)

تأثيرها أخف بكثير من الحرارة والارتفاع، وأحيانًا يكون تأثيرها إيجابيًا بسيطًا على القدرة (بسبب تغيّر خصائص الاحتراق)، لكنها عمليًا نادرًا ما تُعتبر عاملًا حاسمًا مقارنة بالحرارة.

5. نوع الوقود وقيمته الحرارية

الوقود الغازي مقارنة بالسائل، والقيمة الحرارية (Heating Value) للوقود المستخدم، يؤثران بشكل طفيف على القدرة الناتجة وسلوك الاحتراق — وهذا موضوع سنتوسع فيه أكثر في فصل الأنظمة المساعدة عند الحديث عن نظام الوقود.

الخلاصة العملية: نسبة الضغط (2.1) ودرجة حرارة دخول التوربين (TIT 2.1) هما العاملان التصميميان الأساسيان اللذان يحددان الكفاءة النظرية للوحدة، بينما حرارة الهواء المحيط والارتفاع هما أهم عاملين تشغيليين يوميين يحددان «كم ستنتج الوحدة فعليًا اليوم» مقارنة برقمها الاسمي على اللوحة.

2.5 لماذا الكفاءة أقل من المتوقع أحيانًا؟ وطرق تحسينها

بعد كل ما شرحناه في هذا الفصل، السؤال العملي الذي يواجهه أي مهندس تشغيل هو: لماذا نلاحظ أحيانًا أن الوحدة تنتج أقل حتى من «قدرتها المصححة» المتوقعة حسب حرارة الجو والارتفاع؟ الجواب عادة مزيج من عدة أسباب تتراكم مع الوقت:

- **التآكل والتدهور الطبيعي (Degradation):** أي وحدة تفقد جزءًا من كفاءتها تدريجيًا مع ساعات التشغيل، بسبب تآكل بسيط في أسطح الشفرات، وزيادة الفراغات الداخلية (Clearances) بين الأجزاء الدوّارة والثابتة.
- **تلوث واتساخ الضاغط (Fouling):** ذكرناه في 2.3، وهو من أكثر الأسباب شيوعًا وأسهلها للمعالجة عبر برامج تنظيف دورية.
- **ضبط أنظمة التحكم (Control Tuning):** أحيانًا يكون سبب الفجوة إعدادات تحكم غير مضبوطة بدقة (مثل هامش أمان زائد في منطق الحماية من اللهب الخافت Lean Blowout، أو ضبط محافظ جدًا لريش التوجيه IGV)، لا عيبًا ميكانيكيًا حقيقيًا في الماكينة.
- **جودة الصيانة والفحص الدوري:** الالتزام ببرنامج الصيانة الوقائية (سنتوسع فيه في فصل التشغيل والصيانة) هو أكبر عامل يتحكم في مدى قرب الأداء الفعلي من الأداء المصمم له.

هذا الفصل ركّز على «لماذا» و«كيف» يعمل التوربين الغازي من الناحية النظرية والعملية الأساسية. لكن الصورة الكاملة للكفاءة لا تكتمل دون معرفة أن الصناعة طوّرت عدة طرق هندسية فعلية لرفع الكفاءة فوق حدود الدورة البسيطة التي شرحناها، أبرزها:

- **الدورة المركّبة (Combined Cycle):** استغلال حرارة العادم المتبقية (2.1) لتوليد بخار يدير توربين بخاري إضافي — أهم طريقة على الإطلاق لرفع الكفاءة الإجمالية في محطات التوليد الكبيرة.
- **استرجاع الحرارة الداخلي (Regeneration):** تسخين الهواء الخارج من الضاغط بحرارة العادم قبل دخوله غرفة الاحتراق مباشرة، فيقل استهلاك الوقود اللازم — ويُستخدم أكثر في الوحدات الصغيرة والمتوسطة.
- **تبريد هواء السحب (Inlet Air Cooling / Fogging):** معالجة عامل حرارة الهواء المحيط (2.4) مباشرة، بتبريد الهواء صناعيًا قبل دخوله الضاغط، فترتفع كثافته وترتفع القدرة — حل شائع جدًا في المناطق الحارة.
- **حقن الماء أو البخار (Water/Steam Injection):** لزيادة كتلة الغازات المتمددة في التوربين وبالتالي زيادة القدرة اللحظية، خصوصًا في أوقات الذروة.

كل واحدة من هذه الطرق موضوع قائم بذاته، وسنعود إليها بالتفصيل في فصول لاحقة (خصوصًا فصلي الأنظمة المساعدة والتطبيقات). والمهم هنا أن تفهم أن كل هذه الحلول الهندسية هي في الأساس محاولات ذكية للتغلب على القيود نفسها التي شرحناها في هذا الفصل: فواقد الدورة الفعلية، وتأثير ظروف التشغيل.

بهذا نكون أنهينا الفصل الثاني. والفصل القادم (**الفصل الثالث: تطبيقات واستخدامات التوربين الغازي**) سيأخذنا إلى كيفية استثمار كل هذه المبادئ عمليًا في مجالات مختلفة تمامًا: توليد الكهرباء، الطيران، النقل البحري، والنفط والغاز.

2.6 أمثلة محلولة على دورة برايتون: من المعادلة إلى القرار الهندسي

كل ما سبق في هذا الفصل كان مفاهيم. وهذا القسم يحوّلها إلى **أرقام** — خمسة أمثلة محلولة خطوة بخطوة، اخترتها بحيث لا يكون الهدف «حل مسألة» بل الوصول بكل مثال إلى **استنتاج هندسي يستخدمه مهندس الموقع فعلًا**. والمسائل من النوع المعتمد بامتحانات الهندسة المهنية عالميًا، وصياغتها وأرقامها من إعدادي.

الأدوات المشتركة لكل الأمثلة (بافتراضات الهواء القياسي — راجع حدودها في 2.3):

- **علاقة الانضغاط/التمدد متساوي الإنتروبيا:** $T_2 / T_1 = (P_2 / P_1)^{((k-1)/k)}$ حيث $k = 1.4$ للهواء، فيكون الأس $(k-1)/k = 0.2857$
- **شغل الضاغط أو التوربين لكل كيلوغرام:** $W = c_p \times \Delta T$ حيث $c_p = 1.005$ كيلوجول/كغ·كلفن
- **الكفاءة الحرارية المثالية:** $\eta = 1 - 1 / r_p^{((k-1)/k)}$ حيث r_p نسبة الضغط

- **تذكير لا يُنسى:** الحرارات في هذه المعادلات **بالكلفن دائمًا** (كلفن = مئوية + 273). وأشهر خطأ حسابي على الإطلاق هو التعويض بالمئوية مباشرة.

المثال 1 — الكفاءة المثالية وقانون تناقص العوائد

المعطيات: دورة برايتون مثالية بنسبة ضغط $r_p = 12$. المطلوب: الكفاءة الحرارية، ثم أثر رفع النسبة إلى 18.

الحل:

$$\eta = 1 - 1 / 12^{0.2857} = 1 - 1 / 2.034 = 50.8\%$$

وعند $r_p = 18$:

$$\eta = 1 - 1 / 18^{0.2857} = 1 - 1 / 2.284 = 56.2\%$$

الاستنتاج الهندسي: زيادة نسبة الضغط 50% (من 12 إلى 18) اشترت 5.4 نقطة كفاءة فقط — **تناقص عوائد** واضح، بينما كلفة الضاغط الإضافية وتعقيده يرتفعان بشكل حاد. وهذا بالضبط سبب استقرار التصاميم الصناعية الثقيلة عند نسب معتدلة بينما تذهب محركات الطيران المشتقة لنسب أعلى (3.5): الموازنة اقتصادية، لا فيزيائية فقط.

المثال 2 — حرارة خروج الضاغط وشغله الفعلي

المعطيات: هواء يدخل الضاغط عند 30 درجة مئوية (303 كلفن)، نسبة الضغط 10، الكفاءة متساوية الإنتروبيا للضاغط 85%. المطلوب: حرارة الخروج الفعلية وشغل الضاغط.

الحل:

الحرارة المثالية للخروج:

$T_2s = 303 \times 10 \wedge 0.2857 = 303 \times 1.931 = 585$ كلفن (مئوية 312)

الارتفاع الفعلي (نقسم على كفاءة الضاغط لأن الضاغط الحقيقي يحتاج شغلًا أكبر):

$\Delta T = (585 - 303) / 0.85 = 332$ كلفن

فتكون حرارة الخروج الفعلية:

$T_2 = 303 + 332 = 635$ كلفن (مئوية 362)

وشغل الضاغط:

$Wc = 1.005 \times 332 = 334$ كيلوجول/كغ

الاستنتاج الهندسي: الهواء يخرج من الضاغط عند ~360 مئوية **قبل أي احتراق** — وهذا يفسّر أشياء كثيرة في الكتاب: لماذا هواء التبريد المسحوب من الضاغط «ساخن» أصلًا (5.4)، ولماذا يُعامل معدن غلاف الضاغط الخلفي كمنطقة ساخنة، ولاحظ أيضًا اتجاه القسمة: كفاءة الضاغط **تزيد** شغله المطلوب، بينما سنرى في المثال التالي أن كفاءة التوربين **تنقص** شغله المستخرج.

المثال 3 — الشغل الصافي ونسبة الشغل المرتد

المعطيات: استكمالًا للمثال 2: حرارة دخول التوربين 1400 كلفن، التمدد عبر نفس نسبة الضغط 10، كفاءة التوربين متساوية الإنتروبيا 88%. المطلوب: شغل التوربين، الشغل الصافي، نسبة الشغل المرتد، والكفاءة الفعلية.

الحل:

حرارة الخروج المثالية:

$T_2s = 1400 / 1.931 = 725$ كلفن

الهبوط الفعلي (نضرب بالكفاءة لأن التوربين الحقيقي يعطي أقل):

$\Delta T = 0.88 \times (1400 - 725) = 594$ كلفن

شغل التوربين:

$Wt = 1.005 \times 594 \quad = 597$ كيلوجول/كغ

الشغل الصافي:

$Wn = 597 - 334 \quad = 263$ كيلوجول/كغ

نسبة الشغل المرتد (Back-Work Ratio):

$334 / 597 \quad = 56\%$

الحرارة المضافة:

$Qa = 1.005 \times (1400 - 635) \quad = 769$ كيلوجول/كغ

الكفاءة الفعلية:

$263 / 769 \quad = 34.2\%$

الاستنتاج الهندسي: رقمان يستحقان الحفظ. الأول: **أكثر من نصف شغل التوربين يذهب لإدارة الضاغط** — ولهذا فأي تدهور صغير في الضاغط (تلوث، 8.5) يقتطع من الصافي مباشرة وبنسبة مضاعفة. والثاني: الكفاءة هبطت من 48.2% (المثالية عند rp=10) إلى 34.2% بمجرد إدخال كفاءتي المكوّنين — وهذا هو «الفرق بين الدورة النظرية والفعلية» (2.3) بالأرقام.

المثال 4 — من الشغل النوعي إلى تدفق الهواء المطلوب

المعطيات: تطبيق دفع ميكانيكي (3.4) يحتاج قدرة صافية 20 ميغاواط على العمود، بنفس دورة المثال 3 (شغل صافٍ 263 كيلوجول/كغ). المطلوب: تدفق الهواء اللازم.

الحل:

$P = \dot{m} \times Wn \quad \leftarrow \dot{m} = 20{,}000 / 263$

الاستنتاج الهندسي: التوربين الغازي آلة تدفق هواء قبل أي شيء — 76 كيلوغرامًا من الهواء كل ثانية لعشرين ميغاواط فقط. وهذا الرقم يجعل كل ما قلناه عن نظام السحب والفلترة (5.6) ملموسًا: أي فقدان بنسبة 1% من هذا التدفق (فلتر متسخ، تجمد، انسداد) يعني خسارة قدرة مباشرة بنفس الترتيب، وأي جسيم عالق في هذا النهر الهوائي سيمر عبر الشفرات ملايين المرات سنويًا.

المثال 5 — يوم صيفي خليجي: أين تذهب القدرة؟

المعطيات: نفس المعدة ($T_3 = 1400$، $rp = 10$ كلفن، كفاءتا 88%/85%) في يوم شتوي معتدل (15 مئوية = 288 كلفن) ثم في يوم صيفي خليجي (45 مئوية = 318 كلفن). المطلوب: أثر حرارة الجو على القدرة الصافية.

الحل: شغل الضاغط يتناسب طرديًا مع حرارة الدخول (نفس النسبة، نفس الأس): عند 15 مئوية:

$$W_c = 1.005 \times 288 \times 0.931 / 0.85 \quad = 317 \text{ كيلوجول/كغ}$$

$$\text{الصافي} = 597 - 317 \rightarrow = 280$$

عند 45 مئوية:

$$W_c = 1.005 \times 318 \times 0.931 / 0.85 \quad = 350 \text{ كيلوجول/كغ}$$

$$\text{الصافي} = 597 - 350 \rightarrow = 247$$

هبوط الشغل النوعي:

$$(280 - 247) / 280 \quad = 11.8\%$$

ويُضاف أثر ثانٍ:

الهواء الحار أخف، فكتلة التدفق تنخفض بنسبة الكثافة ≃ 288 / 318 أي ~9.4% أخرى.

الأثر الكلي على القدرة:

$$\approx 1 - (247318/288) \times (280/)$$

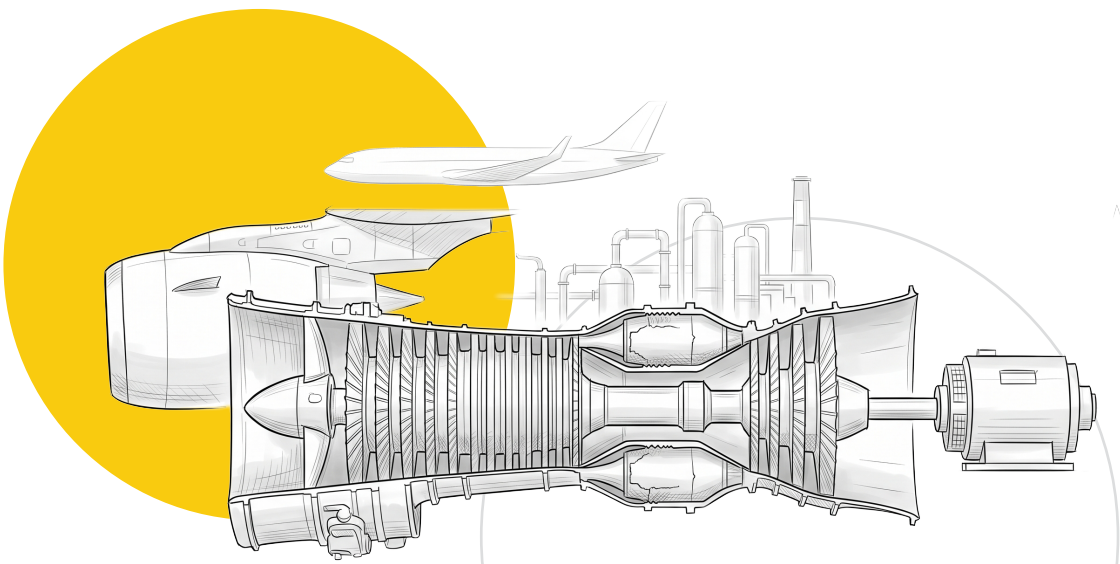
$$= \sim 20\%$$

الاستنتاج الهندسي: خُمس قدرة المحطة يتبخر بين الشتاء والصيف **بلا أي عطل** — والمعدة سليمة تمامًا. وهذا الرقم هو التفسير الكمي لثلاثة أشياء في الكتاب دفعة واحدة: لماذا تُقارن القدرة بعد التصحيح للظروف المرجعية لا قبله (17.2)، ولماذا يصبح تبريد هواء السحب قرارًا اقتصاديًا جوهريًا في الخليج (5.6)، ولماذا «انخفاض القدرة صيفًا» شكوى تشغيلية لا تستحق فتح تحقيق عطل (10.17) — إلا إذا تجاوزت هذا الحساب.

ملاحظة ختامية عن حدود هذه الحسابات: كلها بافتراضات الهواء القياسي — خواص ثابتة، لا فواقد ضغط، لا هواء تبريد مسحوب. والمعدة الحقيقية أعقد (2.3)، وأرقام الأداء التعاقدية تُحسب بمواثيق اختبار رسمية (17.2) لا بهذه المعادلات المبسطة. وقيمة هذه الأمثلة ليست الدقة المطلقة، بل بناء الحدس: أن تعرف قبل أي حساب مفصّل أن نصف شغل التوربين يذهب للضاغط، وأن كل درجة حرارة جو تكلّف قدرة، وأن نسبة الضغط سلاح ذو تناقص عوائد.

الفصل الثالث:

تطبيقات واستخدامات التوربين الغازي



المبدأ الفيزيائي واحد، لكنه يتخذ أشكالًا هندسية مختلفة تمامًا بحسب ما يُطلَب منه. وهذا الفصل جولة في تلك الأشكال: توليد الكهرباء (3.1)، والدفع الجوي (3.2)، والإدارة الميكانيكية (3.3)، وتطبيقات النفط والغاز والمنصات البحرية (3.4) — وينتهي بخريطة عملية لفئات التوربينات وعائلات المصنّعين (3.5) تُغني القارئ عن التوهان بين الأسماء حين ينتقل من موقع إلى آخر.

3.1 توليد الكهرباء

هذا أشهر وأوسع تطبيق للتوربين الغازي عالميًا، ويأخذ عدة أشكال حسب طبيعة الحاجة:

محطات الدورة البسيطة **(Simple Cycle / Open Cycle)**: التوربين الغازي يُدير مولدًا كهربائيًا مباشرة، وحرارة العادم تُطرح للجو دون استغلال إضافي. كفاءتها أقل (شرحناها في الفصل الثاني، 30-40% تقريبًا)، لكن ميزتها الكبرى السرعة: يمكنها بدء التشغيل والوصول إلى الحمل الكامل خلال دقائق معدودة. لهذا السبب تُستخدم بكثرة كـ«محطات ذروة» (Peaking Plants) تعمل فقط في ساعات ارتفاع الطلب على الكهرباء، أو كاحتياط سريع (Fast Reserve) لتغطية أي نقص مفاجئ في الشبكة.

محطات الدورة المركّبة **(Combined Cycle)**: كما ذكرنا في الفصل الثاني، حرارة العادم تُستغل لتوليد بخار يدير توربينًا بخاريًا إضافيًا، فترتفع الكفاءة الإجمالية بشكل كبير (فوق 55-60% في المحطات الحديثة). هذا هو الخيار المفضّل لمحطات «التحميل الأساسي» (Base Load) التي تعمل بشكل شبه مستمر لتغطية الطلب الثابت على مدار الساعة.

الفرق العملي بين النوعين لا يقتصر على الكفاءة فقط، بل يمتد إلى طريقة العمل بالكامل: الدورة البسيطة توربين غازي وحده يدير مولّدًا واحدًا مباشرة، بينما الدورة المركّبة تضيف طبقة كاملة ثانية (Bottoming Cycle) فوق التوربين الغازي (Topping Cycle) — عادم التوربين الغازي، بدلًا من أن يُطرح للجو مباشرة، يمر على مرجل استرداد الحرارة (HRSG — Heat Recovery Steam Generator) يولّد بخارًا بضغط وحرارة عاليين، وهذا البخار يدير توربينًا بخاريًا ثانيًا مربوطًا بمولّد ثانٍ مستقل. النتيجة عمليًا وحدتا توليد (توربين غازي + توربين بخاري) من نفس كمية الوقود المحروقة مرة واحدة فقط في التوربين الغازي — وهذا سبب القفزة الكبيرة في الكفاءة الإجمالية.

مقارنة تفصيلية: متى تختار الدورة البسيطة ومتى تختار الدورة المركّبة؟

من المهم أن نوضح نقطة أساسية هنا: الدورة المركّبة ليست «نوعًا مختلفًا» من التوربين الغازي نفسه — هي فلسفة محطة كاملة، دمج دورة غازية (Topping Cycle) مع دورة بخارية (Bottoming Cycle) لاستعادة حرارة العادم. القرار بين الاثنين قرار هندسي-اقتصادي يوازن بين عدة عوامل متعارضة:

العنصر	الدورة البسيطة (Simple Cycle)	الدورة المركّبة (Combined Cycle)
التكوين	توربين غازي فقط	توربين غازي + HRSG + توربين بخاري
الكفاءة الحرارية	أقل (30-40% تقريبًا)	أعلى بكثير (فوق 55-60%)
تكلفة الإنشاء	منخفضة نسبيًا	مرتفعة (معدات ومياه وأنظمة إضافية)
سرعة بدء التشغيل	سريعة جدًا (دقائق)	أبطأ، خصوصًا من حالة باردة
التعقيد التشغيلي	منخفض نسبيًا	مرتفع (عدد أكبر من المعدات والأنظمة)
استغلال حرارة العادم	محدود (تُطرح للجو مباشرة)	ممتاز (تُستثمر في توليد بخار إضافي)
استهلاك الوقود لكل وحدة طاقة	أعلى	أقل
المرونة في التشغيل (بدء/إيقاف متكرر)	ممتازة	أقل، لأن دورة البخار أبطأ استجابة
الاستخدام النموذجي	محطات ذروة، دفع ميكانيكي (Mechanical Drive)	محطات تحميل أساسي (Base Load)

إيجابيات وسلبيات كل خيار باختصار:

- **الدورة البسيطة:** تصميم أبسط، تكلفة إنشاء وصيانة أقل تعقيدًا، بدء تشغيل سريع جدًا، ومناسبة ممتازة للأحمال المتغيرة والتطبيقات التي تحتاج دفعًا ميكانيكيًا مباشرًا (ضواغط ومضخات). بالمقابل، كفاءتها الحرارية أقل — خصوصًا في الأحمال الجزئية — وكمية كبيرة من طاقة الوقود تخرج مباشرة مع العادم للجو بدون استفادة.

- **الدورة المركّبة**: كفاءة حرارية عالية جدًا واستهلاك وقود أقل لكل ميجاواط ساعة منتج، وهذا يجعلها الخيار الاقتصادي الأفضل لمحطات تعمل ساعات طويلة بأحمال شبه ثابتة. بالمقابل، تكلفة الإنشاء أعلى بكثير، والنظام أكثر تعقيدًا (يحتاج أنظمة معالجة مياه ومراقبة كيمياء المياه/البخار إضافة لكل معدات التوربين الغازي نفسها)، وزمن بدء التشغيل أطول، والمرونة في التشغيل المتكرر (بدء/إيقاف سريع ومتكرر) أقل من الدورة البسيطة.

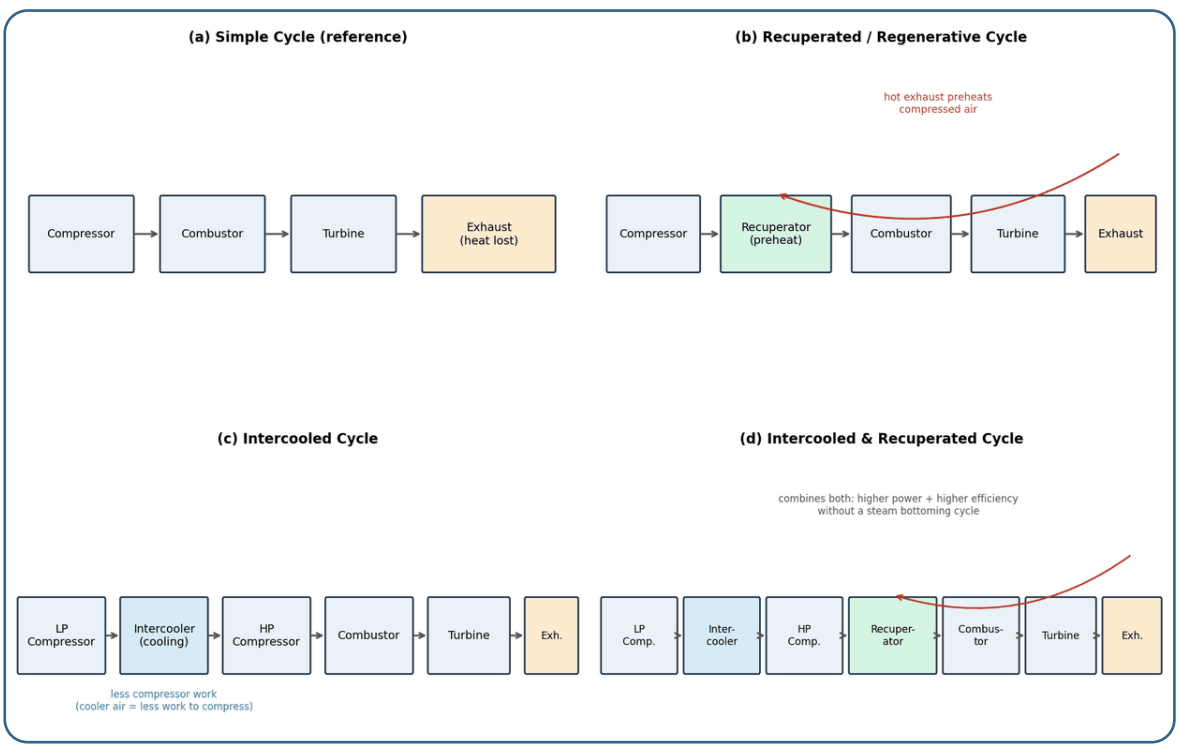
بهذا المنطق بالذات تُبنى أغلب قرارات اختيار نوع المحطة في الصناعة: منصة بحرية أو محطة احتياط طارئ تميل للدورة البسيطة (سرعة ومرونة أهم من الكفاءة القصوى)، بينما محطة توليد كهرباء وطنية كبيرة تعمل بشكل شبه مستمر تميل للدورة المركّبة (الكفاءة والاقتصاد على المدى الطويل أهم من سرعة الاستجابة).

ترتيبات دورة أكثر تقدمًا: الدورة البسيطة والمركّبة هما الأشهر عمليًا، لكن هناك ترتيبات أخرى تستحق فهمًا واضحًا، لأن كل واحدة تحل مشكلة مختلفة بطريقة مختلفة تمامًا عن فكرة "أضف توربين بخاري":

- الدورة المسترجعة/المستردة للحرارة **(Regenerative / Recuperated Cycle)**: بدلًا من أن يُطرح عادم التوربين الغازي للجو مباشرة (أو يذهب لمرجل استرجاع حرارة كبير كما في الدورة المركّبة)، يمر أولًا عبر مبادل حراري يُسمى مسترد الحرارة **(Recuperator)** يستخدم حرارة العادم لتسخين الهواء المضغوط **قبل دخوله غرفة الاحتراق**. النتيجة: كمية الوقود اللازمة للوصول لنفس حرارة الاحتراق المطلوبة تقل، لأن الهواء دخل غرفة الاحتراق مسخّنًا مسبقًا — فترتفع كفاءة الدورة البسيطة نفسها بدون إضافة توربين بخاري كامل. من ناحية التسمية: «Recuperator» يشير لمبادل حراري ثابت يعمل باستمرار (الأكثر شيوعًا في التوربينات الغازية الحديثة)، بينما «Regenerator» تاريخيًا يشير لمصفوفة تخزين حراري دوّارة (استُخدمت في تطبيقات قديمة مثل توربينات السيارات التجريبية) — وفي الممارسة العملية في صناعة التوربينات الغازية، المصطلحان يُستخدمان غالبًا بالتبادل. **قيد مهم:** الاسترداد يعطي أفضل نتيجة في التوربينات ذات نسبة ضغط منخفضة نسبيًا (حيث تبقى حرارة العادم عالية بما يكفي لتسخين مفيد) — ولهذا هو أكثر شيوعًا في التوربينات الصغيرة والمايكروتوربينات، وأقل شيوعًا في التوربينات الصناعية الكبيرة عالية نسبة الضغط المستخدمة أصلًا في محطات الدورة المركّبة. وفي الحقيقة، **الاسترداد والدورة المركّبة خياران متنافسان غالبًا وليسا متكاملين**: كلاهما "يتنافس" على نفس المورد — حرارة العادم — فإن استُخدمت لتسخين الهواء الداخل (استرداد) لم يتبقَّ منها ما يكفي لتشغيل دورة بخارية فعّالة، والعكس صحيح.
- الدورة المبرَّدة بين المراحل **(Intercooled Cycle)**: الضاغط يُقسَّم إلى مرحلتين منفصلتين (ضاغط ضغط منخفض LP وضاغط ضغط عالٍ HP، راجع 5.2)، وبينهما مبادل حراري يُسمى المبرِّد البيني **(Intercooler)** يبرّد الهواء بعد خروجه من مرحلة الضغط المنخفض وقبل دخوله مرحلة الضغط العالي.

الفكرة الفيزيائية: شغل ضغط الهواء (Compression Work) يزيد كلما ارتفعت حرارة الهواء المضغوط — فتبريد الهواء في منتصف الطريق يقلل الشغل الكلي المطلوب لضغطه لنفس الضغط النهائي، وهذا يرفع القدرة الصافية المتاحة للتوربين (لأن جزءًا أقل من طاقة التوربين يُستهلك في تشغيل الضاغط نفسه) ويحسّن الكفاءة أيضًا. مثال حقيقي معروف في الصناعة: توربين GE LMS100، وهو تصميم هجين (يجمع تقنية أعمدة الطيران عالية الكفاءة مع ضاغط صناعي منفصل) يستخدم تبريدًا بينيًا بالتحديد لرفع القدرة والكفاءة معًا مقارنة بتصاميم مشابهة بدون تبريد بيني.

- الدورة المدمجة **(Intercooled & Recuperated — ICR):** دمج الفكرتين معًا في الوحدة نفسها — تبريد بيني يقلل شغل الضغط ويرفع القدرة، واسترداد يقلل استهلاك الوقود ويرفع الكفاءة — فتحصل على تحسّن في القدرة **والكفاءة معًا** من دورة بسيطة واحدة، بدون الحاجة لبنية تحتية كاملة لدورة مركّبة (مرجل استرداد الحرارة، توربين بخاري، معالجة مياه). هذا خيار جذاب خصوصًا في المواقع التي تكون فيها البنية التحتية لدورة مركّبة غير عملية أو غير اقتصادية — منصات بحرية، مواقع نائية، أو مواقع ذات مصادر مياه محدودة (راجع 3.3 و3.4).



الشكل 3.1 — مقارنة تخطيطية بين أربع ترتيبات دورة: (أ) البسيطة كمرجع، (ب) المسترجعة/المستردة (العادم يسخّن الهواء الداخل قبل الاحتراق)، (ج) المبرَّدة بين المراحل (تبريد الهواء بين مرحلتي الضغط لتقليل شغل الضغط)، (د) الدمج بين الاثنين لتحسين القدرة والكفاءة معًا.

مستويات الضغط في مرجل استرداد الحرارة **(HRSG Pressure Levels):** في محطات الدورة المركّبة نفسها (ذكرناها أعلاه)، هناك تفاوت في مدى استغلال حرارة العادم يعتمد على عدد «مستويات الضغط» في الـHRSG:

- مستوى ضغط واحد **(Single-Pressure):** الأبسط — دائرة بخار واحدة بضغط ثابت. سهل التصميم والتشغيل، لكن كفاءة استرجاع الحرارة محدودة نسبيًا.
- مستويان **(Dual-Pressure):** دائرتا بخار (عالي الضغط ومنخفض الضغط) تعملان معًا، فتلتقطان جزءًا أكبر من حرارة العادم عبر مدى درجات حرارة أوسع.
- ثلاثة مستويات **(Triple-Pressure)**، أحيانًا مع إعادة تسخين **(Reheat):** الأكثر تعقيدًا وكفاءة — ثلاث دوائر بخار (عالي/متوسط/منخفض الضغط)، شائعة في محطات الدورة المركّبة الكبيرة الحديثة.

السبب الفني وراء إضافة مستويات: كلما زاد عدد مستويات الضغط، ازدادت دقة مطابقة منحنى تبريد بخار الدورة البخارية لمنحنى تبريد غازات عادم التوربين الغازي وهي تمر في الـHRSG — يقلل هذا من **نقطة القرص** (Pinch Point، أضيق فارق حرارة بين جانبي الغاز والبخار داخل المرجل) ويقلل فقد الإكسيرجي (Exergy Loss) — أي تدهور جودة الطاقة الناتج عن نقل حرارة بفارق درجة حرارة كبير. الثمن مقابل هذا التحسن: تعقيد تصميمي وتشغيلي أعلى، ومعدات وتكلفة إنشاء أكبر — نفس مبدأ الموازنة بين الكفاءة والتعقيد الذي شرحناه أعلاه بين الدورة البسيطة والمركّبة، لكن هنا على مستوى تفاصيل تصميم الـHRSG نفسه.

التوليد الموزّع والصناعي **(Distributed / Industrial Generation)**: وحدات أصغر تُركَّب مباشرة عند موقع الاستهلاك (مصنع، منشأة نفطية، مستشفى، مطار)، أحيانًا مع الاستفادة من العادم الحار لأغراض أخرى في الموقع نفسه (تسخين، تبريد امتصاصي) — يُعرف هذا الأسلوب بـ«التوليد المشترك» (Cogeneration / CHP)، ويرفع الاستفادة الكلية من الوقود بشكل ملحوظ.

من ناحية المرونة، التوربين الغازي يتفوق بشكل واضح على المحطات الأخرى (الفحمية أو النووية مثلًا) بقدرته على البدء والتوقف السريع، وهذا بالذات ما يجعله شريكًا طبيعيًا لمصادر الطاقة المتجددة (الشمسية والرياح) التي يتذبذب إنتاجها — فالتوربين الغازي يستطيع أن يعوّض بسرعة أي انخفاض مفاجئ في إنتاج الطاقة المتجددة، وهذا دور متزايد الأهمية في شبكات الكهرباء الحديثة.



الشكل 3.2 — محطة توليد كهرباء حديثة تعمل بتوربينات غازية بنظام الدورة المركّبة.

3.2 الطيران

الطيران هو المجال الذي دفع تطور التوربين الغازي بأسرع وتيرة تاريخيًا (كما ذكرنا في الفصل الأول عن محركات الطائرات النفاثة في الحرب العالمية الثانية)، ولا يزال أحد أهم تطبيقاته حتى اليوم. الفرق الجوهري هنا عن توليد الكهرباء: الهدف ليس إنتاج دوران على عمود، بل إنتاج **دفع** (Thrust) مباشر بدفع كتلة كبيرة من الهواء للخلف بسرعة عالية.

أشهر أنواع محركات الطيران القائمة على التوربين الغازي:

- المحرك التوربيني النفاث **(Turbojet)**: التصميم الأقدم والأبسط، كل الهواء الداخل يمر عبر الدورة الكاملة (ضغط، احتراق، تمدد) وكل الدفع يأتي من غازات العادم الخارجة بسرعة عالية جدًا. كفاءته أقل في السرعات المتوسطة، ومستخدم اليوم بشكل محدود جدًا (أساسًا في تطبيقات عسكرية أو صواريخ).
- المحرك التوربيني المروحي **(Turbofan)**: التصميم السائد اليوم في كل الطائرات التجارية تقريبًا. مروحة كبيرة أمام المحرك تدفع جزءًا كبيرًا من الهواء «حول» غرفة الاحتراق مباشرة (Bypass Air) بدلًا من أن يمر كله بالدورة الكاملة. هذا يرفع الكفاءة بشكل كبير ويقلل الضجيج، وهو سبب الحجم الكبير الذي نراه في محركات الطائرات الحديثة.
- المحرك التوربيني ذو المروحة **(Turboprop)**: يستخدم التوربين الغازي لتدوير مروحة تقليدية خارجية بدل الدفع النفاث المباشر — مناسب للطائرات الصغيرة والمتوسطة قصيرة المدى بسرعات أقل من طائرات الركاب الكبيرة.

هذا التنوع في التصميم — رغم أن الدورة الحرارية الأساسية (برايتون، الفصل الثاني) واحدة في كل الحالات — مثال ممتاز على مرونة التوربين الغازي: نفس المبدأ الفيزيائي، لكن هندسة مختلفة تمامًا حسب الهدف المطلوب (دفع نفاث مباشر، أو دوران عمود مروحة).



الشكل 3.3 — طائرة تجارية بمحركين توربينيين مروحيين (Turbofan)، أكثر تصاميم محركات الطيران انتشارًا اليوم.

3.3 النقل البحري

في البحر، التوربين الغازي يُستخدم كمحرك دفع رئيسي (Marine Propulsion) بشكل مشابه جدًا لتطبيقات الطيران والتوليد الصناعي، غالبًا باستخدام نسخ «بحرية» من نفس محركات الطيران الأصلية (Aeroderivative Marine Gas Turbines).

أبرز مميزاته في هذا المجال:

- **نسبة قدرة عالية جدًا مقابل الوزن والحجم**: ميزة حاسمة في السفن العسكرية (فرقاطات، مدمرات) التي تحتاج تسارعًا سريعًا وسرعة قصوى عالية.
- **بدء تشغيل سريع جدًا**: مهم جدًا للاستخدامات العسكرية، وأيضًا للسفن التجارية الكبيرة التي تحتاج مرونة في جدول التشغيل.

- غالبًا يُستخدم مع محركات ديزل بنظام هجين **(CODAG / COGAG)**: السفينة تستخدم محركات ديزل اقتصادية للإبحار العادي بسرعة منخفضة، وتشغّل التوربين الغازي فقط عند الحاجة لسرعة قصوى — استفادة من مزايا كل نوع محرك.

بعض السفن السياحية الكبيرة الحديثة، وناقلات الغاز المسال (LNG Carriers)، تستخدم توربينات غازية أيضًا — أحيانًا بالذات لأن الوقود المتوفر على متن ناقلة LNG هو الغاز المتبخر من الحمولة نفسها (Boil-off Gas)، وهذا يعطي ميزة عملية إضافية للتوربين الغازي لقدرته على العمل بمرونة على أنواع وقود مختلفة (كما شرحنا في الفصل الثاني، 2.4).



الشكل 3.4 — سفينة ركاب كبيرة (Cruise Ship) — أحد أشكال استخدام التوربين الغازي بالدفع البحري.

3.4 النفط والغاز

هذا التطبيق هو الأقرب لي شخصيًا من واقع العمل الميداني المباشر، ويستحق وقفة أطول لأن استخداماته أوسع وأكثر تنوعًا مما يتخيله كثيرون خارج هذا القطاع. التوربين الغازي في صناعة النفط والغاز نادرًا ما يُستخدم لتوليد الكهرباء فقط — أغلب استخداماته هي **تدوير معدات دوّارة أخرى مباشرة** (Mechanical Drive)، بدون توليد كهرباء وسيط:

- ضغط ونقل الغاز **(Gas Compression)**: تدوير ضواغط غاز طبيعي كبيرة (Centrifugal Compressors) لدفعه عبر خطوط الأنابيب لمسافات طويلة جدًا، أو لضغطه استعدادًا للتصدير أو الحقن.

- حقن الماء في المكامن **(Water Injection)**: تدوير مضخات ضغط عالٍ جدًا تضخ الماء داخل المكمن البترولي للحفاظ على ضغطه ورفع كفاءة استخراج النفط — تطبيق شائع جدًا في الحقول البحرية.
- حقن الغاز **(Gas Injection)**: بالفكرة نفسها المستخدمة في حقن الماء، لكن بضخ الغاز داخل المكمن لرفع معدل الاستخراج.
- **توليد الكهرباء في المنصات البحرية**: منصات الإنتاج البحرية (Offshore Platforms) تعتمد بشكل شبه كامل على توربينات غازية صغيرة ومتوسطة لتوليد كل احتياجاتها من الكهرباء، لأنها معزولة تمامًا عن أي شبكة كهرباء برية.

الوحدات المستخدمة في هذا القطاع غالبًا من النوع «المشتق من الطيران» (Aeroderivative) — نفس تقنية محركات الطائرات لكن معدّلة للعمل الصناعي الثابت — لأنها خفيفة، مضغوطة الحجم (مهم جدًا في مساحة المنصة البحرية المحدودة)، وسريعة الاستبدال بالكامل كوحدة واحدة (Quick Engine Change) بدل الإصلاح الموضعي، وهذا يقلل وقت التوقف عن العمل بشكل كبير جدًا مقارنة بالوحدات الصناعية الثقيلة.



الشكل 3.5 — منصة إنتاج بحرية (Offshore Platform) — بيئة تشغيل نموذجية للتوربينات الغازية المشتقة من الطيران (Aeroderivative).

من واقع الميدان: العمل على منصة بحرية أو موقع نفطي معزول يفرض واقعًا مختلفًا تمامًا عن محطة توليد برية متصلة بالشبكة — أي عطل في التوربين الغازي هنا لا يعني فقدان الكهرباء فقط، بل يعني توقفًا كاملًا لعمليات الإنتاج والحقن والضخ. هذا الواقع هو ما يفسر التركيز الكبير جدًا على الموثوقية (Reliability) والتكرار (Redundancy) في أنظمة الحماية والتحكم في هذا القطاع تحديدًا — وهو موضوع سنتوسع فيه بالتفصيل في فصلي الحماية والتشغيل والصيانة.

تطبيقات النفط والغاز بالتفصيل: خمسة عوالم لمحرك واحد

قلنا إن النفط والغاز أقرب التطبيقات لي من واقع العمل المباشر — وهو يستحق تفصيلًا أوسع، لأن «توربين غازي في حقل نفطي» عبارة تخفي خلفها **خمسة تطبيقات مختلفة جوهريًا**، لكل منها منطق تشغيل وحمايات وتحديات مختلفة تمامًا. والقاسم المشترك بينها جميعًا ميزة واحدة حاسمة: **الوقود متوفر في الموقع مجانًا تقريبًا** — الغاز المصاحب أو المنتَج نفسه — بينما إيصال كهرباء الشبكة أو الديزل لتلك المواقع مكلف أو مستحيل.

أولًا: إدارة ضواغط تسييل الغاز الطبيعي (LNG Refrigeration Compressors)

أضخم تطبيقات التوربين الغازي في صناعة الغاز على الإطلاق، وأكثرها إثارة هندسيًا.

الفكرة: لتحويل الغاز الطبيعي إلى سائل (LNG) يجب تبريده حتى حوالي **160 درجة مئوية تحت الصفر**، وهذا يتم بدورات تبريد ضخمة (Refrigeration Cycles) تستخدم موائع تبريد مثل البروبان والإيثيلين والميثان أو مبرّد مختلط. وضواغط تلك الدورات تحتاج قدرة ميكانيكية هائلة — عشرات الميغاواط لكل ضاغط — والتوربين الغازي هو المحرك المثالي لها: يعمل بالغاز المنتَج نفسه، ويعطي عزمًا كبيرًا بسرعة متغيرة، وحجمه ووزنه معقولان نسبةً لقدرته.

لماذا يُسمّى القطار **(Train)؟** لأن المنظومة ليست معدة واحدة بل **سلسلة:** توربين غازي ← (أحيانًا علبة تروس) ← ضاغط أو أكثر على نفس العمود. ومن هنا تأتي أهمية كل ما نشرحه عن القفلات وديناميكا القطار الدوّار (5.5) — ففي قطار LNG قد يمتد العمود عبر عدة معدات متتالية.

التحديات العملية المميزة:

- **الإنتاجية مربوطة مباشرة بقدرة التوربين:** أي هبوط في قدرة التوربين — في يوم حار مثلًا (المثال 5 في 2.6) — يعني هبوطًا مباشرًا في إنتاج المصنع من **LNG**. ولهذا تُعتبر أنظمة تبريد هواء السحب (5.6) في مصانع الإسالة استثمارًا إنتاجيًا لا رفاهية.

- **بدء التشغيل معضلة بذاتها:** ضاغط التبريد الضخم يحتاج عزم بدء كبيرًا، ولهذا تُستخدم غالبًا محركات مساعدة للبدء **(Starter/Helper Motors)** — وأحيانًا تبقى تعمل كمساعد أثناء التشغيل لتعويض نقص قدرة التوربين في الأيام الحارة.
- **حساسية شديدة لتوقف الوحدة:** توقف توربين واحد في قطار الإسالة يعني توقف خط إنتاج كامل بخسائر ضخمة — ولهذا تُطبَّق في هذه التطبيقات أعلى مستويات التكرار (Redundancy) في التحكم والحماية، ويصبح كل ما قلناه في الفصل العاشر عن القواطع الكاذبة (10.18) مسألة اقتصادية بالغة الحساسية.
- **حماية الضاغط نفسه:** الانحباس (Surge) هنا خطر مستمر ودائم الحضور في منطق التحكم — لكل ضاغط منظومة حماية انحباس خاصة به (Anti-Surge Control) تعمل بالتوازي مع تحكم التوربين، وهي حلقة تحكم سريعة جدًا بطبيعتها.

ثانيًا: حقن الماء في الآبار والمكامن (Water Injection)

الفكرة الهندسية: عندما يُنتَج النفط من المكمن، ينخفض ضغطه تدريجيًا فيقل معدل الإنتاج. ولاستعادة الضغط والحفاظ على الإنتاج، يُحقَن **ماء** (غالبًا ماء بحر معالَج في التطبيقات البحرية، أو ماء منتَج معاد حقنه) إلى المكمن عبر آبار مخصصة. والحقن يحتاج **مضخات عالية الضغط جدًا** — والتوربين الغازي يديرها مباشرة.

ما الذي يميّز هذا التطبيق؟

- **حمل ثابت نسبيًا ومستمر:** بخلاف توليد الكهرباء المتغيّر مع الطلب، حقن الماء يعمل بحمل شبه ثابت لفترات طويلة — ما يجعله مرشحًا ممتازًا للتشغيل بالحمل الأساسي (Base Load) وبالتالي عمر أطول للأجزاء الساخنة (16.2 — العمر المكافئ).
- **ارتباط مباشر بإنتاج الحقل:** توقف الحقن لا يوقف الإنتاج فورًا، لكن المكمن يفقد ضغطه تدريجيًا — أي أن أثر التوقف **تراكمي وطويل الأمد** وقد لا يظهر فورًا، وهذا يجعل موثوقية الوحدة أهم مما تبدو عليه في النظرة الأولى.
- **بيئة تشغيل قاسية:** في التطبيقات البحرية تحديدًا — رذاذ ملحي مستمر يفرض متطلبات فلترة سحب أشد (5.6) وحماية أعلى من التآكل الساخن (16.2).

ثالثًا: حقن الغاز لرفع ضغط المكمن (Gas Injection / Reservoir Pressure Maintenance)

الفكرة: بدل الماء — أو بالتوازي معه — يُعاد حقن **الغاز** نفسه إلى المكمن. والغرض مزدوج وذكي: **الحفاظ على ضغط المكمن** من جهة، و**التخلص من الغاز المصاحب بطريقة مفيدة** بدل حرقه (Flaring) من جهة أخرى — وهذا بُعد بيئي وتنظيمي متزايد الأهمية عالميًا.

التحدي الهندسي المميز: ضغوط الحقن عالية جدًا — أعلى بكثير من ضغوط عمليات السطح المعتادة — ما يستلزم ضواغط متعددة المراحل بسلاسل ضغط متتالية، والتوربين الغازي يديرها بمنطق قطار LNG نفسه.

نقطة عملية مهمة: التوربين هنا يعمل بالغاز نفسه الذي يُحقَن — وأي تغيّر في خصائص الغاز المنتَج من الحقل (تركيبته، محتواه من السوائل، شوائبه) يؤثر **مرتين**: على أداء الضاغط، وعلى احتراق التوربين نفسه. ولهذا يصبح كل ما نشرحه في 6.2 عن **جودة الوقود ودليل ووبي ودرجة التحميص** ذا أهمية استثنائية في هذه التطبيقات — فالغاز هنا ليس منتجًا معالجًا مستقرًا من شبكة، بل غاز حقل تتغيّر خصائصه مع عمر المكمن.

رابعًا: نقل الغاز عبر خطوط الأنابيب (Pipeline Compression)

تطبيق كلاسيكي مرتبط بالسابقين: الغاز المنقول عبر أنابيب طويلة يفقد ضغطه بسبب الاحتكاك، فتُبنى محطات ضغط **(Compressor Stations)** على مسافات منتظمة لإعادة رفعه. والتوربين الغازي يدير ضواغطها — وميزته الحاسمة هنا أنه **يعمل بالغاز المارّ في الأنبوب نفسه**، فلا حاجة لإمداد وقود خارجي في محطات قد تكون في مناطق نائية جدًا.

خامسًا: توليد الكهرباء في المناطق النائية والحقول البحرية (Remote & Offshore Power Generation)

وهذا التطبيق يستحق وقفة خاصة لأنه يجمع أقسى القيود.

لماذا التوربين الغازي تحديدًا؟

- **الوقود موجود في الموقع:** أهم سبب على الإطلاق — الحقل ينتج غازه، والمنصة تولّد كهرباءها منه. أما إيصال كابل بحري من الشاطئ أو نقل الديزل بالسفن فمكلف ومعقد ومحفوف بالمخاطر.
- **نسبة قدرة إلى وزن وحجم ممتازة:** وهذه **حاسمة** في المنصات البحرية، حيث كل متر مربع وكل طن على سطح المنصة له تكلفة إنشائية باهظة. ولهذا تنتشر في المنصات تحديدًا الوحدات المشتقة من الطيران **(Aeroderivative)** — خفيفة، مضغوطة، سريعة البدء (3.5).

- **سرعة البدء والمرونة:** في مواقع معزولة عن أي شبكة، القدرة على البدء السريع واستعادة التشغيل ذاتيًا بعد انقطاع (البدء الأسود، 9.3) ليست ميزة إضافية بل **ضرورة وجودية** — لا توجد شبكة مجاورة تسند الموقع.

التحديات المميزة لهذا التطبيق:

- شبكة معزولة **(Island Mode):** في المنصة أو الموقع النائي لا توجد شبكة كبيرة تفرض التردد وتمتص الاضطرابات. الوحدات هنا **هي الشبكة** — أي أن حاكم السرعة يعمل غالبًا في وضع الأيزوكرونس (Isochronous) أو بترتيب دقيق للدروب بين الوحدات (6.5)، وأي رفض حمل مفاجئ (9.3) يهدد استقرار الموقع كله. ولهذا تكتسب أنظمة إدارة الطاقة (PMS) وتفريغ الأحمال (Load Shedding) أهمية استثنائية.
- **الصيانة اللوجستية:** قطعة غيار في منصة بحرية قد تحتاج أيامًا وطائرة مروحية أو سفينة إمداد للوصول. وهذا يقلب معادلة الصيانة تمامًا: متوسط زمن الإصلاح **(MTTR، 17.3)** يهيمن عليه الانتظار لا العمل، ما يجعل إدارة قطع الغيار (8.4) والصيانة الوقائية المنضبطة (8.2) أهم بكثير منها في موقع بري قرب مدينة.
- **البيئة البحرية:** رذاذ ملحي، رطوبة عالية، ومساحة محدودة لأنظمة السحب والفلترة — تركيبة تجعل تلوث الضاغط وتآكله (8.5، 16.2) تحديًا يوميًا لا موسميًا.
- **قيود المساحة والسلامة:** حجرات مضغوطة، ومناطق خطرة متداخلة، وأنظمة حريق وغاز بالغة الحساسية (6.7) — كل ذلك في مساحة لا تُقارن بمحطة برية.

خلاصة القسم: لاحظ أن المحرك واحد والمبادئ واحدة، لكن **السياق يغيّر كل شيء**: ما يهم في قطار LNG هو الإنتاجية وحماية الانحباس؛ وما يهم في حقن الماء هو الاستمرارية طويلة الأمد؛ وما يهم في حقن الغاز هو تغيّر خصائص الوقود؛ وما يهم في المنصة البحرية هو الاستقلال والوزن واللوجستيات. ومن يفهم هذا يعرف — عند انتقاله بين موقع وآخر — **أي الأسئلة يجب أن يغيّرها، وأي المبادئ تبقى كما هي.**

3.5 معايير اختيار النوع المناسب لكل تطبيق

بعد أن استعرضنا التطبيقات الأربعة الرئيسية، يأتي السؤال الطبيعي: لماذا تُبنى فكرة التوربين الغازي نفسها بأشكال هندسية مختلفة جدًا حسب التطبيق؟ الجواب المختصر أن هناك ثلاث عائلات تصميمية رئيسية، وكل مشروع يختار العائلة المناسبة له حسب مجموعة معايير عملية:

المعيار	مشتق من الطيران (Aeroderivative)	صناعي ثقيل (Heavy-Duty Industrial)	محرك طيران أصلي
الأصل	مشتق من محرك طائرة، مُعدَّل للاستخدام الثابت	مصمَّم من الصفر للاستخدام الصناعي الثابت	محرك طائرة كما هو
الوزن والحجم	خفيف ومضغوط	ثقيل وضخم	الأخف على الإطلاق
سرعة بدء التشغيل	سريعة جدًا (دقائق)	أبطأ نسبيًا	فورية تقريبًا
أسلوب الصيانة	استبدال الوحدة كاملة (Quick Engine Change)	إصلاح موضعي في الموقع	استبدال/إصلاح بمركز متخصص
نطاق القدرة الشائع	متوسط (عشرات الميجاواط)	كبير جدًا (قد يتجاوز 300+ ميجاواط)	حسب حجم الطائرة
أمثلة تطبيقات	منصات بحرية، دفع بحري، محطات متوسطة	محطات توليد كبيرة، تحميل أساسي	طائرات فقط

الفرق الجوهري بين مشتق الطيران والصناعي الثقيل — أصل التصميم وطريقة الاستخدام: التوربين المشتق من الطيران (Aeroderivative) يعتمد تصميمه الأساسي على محرك طائرة نفاثة أو أحد أجزائه (غالبًا مولّد الغاز — Gas Generator)، ثم يُعدَّل ليعمل في تطبيق ثابت. وراثة تصميم الطيران هذه تحمل معها ميزتين عمليتين مهمتين غير الوزن والحجم المذكورين في الجدول: **كثافة قدرة عالية جدًا** (قدرة كبيرة نسبة للحجم والوزن)، **واستجابة سريعة جدًا للتغيرات في الحمل** — لأن الشفرات والعمود أخف وزنًا وله قصور ذاتي (Inertia) أقل، فيمكنه التسارع أو التباطؤ أسرع من نظيره الصناعي الثقيل، مع كفاءة جيدة رغم صغر الحجم. لهذا السبب يُستخدم بكثرة ليس فقط في توليد الكهرباء، بل أيضًا في تطبيقات الدفع الميكانيكي **(Mechanical Drive)** — تدوير ضواغط الغاز (Compressors) ومضخات النفط والغاز مباشرة بدون مولّد كهربائي وسيط — خصوصًا في منشآت النفط والغاز والمنصات البحرية، حيث الوزن والمساحة والاستجابة السريعة للحمل كلها عوامل حاسمة.

بالمقابل، التوربين الصناعي الثقيل (Industrial) صُمم من البداية كتوربين صناعي وليس كمحرك طائرة معدَّل، فهو أكبر وأثقل وأكثر قوة من حيث الهيكل، ومصمَّم للعمل المستمر لفترات طويلة جدًا (سنوات بدون توقف في محطات التحميل الأساسي) وتحمّل الظروف الصناعية القاسية، مع تركيز أكبر على المتانة وسهولة الصيانة الموضعية وطول العمر التشغيلي — على حساب سرعة الاستجابة وكثافة القدرة.

باختصار: **Aeroderivative** = خفيف، كثافة قدرة عالية نسبة للوزن، سريع الاستجابة، مشتق من تكنولوجيا الطيران.
Industrial = أثقل وأكثر متانة، مصمَّم أساسًا للتشغيل الصناعي المستمر.

بناءً على هذا، أهم المعايير العملية التي تحدد الاختيار الفعلي في أي مشروع:

- **حجم القدرة المطلوبة:** مشروع يحتاج 400 ميجاواط لمحطة تحميل أساسي غالبًا يتّجه لوحدة صناعية ثقيلة، بينما منصة بحرية صغيرة تحتاج 30-20 ميجاواط تناسبها وحدة مشتقة من الطيران أكثر.
- **قيود الوزن والمساحة:** حاسمة جدًا في المنصات البحرية والسفن، وأقل أهمية في محطة برية ذات مساحة كافية.
- نمط التشغيل **(Duty Cycle):** تشغيل متكرر بدء/إيقاف (Peaking) يفضّل وحدة سريعة الاستجابة، بينما تشغيل مستمر لسنوات (Base Load) يفضّل كفاءة أعلى حتى لو كان بدء التشغيل أبطأ.
- **إمكانية الوصول للصيانة:** موقع معزول (منصة بحرية، صحراء نائية) يفضّل تصميم "استبدال الوحدة كاملة" لتقليل وقت التوقف، بينما موقع يسهل الوصول إليه يتحمّل صيانة موضعية أطول.
- **نوع ومصدر الوقود المتاح:** بعض المواقع لا يتوفر فيها إلا غاز مصاحب من الحقل نفسه، أو وقود سائل احتياطي فقط — وهذا يحدد متطلبات نظام الوقود من البداية (موضوع كامل سنتوسع فيه في فصل الأنظمة المساعدة).

وقبل أن نغادر هذا الفصل: رأينا كيف يتحول المبدأ الفيزيائي الواحد إلى حلول هندسية مختلفة تمامًا بحسب الهدف. ويبقى سؤال عملي يواجه كل من ينتقل بين المواقع أو يقرأ وثائق من مصادر مختلفة — **ما هذه الأسماء والفئات كلها، وكيف نتنقل بينها؟** — وهو ما نختم به الفصل.

فئات التوربينات وعائلات المصنّعين: خريطة تنقلك بين الأسماء

نختم هذا الفصل بخريطة يحتاجها كل مهندس ينتقل بين مواقع أو يقرأ وثائق من مصادر مختلفة: صناعة التوربينات الثقيلة تتركز عند عدد محدود من المصنّعين الكبار، ولكل منهم أسماء وعائلات مختلفة لنفس المفاهيم.

أولًا: الفئات الحرارية (Classes) — الحرف الذي يختصر الجيل كله

تُصنّف التوربينات الصناعية الثقيلة عادة بحروف (J، H، F، E...) تعكس جوهريًا **جيل حرارة الاحتراق** — ومعها، كما علّمنا الفصل الثاني، الكفاءة والقدرة وتعقيد التبريد:

الفئة	حرارة الاحتراق التقريبية	كفاءة تقريبية (دورة بسيطة / مركّبة)	ملامحها
E	~1100–1200 مئوية	~33–36% / ~52–54%	الجيل العامل الأقدم المنتشر — متين، متسامح مع الوقود، وأبسط تبريدًا
F	~1300–1400 مئوية	~36–40% / ~57–60%	العمود الفقري لمحطات الدورة المركّبة حول العالم منذ التسعينيات
J / H وما بعدها	~1500–1600+ مئوية	~41–44% / ~62–64%+	قمة التقنية الحالية — تبريد متقدم جدًا ومواد من الفصل 5.4 بأقصاها

الأرقام استرشادية للتموضع الذهني وتتفاوت بين الإصدارات — المرجع الدقيق هو ورقة بيانات الوحدة المعنية.

لاحظ الخيط الذي يربط الجدول بالكتاب كله: كل قفزة فئة هي قفزة حرارة احتراق (2.2)، تستلزم قفزة في تقنيات التبريد والطلاءات (5.4)، وترفع الرهان على أنظمة الحماية الحرارية (7.3) وإدارة الانبعاثات (5.3).

ثانيًا: عائلات المصنّعين الرئيسية

المصنّع	أشهر العائلات الثقيلة	ملاحظات تهم المهندس
GE Vernova	عائلة Frame (6B، 7E/9E، 7F/9F، 7HA/9HA)	المصطلحات التي استخدمناها كثيرًا (FSR، Speedtronic) من هذا العالم؛ احتراق Can-Annular غالبًا
Siemens Energy	SGT5/SGT6 (وريثة عائلة V الأوروبية: V94.2، V94.3A…)	V94.2 بغرفتي احتراق صومعيتين (5.3)؛ الأحدث حلقية
Ansaldo Energia	AE94.2، AE94.3A	من نفس أصل عائلة V الأوروبية — AE94.3A فئة F باحتراق حلقي، منتشرة في منطقتنا
Mitsubishi Power	(F، J، JAC) M501/M701	رائدة فئة J الأعلى حرارة؛ الرقم 701/501 يميز 50/60 هرتز
المشتقة من الطيران	GE LM2500/LM6000/LMS100، عائلات RB211 وTrent وFT8	عالم 3.4 ومنصاته — خفة وزن وسرعة بدء، ومفاهيم العمودين (5.1)

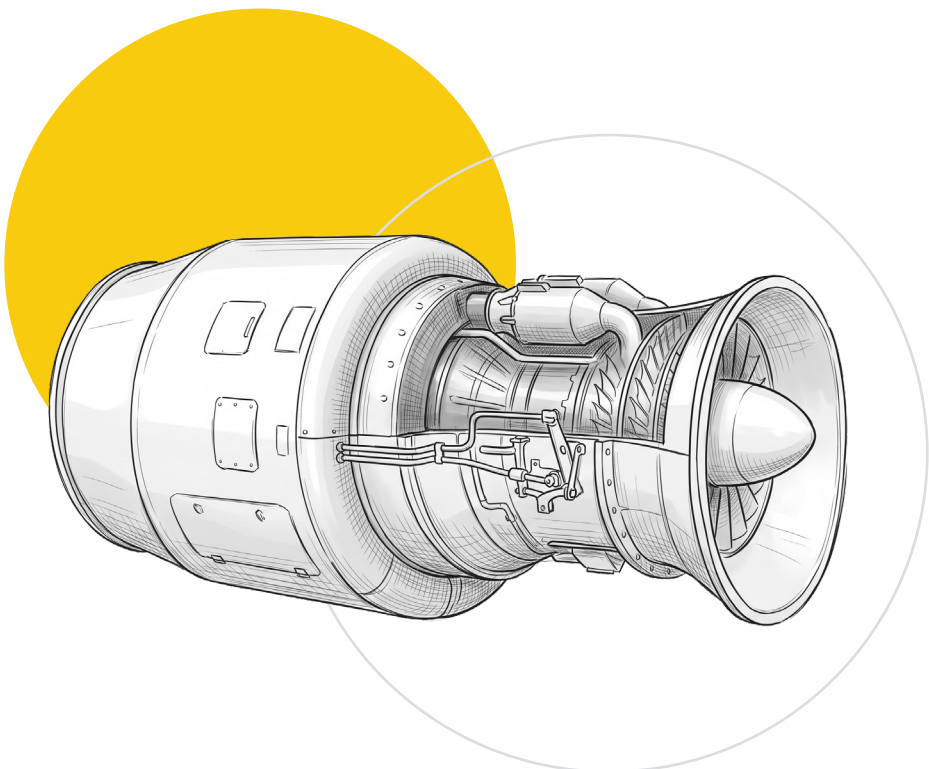
الرسالة العملية من هذا القسم كله: الأسماء تتغير والفيزياء واحدة. من فهم هذا الكتاب على أمثلة عائلة معينة سيجد عند الانتقال لعائلة أخرى أن المختلف هو الأسماء والتفاصيل التنفيذية — مرجع الوقود قد يحمل اسمًا آخر غير FSR، وغرفة الاحتراق قد تكون صومعة بدل حلقة — أما المبادئ (دورة برايتون، أقل قيمة تفوز، طبقات الحماية، سلسلة الإشارة) فتنتقل معك كما هي. وهذا بالمناسبة نفس درس الفصل الخامس عشر عن منصات التحكم — مكررًا على مستوى المعدة نفسها.

خلاصة الفصل

رأينا في هذا الفصل كيف يتحول المبدأ الفيزيائي نفسه الذي شرحناه في الفصل الثاني — دورة برايتون — إلى حلول هندسية مختلفة تمامًا بحسب الهدف: من دفع طائرة، إلى توليد كهرباء لمدينة كاملة، إلى ضخ نفط في منصة بحرية معزولة؛ ثم ختمناه بخريطة الفئات وعائلات المصنّعين التي تنقل القارئ بين الأسماء دون أن يفقد المبدأ. وهذا التنوع في التطبيقات يحمل بالضرورة مزايا وقيودًا مختلفة بحسب كل حالة، وهو بالضبط موضوع الفصل القادم: **الفصل الرابع — إيجابيات وسيئات التوربين الغازي**.

الفصل الرابع:

إيجابيات وسيئات التوربين الغازي



4.1 أبرز الإيجابيات

بعد رحلتنا في الفصول السابقة (المبدأ، ثم التطبيقات)، يمكننا الآن أن نلخّص بموضوعية لماذا أصبح هذا المحرك بالذات الخيار المفضّل في مجالات واسعة جدًا:

1. نسبة قدرة عالية جدًا مقابل الوزن والحجم

هذه الميزة الأهم على الإطلاق، وهي التي فسّرت لنا في الفصل الثالث كل شيء من محركات الطائرات إلى منصات النفط البحرية. لا يوجد محرك حراري آخر يمنحك نفس القدرة بنفس الوزن والحجم الصغير.

2. سرعة بدء التشغيل والاستجابة

توربين غازي بدورة بسيطة يمكنه الوصول إلى الحمل الكامل خلال دقائق، مقارنة بساعات للتوربين البخاري (يحتاج تسخين تدريجي للمرجل، ذكرناها في الفصل الأول). هذه الميزة بالذات هي سبب وجوده كحل احتياطي سريع في شبكات الكهرباء، وكشريك أساسي للطاقة المتجددة (الفصل الثالث، 3.1).

3. مرونة الوقود

يمكنه العمل بأنواع وقود مختلفة (غاز طبيعي، وقود سائل، وأحيانًا خليط مع الهيدروجين في التطورات الحديثة)، وهذا يعطي مرونة تشغيلية كبيرة حسب توفر الوقود في كل موقع — ميزة عملية مهمة جدًا خصوصًا في مواقع النفط والغاز النائية (3.4).

4. بساطة نسبية في التصميم الميكانيكي

كما شرحنا في الفصل الأول (1.2)، لا توجد صمامات ولا مكابس متحركة — فقط أجزاء دوّارة. هذا يعني اهتزاز أقل، تشغيل أنعم، وعدد أجزاء متحركة أقل عرضة للعطل مقارنة بمحرك احتراق داخلي ترددي بنفس القدرة.

5. إمكانية الوصول إلى كفاءة عالية جدًا في الدورة المركّبة

بمفرده في دورة بسيطة كفاءته محدودة (30-40%، الفصل الثاني)، لكن بالدمج مع دورة بخارية يمكنه الوصول إلى أعلى كفاءات محطات الطاقة الحرارية المعروفة اليوم (فوق 60% في بعض المحطات الحديثة جدًا) — تفوق واضح على أي محرك حراري تقليدي آخر لوحده.

6. انبعاثات أقل نسبيًا مقارنة ببدائل الوقود الأحفوري الأخرى

عند حرق الغاز الطبيعي، التوربين الغازي عمومًا ينتج انبعاثات كربونية أقل للوحدة الواحدة من الطاقة مقارنة بمحطات الفحم أو الديزل الثقيل — عامل أصبح مهمًا جدًا في قرارات الاستثمار الحديثة في قطاع الطاقة، رغم أنه يبقى محركًا يحرق وقودًا أحفوريًا وليس حلًا «نظيفًا» بالمطلق.

7. تصميم مضغوط يسهّل التركيب في مواقع محدودة المساحة

كما رأينا في منصات النفط البحرية والسفن (3.3، 3.4) — هذا عامل حاسم في مواقع لا تتحمّل أبدًا حجم وثقل محطة توليد تقليدية.

4.2 أبرز السلبيات والتحديات

بنفس الموضوعية، يجب أن نكون واضحين: التوربين الغازي ليس حلًا مثاليًا لكل موقف، وله تحديات حقيقية يجب أن يعرفها أي مهندس ويخطط لها من البداية:

1. حساسية عالية لظروف الهواء المحيط

شرحناها بالتفصيل في الفصل الثاني (2.4): حرارة الجو والارتفاع يؤثران مباشرة على القدرة والكفاءة. عكس محرك الديزل مثلًا الذي يبقى أداؤه أثبت نسبيًا أمام تغيّر الظروف الجوية.

2. كفاءة ضعيفة نسبيًا بدون دورة مركّبة، وأضعف في الحمل الجزئي

كفاءة الدورة البسيطة (30-40%، الفصل الثاني) أقل من محركات الديزل الكبيرة بنفس القدرة. وحتى هذا الرقم يتراجع أكثر إذا عملت الوحدة بحمل جزئي (Partial Load) لفترات طويلة بدلًا من حملها الكامل المصمَّمة له — نقطة تصميمية مهمة عند التخطيط لحجم الوحدة المناسب لحمل معين.

3. حساسية عالية جدًا لجودة الهواء والوقود الداخل

هذه نقطة أوضحها من واقع تجربة مباشرة: التوربين الغازي حساس جدًا لأي ملوثات في الهواء الداخل — غبار، رمل، وفي البيئات البحرية خاصة رذاذ الملح (Salt Ingestion). أي جسيمات صغيرة تدخل مع الهواء قد تسبب تآكلًا أو انسدادًا في شفرات الضاغط الأولى، أو أضرار مباشرة أخطر (Foreign Object Damage - FOD). هذا هو السبب الرئيسي وراء الاهتمام الكبير جدًا بأنظمة فلترة الهواء (سنتوسع فيها في فصل الأنظمة المساعدة)، ولماذا يحتاج موقع مثل منصة بحرية في مناخ الخليج معايير فلترة وصيانة أشد بكثير من موقع بري في مناخ معتدل.

4. تكلفة أولية ومواد عالية التكلفة

المعادن والسبائك القادرة على تحمّل درجات حرارة دخول التوربين العالية (TIT، الفصل الثاني) غالية جدًا وتقنية تصنيعها معقّدة (تبريد داخلي في الشفرات، طلاءات حرارية خاصة Thermal Barrier Coatings). هذا ينعكس على التكلفة الأولية للوحدة، وأيضًا على تكلفة قطع الغيار لاحقًا.

5. الانبعاثات النيتروجينية (NOx) عند درجات الحرارة العالية

رفع TIT نفسه الذي يحسّن الكفاءة (2.2) يزيد من تكوّن أكاسيد النيتروجين في الاحتراق (كلما ارتفعت حرارة اللهب). الصناعة عالجت هذا بتقنيات مثل غرف الاحتراق منخفضة الانبعاثات (Dry Low NOx / DLN)، لكنها تضيف تعقيدًا إضافيًا في ضبط نظام التحكم بالوقود والهواء — وهو موضوع سنعود إليه في فصل الأنظمة المساعدة.

6. الضجيج

التوربين الغازي يصدر ضجيجًا عالي التردد بمستويات كبيرة (ذكرنا الصوت المميّز في الفصل الأول، 1.2)، مما يتطلب أغلفة عازلة للصوت (Acoustic Enclosures) ومكاتم في مسارات الهواء — تكلفة وتعقيد إضافي، خصوصًا في مواقع قريبة من مناطق سكنية.

7. تكلفة وتعقيد الإصلاح الجذري (Overhaul)

صحيح أن التصميم المشتق من الطيران يسمح باستبدال الوحدة كاملة بسرعة في الموقع (3.5)، لكن إصلاح الوحدة نفسها لاحقًا — خصوصًا القسم الساخن (Hot Section: غرفة الاحتراق وشفرات التوربين) — عملية متخصصة جدًا، غالبًا تحتاج مركز إصلاح معتمد من الشركة المصنّعة، وتكلفتها مرتفعة نسبيًا لأن عمر هذه الأجزاء محدود بعدد ساعات تشغيل معيّن.

الخلاصة: كل ميزة من مزايا 4.1 تحمل معها غالبًا تحديًا مقابلًا — وهذا بالضبط الدرس المهم لأي مهندس: التوربين الغازي أداة قوية جدًا، لكن اختيارها الصحيح واستخدامها الأمثل يحتاج فهمًا واعيًا لهذه الموازنة، ليس مجرد حماس للمزايا.

4.3 موازنة عملية: متى يكون الخيار الأفضل؟

بعد كل المزايا والتحديات التي استعرضناها، يبقى السؤال العملي الحقيقي الذي يواجهه أي مهندس أو متخذ قرار: متى أختار فعلًا توربينًا غازيًا بدل البدائل الأخرى؟ لا يوجد جواب واحد يصلح لكل حالة، لكن هناك خطوط عريضة تساعد في التوجيه:

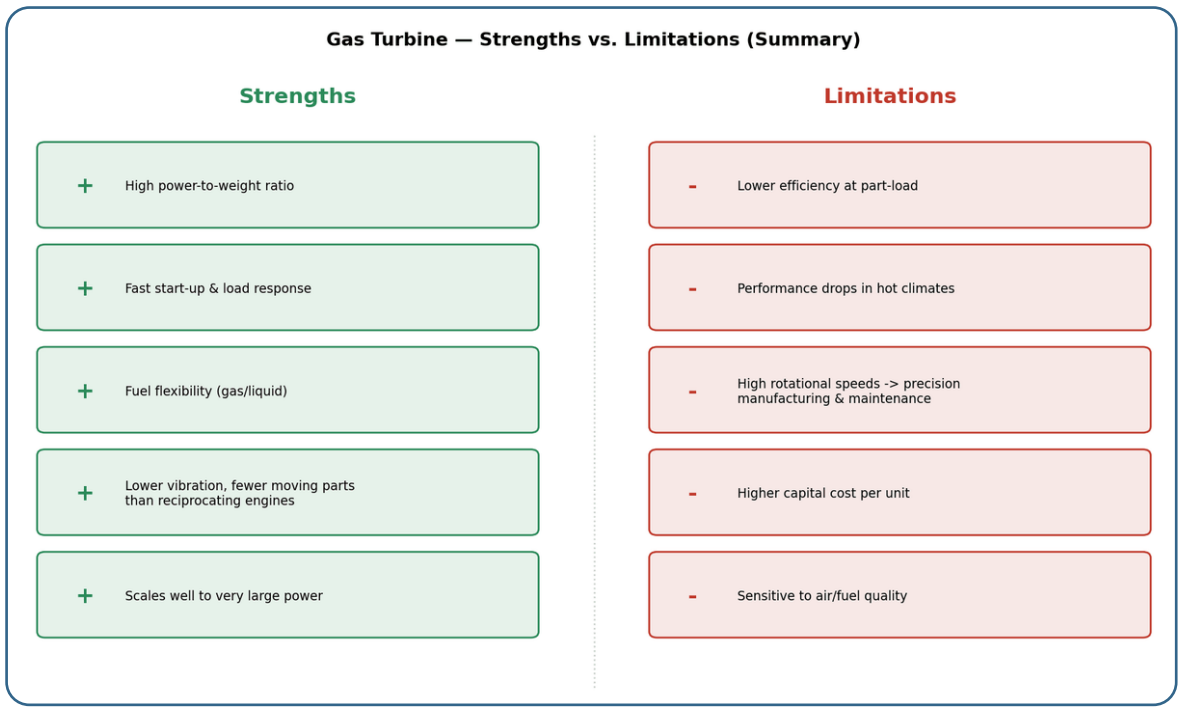
التوربين الغازي يكون الخيار الأقوى عندما:

- تكون الحاجة إلى استجابة سريعة جدًا (احتياط طوارئ، تغطية ذروة، شريك لطاقة متجددة متذبذبة).
- يكون الوزن والمساحة قيدين حقيقيين وحاسمين (منصة بحرية، سفينة، طائرة).
- يتوفر وقود غاز طبيعي بجودة جيدة وبكمية كافية.
- يكون المشروع قادرًا على الاستثمار في دورة مركّبة لرفع الكفاءة (محطات كبيرة، تحميل أساسي طويل الأمد).
- يحتاج الموقع حلًا يعمل بأقل تدخل بشري ممكن لفترات طويلة (منصات بحرية بعيدة، محطات نائية).

البدائل تكون أنسب عندما:

- محرك الديزل أو محرك الغاز الترددي **(Reciprocating Gas Engine)**: أفضل في الحمل الجزئي المتغير باستمرار، وفي المشاريع الصغيرة والمتوسطة التي لا تحتاج قدرة ضخمة، وفي مواقع لا توجد فيها بنية تحتية لدعم متخصص لصيانة توربينات غازية. كفاءتها أعلى بكثير عند التشغيل بحمل جزئي مقارنة بالتوربين الغازي.
- **التوربين البخاري**: أفضل عندما لا يكون مصدر الحرارة احتراقًا مباشرًا أصلًا (مثل الطاقة النووية، أو حرق فحم/نفايات، أو حرارة صناعية مهدورة من عملية أخرى)، وعندما لا يكون الحجم والوزن قيدًا أساسيًا، وعندما يكون التشغيل مستمرًا جدًا بدون حاجة لبدء/إيقاف متكرر.

عامل بيئة الموقع نفسه حاسم جدًا في هذا القرار — كما وضحنا في 4.2، موقع بحري أو صحراوي (مثل أغلب مناطقنا) يفرض تحديات فلترة وصيانة إضافية يجب أن تُحسب بدقة في دراسة الجدوى من البداية، لا أن تُكتشف بعد التشغيل.



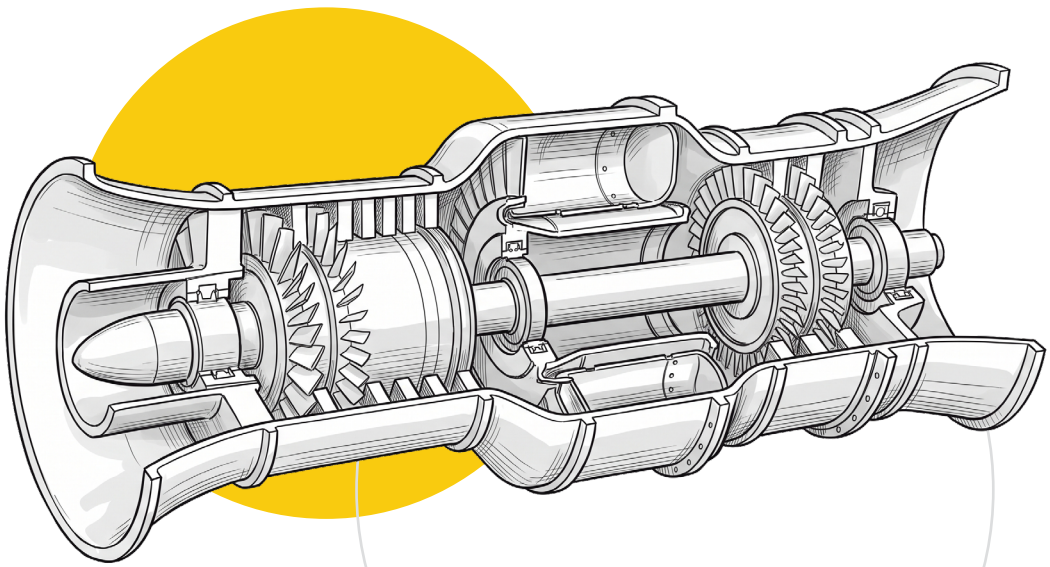
الشكل 4.1 — ملخص بصري لأبرز نقاط القوة والتحديات التي استعرضناها في الفصل، كخلاصة سريعة قبل الانتقال للمكونات

خلاصة الفصل: التوربين الغازي ليس "الحل الأفضل مطلقًا" ولا "خيارًا ضعيفًا" — هو أداة هندسية بمزايا وتحديات واضحة ومفهومة، والاختيار الصحيح يعتمد دائمًا على موازنة دقيقة بين طبيعة الحمل، بيئة الموقع، وتوفر الوقود والدعم الفني.

بهذا نكون أنهينا الجزء «المفاهيمي» من الكتاب (ما هو، كيف يعمل، أين يُستخدم، ومزاياه وتحدياته). من الفصل القادم سنبدأ بفتح الصندوق فعليًا ونتعرف على مكونات التوربين الغازي الداخلية واحدًا واحدًا — **الفصل الخامس: مكونات التوربين الغازي**.

الفصل الخامس:

مكونات التوربين الغازي



5.1 نظرة عامة على البنية العامة

في الفصول السابقة تعاملنا مع التوربين الغازي كـ«صندوق أسود» له ثلاث مراحل رئيسية (ضغط، احتراق، تمدد). من هذا الفصل فصاعدًا سنفتح هذا الصندوق ونتعرف على كل جزء فيه على حدة — ما وظيفته بالضبط، وما يميّزه، ولماذا صُمم بهذا الشكل بالذات.

قبل أن نغوص في التفاصيل، يجب أن نوضح مفهومين أساسيين يحددان شكل أي توربين غازي:

التوزيع العام للأجزاء

في أبسط تصوّر، يتكوّن التوربين الغازي من:

- عمود دوّار واحد أو أكثر **(Rotor)** يحمل عليه شفرات الضاغط وشفرات التوربين.
- هيكل خارجي ثابت **(Casing / Stator)** يحيط بالعمود ويحمل الشفرات الثابتة، وغرفة الاحتراق، ومسارات الهواء.
- محامل **(Bearings)** تسند العمود الدوّار وتسمح له بالدوران بسرعات عالية جدًا بأقل احتكاك ممكن.

تصميم العمود الواحد مقابل العمود المزدوج (Single-Shaft vs. Two-Shaft)

هذا من أهم القرارات التصميمية التي تحدد استخدام الوحدة عمليًا:

- عمود واحد **(Single-Shaft)**: الضاغط والتوربين مربوطان بنفس العمود الدوّار مباشرة، ونفس العمود هو الذي يوفر الشغل الصافي للحمل (مولد كهربائي مثلًا). مناسب جدًا لتطبيقات تحتاج سرعة دوران ثابتة تقريبًا، مثل توليد الكهرباء (المولد يحتاج سرعة دوران محددة بدقة لإنتاج تردد كهربائي ثابت).
- عمودان منفصلان ميكانيكيًا **(Two-Shaft / Free Power Turbine)**: التوربين هنا مقسوم إلى جزأين: «توربين الغاز المولّد» (Gas Generator Turbine) الذي وظيفته الوحيدة تدوير الضاغط، و«توربين القدرة الحرة» (Free Power Turbine) المنفصل تمامًا ميكانيكيًا، ولا يدور إلا بفعل اندفاع الغازات القادمة من توربين الغاز المولّد. هذا التصميم يعطي مرونة كبيرة في سرعة الدوران المستقلة عن سرعة الضاغط، وهو الأكثر شيوعًا في تطبيقات الدفع الميكانيكي المباشر (ضواغط الغاز، مضخات الحقن التي ذكرناها في 3.4)، لأن الحمل هناك (ضاغط أو مضخة) غالبًا يحتاج سرعة دوران مختلفة تمامًا عن سرعة الضاغط المثلى. وهناك ميزة عملية إضافية مهمة جدًا في هذا التصميم تظهر بالذات وقت بدء التشغيل: بما أن توربين الغاز المولّد منفصل ميكانيكيًا عن توربين القدرة، فهو يستطيع التسارع وحده دون أن يضطر لسحب

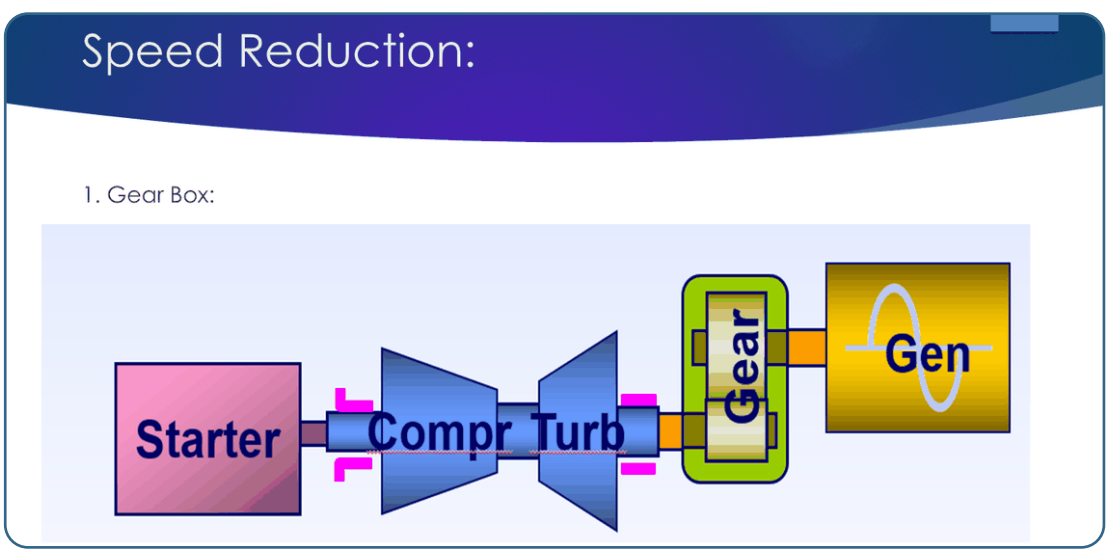
الحمل الخارجي (المعدة المُدارة) معه في الوقت نفسه — فيصبح تسريع التوربين أثناء بدء التشغيل أسهل بكثير، خصوصًا إذا كان الحمل المُدار ضاغطًا كبيرًا أو مضخة أو أي معدة أخرى تتغير سرعتها وتحتاج عزم بدء عاليًا.

هذا التصنيف بالذات هو سبب رئيسي وراء اختلاف «شكل» التوربين الغازي حسب تطبيقه، رغم أن المبدأ الحراري (برايتون) واحد في كل الحالات.

لماذا نحتاج لتخفيض السرعة أصلًا؟

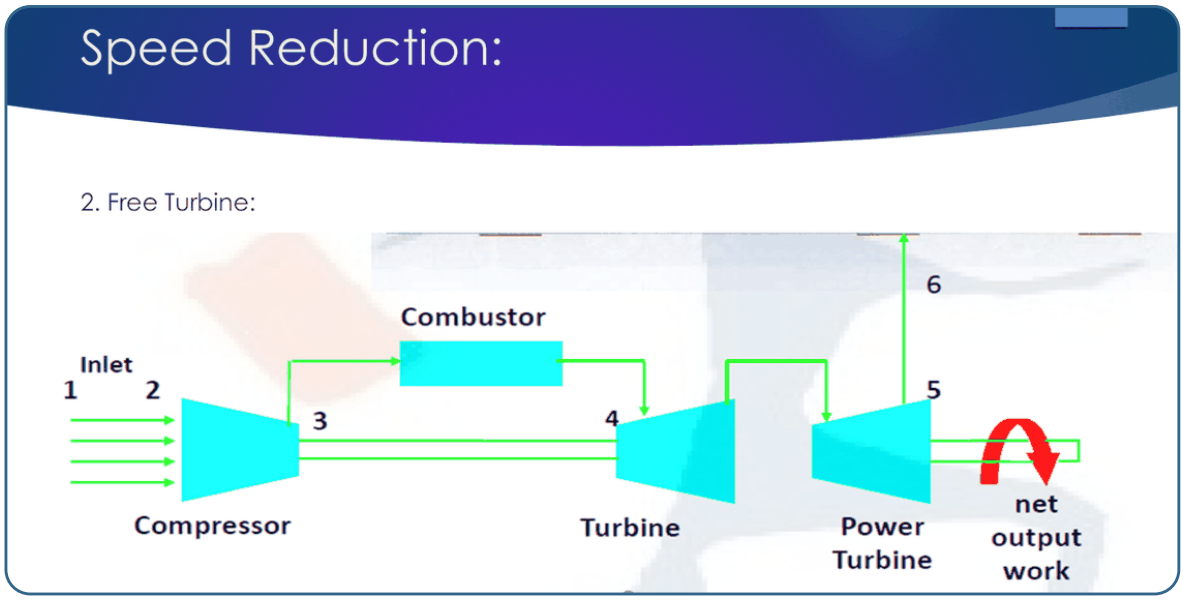
نقطة عملية مهمة تكمّل الفكرة السابقة: التوربين الغازي بطبيعته يدور بسرعات عالية جدًا — عمود الضاغط والتوربين (خصوصًا في التصاميم الصغيرة والمشتقة من محركات الطيران Aeroderivative) قد يدور بعشرات آلاف الدورات في الدقيقة. لكن الحمل المطلوب تشغيله (مولد كهربائي، ضاغط غاز على الخط، مضخة) غالبًا يحتاج سرعة دوران أقل بكثير — فالمولد الكهربائي مثلًا يحتاج سرعة دوران محددة بدقة (كـ 3000 أو 3600 دورة/دقيقة حسب تردد الشبكة 50 أو 60 هرتز لمولد ثنائي القطب) لإنتاج تردد كهربائي صحيح. من واقع الميدان، سرعة الدوران الطبيعية لكثير من التوربينات (خصوصًا الصغيرة منها) أعلى بكثير من هذا الرقم، فلا بد من وسيلة لتخفيض السرعة قبل أن تصل إلى الحمل. وهناك طريقتان عمليتان شائعتان لحل هذه المشكلة:

- علبة تروس التخفيض **(Reduction Gearbox):** مجموعة تروس ميكانيكية توضع بين عمود التوربين (أو عمود توربين القدرة الحرة) والحمل، تخفّض السرعة بنسبة ثابتة (مثلًا 10:1) للوصول إلى السرعة المطلوبة بالضبط. تُستخدم كثيرًا مع تصميم العمود الواحد، لأنها الوسيلة الوحيدة لتخفيض سرعته الثابتة إلى السرعة المطلوبة في الحمل.



الشكل 5.1 — تخفيض السرعة عبر علبة تروس (Gearbox) موضوعة بين عمود التوربين والمولد الكهربائي.

- توربين القدرة الحرة **(Free Power Turbine):** هو نفس مفهوم العمود المزدوج الذي شرحناه أعلاه — فبما أن توربين القدرة الحرة منفصل ميكانيكيًا تمامًا عن عمود الضاغط/توربين الغاز المولّد، يمكن تصميمه أصلًا ليدور بسرعة أبطأ من عمود الضاغط، وهذا يقلل (لكن لا يلغي بالضرورة) الحاجة إلى تخفيض إضافي بالتروس. ومن واقع عملي، كثير من التطبيقات تجمع بين الاثنين: توربين قدرة حرة يدور بسرعة أقل من الضاغط، ثم علبة تروس إضافية أصغر توصل السرعة النهائية بالضبط إلى متطلبات الحمل.



الشكل 5.2 — مسار الغازات بتصميم توربين القدرة الحرة (Free Power Turbine)، من الهواء الداخل وحتى الشغل الصافي الناتج بعمود توربين القدرة المنفصل.

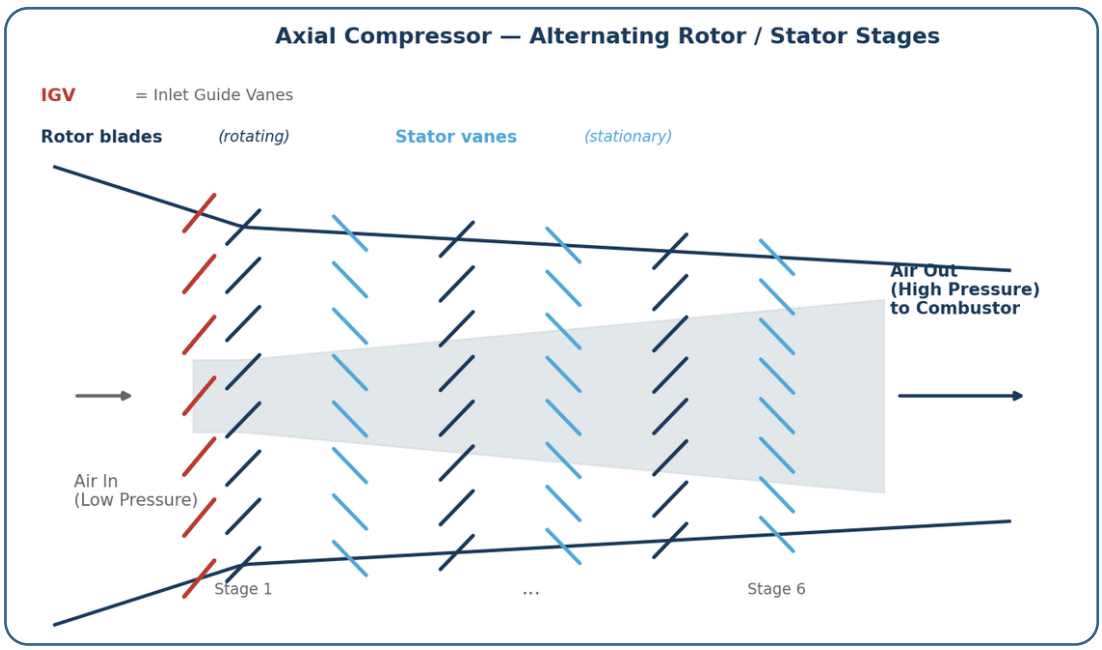
بقية هذا الفصل ستستعرض كل جزء رئيسي بالتفصيل: الضاغط (5.2)، غرفة الاحتراق (5.3)، قسم التوربين (5.4)، العمود والمحامل (5.5)، ثم أقسام السحب والعادم (5.6).

5.2 الضاغط

الضاغط أول مكوّن يمر عليه الهواء، ووظيفته رفع ضغط الهواء (شرحناها في الفصل الثاني، 2.1) بأعلى كفاءة ممكنة وبأقل استهلاك طاقة ممكن. يوجد نوعان رئيسيان:

الضاغط المحوري (Axial Compressor)

الأكثر شيوعًا في التوربينات الغازية المتوسطة والكبيرة (الصناعية والمشتقة من الطيران على حد سواء). يتحرك الهواء بشكل عام موازيًا لمحور الدوران، ويمر عبر سلسلة طويلة من «المراحل» (Stages) — كل مرحلة فيها صف شفرات دوّارة (Rotor Blades) متبوع مباشرة بصف شفرات ثابتة (Stator Vanes). كل مرحلة ترفع الضغط بنسبة صغيرة فقط، لكن تراكم عشرات المراحل (قد تصل إلى 15-20 مرحلة في التصاميم الكبيرة) يعطي نسبة الضغط الإجمالية العالية التي ذكرناها في 2.1.

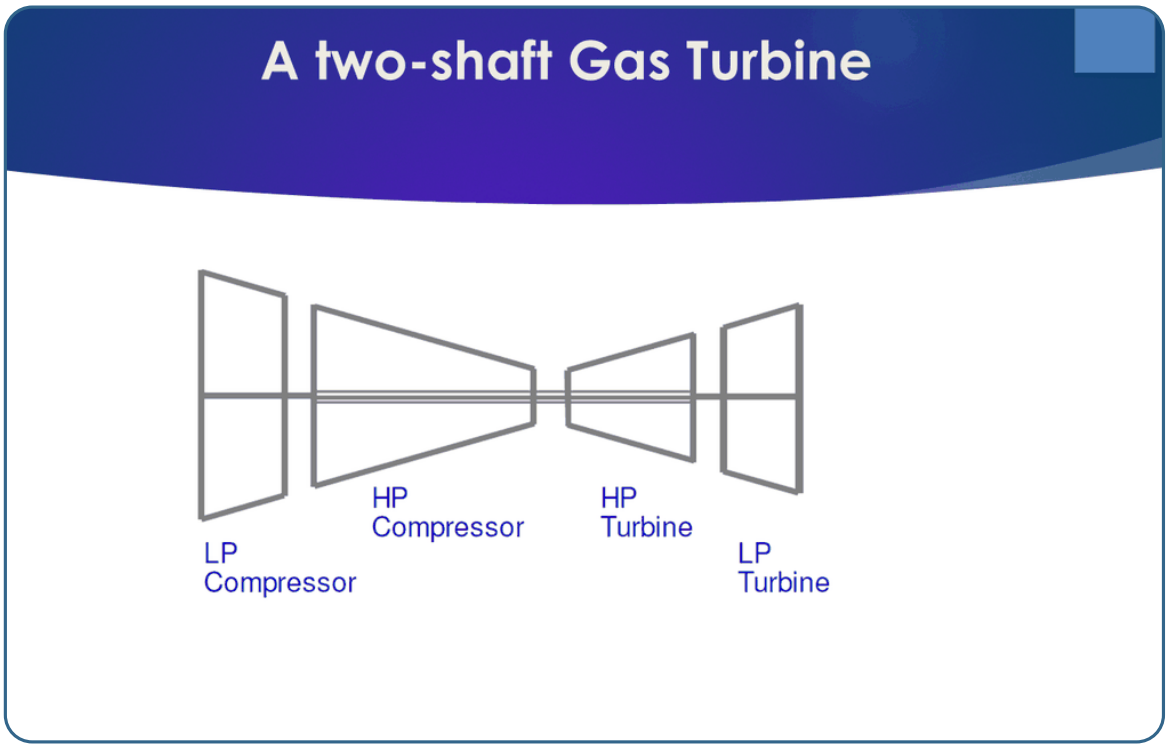


الشكل 5.3 — الضاغط المحوري: مراحل متعاقبة من الشفرات الدوّارة (Rotor) والثابتة (Stator)، مع ريش التوجيه عند المدخل (IGV).

تعدد الأعمدة داخل الضاغط نفسه (Multi-Spool / Twin-Spool)

نقطة تستحق توضيحًا مهمًا: بعض التصاميم — خصوصًا التوربينات عالية نسبة الضغط والمشتقة من محركات الطيران (Aeroderivative) — لا تكتفي بضاغط محوري بعمود واحد، بل تقسم الضاغط نفسه إلى جزأين مستقلين ميكانيكيًا: ضاغط الضغط المنخفض **(LP Compressor)** وضاغط الضغط العالي **(HP Compressor)**، لكل واحد عمود خاص به وتوربين مخصص يدوّره فقط (LP Turbine يدوّر LP Compressor، وHP Turbine يدوّر HP Compressor) — عادة عبر عمودين متداخلين (أحدهما بداخل الآخر)، وليس متجاورين. الفائدة الأساسية: كل قسم من الضاغط يستطيع الدوران بالسرعة المثلى الخاصة به (عادة الـHP يدور أسرع من الـLP)، وهذا يحسّن كفاءة الضاغط واستقراره عبر مدى واسع من ظروف التشغيل، ويقلل خطر ظاهرة الانحباس (Surge) التي سنشرحها بعد قليل.

تنويه مهم لتجنب الالتباس: هذا المفهوم — تقسيم الضاغط نفسه إلى LP/HP — مختلف تمامًا عن مفهوم «العمود المزدوج / توربين القدرة الحرة» الذي شرحناه في 5.1، رغم أن بعض المصادر تستخدم تعبير «Two-Shaft» نفسه للدلالة على كلا المفهومين. هناك (5.1) الانفصال بين توربين الغاز المولّد وتوربين القدرة الذي يقود الحمل الخارجي. أما هنا فالانفصال داخل الضاغط نفسه فقط، بين مرحلتيه المنخفضة والعالية الضغط — ويمكن كذلك أن يجتمع المفهومان في الوحدة نفسها (ضاغط بمرحلتين LP/HP، متبوع بتوربين قدرة حرة منفصل تمامًا).



الشكل 5.4 — تصميم متعدد الأعمدة (Twin-Spool): ضاغط الضغط المنخفض (LP) وضاغط الضغط العالي (HP)، كل منهما بعمود وتوربين خاص يدور بسرعته المثلى المستقلة.

الضاغط الطرد المركزي (Centrifugal Compressor)

أبسط تصميمًا؛ يدخل الهواء محوريًا ثم يُقذف إلى الخارج شعاعيًا (Radially) بفعل دوران «دفاعة» (Impeller) واحدة أو مرحلتين. أقل كفاءة ونسبة ضغط من المحوري للحجم نفسه، لكنه أقوى وأبسط ميكانيكيًا، ويُستخدم غالبًا في التوربينات الغازية الصغيرة جدًا (وحدات مساعدة، توربينات صغيرة الحجم دون بضع ميجاواطات).

دور ريش التوجيه المتغيرة (IGV / VSV)

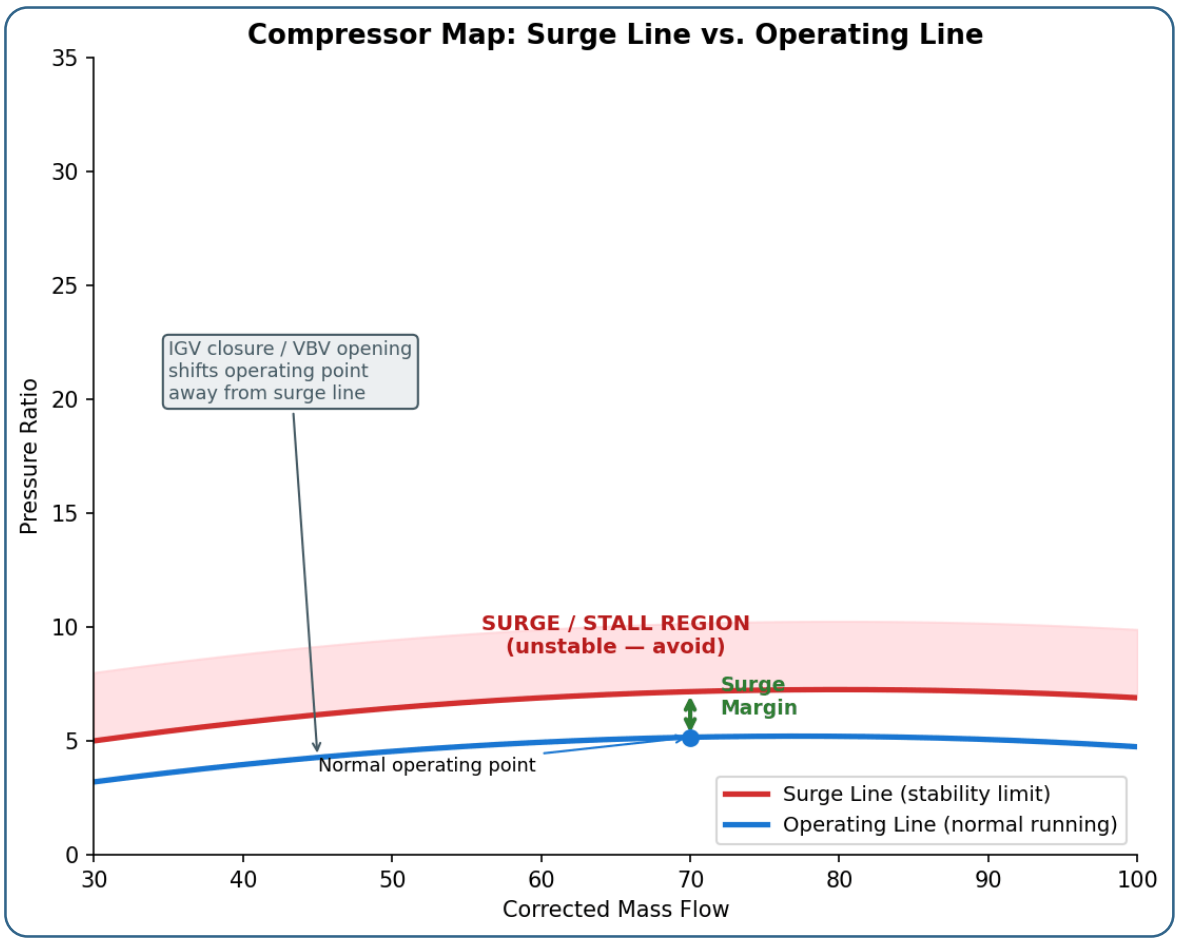
هذه نقطة عملية مهمة جدًا: أول صف شفرات ثابتة عند مدخل الضاغط يكون عادة «ريش التوجيه عند المدخل» (Inlet Guide Vanes - IGV)، وزاويتها متغيرة (يتحكم بها نظام التحكم أوتوماتيكيًا). وبعض التصاميم المتقدمة فيها كذلك عدة صفوف شفرات ثابتة متغيرة الزاوية في المراحل الأولى (Variable Stator Vanes - VSV). وظيفتها الأساسية: ضبط كمية الهواء الداخل وزاوية دخوله حسب سرعة دوران الوحدة وظروف التشغيل — مهم جدًا عند بدء التشغيل والسرعات المنخفضة، وأيضًا للمساعدة في ضبط درجة حرارة العادم عند التحميل الجزئي.

ظاهرتا عدم استقرار الجريان: الترنح (Stall) مقابل الانحباس (Surge)

من أخطر الظواهر التشغيلية التي يجب على أي مهندس أن يفهمها، وهناك فرق مهم بين مستويين من المشكلة الأساسية نفسها (انفصال جريان الهواء عن سطح الشفرة، Flow Separation):

- الترنح الموضعي **(Rotating Stall)**: انفصال جزئي وموضعي لجريان الهواء عن بعض الشفرات فقط (ليس الضاغط كله)، فتتكوّن «فقاعة» اضطراب تدور حول محيط الضاغط بسرعة أبطأ من دوران العمود نفسه. يقلل الكفاءة ويرفع الاهتزاز، لكنه أقل حدة من الانحباس ولا يعكس اتجاه الجريان بالكامل.
- الانحباس **(Surge)**: انهيار جريان الهواء على مستوى الضاغط كله دفعة واحدة — يحدث انقطاع مفاجئ وعكسي في جريان الهواء (يندفع الهواء إلى الخلف لحظيًا باتجاه المدخل) يُعرف بـ"الانحباس"، ويترافق عادة بصوت انفجاري مسموع بوضوح، واهتزاز شديد، ويمكن أن يسبب أضرارًا ميكانيكية حقيقية للشفرات إذا تكرر أو استمر.

خريطة الضاغط وهامش الانحباس **(Compressor Map & Surge Margin)**: يصمّم المهندسون أداء الضاغط وأحيانًا يراقبونه عبر «خريطة» ترسم نسبة الضغط مقابل معدل التدفق المصحح (Corrected Mass Flow). على هذه الخريطة، هناك «خط انحباس» (Surge Line) يمثّل الحد الأقصى المطلق قبل الانهيار، و«خط تشغيل» (Operating Line) يمثّل نقاط التشغيل الطبيعية — والمسافة الآمنة بينهما تُسمى «هامش الانحباس» (Surge Margin). وكلما اقترب خط التشغيل من خط الانحباس (بسبب تلوث الضاغط 8.5، أو خلل في ريش IGV، أو تسارع مفاجئ، أو انسداد في الفلاتر)، قلّ هامش الأمان وازداد احتمال الانحباس الفعلي.



الشكل 5.5 — خريطة ضاغط مبسّطة: خط الانحباس (أحمر) وخط التشغيل الطبيعي (أزرق)، والمسافة بينهما هي هامش الانحباس. إغلاق IGV أو فتح صمامات النزف (VBV) يبعد نقطة التشغيل عن خط الانحباس وقت السرعات المنخفضة.

هذا بالذات هو السبب الرئيسي وراء وجود أنظمة التحكم بـ IGV/VSV، وصمامات نزف الهواء (Bleed/Blow-off Valves) التي تفتح تلقائيًا عند بدء التشغيل والسرعات المنخفضة (حيث يكون هامش الانحباس أضيق طبيعيًا) لحماية الضاغط من هذه الظاهرة.

المواد

الشفرات في المراحل الأولى (حيث الحرارة أقل نسبيًا) تُصنع في التوربينات الصناعية الثقيلة غالبًا من الفولاذ المقاوم للصدأ المارتنزيتي (نحو 12% كروم)، بينما تُستخدم سبائك التيتانيوم — خفيفة وقوية — في المراحل الأولى للمحركات المشتقة من الطيران. أما المراحل الأخيرة، القريبة من غرفة الاحتراق حيث الحرارة أعلى، فتُصنع من سبائك فولاذية أو سبائك نيكل تتحمل حرارة أعلى.

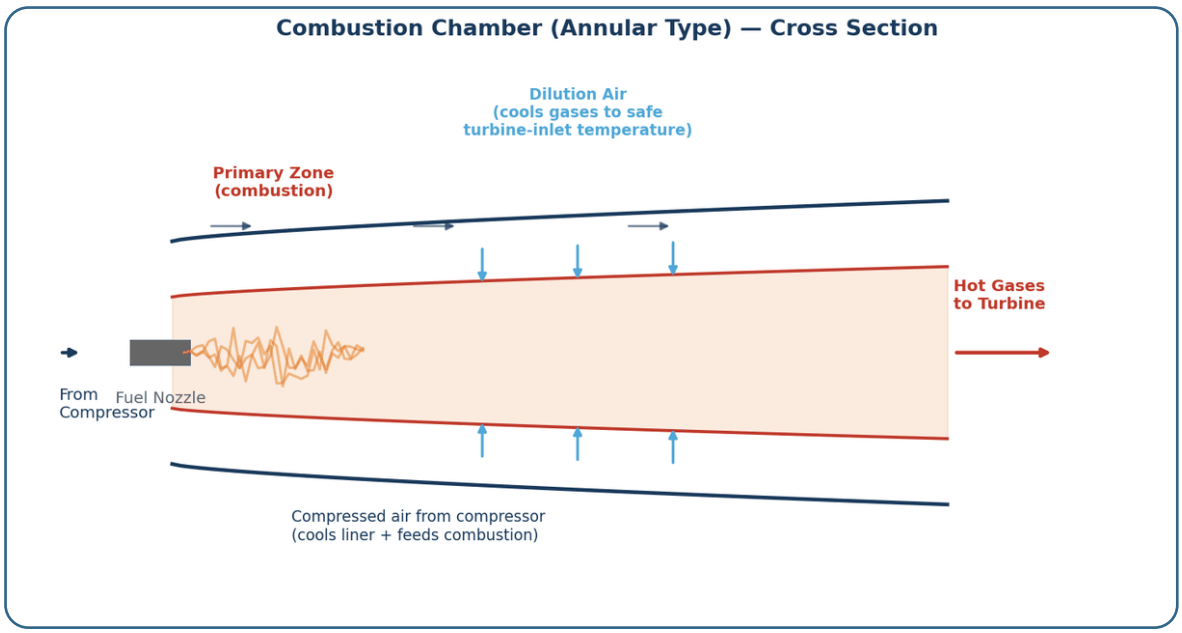
من واقع الميدان: مراقبة اهتزاز الضاغط (Compressor Vibration Monitoring) وسرعة دورانه بدقة عالية (عبر أجهزة استشعار سرعة مخصصة) من أهم أدوات المهندس اليومية للكشف المبكر عن أي تدهور في أداء الضاغط قبل أن يتطور إلى مشكلة أكبر — وهذا موضوع سنتوسع فيه بالتفصيل في فصل الحماية.

5.3 غرفة الاحتراق

هنا يحدث الاحتراق الفعلي (2.1)، وهذا الجزء من أكثر أجزاء التوربين الغازي تعقيدًا هندسيًا رغم صغر حجمه النسبي — لأنه يجب أن يدير عملية احتراق مستمرة، مستقرة، وكاملة، بحرارة تفوق أحيانًا 2000 درجة مئوية في اللهب الفعلي، وأن يحمي في الوقت نفسه المعادن المحيطة من الانصهار.

أنواع التصميم

- النوع الأنبوبي **(Can-Type)**: عدة غرف احتراق أسطوانية منفصلة موزّعة حول محيط الوحدة، كل واحدة بفوهة وقود خاصة بها. تصميم قديم نسبيًا، سهل الصيانة (كل غرفة تُفحص وتُستبدل على حدة)، لكنه أقل انتظامًا في توزيع الحرارة.
- النوع الحلقي **(Annular-Type)**: غرفة احتراق واحدة مستمرة على شكل حلقة كاملة حول العمود، بعدة فوهات وقود موزّعة داخلها. الأكثر شيوعًا في التصاميم الحديثة (خاصة محركات الطيران) لأنه أخف وزنًا، وأكثر انتظامًا في توزيع الحرارة عند مدخل التوربين.
- النوع المختلط **(Can-Annular)**: عدة أنابيب احتراق منفصلة لكنها موضوعة داخل غلاف حلقي مشترك — حل وسط شائع في التصاميم الصناعية الثقيلة، يجمع سهولة صيانة النوع الأنبوبي مع بعض مزايا النوع الحلقي.
- النوع الصومعي **(Silo-Type)**: غرفة احتراق واحدة أو اثنتان كبيرتان جدًا مركّبتان **خارج** جسم التوربين (عموديًا أو بميل، كالصومعة — ومن هنا الاسم)، تشتهر بها بعض عائلات التوربينات الأوروبية الثقيلة الأقدم. ميزته: حجم احتراق كبير يسمح بأزمنة إقامة طويلة ومرونة وقود واسعة (حتى الوقود الثقيل)، وسهولة وصول ممتازة للفحص من الخارج؛ وثمنه: حجم وتكلفة أكبر، وتوزيع حرارة أقل انتظامًا عند مدخل التوربين. وقد انتقلت الأجيال الأحدث من نفس العائلات إلى النوع الحلقي — لكن مئات الوحدات الصومعية ما زالت تعمل حول العالم، وقد تقابل إحداها في مسيرتك.



الشكل 5.6 — مقطع لغرفة احتراق من النوع الحلقي (Annular): منطقة الاحتراق الأساسية، هواء التخفيف، والهواء المحيط الذي يبرّد جدار الغرفة نفسه.

كيف يُوزَّع الهواء داخليًا؟

ليس كل الهواء القادم من الضاغط يدخل مباشرة إلى منطقة اللهب. جزء منه (هواء الاحتراق الأساسي) يدخل مباشرة عند فوهة الوقود في منطقة «الاحتراق الأساسية» (Primary Zone) حيث يتكوّن اللهب الفعلي. والباقي يمر حول جدار الغرفة الخارجي أولًا (لتبريده وحمايته من الحرارة المباشرة)، ثم يدخل تدريجيًا كـ«هواء تخفيف» (Dilution Air) في مناطق لاحقة — وظيفته تبريد الغازات الساخنة جدًا لتنزل إلى درجة حرارة دخول التوربين (TIT) الآمنة والمصمَّمة لها الشفرات (2.1)، وأيضًا لتوحيد توزيع الحرارة قبل دخولها إلى التوربين (Temperature Traverse).

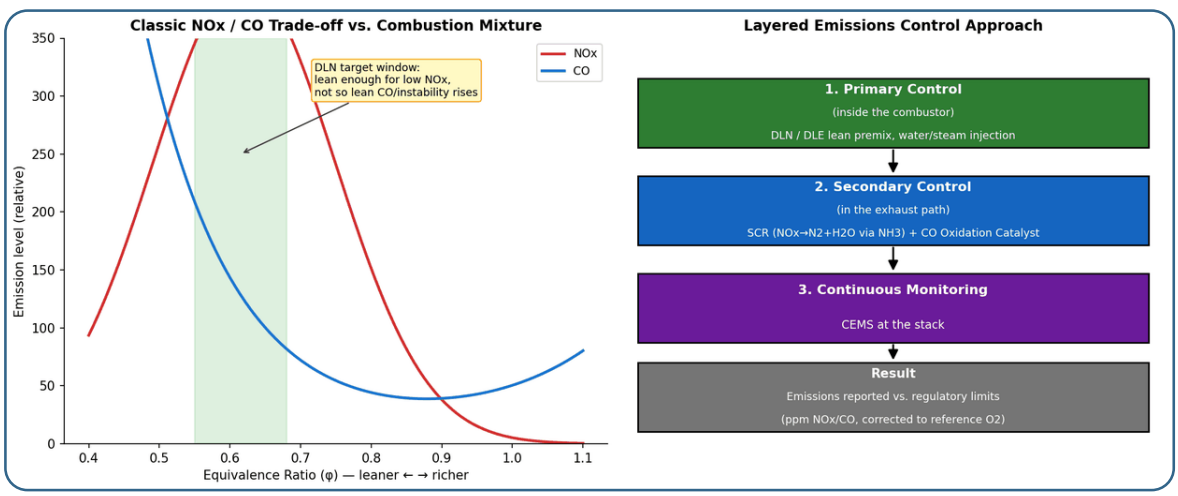
فوهات الوقود وأجهزة الإشعال

فوهات الوقود (Fuel Nozzles) مسؤولة عن رذّ الوقود بشكل دقيق جدًا لضمان خلط جيد بالهواء واحتراق كامل. أما أجهزة الإشعال (Igniters) فتُستخدم فقط عند بدء التشغيل لإشعال اللهب الأول — وبعدها يصبح الاحتراق ذاتي الاستمرار طالما ظل تدفق الوقود والهواء مستمرًا، ولا حاجة لإبقاء الشرارة مستمرة (بعكس محرك السيارة الذي يحتاج شرارة في كل شوط).

التحكم بالانبعاثات الضارة (Emissions Control)

الاحتراق الكامل نظريًا ينتج فقط ثاني أكسيد الكربون CO_2 وبخار ماء، لكنه عمليًا ينتج معه ملوثين رئيسيين يجب التحكم فيهما بدقة: أكاسيد النيتروجين (NOx) وأول أكسيد الكربون (CO). والمشكلة الجوهرية أن هذين الملوثين يتصرفان بشكل متعاكس تمامًا حسب «غنى» خليط الوقود والهواء:

- **NOx**: يتكوّن أساسًا من تفاعل النيتروجين والأكسجين في الهواء نفسه (لا من الوقود) عند درجات حرارة لهب عالية جدًا (Thermal NOx) — وكلما ارتفعت حرارة اللهب، ازداد تكوّن NOx بشكل حاد.
- **CO**: ينتج من احتراق غير مكتمل — ويحدث إما عند خليط غني جدًا بالوقود (لا يوجد أكسجين كافٍ لإتمام الاحتراق)، أو عند خليط فقير جدًا بالوقود (اللهب ضعيف وغير مستقر فلا يكتمل التفاعل الكيميائي بالكامل).



الشكل 5.7 — يسار: العلاقة الكلاسيكية بين NOx وCO ونسبة الخليط (Equivalence Ratio) — منطقة تصميم DLN المستهدفة فقيرة بما يكفي لخفض NOx، لكنها ليست فقيرة لدرجة ترفع CO أو تُفقد استقرار اللهب. يمين: طبقات التحكم بالانبعاثات الثلاث من الاحتراق حتى المراقبة عند المدخنة.

النتيجة العملية: لا توجد «نقطة تشغيل واحدة» تُطفئ الاثنين معًا — بل لا بد من تصميم دقيق يستهدف «نافذة» ضيقة من نسبة الخليط تحقق أقل مستوى ممكن منهما معًا. وهذا بالضبط سبب وجود التحكم بالانبعاثات على عدة طبقات متتالية:

الطبقة الأولى — التحكم الأساسي داخل غرفة الاحتراق نفسها: الحل الهندسي الحديث هو غرف احتراق «الخلط المسبق الفقير الجاف» (Dry Low NOx - DLN)، التي تخلط الوقود بكمية أكبر من الهواء قبل الاحتراق (بدل حقنه مباشرة في اللهب)، فينتج احتراق أكثر انتظامًا وبدرجة حرارة ذروة أقل ضمن «نافذة» الخليط الفقير المستهدفة، وبالتالي انبعاثات NOx أقل بكثير — دون حاجة إلى حقن الماء أو البخار (الذي ذكرناه في 2.5) كحل بديل أقدم وأقل كفاءة في الوقود.

الطبقة الثانية — التحكم الثانوي في مسار العادم (بعد خروج الغازات من التوربين): في المحطات التي يجب أن تلتزم بحدود انبعاثات صارمة جدًا (خصوصًا محطات التوليد الكبيرة)، لا يكفي التحكم بالاحتراق وحده، فتُضاف معدات معالجة إضافية في مسار العادم نفسه (قبل أو داخل الـ HRSG في محطات الدورة المركّبة، 3.1):

- الاختزال الحفزي الانتقائي **(SCR - Selective Catalytic Reduction)**: تُحقن الأمونيا (NH_3) داخل مسار العادم، ثم تمر الغازات على طبقة محفّز (Catalyst) خاصة تحوّل NOx والأمونيا معًا إلى نيتروجين وبخار ماء (غازات غير ضارة). فعّال جدًا (يمكن أن يزيل أكثر من 90% من الـ NOx في التصاميم الحديثة)، لكنه يحتاج ضبطًا دقيقًا جدًا لكمية الأمونيا المحقونة — فالزيادة تسبب «انزلاق أمونيا» (Ammonia Slip) غير مسموح به تنظيميًا، والنقصان لا يحقق نسبة الإزالة المطلوبة.
- محفّز أكسدة أول أكسيد الكربون **(CO Oxidation Catalyst)**: طبقة محفّز منفصلة تكمل أكسدة أي CO متبقٍّ لثاني أكسيد الكربون CO_2.

الطبقة الثالثة — المراقبة المستمرة: أنظمة قياس الانبعاثات المستمر (CEMS - Continuous Emissions Monitoring System) تراقب تركيز NOx وCO فعليًا عند المدخنة بشكل دائم (وليس بفحوصات دورية فقط)، وتقارن القراءة بالحد التنظيمي المسموح — وعادة يُصحَّح الرقم إلى نسبة أكسجين مرجعية موحّدة (O_2 Reference) كي تكون المقارنة بين وحدات ومواقع مختلفة عادلة.

> **من واقع الميدان:** ضبط نظام DLN (يُعرف بـ«Tuning») مهمة متخصصة دقيقة جدًا — فأي انحراف بسيط في جدول توزيع الوقود بين مراحل الاحتراق المختلفة (Staging) قد يرفع الانبعاثات فوق الحد المسموح، أو يسبب تذبذبات ضغط في غرفة الاحتراق (Combustion Dynamics/Pressure Oscillations) التي تضر بعمر معدات الاحتراق نفسها إذا استمرت دون معالجة.

اتجاهات حديثة تستحق المتابعة (حتى 2026): التوربينات الحديثة عالية الكفاءة (فئات H وJ) تنتج NOx عند مخرج التوربين أعلى من الأجيال الأقدم (فئة F)، وهذا يفرض على أنظمة SCR نسبة إزالة أعلى بكثير (تتجاوز 90%) للوصول إلى الحد نفسه المسموح به عند المدخنة — تحدٍّ هندسي حقيقي، خصوصًا عند التشغيل بحمل جزئي منخفض (حتى 20% من الحمل الكامل لدعم مرونة الشبكة الكهربائية) حيث يقل انتظام الاحتراق وترتفع الانبعاثات مؤقتًا. كذلك، استمرت الجهات التنظيمية (مثل وكالة حماية البيئة الأمريكية EPA) في تشديد حدود NOx للتوربينات الجديدة تدريجيًا. وفي اتجاه مختلف تمامًا، فإن دمج الهيدروجين بالوقود الغازي (Hydrogen Blending) — كخطوة نحو خفض انبعاثات CO_2 — يحمل معه تحديًا مباشرًا لأنظمة DLN نفسها: حرارة لهب الهيدروجين أعلى من الغاز الطبيعي بنحو 300 درجة مئوية وسرعة انتشار لهبه أسرع بعدة مرات، وهذا يرفع NOx بشكل حاد ويزيد خطر «ارتداد اللهب» (Flashback) للخلف نحو فوهات الوقود ما لم تُعَد هندسة غرفة الاحتراق نفسها (تصميمات حديثة توصلت إلى نسب خلط هيدروجين تتراوح 30-65% بانبعاثات NOx مقاربة للغاز الطبيعي، عبر تقنيات مثل تدريج الوقود المحوري Axial Fuel Staging وفوهات الخلط الدقيق Micromixers).

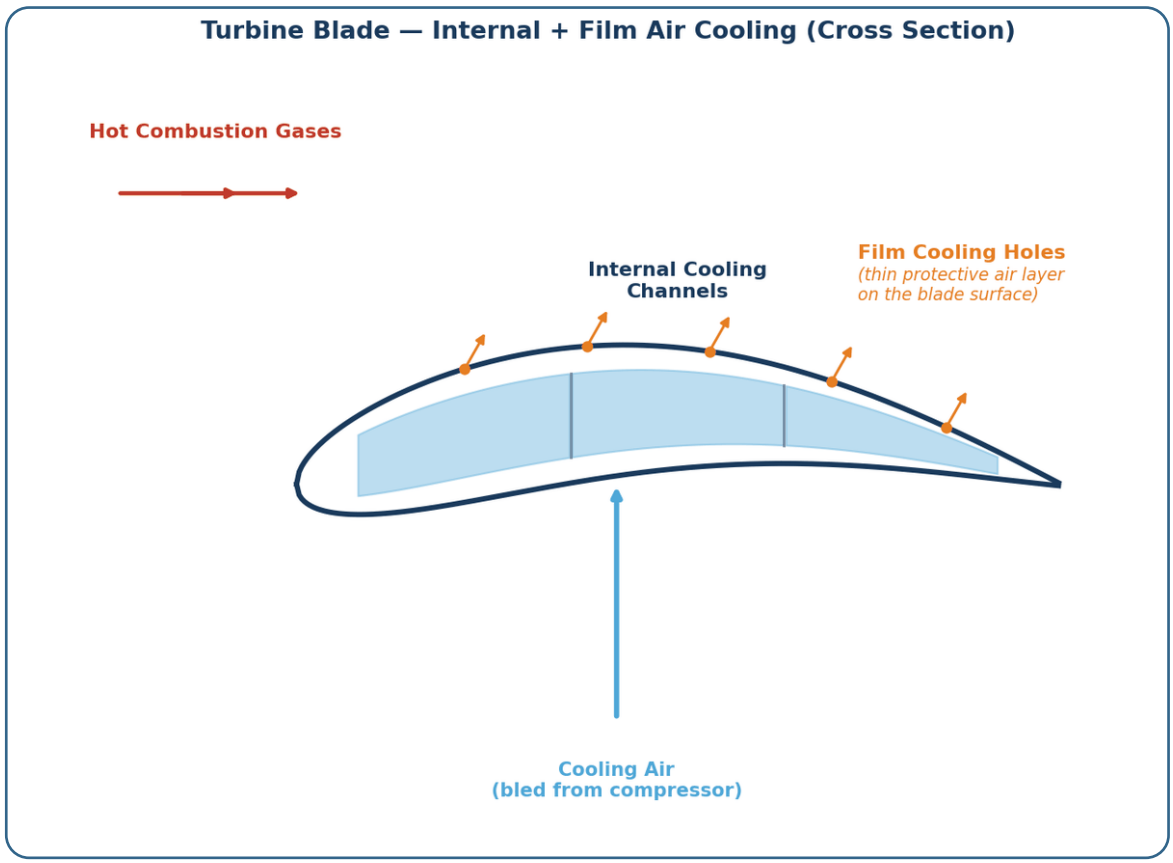
5.4 قسم التوربين

هنا يحدث التمدد (2.1) الذي يولّد الحركة الفعلية على العمود. من الناحية الهيكلية، يشبه قسم التوربين الضاغط في مبدأ التصميم (مراحل متعاقبة من الشفرات)، لكنه معكوس في الوظيفة: فبدل أن «يرفع» ضغط الهواء، هو «يستخرج» الطاقة من الغازات الساخنة عالية الضغط.

كل مرحلة في قسم التوربين فيها صف شفرات ثابتة (Nozzle / Stator Vanes) تُوجّه الغازات بزاوية محسوبة بدقة، متبوع بصف شفرات دوّارة (Rotor Blades) تستقبل هذا الاندفاع الموجّه فتتحول طاقته إلى حركة دورانية ميكانيكية على العمود.

التحدي الحقيقي: الحرارة

يتعرض هذا القسم لأقسى ظروف تشغيلية في الوحدة كاملة — فأول صف شفرات مباشرة بعد غرفة الاحتراق يستقبل الغازات عند درجة حرارة دخول التوربين (TIT) التي ناقشناها بالتفصيل (2.2)، وهي غالبًا أعلى من نقطة انصهار المعدن نفسه لولا تقنيات التبريد المتقدمة. وهذا التناقض الظاهري — معدن يعمل بسلام بحرارة أعلى من نقطة انصهاره النظرية — هو أحد أعظم إنجازات هندسة التوربينات الغازية الحديثة.



الشكل 5.8 — مقطع شفرة توربين: هواء التبريد المسحوب من الضاغط (2.3) يمر بقنوات داخلية ثم يخرج كطبقة رقيقة واقية من ثقوب دقيقة على السطح (Film Cooling).

كيف تُحمى الشفرات؟

- التبريد الداخلي **(Internal Cooling)**: قنوات دقيقة محفورة داخل الشفرة نفسها، يمر فيها هواء بارد نسبيًا (مسحوب من الضاغط، ذكرناه كفاقد كفاءة في 2.3) يمتص الحرارة من الداخل قبل أن تصل إلى سطح الشفرة الخارجي.
- التبريد الغشائي **(Film Cooling)**: بعد أن يبرّد الهواء الشفرة من الداخل، يخرج من ثقوب دقيقة جدًا موزّعة على السطح الخارجي، فيكوّن طبقة رقيقة من الهواء البارد تحمي السطح مباشرة من ملامسة الغازات الساخنة جدًا.
- الطلاءات الحرارية العازلة **(Thermal Barrier Coatings - TBC)**: طبقة سيراميكية رقيقة جدًا (أجزاء من المليمتر) تُطلى بها الشفرة من الخارج، تعمل كعازل حراري إضافي يقلل الحرارة الواصلة فعليًا للمعدن الأساسي.

المواد

شفرات التوربين (خاصة المراحل الأولى) تُصنع من سبائك خاصة قادرة على تحمل الحرارة العالية جدًا مع الحفاظ على قوتها الميكانيكية — أشهرها سبائك الإنكونيل (Inconel) وسبائك أخرى قائمة على النيكل (Nickel-Based Superalloys). وفي التصاميم المتقدمة جدًا، تُصنع بعض الشفرات بتقنية «البلورة الواحدة» (Single-Crystal) بدل التركيب المعدني المعتاد متعدد الحبيبات، لأن غياب الحدود بين الحبيبات المعدنية يرفع مقاومتها للزحف الحراري (Creep) عند درجات الحرارة العالية جدًا لفترات تشغيل طويلة.

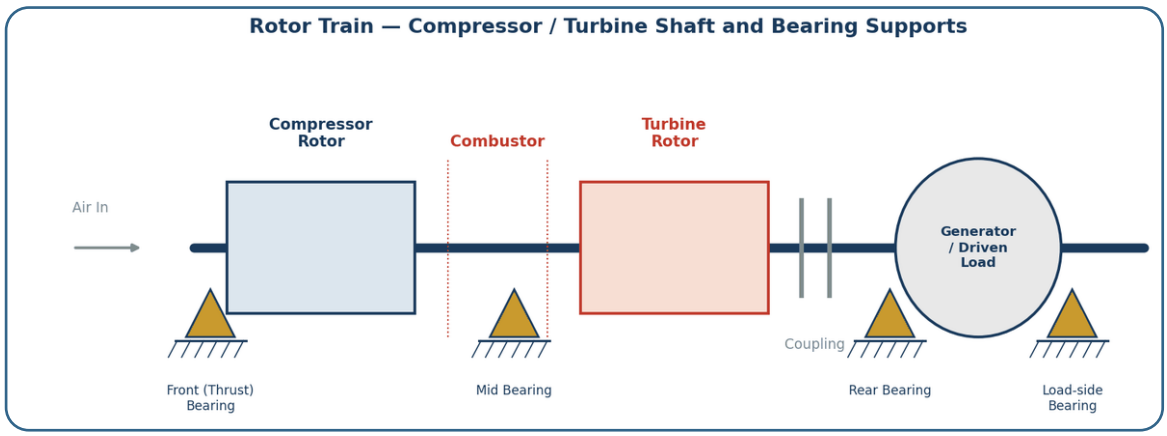
تطورات حديثة في المواد والتصنيع (حتى 2026): بدأ أحدث جيل من التوربينات الغازية (خصوصًا في محركات الطيران المتقدمة) يستخدم «المواد المركّبة السيراميكية» (Ceramic Matrix Composites - CMC) بدل السبائك المعدنية في أجزاء مختارة (مثل أغلفة شفرات التوربين — Shrouds — وبعض الشفرات الثابتة، وتجريبيًا بعض الشفرات الدوّارة في المحركات العسكرية الحديثة جدًا). ميزتها الأساسية: تتحمل حرارة أعلى بكثير من السبائك المعدنية بنفس الوزن (تقريبًا ثلث وزن السبيكة المعدنية المكافئة)، وهذا يقلل — أو يلغي أحيانًا — حاجتها إلى هواء تبريد مسحوب من الضاغط، فيرفع الكفاءة الكلية للمحرك (تذكير بفاقد «هواء التبريد المسروق» الذي ذكرناه في 2.3). وبالتوازي، أصبح التصنيع بالطباعة ثلاثية الأبعاد (Additive Manufacturing) يُستخدم بشكل متزايد لتصنيع شفرات وفوهات وقود بقنوات تبريد داخلية معقدة جدًا يستحيل تصنيعها بالطرق التقليدية (السباكة والتفريز)، ما يسمح بتصاميم تبريد أكثر كفاءة وأقل استهلاكًا لهواء التبريد. وهذه كلها اتجاهات ما زالت تتوسع تدريجيًا من محركات الطيران إلى التوربينات الصناعية الثقيلة.

فراغ رأس الشفرة (Tip Clearance)

مسافة صغيرة جدًا يجب أن تُترك بين طرف الشفرة الدوّارة والهيكل الثابت المحيط — فإذا كانت المسافة كبيرة جدًا، تسرّب هواء/غاز دون أن يمر عبر الشفرة فعليًا (فاقد كفاءة)، وإذا كانت صغيرة جدًا أو انعدمت، حدث احتكاك ميكانيكي مباشر وضرر خطير. وبعض التصاميم الحديثة تستخدم أنظمة تحكم فعّال بهذا الفراغ (Active Clearance Control) تضبطه أوتوماتيكيًا حسب درجة الحرارة والحمل لتحقيق أفضل توازن بين الكفاءة والسلامة.

5.5 العمود والمحامل

الضاغط وقسم التوربين (5.2، 5.4) ليسا قطعتين منفصلتين — بل هما مربوطان ميكانيكيًا بعمود دوّار واحد (أو عمودين في تصميم Two-Shaft، 5.1)، وهذا العمود بالذات هو «العمود الفقري» الذي يحمل كل شيء ويحدد سلامة التشغيل من الناحية الميكانيكية البحتة.



الشكل 5.9 — سلسلة العمود الدوّار (Rotor Train): الضاغط والتوربين مربوطان بعمود واحد، مدعوم بمحامل عند نقاط محددة، ومربوط بالحمل (مولد كهربائي مثلًا) عبر قفلة ميكانيكية.

تصميم العمود

في التصاميم المشتقة من الطيران، غالبًا يكون العمود مجوّفًا (Hollow Shaft) لتخفيف الوزن، وأحيانًا يُستخدم الفراغ الداخلي كمسار لتمرير هواء التبريد (5.4). وفي التصاميم الصناعية الثقيلة، يكون العمود عادة أثقل وأصلب، مصمَّمًا لتحمل عزم دوران كبير جدًا باستقرار عالٍ على مدى سنوات تشغيل طويلة.

المحامل (Bearings)

المحامل هي التي تسند العمود الدوّار وتسمح له بالدوران بأقل احتكاك ممكن، ويوجد نوعان رئيسيان:

- محامل الفيلم الزيتي **(Fluid-Film / Journal Bearings)**: العمود "يطفو" فعليًا على طبقة رقيقة جدًا من زيت التزييت المضغوط، بدون تلامس معدني مباشر تقريبًا أثناء التشغيل الطبيعي. شائعة جدًا في التصاميم الصناعية الثقيلة والكبيرة، وتتحمل أحمالًا عالية جدًا لفترات طويلة.
- المحامل الدحرجية **(Rolling-Element Bearings — كرات أو بكرات)**: تصميم أخف وزنًا وأكثر إحكامًا، شائع في المحركات المشتقة من الطيران حيث الوزن عامل حاسم (3.5). تتحمل أحمالًا أقل نسبيًا من محامل الفيلم الزيتي، لكنها أبسط في التركيب والاستبدال.

ونوع خاص مهم جدًا هو «محمل الدفع» (Thrust Bearing) — مسؤول تحديدًا عن تحمّل القوة المحورية (على طول اتجاه العمود، لا العمودية عليه) الناتجة طبيعيًا من فرق الضغط بين الضاغط والتوربين. وهذا المحمل بالذات من أكثر النقاط حساسية في أي توربين غازي — فتدهوره أو تلفه من أخطر الأعطال الميكانيكية الممكنة، وهو سبب رئيسي وراء أهمية مراقبة موضع العمود المحوري (Axial Position / Thrust Monitoring) في أنظمة الحماية (سنتوسع فيه في فصل الحماية).

التزييت: مقدمة سريعة

كل هذه المحامل — خاصة محامل الفيلم الزيتي — تعتمد اعتمادًا كاملًا على تزويد مستمر وموثوق بزيت تزييت نظيف وبضغط ودرجة حرارة مناسبين. وهذا نظام كامل بحد ذاته (نظام التزييت وزيت التزييت) سنشرحه بالتفصيل في الفصل القادم — الفصل السادس، الأنظمة المساعدة — لأنه من أهم الأنظمة التي تحمي الوحدة كاملة من فشل كارثي.

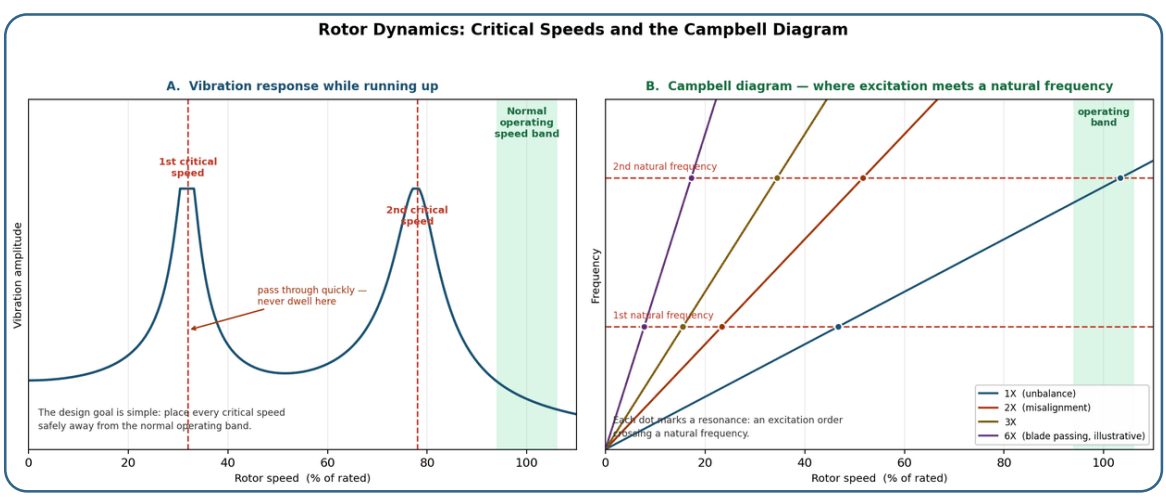
اهتزاز العمود والتوازن

عمود يدور بآلاف الدورات في الدقيقة يجب أن يكون متوازنًا ميكانيكيًا بدقة عالية جدًا (Rotor Balancing) — فأي عدم توازن بسيط جدًا (حتى غير المحسوس بالعين) يتحول إلى قوة اهتزاز كبيرة عند سرعات الدوران العالية. ولهذا لكل عمود «سرعات حرجة» (Critical Speeds) يجب أن يتجاوزها بسرعة أثناء بدء التشغيل وإيقافه بدل التوقف عندها لفترة طويلة — موضوع عملي سيفيدنا كثيرًا عند الحديث عن إجراءات التشغيل في فصل لاحق.

ديناميكا العمود الدوّار: السرعات الحرجة ومخطط كامبل

ذكرنا أعلاه مفهوم «السرعات الحرجة» في جملة واحدة — وهو يستحق توسعة، لأنه يفسّر سلوكًا يراه كل مشغّل تقريبًا أثناء البدء والإيقاف، وغالبًا دون أن يعرف سببه.

أي جسم مرن له **ترددات طبيعية** (Natural Frequencies) يهتز عندها بسهولة. والعمود الدوّار مع محامله ليس استثناءً: هو منظومة مرنة لها ترددات الخاصة، تحددها كتلته وصلابته وخصائص المحامل والفيلم الزيتي نفسه. والسرعة الحرجة **(Critical Speed)** هي ببساطة سرعة الدوران التي يتطابق عندها تردد الإثارة الناتج عن الدوران مع أحد هذه الترددات الطبيعية — فيحدث رنين (Resonance)، ويقفز الاهتزاز بشكل حاد رغم أن شيئًا لم يتعطّل.



الشكل 5.10 — يسار: كيف يقفز الاهتزاز عند كل سرعة حرجة أثناء رفع السرعة. يمين: مخطط كامبل — كل نقطة تقاطع بين مرتبة إثارة وتردد طبيعي هي سرعة رنين محتملة.

النتيجة العملية الأولى — لماذا نمرّ بسرعة ولا نتوقف؟

أثناء رفع السرعة أو خفضها، تمر الوحدة حتمًا عبر سرعاتها الحرجة. الاهتزاز عندها يرتفع مؤقتًا، وهذا **متوقَّع ومقبول** طالما كان العبور سريعًا. لكن التوقف أو التثبيت عند سرعة حرجة يعني تعريض المعدة لاهتزاز مرتفع مستمر — وهذا تحديدًا ما يستهلك عمر الكلال ويؤذي المحامل. لهذا تسلسل البدء (9.3) يتضمّن معدلات تسارع محددة عبر مناطق معيّنة، وليست «سرعة عشوائية».

النتيجة العملية الثانية — مخطط كامبل (Campbell Diagram)

المخطط بالشكل أعلاه أداة تصميم قياسية: المحور الأفقي سرعة الدوران، والرأسي التردد. الخطوط المائلة الصاعدة من الأصل هي مراتب الإثارة (**Excitation Orders**): 1X (مرة واحدة لكل دورة — مصدرها الأساسي عدم التوازن)، 2X (مرتين لكل دورة — مصدرها الشائع سوء المحاذاة)، ومراتب أعلى مثل تردد مرور الشفرات. والخطوط الأفقية هي الترددات الطبيعية للمنظومة.

كل **تقاطع** بين خط مائل وخط أفقي هو سرعة يحدث عندها رنين محتمل. ومهمة المصمّم أن تقع هذه التقاطعات **خارج نطاق التشغيل الطبيعي** بهامش كافٍ — لا أن تُراقَب فقط.

لماذا يهم هذا مهندس التشغيل، لا المصمّم فقط؟

لأن هذا هو الأساس الذي يجعل تحليل توقيع الاهتزاز (7.4) ذا معنى: قراءة اهتزاز مرتفعة عند **1X** تعني عدم توازن؛ وعند **2X** تشير غالبًا لسوء محاذاة؛ وارتفاع عند تردد لا يرتبط بمضاعف صحيح للسرعة يشير لمشاكل من نوع آخر تمامًا (عدم استقرار الفيلم الزيتي مثلًا). أي أن **التردد يحمل التشخيص، لا الاتساع وحده** — وهذه بالضبط الفكرة التي بُنيت عليها حالة 5 في الفصل الثالث عشر.

ونقطة أخيرة تربط الفصل السادس عشر: أي حدث يغيّر كتلة أو صلابة المنظومة — استبدال مكوّن دوّار، فقدان جزء من شفرة، تدهور محمل — **يزيح الترددات الطبيعية نفسها**. ولهذا لا يُفترض أن يبقى توقيع الاهتزاز كما كان بعد أي عمل كبير: يُعاد تسجيل توقيع مرجعي جديد (Baseline) بعد كل فحص كبير، وتُقارَن القراءات اللاحقة به هو، لا بالتوقيع القديم.

القفلات وعلبة التروس والاهتزاز اللّيّي (Couplings, Gearbox and Torsional Vibration)

تكلمنا حتى الآن عن العمود ومحامله. لكن العمود لا يعمل وحده — هو حلقة في قطار دوّار **(Rotor Train)** يمتد من الضاغط حتى الحمل النهائي. وما يقع **بين** هذه الحلقات — القفلات وعلبة التروس — له أعطاله الخاصة، وله نوع اهتزاز مختلف تمامًا عمّا شرحناه أعلاه.

القفلة (Coupling): أكثر من مجرد وصلة

القفلة تنقل عزم الدوران من التوربين إلى الحمل (مولد، ضاغط، مضخة)، لكن وظيفتها الحقيقية أوسع من ذلك بكثير:

- استيعاب سوء المحاذاة المتبقي **(Residual Misalignment)**: مهما بلغت دقة المحاذاة (8.4)، يبقى فارق صغير — والقفلة مصمَّمة لاستيعابه دون نقل أحمال ضارة للمحامل.
- **استيعاب النمو الحراري المحوري**: عند التسخين من حالة السكون إلى التشغيل الكامل، تستطيل الأعمدة والهياكل. والقفلة يجب أن تسمح بهذا النمو، **وإلا نقلت قوة محورية إلى محمل الدفع** — وهذه إحدى أسباب الانزياح المحوري المذكورة في 7.4.
- **الفصل الكهربائي أحيانًا**: في تطبيقات المولدات، تُستخدم أحيانًا ترتيبات تمنع مرور تيارات العمود (Shaft Currents) التي تتلف المحامل.

النوعان الشائعان:

- قفلة الأقراص المرنة **(Flexible Disc / Diaphragm Coupling)**: تعتمد على مرونة أقراص معدنية رقيقة. لا تحتاج تزييتًا، وهذه ميزتها الكبرى — لا صيانة دورية ولا تسريب. وهي الأكثر شيوعًا في التصاميم الحديثة.
- القفلة المسنّنة **(Gear Coupling)**: تعتمد على أسنان متعاشقة تسمح بحركة نسبية صغيرة، وتحتاج **تزييتًا مستمرًا**. وهنا مصدر عطل حقيقي: نقص التزييت يجعل الأسنان تلتصق وتفقد قدرتها على الحركة، فتصبح القفلة "قاسية" وتنقل الأحمال بدل أن تستوعبها.

نقطة عملية مهمة: القفلة العالقة **(Locked Coupling)** تُحوّل مشكلة صغيرة إلى مشكلة كبيرة صامتة — سوء محاذاة كان يُستوعَب سابقًا يبدأ بالظهور كحمل على المحامل وكاهتزاز عند 2X (5.5)، ونمو حراري كان يُمتَص يبدأ بالظهور كقوة محورية. ولهذا عند التحقيق في ارتفاع اهتزاز عند 2X أو في انزياح محوري تدريجي، **حالة القفلة سؤال مبكر لا متأخر.**

علبة التروس (Gearbox)

كثير من التطبيقات تحتاج سرعة دوران مختلفة عن سرعة التوربين: مولد يعمل بسرعة متزامنة ثابتة تفرضها الشبكة، أو ضاغط يحتاج سرعة أعلى. وعلبة التروس هي الحل، لكنها تضيف مجموعة اعتبارات جديدة:

- **إنها معدة قائمة بذاتها**: لها محاملها وتزييتها وحرارتها واهتزازها، وتحتاج مراقبة مستقلة — لا أن تُعامَل كـ"قطعة وصل".
- **بصمة اهتزاز خاصة بها**: أشهرها تردد تعاشق الأسنان **(Gear Mesh Frequency)** = عدد الأسنان × سرعة الدوران. وظهور هذا التردد أو مضاعفاته في المخطط الطيفي (7.4) يشير مباشرةً إلى حالة الأسنان — تآكل، كسر سنّ، أو مشكلة في نمط التعاشق.
- **جودة الزيت أكثر حساسية**: تحمّل الأسنان لأحمال التماس يجعل خصائص الزيت ومستوى نظافته حرجًا. وتحليل الزيت الدوري (8.2) في علبة التروس **أكثر قيمة تشخيصية** منه في أماكن أخرى، لأن جزيئات المعدن فيه تحمل توقيعًا مباشرًا عن حالة الأسنان.
- **الحرارة**: ارتفاع حرارة علبة التروس مؤشر مبكر معتبر — قد يعني تزييتًا غير كافٍ، أو حملًا زائدًا، أو بداية مشكلة في التعاشق.

الاهتزاز اللَّيّي (Torsional Vibration): النوع الذي لا تراه

هذه نقطة تستحق تأكيدًا خاصًا لأنها **غير مرئية بأجهزة المراقبة المعتادة**.

كل ما نشرحه في 7.4 يقيس الاهتزاز **الشعاعي والمحوري** — أي حركة العمود في الفضاء. أما الاهتزاز اللَّيّي فهو **تذبذب في سرعة الدوران نفسها** — أي أن العمود يتسارع ويتباطأ دوريًا حول سرعته المتوسطة، فيلتوي ويرتد كنابض لولبي. ومركز العمود لا يتحرك من مكانه إطلاقًا.

النتيجة الخطيرة: مجسّات القرب لا تراه، وحسّاسات التسارع على الهياكل بالكاد تلتقطه. أي أن الوحدة قد تعاني إجهادًا ليّيًا خطيرًا **وكل شاشات الاهتزاز تعرض قراءات طبيعية تمامًا**.

ما الذي يثيره؟

- **أحداث كهربائية في جانب المولد** (18.3): قصر في الشبكة، ربط خاطئ عند التزامن، أو إغلاق تلقائي سريع للقاطع — كلها تُنتج صدمة عزم مفاجئة تنتقل عبر القطار كله.
- **تذبذبات في الحمل المُدار** في تطبيقات الضواغط والمضخات الترددية.
- **تشغيل عند سرعة تصادف تردد الرنين اللَّيّي** للقطار.

لماذا يهم عمليًا؟ لأن أثره تراكمي وصامت: إجهاد كلال (16.2) يتراكم في القفلة أو في أسنان علبة التروس أو في العمود نفسه، حتى يظهر فجأة ككسر بلا إنذار مسبق على أي شاشة.

كيف يُعالَج؟ أساسًا **بالتصميم**: تُجرى دراسة تحليل لَيّي (Torsional Analysis) للقطار الكامل في مرحلة التصميم، وتُوضع ترددات الرنين اللَّيّية خارج نطاقات التشغيل — تمامًا بمنطق مخطط كامبل الذي شرحناه أعلاه، لكن للالتواء بدل الانحناء. ومن هنا تأتي نتيجة عملية مهمة جدًا:

> **أي تغيير على تركيبة القطار الدوّار — استبدال قفلة بأخرى مختلفة المرونة، تغيير كتلة دوّارة، أو تعديل في علبة التروس — يغيّر الترددات اللَّيّية للقطار كله.** ولهذا هذا النوع من التغييرات هو مثال نموذجي على ما يجب أن يمر عبر إدارة التغيير (8.6)، لا أن يُعامَل كاستبدال قطعة مكافئة.

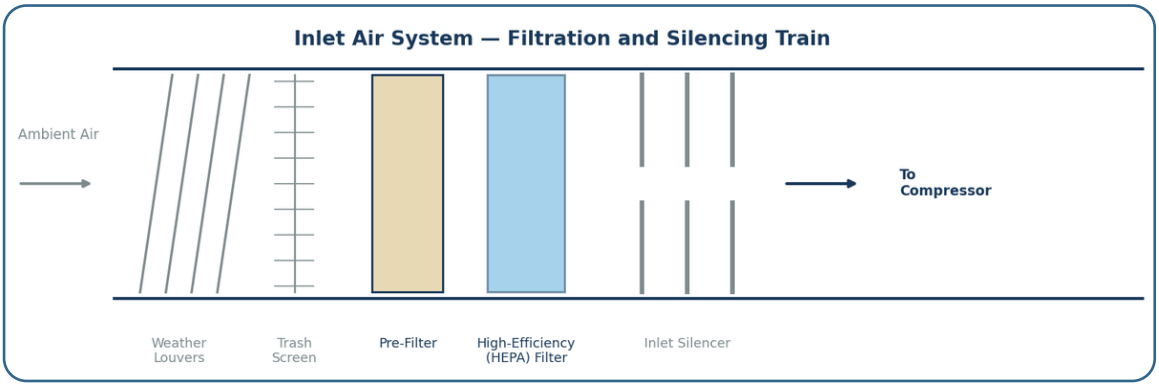
5.6 السحب والعادم

آخر مكوّنين رئيسيين لا يشاركان مباشرة في الدورة الحرارية (Brayton)، لكنهما ضروريان جدًا لأداء الوحدة كاملة وحمايتها. ونعرضهما هنا على مستوى المكوّن؛ أما المنظومتان كاملتين — بمراحلهما ومنطق التحكم بهما وأعطالهما — فلهما موضعان مخصصان: **منظومة السحب في الفصل الخامس والعشرين، ونظام العادم في 5.8**.

قسم السحب (Inlet System)

كل الهواء الذي يدخل الضاغط (2.1) يمر أولًا عبر سلسلة من المكونات المصمَّمة لحمايته وتهيئته:

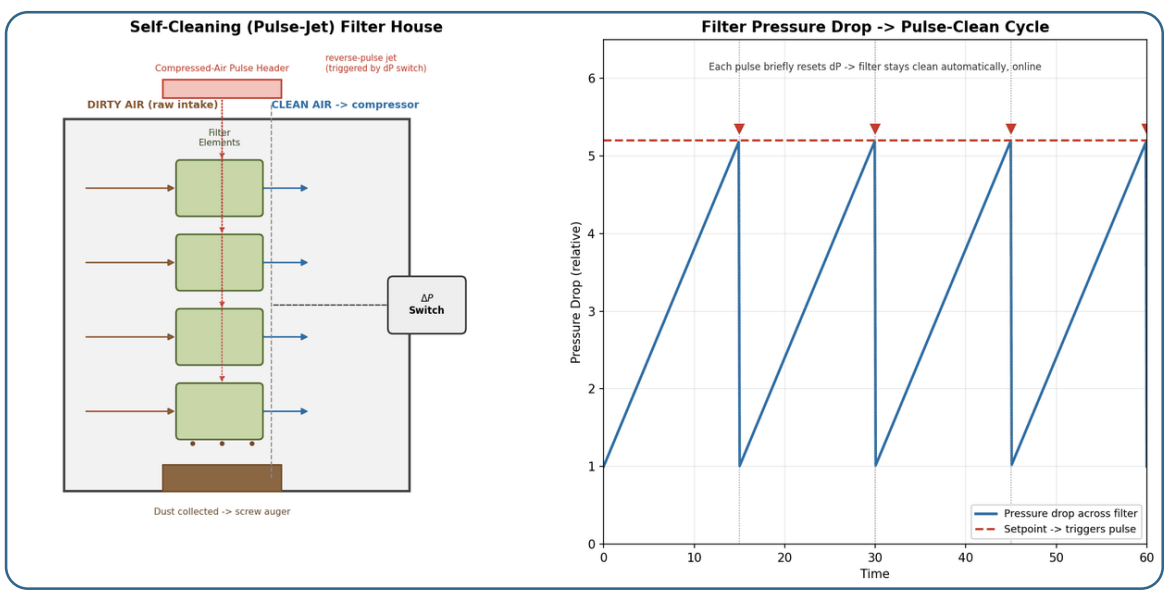
- مصدّات الطقس **(Weather Louvers)**: تمنع دخول المطر والأجسام الكبيرة مباشرة.
- شبكة حجب الأجسام الكبيرة **(Trash / Bird Screen)**: تمنع دخول أي جسم كبير (طيور، أكياس، أدوات) قد يسبب ضررًا مباشرًا بالشفرات (FOD، ذكرناها في 4.2).
- مراحل الفلترة **(Filtration Stages)**: عادة على مرحلتين أو أكثر — فلتر أولي (Pre-Filter) يوقف الجسيمات الكبيرة نسبيًا، ثم فلتر عالي الكفاءة (High-Efficiency / HEPA) يوقف الغبار والجسيمات الدقيقة جدًا التي تسبب تلوث شفرات الضاغط وتآكلها (4.2، 2.3). وهذا الجزء بالذات أهم بكثير في المواقع الصحراوية والبحرية (رذاذ الملح) التي تحدثنا عنها.
- مكاتم الصوت **(Inlet Silencers)**: ألواح أو حواجز صوتية تمتص جزءًا كبيرًا من الضجيج (4.2) قبل أن يصل الهواء إلى الضاغط.



الشكل 5.11 — نظام السحب: مصدّات طقس، شبكة حجب أجسام، مرحلتا فلترة، ومكتم صوت — قبل دخول الهواء للضاغط.

نظام التنظيف الذاتي للفلاتر (Self-Cleaning Pulse-Jet Filters)

في المواقع كثيفة الغبار — الصحراوية بشكل خاص — يتسخ الفلتر الساكن بسرعة، فيرتفع فرق الضغط عبره وتقلّ كتلة الهواء الواصلة إلى الضاغط. والحل الشائع صناعيًا هو فلتر **ذاتي التنظيف بالنبض العكسي**: خراطيش يمر الهواء عبرها من الخارج إلى الداخل، وحسّاس فرق ضغط يراقبها، وعند بلوغ حدٍّ محدد يُطلق صمام نبضي نفخة هواء مضغوط قصيرة جدًا في الاتجاه المعاكس فتنشقّ طبقة الغبار وتسقط إلى مجمّع أسفل بيت الفلتر. والعملية تتكرر تلقائيًا أثناء التشغيل دون إيقاف الوحدة — ومن هنا تسميتها «ذاتية».



الشكل 5.12 — يسار: مخطط بيت فلتر ذاتي التنظيف، يوضح مسار الهواء المتسخ والنظيف، رأس هواء النبض العكسي، حسّاس فرق الضغط، ومجمّع الغبار. يمين: منحنى دورة تكرار فرق الضغط — يرتفع تدريجيًا حتى حد معيّن ثم ينخفض فجأة عند كل نبضة تنظيف.

ويحتاج هذا النظام مصدر هواء مضغوط جاف ونظيف، ومراقبة دورية لصمامات النبض نفسها — فعطل صمام واحد يعني أن جزءًا من الخراطيش لا يُنظَّف تلقائيًا. ومقارنته بالفلاتر الساكنة، ومنطق إطلاق النبض ومعاييره، في 25.5.

والفلترة ليست المعالجة الوحيدة لهواء السحب. فهناك وجهان آخران للمنظومة نفسها، لكل منهما بُعد اقتصادي وتشغيلي كبير:

- **تبريد هواء السحب** لتعويض ما تسلبه الحرارة من قدرة (2.4)، بثلاث عائلات: التبريد التبخيري بالوسائط، والترذيذ الضبابي (Fogging)، والتبريد الميكانيكي/الامتصاصي. والأوليان محدودتان بحد درجة حرارة البصيلة الرطبة **(Wet Bulb)** فتضعف جدواهما في الأجواء الرطبة، والأخيرة وحدها لا تتقيد بالرطوبة. ومنها فرع خاص هو الضغط الرطب **(Wet Compression)** — ترذيذ زائد عن قصد لا يجوز إلا على آلة مصممة له.
- منع التجمد **(Anti-Icing)**: ومفارقته أن التجمد لا يتطلب جوًا تحت الصفر — فتسارع الهواء عند فوهة الدخول يخفض حرارته عدة درجات، فيتكوّن الجليد على حواف المدخل وريش IGV بينما ميزان الحرارة الخارجي يقرأ فوق الصفر. وعلاجه الشائع تدفئة المدخل بهواء منزوف من الضاغط، بثمنٍ أدائي مقصود.

وكلا الموضوعين — بفيزيائهما وأرقامهما ومنطق التحكم بهما ومصفوفة تشخيصهما — مفصّل في **الفصل الخامس والعشرين** (25.6 إلى 25.9).

قسم العادم (Exhaust System)

بعد أن تخرج الغازات من التوربين (2.1)، تمر عبر:

- الناشر **(Exhaust Diffuser)**: يوسّع مقطع مسار الغازات تدريجيًا لتقليل سرعتها واستعادة جزء من ضغطها المتبقي، بدل أن تُفقد الطاقة كلها كسرعة اندفاع خام.
- وصلات التمدد الحراري **(Expansion Joints)**: نظرًا للفروقات الكبيرة جدًا في درجة الحرارة بين حالة التشغيل والإيقاف، تتمدد الأنابيب والهياكل وتنكمش باستمرار — فوصلات مرنة خاصة تمتص هذا التمدد دون أن تسبب إجهادًا ميكانيكيًا في الهيكل الثابت.
- **مكتم صوت العادم**: بنفس فكرة مكتم السحب، لتقليل الضجيج الصادر من خروج الغازات.
- **في حالة الدورة المركّبة (2.5، 3.1)**: العادم هنا لا يخرج إلى الجو مباشرة، بل يدخل «مرجل استرداد الحرارة» (Heat Recovery Steam Generator - HRSG) لتوليد البخار — نقطة الوصل الفعلية بين التوربين الغازي والتوربين البخاري في محطات الدورة المركّبة.

وبهذا تكتمل جولة المكوّنات

بهذا نكون فتحنا «الصندوق الأسود» على امتداده: من الهواء الداخل عبر الفلاتر، مرورًا بالضاغط والاحتراق والتوربين والعمود، وصولًا إلى العادم. ويبقى سؤالان يستحقان قسمين مستقلين قبل أن نغادر الفصل: **لماذا صُمّم التوربين بهذا الشكل تحديدًا** (5.7)، **وما الذي يجري فعلًا في مجرى العادم** — وهو أكثر ما يُهمَل رغم أنه يحمل ثلثي طاقة الوقود (5.8).

5.7 لماذا صُمّم التوربين هكذا؟ من المشكلة إلى الحل التصميمي

كل ما شرحناه في هذا الفصل وصف **ماذا** يوجد في التوربين. وهذا القسم يجيب عن سؤال مختلف وأعمق: **لماذا يوجد؟**

فكل تفصيلة في تصميم التوربين الغازي — كل صمام نزف، وكل ريشة متغيرة، وكل ختم، وكل طلاء، وكل ثقب تبريد — **هي حلّ لمشكلة فيزيائية محددة**. ولم تُخترع دفعة واحدة، بل تراكمت عبر عقود من الفشل والتعلّم.

ولماذا يستحق هذا قسمًا مستقلًا؟ لأن المهندس الذي يعرف **المشكلة** التي وُجد المكوّن لحلّها يستطيع أن يتنبأ بما سيحدث إذا فشل ذلك المكوّن. ومن يحفظ الأسماء فقط لا يستطيع.

أولًا: المشكلات في الضاغط

المشكلة الفيزيائية	لماذا تحدث	الحل التصميمي	ماذا يحدث إن فشل الحل
الانحباس والاختناق عند السرعات المنخفضة	عند البدء لا يتناسب تدفق الهواء عبر المراحل الأمامية والخلفية؛ فتعمل المراحل الأمامية قرب الانفصال	ريش توجيه متغيرة **(IGV/VSV)** تحدّ تدفق الهواء، **وصمامات نزف** تنفّس هواء المراحل الوسطى	بدء معلّق، انحباس مسموع، تلف ريش (24.5)
تسرّب الهواء عكسيًا نحو مناطق الضغط الأدنى	الهواء يميل طبيعيًا للسريان نحو الضغط الأقل، وكل تسرّب هو شغل ضاع	أختام **(Seals)** عند قاعدة كل صف ريش ثابت	انخفاض كفاءة الضاغط بلا سبب ظاهر

المشكلة الفيزيائية	لماذا تحدث	الحل التصميمي	ماذا يحدث إن فشل الحل
خلوص أطراف الريش	أي فجوة بين طرف الريشة والغلاف تسمح بتسرّب حول الريشة	طلاءات قابلة للتآكل **(Abradable)** على السطح الداخلي للغلاف تسمح للريشة بحفر مسارها بنفسها بأقل خلوص	فقد أداء تدريجي دائم، وأحيانًا احتكاك
الانحناء الحراري بعد الإيقاف	العمود الساكن الساخن يبرد من أسفل أسرع من أعلى	آلية الدوران البطيء **(Ratchet / Turning Gear)**	اهتزاز عنيف عند البدء، واحتكاك (26.4)
التمدد الحراري التفاضلي	الغلاف والعمود يتمددان بمعدلات مختلفة	**تقسيم الغلاف إلى أقسام** (أمامي، خلفي، مخرج) مع مواضع تثبيت وتمدد محسوبة	إجهاد على الهيكل، وتغيّر خلوصات

ثانيًا: المشكلات في غرفة الاحتراق

المشكلة	الحل التصميمي	التعليق
حرارة اللهب تتجاوز ما يتحمله أي معدن	تقسيم الهواء: احتراق، وتبريد فيلمي للبطانة، وتخفيف (راجع 25.2)	هذا هو سبب أن معظم الهواء لا يحترق أصلًا
إشعال غرفة واحدة لا يكفي	أنابيب اللهب المتقاطعة **(Crossfire Tubes)** تنقل اللهب بين الغرف	فشلها يعني اشتعالًا في بعض الغرف فقط، وفارق حرارة فوري
تمدد البطانة داخل غلاف بارد	تركيب عائم يسمح بالحركة النسبية	تقييد التمدد يعني تشقّقًا
NOx مرتفع عند حرارة لهب عالية	خلط مسبق فقير (DLN) — الفصل الثاني والعشرون	كلفة: نافذة تشغيل ضيقة
توزيع حرارة غير متجانس على مدخل التوربين	هواء التخفيف وترتيب الثقوب لتشكيل ملف حرارة مقصود **(Temperature Profile)**	الملف ليس متساويًا عمدًا — أبرد عند الجذر والطرف

ثالثًا: المشكلات في قسم التوربين

المشكلة	الحل التصميمي
درجة حرارة الغاز أعلى من نقطة انصهار السبيكة	**تبريد داخلي** بقنوات وتبريد فيلمي بثقوب، وطلاءات حاجزة حرارية **(TBC)**، وسبائك ذات بلورة موجّهة أو بلورة واحدة
الزحف **(Creep)** تحت الحمل والحرارة الطويلة	سبائك مقاومة للزحف، وحدود صارمة لساعات التشغيل عند الحرارة القصوى (8.2)
الكلال عالي الدورات من الاهتزاز	ضبط الترددات الطبيعية بعيدًا عن مضاعفات سرعة الدوران (مخطط كامبل، 5.5)، وأغطية طرفية ورباطات **(Shrouds)** لرفع التخميد
التآكل الساخن من الملح والفاناديوم	طلاءات مقاومة، وحدود صارمة على ملوّثات الوقود والهواء (25.3)
الدفع المحوري الناتج عن فارق الضغط	محمل دفع **(Thrust Bearing)** مع مراقبة موضع محوري (7.4)

رابعًا: نمو نسبة الضغط — قصة تختصر تطور الصناعة كلها

إذا أردت مؤشرًا واحدًا يلخّص تطور التوربينات الغازية عبر سبعين عامًا، فهو **نسبة الضغط**:

- الأجيال الأولى: نسب ضغط متواضعة (في حدود 5–10)، وكفاءة نحو 20–25%.
- الأجيال المتوسطة: 12–18، وكفاءة 30–34%.
- الفئة F الحديثة: 18–24، وكفاءة 36–40% في الدورة البسيطة؛ والفئتان H وJ: نسبة ضغط أعلى، وكفاءة تتجاوز 40%.

ولماذا لم نرفعها من البداية؟ لأن كل زيادة في نسبة الضغط تتطلب:

- **مراحل ضاغط أكثر** ← عمود أطول ← مشاكل ديناميكية دوّارة أعقد.
- **حرارة مخرج ضاغط أعلى** ← هواء التبريد نفسه أصبح أسخن ← تبريد أصعب.
- **نافذة تشغيل أضيق** ← حساسية أعلى للانحباس ← حاجة إلى ريش متغيرة أكثر وصمامات نزف أكثر.
- **حرارة دخول توربين أعلى** ← سبائك وطلاءات وتبريد لم تكن متاحة.

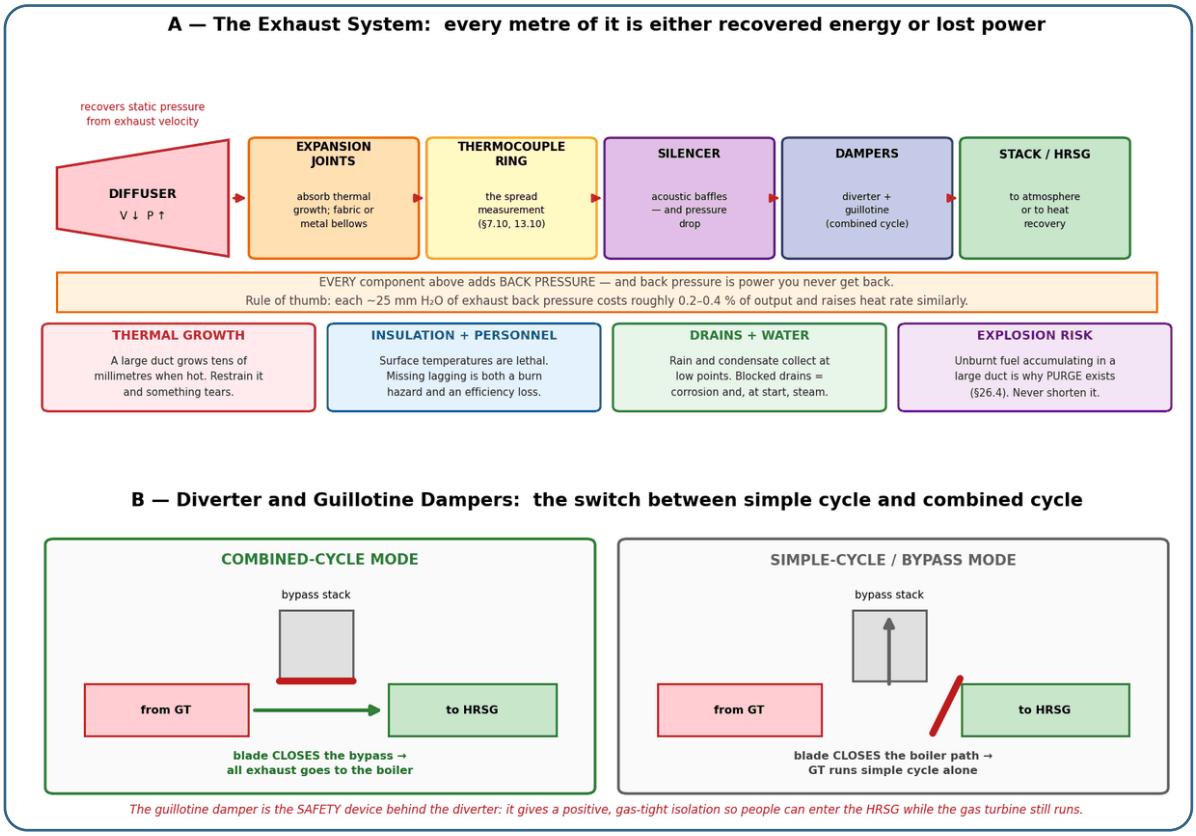
فكل قفزة في نسبة الضغط كانت مشروطة بقفزة موازية في علم المواد وفي منظومة التحكم. وهذه ملاحظة تستحق التأمل: **التوربين الحديث ليس ثمرة تقدم في الديناميكا الحرارية — الديناميكا الحرارية لم تتغيّر منذ برايتون. إنه ثمرة تقدم في المواد والتبريد والتحكم.**

والخلاصة التي أرجو أن تُقرأ مرتين: حين تقف أمام توربين غازي، أنت لا تنظر إلى آلة — **أنت تنظر إلى سجل مكتوب بالمعدن لكل مشكلة واجهتها هذه الصناعة وحلّتها.** صمام النزف موجود لأن وحدة انحبست يومًا. وأنبوب اللهب المتقاطع موجود لأن وحدة اشتعلت في نصف غرفها. وآلية الدوران البطيء موجودة لأن عمودًا انحنى.

ومن يفهم هذا لا يرى قائمة صيانة — يرى منظومة دفاعات، ويعرف أي دفاع سقط حين يُصاب.

5.8 نظام العادم بالتفصيل: آخر ما يراه الغاز، وأول ما يُهمَل

عرضنا نظام العادم في 5.6 بإيجاز. ويستحق تفصيلًا أوسع لسببين: **الأول** أنه في محطة دورة مركبة لم يعد مجرد مخرج للغاز، بل **المدخل إلى نصف المحطة الآخر** (الفصل السابع والعشرون). **والثاني** — وهو الأهم عمليًا — أن العادم هو الجزء الذي **يُهمَل أكثر من غيره في الصيانة**، مع أن إهماله يظهر مباشرةً على عدّاد القدرة.



الشكل 5.13 — أعلى: منظومة العادم من الناشر حتى المدخنة أو مرجل الاسترداد، مع أثر الضغط الخلفي وأبرز مخاطرها. أسفل: مخمّد التحويل والمخمّد المقصلي بوضعَي الدورة المركبة والبسيطة.

أولًا: الناشر (Exhaust Diffuser) — استرجاع ما يمكن استرجاعه

الغاز يخرج من المرحلة الأخيرة للتوربين بسرعة عالية جدًا، وهذه السرعة **طاقة حركية ضائعة** إن تُركت. ووظيفة الناشر تحويل جزء منها إلى ضغط ساكن عبر توسيع المقطع تدريجيًا:

$$A\uparrow \Rightarrow V\downarrow \Rightarrow P_{static}\uparrow$$

والفائدة أكبر مما تبدو: رفع الضغط الساكن عند مخرج التوربين يعني **خفض الضغط الخلفي الفعلي الذي يراه التوربين**، ومن ثمّ نسبة تمدّد أكبر وشغل أكبر. ولهذا فإن تصميم الناشر — زاوية التوسّع، والطول، وتوحيد التدفق الداخل إليه — بند أداء حقيقي لا مجرد قطعة أنبوب مخروطية.

وثلاث ملاحظات ميدانية:

- **الناشر عنصر مُجهَد حراريًا وميكانيكيًا**، ودعاماته الداخلية (Struts) تتعرض لتشققات مع تقادم الوحدة. وهي تُفحص عادةً ضمن فحص المنظار للمسار الساخن (الفصل السادس عشر).

- **زاوية توسّع كبيرة جدًا تسبب انفصال التدفق** عن الجدران، فيفقد الناشر وظيفته ويولّد اضطرابًا واهتزازًا.
- **أي عائق أو تشوّه داخل الناشر** — لوح مرتخٍ، أو عزل داخلي انهار — يظهر مباشرة كنقص قدرة وارتفاع فارق حرارة.

ثانيًا: وصلات التمدد (Expansion Joints) — الاعتراف بأن المعدن يتحرك

مجرى العادم قد يتجاوز طوله عشرات الأمتار، ويرتفع من حرارة الجو إلى ما فوق 550 درجة مئوية في دقائق. **والفولاذ يتمدّد نحو 1.2 مليمتر لكل متر لكل مئة درجة** — أي أن مجرى بطول عشرين مترًا **يستطيل أكثر من عشرة سنتيمترات** بين الإيقاف والتشغيل الكامل.

ولا يمكن منع هذا التمدد — يمكن فقط استيعابه. ووصلات التمدد هي وسيلة الاستيعاب، وتأتي بنوعين:

النوع	البنية	الميزة	نقطة الضعف
قماشية (Fabric)	طبقات نسيج مقاوم للحرارة مع عزل داخلي	مرونة عالية بكل الاتجاهات، وزن أقل، تكلفة أقل	عمر محدود؛ تتدهور بالحرارة والأشعة والرطوبة
معدنية (Metallic Bellows)	ثنيات معدنية مموّجة	عمر أطول، تتحمل ضغطًا أعلى	صلابة أعلى، وحساسية للكلال من التمدد المتكرر

من واقع الميدان — ثلاث حقائق عن وصلات التمدد:

الأولى: تسريب وصلة التمدد ليس مشكلة «تسريب» فقط. الغاز الخارج عند 550 درجة في منطقة يمر بها الناس **خطر حروق مباشر**، وقد يشعل عازلًا أو زيتًا متسربًا قريبًا. ولهذا يُفحَص محيط الوصلات بصريًا في كل جولة، وتُعدّ التسريبات منها بندًا عاجلًا لا مؤجّلًا.

والثانية: عمر الوصلة القماشية محدود بطبيعته، وينبغي أن تكون ضمن قطع الغيار المخطط لها لا ضمن الأعطال المفاجئة. **وعدد دورات البدء والإيقاف يستهلك عمرها أكثر من ساعات التشغيل** — تمامًا كما هو الحال مع أجزاء المسار الساخن (8.2).

والثالثة — وهي الأخطر: لا تُقيّد حركة المجرى أبدًا. كل دعامة وكل تثبيت في مسار العادم مصمَّم إما ليمنع الحركة في اتجاه معيّن أو ليسمح بها في اتجاه آخر. **وإضافة دعامة «لتقوية» المجرى أثناء صيانة، أو نسيان تحرير قيد مؤقت، ينتهي بتمزّق الوصلة أو انبعاج المجرى** — وهو من أكثر الأخطاء تكرارًا بعد أعمال الصيانة، ويندرج مباشرة تحت إدارة التغيير (8.6).

ثالثًا: الضغط الخلفي (Back Pressure) — الثمن الخفي

كل ما يوضع في مسار العادم — مكتم صوت، مخمِّدات، حزم أنابيب مرجل، مدخنة طويلة، ثنيات — يضيف مقاومة. **وهذه المقاومة خصم مباشر ودائم من قدرة الوحدة وكفاءتها.**

والقاعدة التقريبية: كل نحو 25 مليمترًا من عمود الماء (بوصة ماء) من الضغط الخلفي يكلّف في حدود **0.1–0.15% من القدرة**، مع ارتفاع مماثل في معدل الحرارة. وهذه أرقام صغيرة على الورق، لكنها تتراكم: مجرى مصمَّم بسخاء زائد، أو مكتم صوت متدهور، أو مرجل استرداد بدأت أنابيبه تتسخ، قد يكلّف مجتمعًا **1–2% من قدرة المحطة بشكل مستمر**.

والمقارنة مع مدخل الهواء مفيدة هنا: فقد الضغط عند المدخل وفقد الضغط عند العادم **يعملان بالمنطق نفسه ويقاسان بالطريقة نفسها**، وكلاهما خسارة دائمة لا تُسترد (راجع 25.5). والفرق أن المدخل يُراقَب عادةً بعناية لأن فلاتره تُستبدل، بينما **الضغط الخلفي للعادم كثيرًا ما لا يُراقَب إطلاقًا** — مع أن قياسه لا يحتاج أكثر من مرسل ضغط واحد ومنحنى أساس مسجَّل عند التسليم.

وارتفاع الضغط الخلفي مؤشر تشخيصي أيضًا لا مجرد خسارة: ارتفاعه التدريجي في محطة دورة مركبة يعني غالبًا اتساخ أو انسداد في حزم المرجل، أو تدهور محفّز **SCR** (22.8)؛ وارتفاعه المفاجئ يعني عائقًا ماديًا — لوح عزل انهار، أو مخمِّد لم يفتح بالكامل.

رابعًا: مكتم الصوت (Silencer)

الضجيج الصادر من مخرج العادم من أعلى مصادر الضجيج في المحطة، ويُعالَج بحواجز صوتية (Baffles) مبطّنة بمواد ماصّة داخل مجرى موسّع.

والمقايضة واضحة: كل حاجز يمتص ضجيجًا ويضيف ضغطًا خلفيًا. **والتصميم الجيد هو الذي يبلغ حد الضجيج المطلوب بأقل عدد ممكن من الحواجز، لا الذي يبالغ في الكتم.**

ونقطة صيانية مهمة: المواد الماصّة داخل المكتم تتدهور بمرور السنين وقد تتفتّت. **وشظايا العزل المتحررة تنتقل مع التيار وقد تدخل مرجل الاسترداد أو تسدّ ممرات** — ولهذا يُفحَص المكتم داخليًا في العمرات، ويُعدّ ارتفاع مستوى الضجيج مؤشرًا مبكرًا على تدهوره.

خامسًا: المخمِّدات (Dampers) في محطات الدورة المركبة

في محطة تستطيع العمل بدورة بسيطة أو مركبة، يجب أن يكون هناك مفتاح يحوّل مسار العادم. وهذا دور المخمِّدات:

1) مخمِّد التحويل **(Diverter Damper):** ريشة كبيرة تدور لتوجّه العادم إما إلى مدخنة التجاوز **(Bypass Stack)** مباشرة إلى الجو، أو إلى **مرجل استرداد الحرارة**. وهو مخمِّد **معدِّل** يمكنه العمل في مواضع وسيطة أثناء الانتقال.

2) المخمِّد المقصلي **(Guillotine Damper):** لوح ينزلق عموديًا ليغلق المسار **إغلاقًا محكمًا تامًا**. وهو **ليس أداة تشغيل بل أداة سلامة:** مخمِّد التحويل لا يضمن إحكامًا كاملًا — دائمًا هناك تسريب — أما المقصلي فيوفّر **عزلًا موجبًا ومحكمًا للغاز**، وهو ما يسمح لفريق بدخول مرجل الاسترداد للصيانة **بينما التوربين الغازي ما زال يعمل**.

> وهذا من أوضح الأمثلة في هذا الكتاب على الفرق بين عنصر تحكم وعنصر سلامة:
>
> مخمِّد التحويل يجيب عن سؤال تشغيلي: «إلى أين يذهب العادم الآن؟»
>
> المخمِّد المقصلي يجيب عن سؤال سلامة: «هل أستطيع أن أضمن أن لا شيء يصل إلى حيث يقف الناس؟»
>
> والخلط بينهما قاتل حرفيًا. ولهذا يرتبط المخمِّد المقصلي بمنظومة تصاريح العمل وقفل وتعليم المصادر (LOTO / PTW) التي شرحناها في 8.6، ويُتحقَّق من موضعه فعليًا لا من قراءته على الشاشة. وهذه حالة نموذجية للقاعدة التي كررناها عبر الكتاب: قبل دخول الإنسان، يُتحقَّق من العزل بالعين والقياس، لا بمؤشر على شاشة.

نقطة تحكم مرتبطة: أثناء تحويل المسار من دورة بسيطة إلى مركبة، **لا يجوز أن يمر التوربين بلحظة يكون فيها كلا المسارين مغلقًا** — لأن ذلك يعني ضغطًا خلفيًا يرتفع بلا حد. ولهذا تُبنى منطقية التحويل بتراكب مقصود (Overlap): يُفتح المسار الجديد قبل أن يُغلق القديم بالكامل، مع مراقبة مستمرة للضغط الخلفي وحماية تقطع عند تجاوزه.

سادسًا: القياس داخل مجرى العادم

مجرى العادم ليس أنبوبًا صامتًا — إنه **أغنى موضع بالمعلومات في التوربين كله:**

- **حلقة الثرموكابلات** الموزّعة حول المحيط: مصدر متوسط حرارة العادم الذي يقود حلقة التحكم بالحرارة (9.9)، ومصدر الفارق **(Spread)** الذي هو أهم أداة تشخيص للاحتراق في الكتاب كله (7.10 و13.10).

- **قياس الضغط الخلفي** — كما سبق.
- محللات الانبعاثات **(CEMS)** عند المدخنة (22.12).
- **قياس ضغط المجرى** للحماية من الانبعاج ومن الضغط الزائد.

وملاحظة تركيبية مهمة على الثرموكابلات: الغازات الخارجة من غرفة احتراق واحدة **لا تصل إلى ثرموكابل واحد فقط**، بل تنتشر على ثرموكابلين متجاورين أو أكثر بسبب الدوران عبر مراحل التوربين. **وهذا بالضبط سبب أن «زوجًا باردًا متجاورًا» يدل على غرفة أو حاقن بعينه، بينما «قراءة شاذة منفردة» تدل على مشكلة قياس** — وهي القاعدة التشخيصية التي بنينا عليها 7.10.

سابعًا: مسائل عملية كثيرًا ما تُنسى

- العزل الحراري **(Lagging)**: ليس رفاهية. سطح مجرى عادم غير معزول **يحرق بالملامسة**، ويشعّ حرارة تجعل العمل حوله مستحيلًا صيفًا، **ويسرّب حرارة كانت ستُسترد** في محطة دورة مركبة. وقطعة عزل مفقودة بند سلامة وأداء معًا.
- المصارف **(Drains)**: مياه الأمطار والتكثّف تتجمع في النقاط المنخفضة. **ومصرف مسدود يعني ماءً راكدًا يُسرّع التآكل**، وقد يتبخر دفعةً واحدة عند البدء. وفي المحطات المركبة يزداد الأمر أهمية لوجود أسطح باردة كثيرة.
- **التصريف قبل البدء**: إحدى نقاط الفحص القبلي التي نشرحها في 26.3، ولها سبب مباشر هنا.
- **خطر الانفجار**: حجم مجرى العادم — ومعه مرجل الاسترداد إن وُجد — **ضخم ومليء بالزوايا الميتة**. وتجمّع وقود غير محترق فيه هو السبب الذي وُجد من أجله التطهير (Purge) أصلًا. **وكل حادثة انفجار عادم موثّقة في هذه الصناعة تقريبًا تعود إلى تطهير غير كافٍ أو تسريب وقود لم يُكتشف** (26.4).
- **الطيور والأجسام الغريبة**: مدخنة مفتوحة لفترة توقف طويلة قد تصبح مأوى. وشبكة حماية عند فوهة المدخنة إجراء بسيط يمنع مشكلة مزعجة.

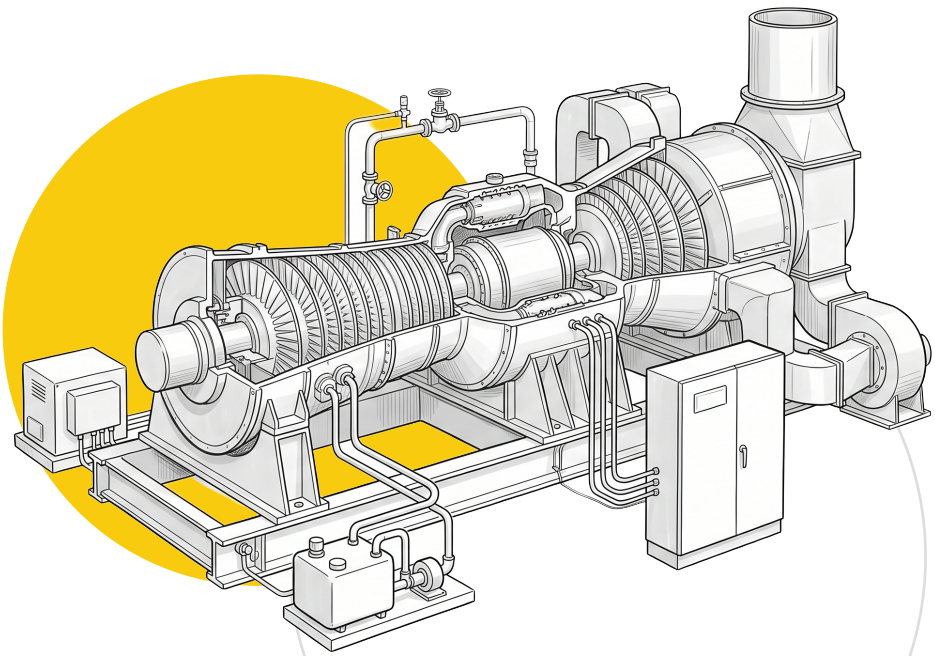
وخلاصة هذا القسم: مسار العادم هو المكان الذي **تخرج منه ثلثا طاقة الوقود**. وفي الدورة البسيطة تذهب هذه الطاقة إلى السماء، وفي الدورة المركبة تصبح وقود الدورة الثانية. **وفي الحالتين، كل مليمتر ماء من ضغط خلفي زائد، وكل قطعة عزل مفقودة، وكل وصلة تمدد متسربة — ثمن يُدفع كل ساعة تشغيل، ولا يظهر في أي إنذار.**

خلاصة الفصل

بهذا نكون فتحنا «الصندوق الأسود» بالكامل: من الهواء الداخل عبر الفلاتر، مرورًا بالضاغط والاحتراق والتوربين والعمود، وصولًا إلى العادم — ومعه إجابة السؤال الذي يفصل من يعرف الأسماء عمّن يفهم الآلة: **لماذا صُمّم كل جزء بهذا الشكل، وما الذي يحدث إن لم يفعل ما صُمّم له.** وكل مكوّن شرحناه في هذا الفصل يعتمد عمره الافتراضي وأداؤه اعتمادًا مباشرًا على مجموعة أنظمة مساعدة تدعمه من خلف الكواليس — تزييت، وقود، تبريد، بدء تشغيل، وتحكم — وهذا بالضبط موضوع **الفصل السادس: الأنظمة المساعدة**.

الفصل السادس:

الأنظمة المساعدة



التوربين الغازي لا يعمل وحده. فخلف كل ساعة تشغيل ناجحة تقف مجموعة أنظمة لا يراها أحد ما دامت تعمل، ويتوقف كل شيء حين يتعثّر أحدها. وهذا الفصل يعرضها واحدًا واحدًا: التزييت (6.1)، والوقود (6.2)، والتبريد والتهوية (6.3)، وبدء التشغيل (6.4)، والتحكم بالسرعة (6.5)، والإثارة والمولد (6.6)، ثم حجرة التوربين ونظام تهويتها (6.7)، وأخيرًا التغذية الكهربائية المساعدة (6.8) التي يعتمد عليها كل ما سبقها.

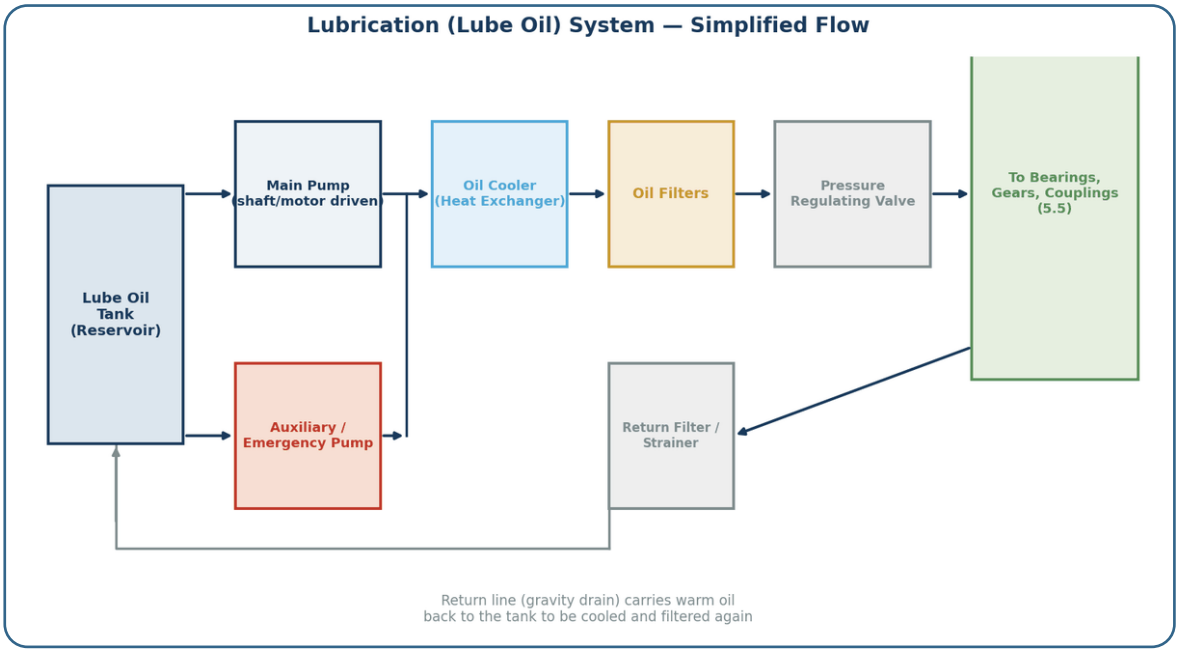
والقاعدة التي تربط الفصل كله: أغلب ما يوقف التوربين الغازي فعلًا في الميدان ليس عطلًا في التوربين نفسه، بل في نظام مساعد له.

6.1 نظام التزييت

وعدناك في الفصل الخامس (5.5) بأن نعود إلى هذا النظام بالتفصيل — وهذا أوانه، لأنه من أهم الأنظمة المساعدة على الإطلاق: أي فشل حقيقي فيه قد يؤدي إلى تلف كارثي في المحامل والعمود خلال ثوانٍ معدودة، لا دقائق.

المكونات الرئيسية

- خزان الزيت **(Lube Oil Tank)**: يخزن كمية كافية من زيت التزييت، ويسمح للفقاعات الهوائية والرطوبة بالانفصال قبل إعادة ضخ الزيت.
- المضخات **(Pumps)**: عادة أكثر من مضخة — مضخة رئيسية (تُدار أحيانًا مباشرة من عمود الوحدة نفسه، وأحيانًا بمحرك كهربائي منفصل)، ومضخة احتياطية/طوارئ (Auxiliary/Emergency Pump) بمحرك كهربائي مستقل تمامًا، تبدأ تلقائيًا فورًا إذا انخفض ضغط الزيت عن حد معيّن — نقطة حماية حرجة جدًا خصوصًا أثناء التوقف (Coast-Down)، حين يظل العمود يدور بالقصور الذاتي دون دفع من التوربين.
- مبرّد الزيت **(Oil Cooler)**: الزيت يسخن أثناء مروره في المحامل، فيجب تبريده قبل إعادة تدويره — إما بمبادل حراري بالهواء أو بالماء.
- الفلاتر **(Filters)**: تزيل أي شوائب أو جسيمات معدنية دقيقة قبل وصول الزيت إلى المحامل — ووجود جسيمات معدنية في الفلتر عند الفحص الدوري مؤشر مبكر مهم جدًا على تآكل داخلي (سنتوسع فيه في فصل الحماية والصيانة).
- صمام تنظيم الضغط **(Pressure Regulating Valve)**: يحافظ على ضغط ثابت ومناسب بغض النظر عن سرعة المضخة أو التغيرات في الحمل.

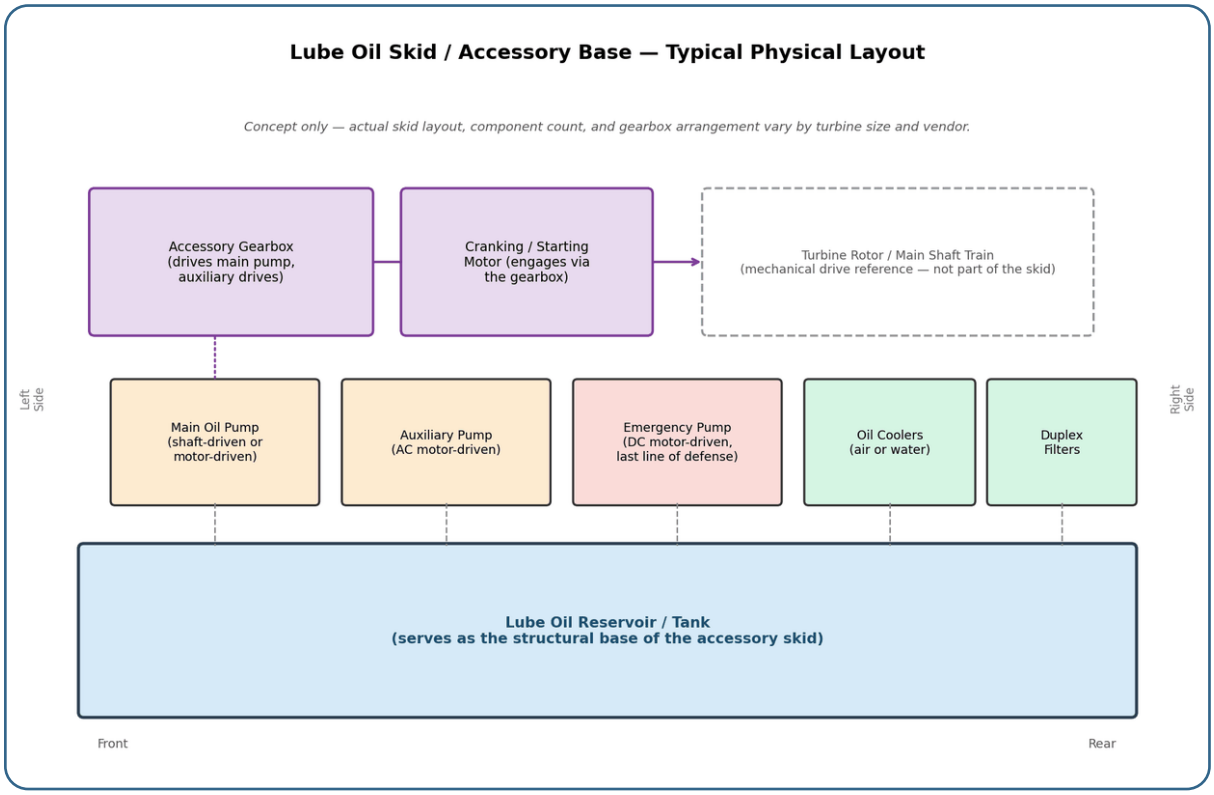


الشكل 6.1 — نظام التزييت المبسّط: الزيت يُضخ من الخزان عبر المبرّد والفلاتر إلى المحامل (5.5)، ثم يعود بالجاذبية للخزان ليُبرَّد ويُفلتر من جديد.

التصميم الفيزيائي: الحاوية كقاعدة إنشائية (Skid-Mounted Design)

المخطط السابق يوضح الجانب الوظيفي (كيف يدور الزيت)، لكن من المفيد عمليًا أن تعرف كيف يُبنى النظام فيزيائيًا على أرض الواقع. في كثير من التصاميم — خصوصًا الوحدات المُعبّأة (Packaged Units) الشائعة في تطبيقات النفط والغاز وتوليد الكهرباء — خزان الزيت نفسه يُستخدم كقاعدة إنشائية **(Base)** تُركَّب فوقها بقية مكونات النظام: المضخات، المبرّدات، الفلاتر، وأحيانًا صندوق التروس الملحق (Accessory Gearbox) ومحرك الدوران/البدء (Cranking/Starting Motor)، بحيث تشكّل هذه المكونات كلها مع الخزان وحدة واحدة مدمجة تُسمّى عادة «Accessory Base» أو «Lube Oil Skid».

صندوق التروس الملحق يأخذ حركته الدورانية من عمود التوربين نفسه (أو من محرك الدوران أثناء البدء)، وينقلها بدوره لتشغيل المضخة الرئيسية ميكانيكيًا، إضافة إلى تشغيل أي ملحقات أخرى مُدارة ميكانيكيًا. وهذا الترتيب يفسّر لماذا نجد أحيانًا محرك الدوران وصندوق التروس بجوار بعضهما فوق القاعدة نفسها، بينما تبقى المضخة الاحتياطية والطوارئ مستقلة تمامًا بمحركاتها الكهربائية الخاصة — وهذا بالضبط سبب أهمية استقلاليتها كخط دفاع أخير كما ذكرنا أعلاه.



الشكل 6.2 — تخطيط فيزيائي نموذجي لقاعدة نظام التزييت (Skid). هذا تصور مفاهيمي عام؛ الترتيب الفعلي وعدد المكونات وطريقة تركيب صندوق التروس يختلف حسب حجم التوربين والشركة الصانعة — بعض الوحدات الصغيرة لا تحتوي أصلًا على صندوق تروس ملحق منفصل.

من واقع الميدان: اختبار المضخة الاحتياطية/الطوارئ دوريًا (تشغيلها فعليًا والتأكد من أنها تبدأ تلقائيًا عند انخفاض الضغط) من أهم الفحوص الروتينية التي لا يجوز التهاون فيها إطلاقًا — لأنها آخر خط دفاع للمحامل إذا تعطلت المضخة الرئيسية أثناء التشغيل. وكثير من حوادث تلف المحامل الكبيرة في الصناعة سببها الحقيقي ليس فشل المضخة الرئيسية بحد ذاتها، بل فشل المضخة الاحتياطية في الاستجابة حين احتجنا إليها فعلًا.

6.2 نظام الوقود

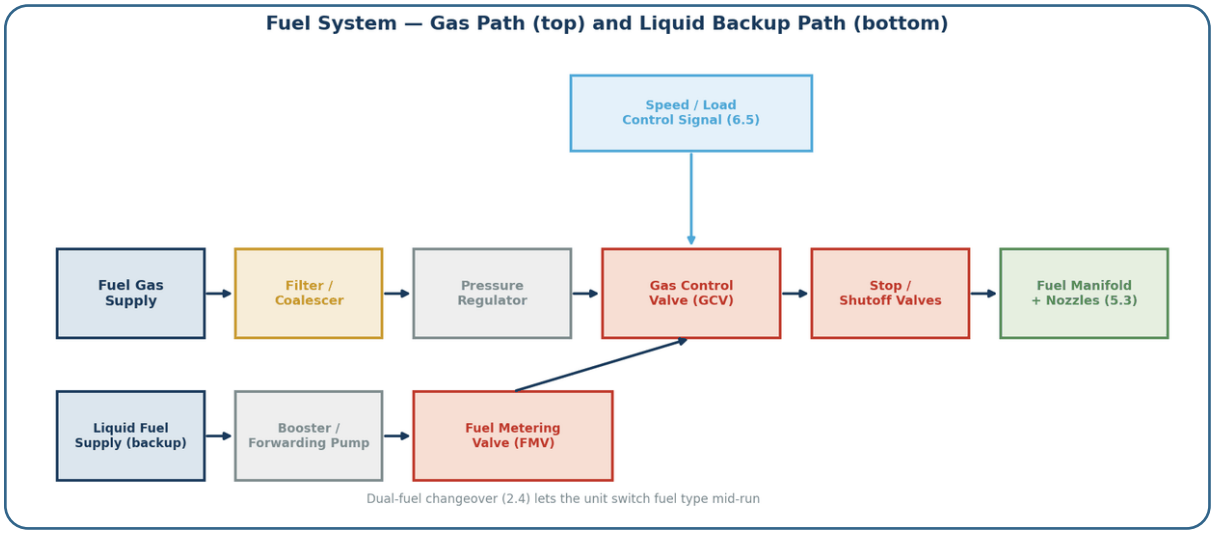
هذا النظام مسؤول عن توصيل الوقود لغرفة الاحتراق (5.3) بالكمية الدقيقة المطلوبة، وبالضغط المناسب، وبأمان تام — لأن أي خطأ هنا ينعكس مباشرة على استقرار الاحتراق والأمان التشغيلي.

مسار الغاز الطبيعي (الأكثر شيوعًا)

- الفلترة **(Filter / Coalescer)**: تزيل أي جسيمات صلبة أو رطوبة/سوائل متكثفة من الغاز قبل دخوله إلى النظام — نقطة مهمة جدًا لحماية صمامات التحكم الدقيقة من التلف.
- منظّم الضغط **(Pressure Regulator)**: يثبّت ضغط الغاز الداخل للنظام عند قيمة مناسبة، بغض النظر عن تقلبات ضغط مصدر الإمداد.
- صمام التحكم بالغاز **(Gas Control Valve - GCV)**: القلب الفعلي للنظام — يستقبل إشارة من نظام التحكم بالسرعة/الحمل (6.5) ويضبط كمية الغاز المتدفقة بدقة عالية جدًا وباستجابة سريعة جدًا (أجزاء من الثانية) لضبط سرعة وحمل الوحدة لحظيًا.
- صمامات الإيقاف **(Stop / Shutoff Valves)**: صمامات أمان مستقلة (غالبًا مزدوجة/متكررة Redundant) وظيفتها الوحيدة قطع تدفق الوقود بالكامل فورًا عند أي أمر إيقاف طارئ — مصمَّمة لتفشل بوضع «مغلق» دائمًا (Fail-Safe Closed) حتى لو انقطعت الطاقة الكهربائية أو الهوائية عنها.

مثال حقيقي: صمام تحكم بالوقود

من ضمن المراجع التي راجعتها، صمام تحكم وقود تجاري نموذجي يستخدم محرك خطوة كهربائي (Electric Stepper Motor Actuator) بمدى تحكم واسع جدًا تصل نسبته إلى 500:1 (أي أنه يستطيع ضبط تدفق دقيق جدًا عند الأحمال المنخفضة جدًا وصولًا للحمل الكامل)، وزمن حركة كامل من الإغلاق للفتح التام أقل من 250 ميلي ثانية، مع نظام تغذية راجعة رقمي بصري (Digital Optical Encoder) بدقة موقع تصل إلى $\pm 0.05\%$ ، ويستقبل إشارة تحكم قياسية 4-20 مللي أمبير من نظام التحكم، وتصنيعه مقاوم للانفجار (Explosion-Proof) لأنه يعمل في منطقة قد يوجد فيها غاز قابل للاشتعال. هذا المستوى من الدقة والسرعة يوضح لماذا يُعد صمام التحكم بالوقود من أكثر مكونات النظام تعقيدًا وحساسية.



الشكل 6.3 — نظام الوقود: مسار الغاز الطبيعي (أعلى) ومسار الوقود السائل الاحتياطي (أسفل)، مع إشارة التحكم القادمة من نظام السرعة/الحمل (6.5).

الوقود السائل والتشغيل المزدوج (Dual-Fuel)

كثير من الوحدات — خصوصًا في محطات التوليد التي تحتاج إلى ضمان استمرارية عالية — مزوّدة بمسار وقود سائل احتياطي (ديزل غالبًا)، مع نظام كامل مستقل: مضخة تعزيز (Booster Pump)، صمام قياس الوقود (Fuel Metering Valve - FMV)، وأحيانًا مسخّن للوقود الثقيل. والقدرة على التحويل بين نوعي الوقود أثناء التشغيل (Fuel Changeover) — أحيانًا دون توقف الوحدة إطلاقًا — من أهم مزايا مرونة الوقود التي ذكرناها في 4.1 و2.4، وميزة عملية حقيقية جدًا إذا انقطع إمداد الغاز الطبيعي مؤقتًا.

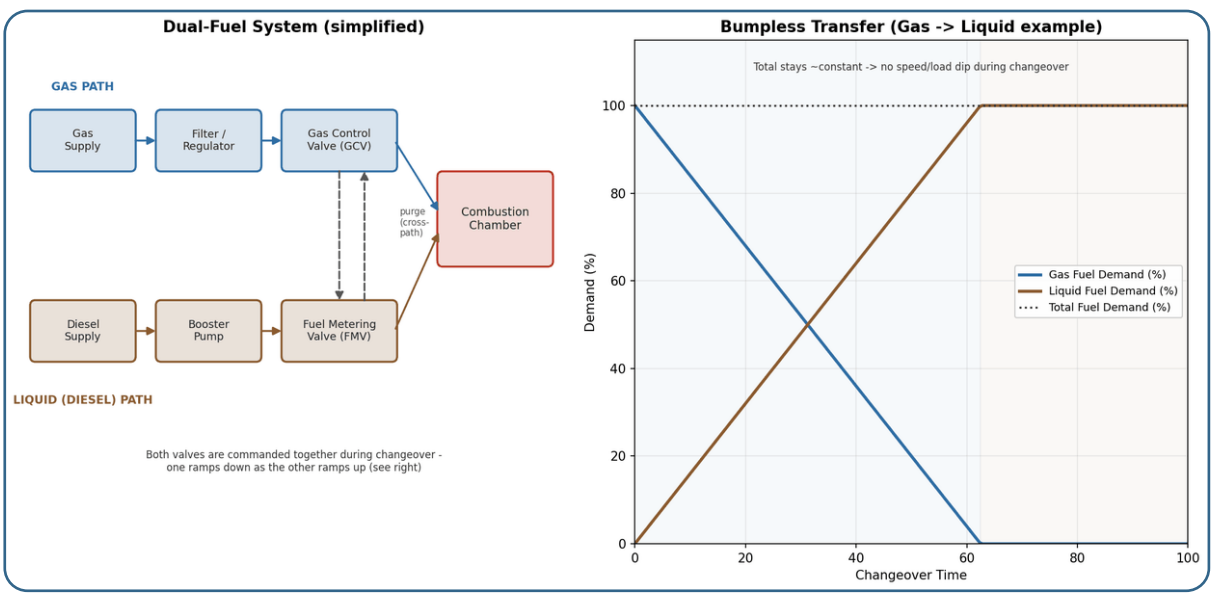
عملية التحويل بين الوقودين (Fuel Changeover) — كيف تتم عمليًا

نظام التحكم لا يغلق صمام وقود ويفتح الآخر دفعة واحدة — فهذا يسبب اضطرابًا مفاجئًا في كمية الطاقة الداخلة إلى غرفة الاحتراق، وقد يسبب تذبذبًا في السرعة/الحمل أو حتى إيقافًا غير مرغوب. وبدلًا من ذلك، يُطبَّق مبدأ "النقل السلس" **(Bumpless Transfer)**: صمام الوقود القديم يبدأ بالإغلاق تدريجيًا في اللحظة نفسها التي يبدأ فيها صمام الوقود الجديد بالفتح تدريجيًا، بحيث يبقى **مجموع** الطاقة الداخلة من الوقودين معًا شبه ثابت طوال فترة التحويل (تستغرق عادة بضع دقائق) — فلا يشعر الحمل الخارجي (المولد أو المعدة المُدارة) بأي تغيّر ملحوظ في السرعة أو الحمل أثناء العملية.

هناك اتجاهان للتحويل، ولكل منهما اعتبار عملي مختلف:

- من الغاز إلى السائل **(Gas to Liquid Changeover):** يحدث عادة عند انقطاع إمداد الغاز الطبيعي (مخطط له أو طارئ)، أو أحيانًا كجزء من اختبار دوري للتأكد من أن مسار الوقود الاحتياطي جاهز فعلًا وقت الحاجة. ويكون مسار الوقود السائل مُجهّزًا ومضغوطًا مسبقًا (Primed) في وضع الاستعداد قبل بدء التحويل الفعلي، لتقليل زمن الاستجابة.
- من السائل إلى الغاز **(Liquid to Gas Changeover):** يحدث بعد عودة إمداد الغاز الطبيعي إلى التوفر، للرجوع إلى الوقود الأساسي الأرخص والأنظف احتراقًا عادة.

خطوة أمان حرجة: تطهير المسار غير المستخدم **(Purge)** — بعد أن ينتهي التحويل ويصبح مسار وقود معيّن غير مستخدم بالكامل، يبقى احتمال وجود وقود متبقٍ في خطوطه (خصوصًا الغاز، لأنه قابل للتجمع في المناطق المغلقة). لذلك يشغّل نظام التحكم تلقائيًا دورة تطهير (Purge) للمسار غير المستخدم — عادة باستخدام الوقود النشط نفسه أو غاز خامل — لطرد أي بقايا وقود قابل للاشتعال من الخطوط والصمامات قبل أن تُعتبر العملية مكتملة بأمان. وهذه الخطوة بالذات من أهم أسباب تعقيد منطق التحويل، رغم أنها غير مرئية للمشغّل عادة.



الشكل 6.4 — يسار: مخطط مبسّط لنظام الوقود المزدوج (غاز وديزل) مع مسارات التطهير المتقاطعة. يمين: منحنى «النقل السلس» (Bumpless Transfer) أثناء التحويل من الغاز للسائل، يوضح كيف يبقى مجموع طلب الوقود شبه ثابت طوال فترة التحويل.

جودة الوقود ومعالجته: لماذا «غاز طبيعي» ليست مواصفة كافية؟

شرحنا في الأعلى **مسار** الوقود ومكوناته. لكن مهندس التشغيل يواجه سؤالًا مختلفًا وأكثر إلحاحًا عمليًا: ما الذي يجعل غازًا معيّنًا **صالحًا** لهذا التوربين بالذات؟ الإجابة ليست «لأنه غاز طبيعي» — فالتوربين الغازي حسّاس لخصائص الوقود بدرجة تفوق توقّع الكثيرين.

أولًا: المحتوى الحراري ودليل ووبي (Wobbe Index)

صمام التحكم بالوقود يضبط **تدفقًا**، بينما ما يحتاجه الاحتراق فعلًا هو **طاقة**. فإذا تغيّر المحتوى الحراري للغاز (بسبب تغيّر تركيبته من المصدر مثلًا)، فإن نفس فتحة الصمام تُدخل كمية طاقة مختلفة — أي أن نقطة التشغيل انزاحت بدون أن يطلب أحد ذلك.

المقياس الصناعي المستخدم لهذا هو دليل ووبي **(Wobbe Index)**: مؤشر يجمع المحتوى الحراري للغاز مع كثافته النسبية، وقيمته العملية أنه **يمثّل الطاقة المتدفقة عبر فتحة معيّنة عند ضغط معيّن**. أي أن غازين مختلفي التركيب لكن متساويي دليل ووبي يعطيان تقريبًا نفس السلوك عند نفس فتحة الفوهة.

النتيجة: يحدد المصنّع **مدى ووبي مسموحًا** لكل تصميم، وأيضًا **معدل تغيّر مسموحًا** له. تجاوز المدى يعني إما احتراقًا غنيًا (ارتفاع حرارة وانبعاثات) أو فقيرًا (عدم استقرار وخطر انطفاء اللهب). وهذه حساسية تزداد بشكل خاص في أنظمة الخلط المسبق الفقير (DLN، 5.3) لأنها أصلًا تعمل ضمن نافذة ضيقة مقصودة.

ثانيًا: درجة التحميص (Superheat) — أخطر ما يُغفَل

هذه نقطة تسبب مشاكل حقيقية في المواقع، وغالبًا لا تُشرح بوضوح: الغاز الداخل لصمامات التحكم يجب أن يكون **جافًا تمامًا وبهامش أمان حراري فوق نقطة ندى الهيدروكربونات** — أي أعلى بعدد كافٍ من الدرجات فوق درجة الحرارة التي تبدأ عندها مكوّناته الثقيلة بالتكثّف سائلًا.

لماذا؟ لأن الغاز يتمدد ويبرد أثناء مروره عبر منظّم الضغط وصمام التحكم. فإذا كان قريبًا من نقطة الندى عند المدخل، فقد يتكثّف **داخل** الصمام أو داخل فوهات الوقود. ودخول قطرات سائلة لفوهة مصمَّمة للغاز يعني: احتراقًا موضعيًا شديدًا، تلفًا للفوهة، تذبذبات ضغط في غرفة الاحتراق، وأحيانًا قطعًا مباشرًا. لهذا كثير من المنشآت تركّب مسخّن غاز أداء **(Performance Heater)** قبل النظام لضمان هذا الهامش الحراري باستمرار، ولا تعتمد على درجة حرارة خط الإمداد كما وصلت.

ثالثًا: النظافة — الجسيمات والسوائل

صمام التحكم بالوقود جهاز دقيق جدًا (شرحنا مواصفاته أعلاه)، وفوهات الوقود ذات فتحات دقيقة. لذلك تُركَّب سلسلة معالجة قبلها:

- فاصل/مرشّح تجميعي **(Coalescing Filter)** يجمع الرذاذ السائل الدقيق ويفصله.
- **مرشّح جسيمات** يوقف الشوائب الصلبة (صدأ الخطوط، حبيبات).
- مصائد ونقاط تصريف **(Drains)** في النقاط المنخفضة، مع فحص دوري لها — لأن مصيدة ممتلئة لا تحمي شيئًا.

رابعًا: الملوّثات الكيميائية

- **الكبريت:** مصدر مباشر للتآكل الساخن في مكونات المسار الساخن (16.2)، وأيضًا مصدر لأكاسيد الكبريت في العادم.
- **المعادن القلوية (صوديوم، بوتاسيوم):** تصل عادة مع هواء السحب في المواقع الساحلية، أو مع الوقود السائل، وهي من أشرس مسبّبات التآكل الساخن على الإطلاق.
- **الرطوبة وثاني أكسيد الكربون:** يسبّبان تآكلًا في خطوط الإمداد نفسها قبل أن يصلا للمعدة.

خامسًا: خصوصية الوقود السائل

مسار الوقود السائل (الديزل غالبًا) يضيف اعتبارات خاصة: **اللزوجة** يجب أن تكون ضمن مدى محدد ليعمل الرذاذ بشكل صحيح — ولهذا تُسخَّن الأنواع الثقيلة قبل الحقن؛ **وتلوث الوقود بالماء أو الشوائب** بعد فترة تخزين طويلة مشكلة متكررة في الوحدات التي يُستخدم فيها الوقود السائل كاحتياطي نادر الاستعمال. وهذه نقطة عملية تستحق تأكيدًا: **الوقود الاحتياطي الذي لا يُختبر دوريًا ليس احتياطيًا** — لا من ناحية جاهزية المسار، ولا من ناحية صلاحية الوقود المخزّن نفسه (راجع اختبار التحويل الدوري المذكور أعلاه).

الخلاصة العملية

عند تشخيص أي مشكلة احتراق — عدم استقرار، ارتفاع فارق حرارة العادم (10.3)، انبعاثات خارجة عن الحد، أو تذبذبات ضغط في غرفة الاحتراق — يجب أن يكون سؤال **"هل تغيّر شيء في جودة الوقود؟"** ضمن أول ثلاثة أسئلة، لا آخرها. فتغيّر مصدر الغاز، أو تعطّل مسخّن، أو مصيدة ممتلئة، كلها أسباب حقيقية ومتكررة تُنتج أعراضًا تبدو وكأنها أعطال في المعدة نفسها.

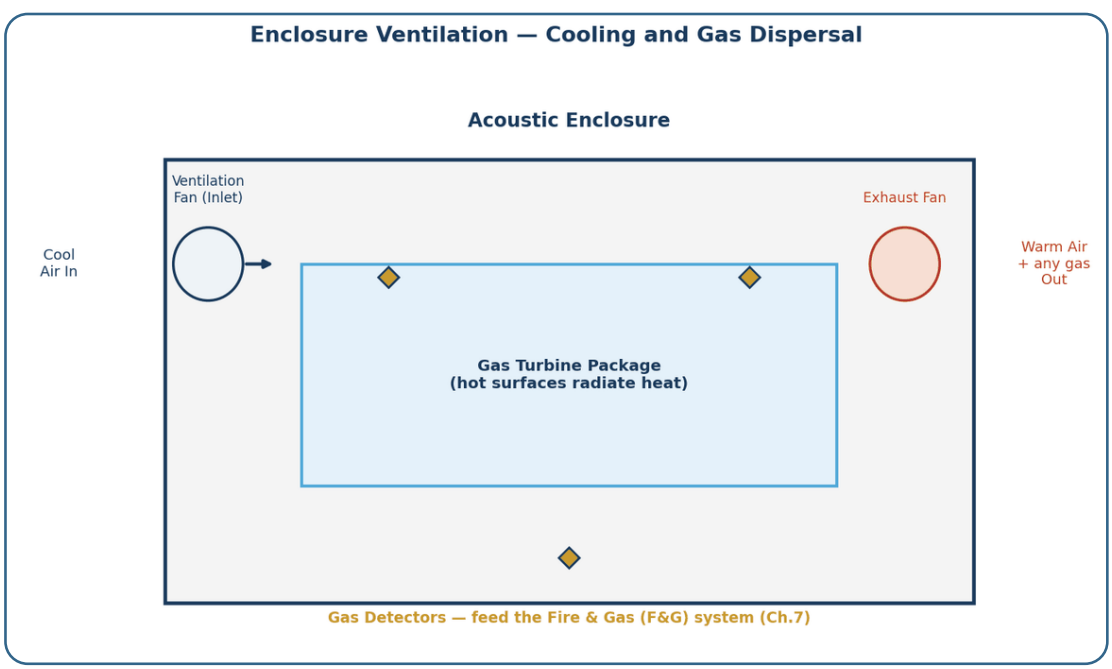
6.3 نظام التبريد والتهوية

شرحنا سابقًا جزءًا من التبريد مرتبطًا مباشرة بمكوّن معيّن — تبريد شفرات التوربين (5.4)، وتبريد زيت التزييت بمبادل حراري (6.1). ويركّز هذا القسم على التبريد والتهوية على مستوى «الوحدة كاملة» داخل الحاوية أو الغلاف الذي تُركّب فيه.

تهوية الغلاف الصوتي (Enclosure Ventilation)

كثير من التوربينات الغازية — خصوصًا المشتقة من الطيران والمتوسطة الحجم — تُركّب داخل غلاف معدني صوتي (Acoustic Enclosure، ذكرناه في 4.2) لتقليل الضجيج وحماية المعدة من الطقس. لكن هذا الغلاف نفسه يحتاج إلى نظام تهوية مستقل مهم جدًا لسببين:

1. **إزالة الحرارة:** يشع سطح التوربين الغازي وأنابيبه الساخنة حرارة كبيرة داخل فضاء مغلق نسبيًا — ودون تهوية كافية، تتراكم الحرارة وتضر بالمعدات الكهربائية والحساسات الحساسة داخل الغلاف نفسه.
2. تخفيف تراكم أي تسرب غاز **(Gas Dispersal):** هذه نقطة أمان بالغة الأهمية — إذا حدث أي تسرب بسيط في نظام الوقود (6.2) داخل الغلاف المغلق، فإن التهوية المستمرة تمنع تراكم الغاز إلى مستوى خطر (قابل للاشتعال)، وتطرده إلى الخارج بأمان قبل أن يصل إلى تركيز خطير.



الشكل 6.5 — تهوية الغلاف الصوتي: مروحة دخول وأخرى خروج تحافظان على تدفق هواء مستمر، مع كاشفات غاز موزّعة تراقب أي تسرب وتغذّي نظام الحريق والغاز (F&G) الذي سنشرحه في فصل الحماية.

هذا الربط بالذات — بين التهوية وكاشفات الغاز — هو سبب تصنيف نظام التهوية أحيانًا كجزء من منظومة الحماية أيضًا، لا مجرد نظام مساعد عادي. وسنتوسع في منطق الحماية والإنذار والإيقاف الطارئ المرتبط به في الفصل السابع.

تبريد المولد (Generator Cooling)

المولد الكهربائي المربوط بالتوربين (5.1) ينتج حرارة كبيرة أثناء التشغيل بسبب المقاومة الكهربائية في ملفاته، ويحتاج إلى تبريد خاص به:

- تبريد هوائي **(Air-Cooled)**: الأكثر شيوعًا في الوحدات المتوسطة — مراوح تُدير هواءً عبر ملفات المولد.
- تبريد بغاز الهيدروجين **(Hydrogen-Cooled)**: يُستخدم في المولدات الكبيرة جدًا لأن الهيدروجين له قدرة توصيل حراري أعلى بكثير من الهواء، لكنه يحتاج إلى أنظمة سلامة إضافية معقّدة (كونه غازًا شديد القابلية للاشتعال).
- تبريد مائي لملفات العضو الثابت **(Water-Cooled Stator)**: في المولدات الضخمة جدًا، أحيانًا يُستخدم ماء نقي جدًا (منزوع الأيونات) يدور مباشرة داخل ملفات العضو الثابت نفسها لتبريد أكثر فعالية.

نظام مياه التبريد (Cooling Water System)

في المنشآت الكبيرة التي تضم عدة مبادلات حرارية (تبريد الزيت، تبريد المولد، أحيانًا تبريد الهواء الداخل — 2.5)، غالبًا يوجد نظام مياه تبريد مركزي (دائرة مغلقة عادة) يخدم هذه الاحتياجات كلها مجتمعة، بدلًا من أن يكون لكل مبادل مصدر تبريد منفصل.

6.4 نظام بدء التشغيل

التوربين الغازي، بخلاف محرك السيارة، لا يستطيع «أن يبدأ نفسه بنفسه» من السكون — فلا بد من جهاز خارجي يدوّر العمود بسرعة كافية أولًا (Cranking) قبل أن يصبح الاحتراق قادرًا على الاستمرار ذاتيًا. وهذا الجهاز الخارجي يُسمى «المُبدئ» أو «الستارتر» (Starter)، وله عدة أنواع:

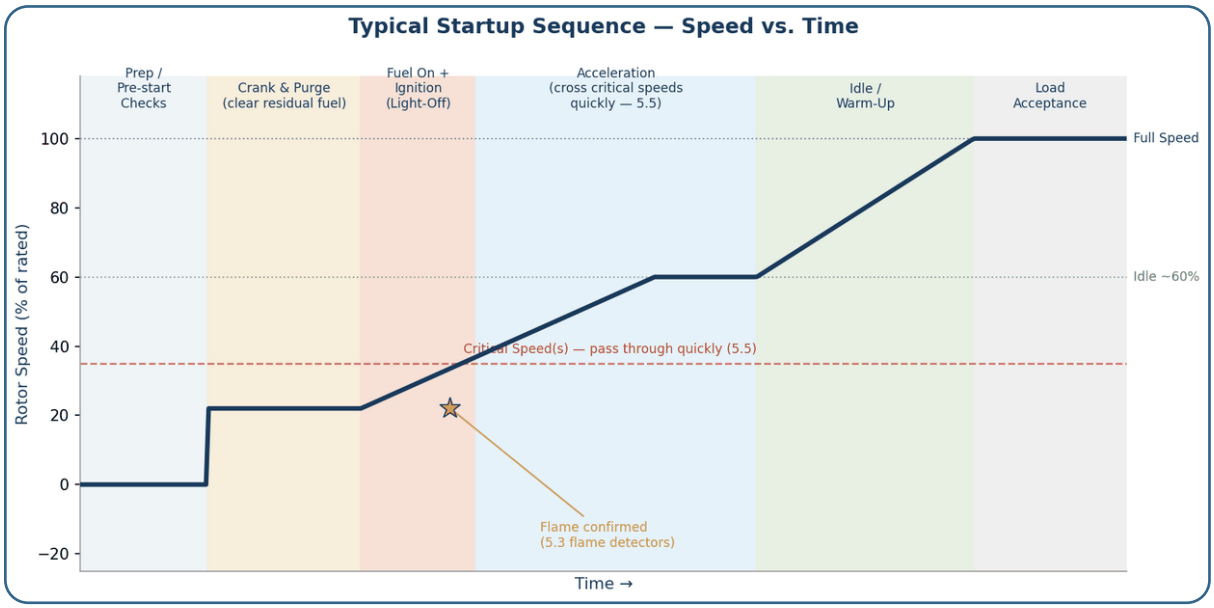
- محرك بدء كهربائي **(Electric Starter Motor)**: شائع في الوحدات الصغيرة والمتوسطة، بسيط ومباشر.
- توربين بدء هوائي أو هيدروليكي **(Pneumatic / Hydraulic Starter Turbine)**: يستخدم هواء مضغوط أو زيت هيدروليكي عالي الضغط لتدوير توربين صغير مربوط بعمود الوحدة عبر ناقل عزم (Torque Converter) — شائع في الوحدات الصناعية الكبيرة.

- **محرك ديزل**: يُختار حين تكون القدرة على البدء دون أي تغذية كهربائية خارجية مطلوبة (البدء الأسود، 9.3).
- بدء ثابت بالمحوّل الساكن **(Static / LCI Starter)**: في الوحدات الكبيرة جدًا، أحيانًا يُستخدم المولد الكهربائي نفسه (5.1، 6.6) كمحرك مؤقت أثناء البدء فقط، بالتغذية العكسية عبر محوّل تردد إلكتروني (Load Commutated Inverter) — يلغي الحاجة إلى محرك بدء منفصل تمامًا.

وأيًّا كان النوع، فوظيفته تنتهي عند سرعة الاكتفاء الذاتي **(Self-Sustaining Speed)**: عندها يصبح التوربين قادرًا على تسريع نفسه، فيُفصل جهاز البدء تلقائيًا. والتحقق من حدوث هذا الفصل — ومن توقف محرك البدء بعد فترة تبريده — بند تشغيلي حقيقي لا شكلي.

ويرافق نظام البدء دائمًا آلية الدوران البطيء **(Turning Gear / Ratchet)**: تدوير بطيء جدًا للعمود بعد الإيقاف، غرضه ليس التحضير للبدء بل منع **الانحناء الحراري** للعمود الساخن الساكن. وتفصيلها في 26.4.

تسلسل بدء التشغيل — الصورة العامة



الشكل 6.6 — تسلسل بدء تشغيل نموذجي: من التدوير والتطهير، مرورًا بالإشعال، وصولًا لتحمل الحمل الكامل.

تمر الوحدة بسلسلة مراحل متتابعة لا يجوز الانتقال بينها إلا بتحقق شرطها: **تدوير** بلا وقود، ثم تطهير **(Purge)** يطرد أي مزيج قابل للاشتعال من مسار الغاز والعادم — وهي خطوة أمان لا تُختصر بأي حال — ثم هبوط إلى **سرعة الإشعال**، فإشعال وإثبات لهب خلال نافذة زمنية ضيقة، ثم **إحماء** يسمح للحرارة بالانتشار في سُمك المعدن، ثم **تسارع** إلى السرعة الاسمية، فتزامن وتحميل.

وهذه المراحل موضوع فصل كامل لاحقًا: **الفصل السادس والعشرون** يشرح ما يحدث في كل مرحلة، وما يجب أن يراقبه المشغّل فيها، وأي الحمايات تكون فعّالة عندها. أما منطق التحكم الذي ينقل الوحدة من مرحلة إلى أخرى — السماحات، والعتبات، والإيقاف بأنواعه — ففي 9.3.

> **من واقع الميدان:** «فشل الإشعال» (Failure to Light) من أكثر ما يواجهه مهندس التشغيل عمليًا، وأسبابه غالبًا بسيطة: شمعة إشعال ضعيفة، أو ضغط وقود غير كافٍ لحظة البدء، أو رطوبة في خط الوقود. والنظام مصمَّم عمدًا ليكون متحفظًا جدًا في هذه المرحلة — يفضّل إيقاف المحاولة وإعادة التطهير على المخاطرة بإشعال في ظروف غير مؤكدة. ومنهجية تشخيص هذه الحالة تحديدًا في 24.6 و26.6.

6.5 نظام التحكم بالسرعة (الحاكم)

بعد أن تنتهي مرحلة بدء التشغيل (6.4) وتصل الوحدة إلى السرعة الكاملة، من المسؤول عن إبقاء هذه السرعة ثابتة، والتحكم في مقدار الحمل الذي تحمله الوحدة؟ هذا بالضبط دور «الحاكم» أو نظام التحكم بالسرعة (Governor / Speed Control)، الذي يرسل إشارة التحكم إلى صمام الوقود (GCV، 6.2) باستمرار.

المبدأ الأساسي: التحكم التناسبي (Proportional Control)

أبسط شكل للحاكم يعمل بمعادلة بسيطة جدًا:

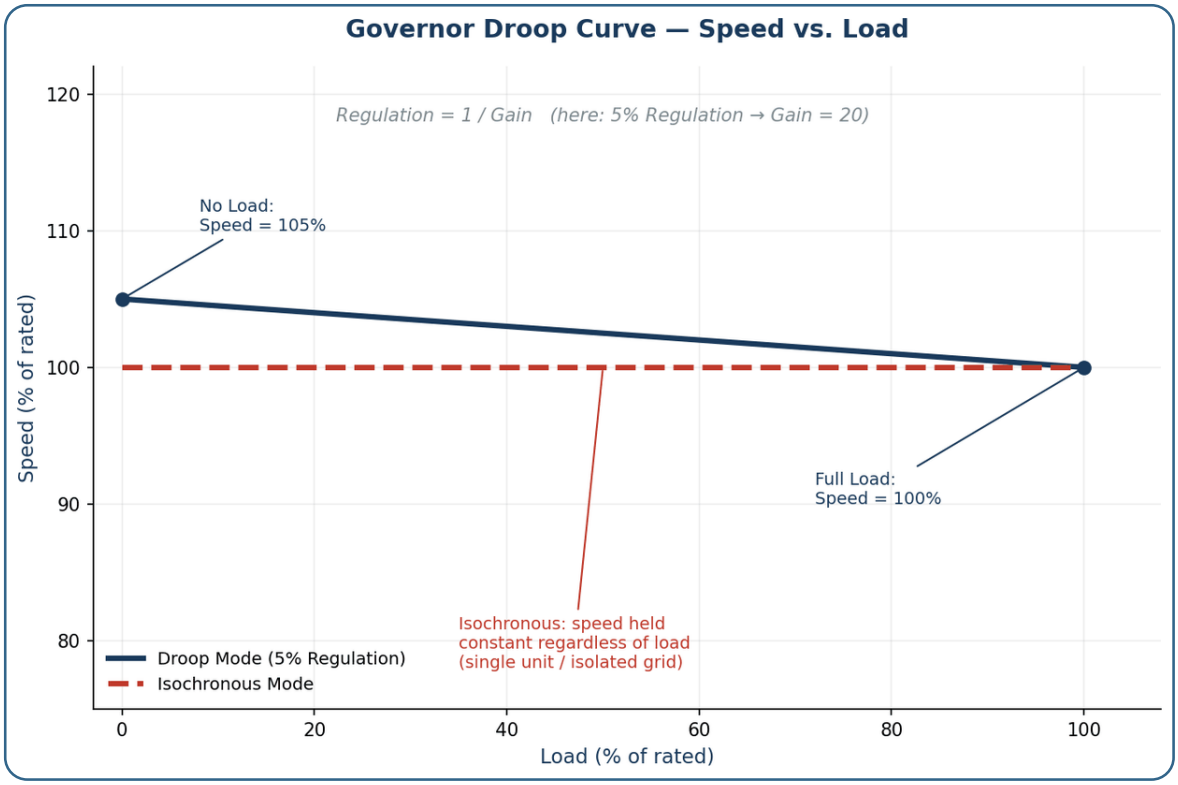
الخرج (أمر الوقود) = (السرعة المرجعية − السرعة الفعلية المُقاسة) × الكسب (Gain)

أي كلما ازداد الفرق بين السرعة المطلوبة والسرعة الفعلية، ازداد تصحيح كمية الوقود. لكن في التحكم التناسبي البحت، لا بد أن يبقى دائمًا «فرق بسيط» (خطأ) بين السرعة المرجعية والفعلية كي يستمر الحاكم في إرسال أي أمر وقود غير صفري — وهذا الفرق يُسمى «التفاوت» أو «الدروب» (Droop / Regulation)، ويُعرَّف بأنه النسبة المئوية للفرق في السرعة اللازم لإنتاج تغيّر 100% في الخرج، وعلاقته بالكسب بسيطة:

نسبة الدروب = 1 ÷ الكسب

مثال عملي: إذا كان الدروب 5%، فالكسب = 1 ÷ 0.05 = 20. أي أنه إذا كانت الوحدة بلا حمل إطلاقًا، استقرت سرعتها عند 105% تقريبًا (أعلى من السرعة الاسمية)، وكلما ازداد الحمل تدريجيًا انخفضت السرعة تدريجيًا حتى تصل إلى 100% عند الحمل الكامل.

وضعا التشغيل: الدروب مقابل الأيزوكرونس (Droop vs. Isochronous)

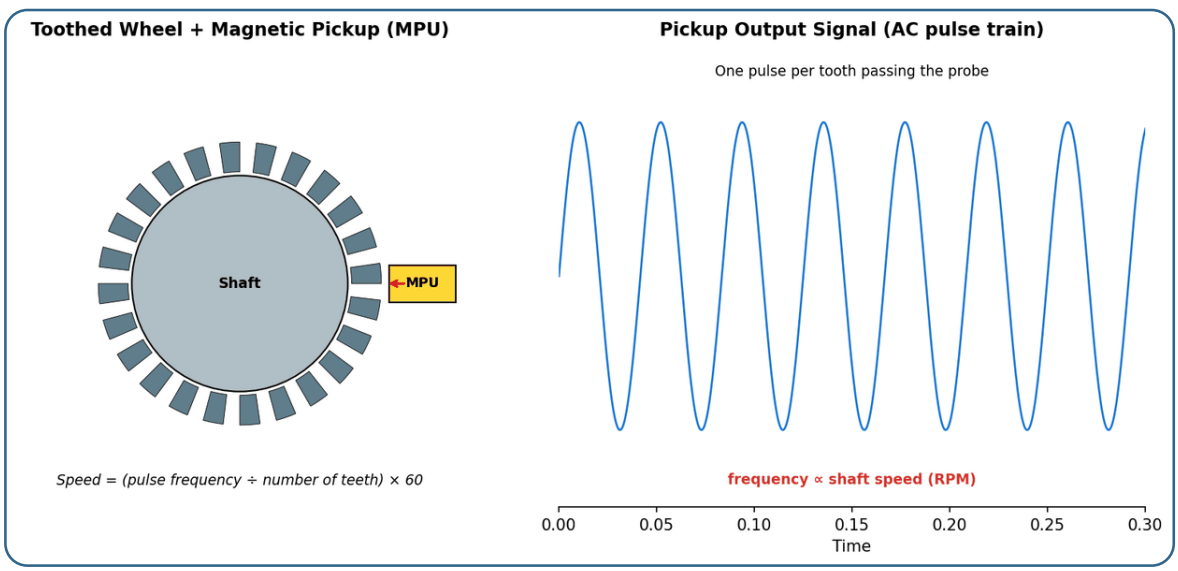


الشكل 6.7 — منحنى الدروب: بوضع الدروب (Droop) تنخفض السرعة تدريجيًا مع زيادة الحمل، بينما بوضع الأيزوكرونس (Isochronous) تبقى السرعة ثابتة تمامًا بغض النظر عن الحمل.

- وضع الدروب **(Droop Mode)**: هذا هو الوضع القياسي حين تعمل الوحدة موازية (Paralleled) مع وحدات أخرى على الشبكة الكهربائية نفسها — لأنه لو حاولت كل وحدة تثبيت سرعتها بدقة مطلقة (تزامن تام)، لتنازعت الوحدات كلها باستمرار على ضبط التردد، وحدثت حالة عدم استقرار (Hunting). والدروب يسمح بتوزيع الحمل تلقائيًا وبشكل مستقر بين جميع الوحدات المشتركة على الشبكة، كل وحدة حسب منحنى الدروب الخاص بها.
- وضع الأيزوكرونس **(Isochronous Mode)**: هنا يحافظ الحاكم على سرعة ثابتة تمامًا بغض النظر عن الحمل — يُستخدم فقط حين تعمل الوحدة وحدها على شبكة معزولة تمامًا (Island Mode)، أو أثناء «البدء الأسود» (Black Start) لتغذية شبكة كهرباء بعد انقطاع تام، حيث لا توجد وحدات أخرى تشاركها ضبط التردد.

كيف تُقاس السرعة الفعلية أصلًا؟ (Magnetic Speed Pickup)

كل الحديث السابق عن الدروب والأيزوكرونس يفترض أن لدينا قراءة سرعة دقيقة وسريعة الاستجابة — وهذه القراءة تأتي عمليًا من حسّاس بسيط جدًا في مبدأ عمله لكنه حسّاس جدًا في التركيب: عجلة معدنية مسنّنة (Toothed Wheel) مثبّتة على العمود نفسه (5.5)، وبجانبها مباشرة — دون أي تلامس ميكانيكي — حسّاس مغناطيسي ثابت (Magnetic Pickup Unit، يُختصر MPU). وكل سنّ يمر أمام الحسّاس يغيّر المجال المغناطيسي لحظيًا، فيولّد نبضة جهد صغيرة (إشارة متردد AC). وكلما دار العمود أسرع، ازداد عدد النبضات في الثانية (التردد)، وبما أن عدد أسنان العجلة معروف وثابت، يحوّل نظام التحكم هذا التردد مباشرة إلى سرعة دوران فعلية (RPM) بمعادلة بسيطة.



الشكل 6.8 — مبدأ قياس السرعة بحسّاس مغناطيسي (Magnetic Pickup) وعجلة مسنّنة: كل سنّ يمر أمام الحسّاس ينتج نبضة، وتردد النبضات يتناسب طرديًا مع سرعة دوران العمود.

من واقع الميدان، هذا الحسّاس من أكثر القياسات حرجيةً في التوربين الغازي كله — عليه يعتمد كل من الحاكم (هذا القسم)، والحماية من السرعة الزائدة (7.2)، وتسلسل بدء التشغيل (6.4، 9.3). ولأنه بهذه الأهمية، غالبًا ما يُركَّب مكررًا (حسّاسان أو ثلاثة لكل عمود) بالفلسفة نفسها في تكرار الحسّاسات التي سنشرحها بالتفصيل في الفصل التاسع (9.6).

الربط بالأنظمة الأخرى

يرسل الحاكم أمره النهائي مباشرة إلى صمام التحكم بالغاز (GCV، 6.2)، ويستقبل قراءة السرعة الفعلية من أجهزة استشعار سرعة مخصصة على العمود (5.5) بالطريقة التي شرحناها أعلاه. وفي الوحدات الحديثة، يحدث هذا كله رقميًا داخل نظام تحكم إلكتروني متكامل (مثل أنظمة Mark VIe التي ذكرناها سابقًا)، لكن المبدأ الرياضي البسيط (فرق × كسب) يبقى هو نفسه في جوهره.

6.6 نظام الإثارة والمولد

هذا القسم الأخير في الفصل يخص تحديدًا التطبيقات التي يكون فيها التوربين الغازي مربوطًا بمولد كهربائي (توليد الكهرباء، 3.1) — أما تطبيقات الدفع الميكانيكي المباشر (ضغط الغاز، حقن الماء، 3.4) فلا تحتاج إلى هذا النظام إطلاقًا، لأن العمود يدير معدات ميكانيكية مباشرة دون مرحلة توليد كهربائي وسيطة.

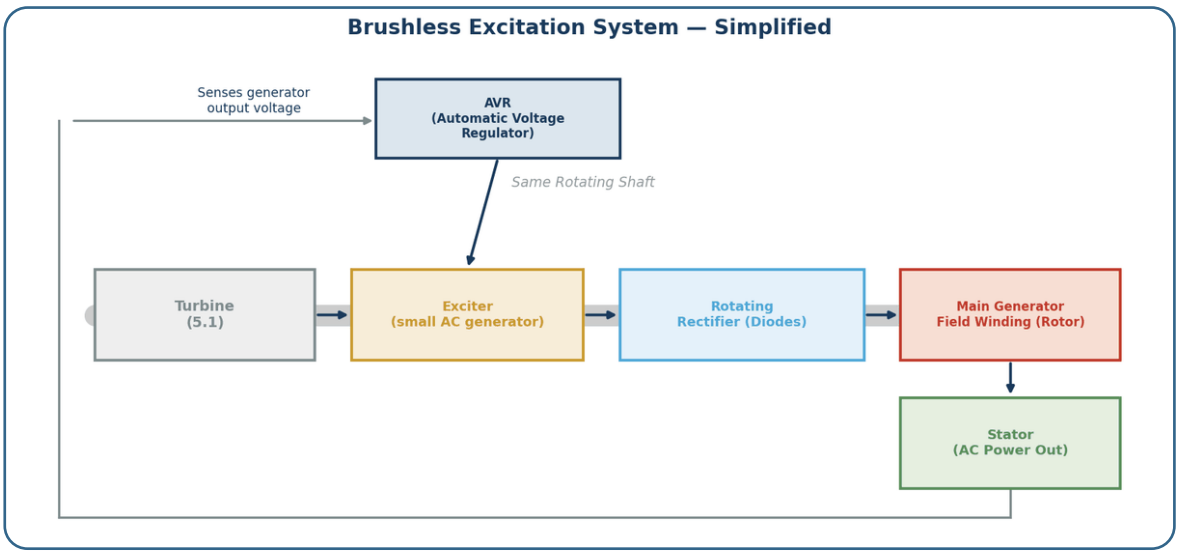
أساسيات نظرية المولد بإيجاز

المولد الكهربائي المتزامن (Synchronous Generator) يتكون أساسًا من جزأين: العضو الدوّار **(Rotor)** الذي يحمل ملفًا مغناطيسيًا يُغذّى بتيار مستمر (DC) لإنتاج مجال مغناطيسي دوّار، والعضو الثابت **(Stator)** الذي يضم ملفات النحاس التي «يقصّها» هذا المجال المغناطيسي أثناء دورانه، فيُحث فيها التيار الكهربائي المتردد (AC) الذي هو الناتج النهائي المطلوب.

دور نظام الإثارة (Excitation System)

نظام الإثارة مسؤول تحديدًا عن توفير وضبط التيار المستمر (DC) الذي يغذّي ملف العضو الدوّار في المولد. وهناك نوعان رئيسيان:

- الإثارة الساكنة **(Static Excitation)**: تيار الإثارة يُؤخذ من جزء من ناتج المولد نفسه (أو مصدر خارجي)، يُحوَّل لتيار مستمر، ويُغذَّى للعضو الدوّار عبر حلقات انزلاقية وفرش كربونية (Slip Rings & Brushes) — وتحتاج إلى صيانة دورية بسبب التلامس الميكانيكي المستمر.
- الإثارة عديمة الفرش **(Brushless Excitation)**: الأكثر شيوعًا في التصاميم الحديثة — مولد صغير إضافي (Exciter) مركّب على العمود نفسه، ناتجه يُحوَّل لتيار مستمر عبر «مقوّم دوّار» (Rotating Rectifier) مركّب هو الآخر على العمود نفسه، فلا حاجة إلى أي تلامس ميكانيكي (حلقات أو فرش) إطلاقًا — موثوقية أعلى وصيانة أقل.



الشكل 6.9 — نظام الإثارة عديم الفرش (Brushless): مولد إثارة صغير على نفس العمود، ومقوّم دوّار يحوّل ناتجه لتيار مستمر يغذّي ملف المولد الرئيسي، بضبط مستمر من منظم الجهد الآلي (AVR).

منظم الجهد الآلي (Automatic Voltage Regulator - AVR)

على غرار الحاكم (6.5) الذي يضبط السرعة، يضبط الـ AVR تيار الإثارة باستمرار للحفاظ على ثبات جهد خرج المولد عند القيمة المطلوبة، بغض النظر عن تغيّرات الحمل. فزيادة تيار الإثارة ترفع الجهد، وتقليله يخفضه — وهذا التحكم أساسي جدًا أيضًا لضبط «القدرة الرَّدّية» (Reactive Power / VARs) التي يساهم بها المولد في الشبكة الكهربائية، وهو موضوع سنتناوله بتوسع أكبر في فصل الحماية عند الحديث عن حماية المولد من الإثارة الزائدة أو الناقصة.

وقفة قبل المتابعة

إلى هنا نكون قد عرضنا ستة أنظمة مساعدة تمسّ التوربين مباشرة: التزييت، الوقود، التبريد والتهوية، بدء التشغيل، التحكم بالسرعة، والإثارة والمولد. ويبقى نظامان لا يقلّان أهمية وإن كانا أقل ظهورًا في النقاش اليومي: **حجرة التوربين ونظام تهويتها** (6.7)، **والتغذية الكهربائية المساعدة** (6.8) — وهذا الأخير هو الذي يضمن أن تبقى السبعة قبله قادرة على العمل أصلًا.

6.7 حجرة التوربين ونظام التهوية (Turbine Enclosure and Ventilation System)

ألمحنا إلى هذا الموضوع سريعًا عند الحديث عن التبريد والتهوية (6.3)، لكنه يستحق قسمًا مستقلًا كاملًا — لأن حجرة التوربين ليست مجرد «غطاء» حول المعدة، بل نظام هندسي متكامل له وظائف سلامة وأداء وصيانة، ومرتبط مباشرة بأنظمة الحريق والغاز (7.6) ومنطق الإيقاف الطارئ (7.8).

1. الغرض من حجرة التوربين (Purpose of the Enclosure)

الحجرة تخدم عدة أغراض في آنٍ واحد، وهذا سبب تعقيد تصميمها:

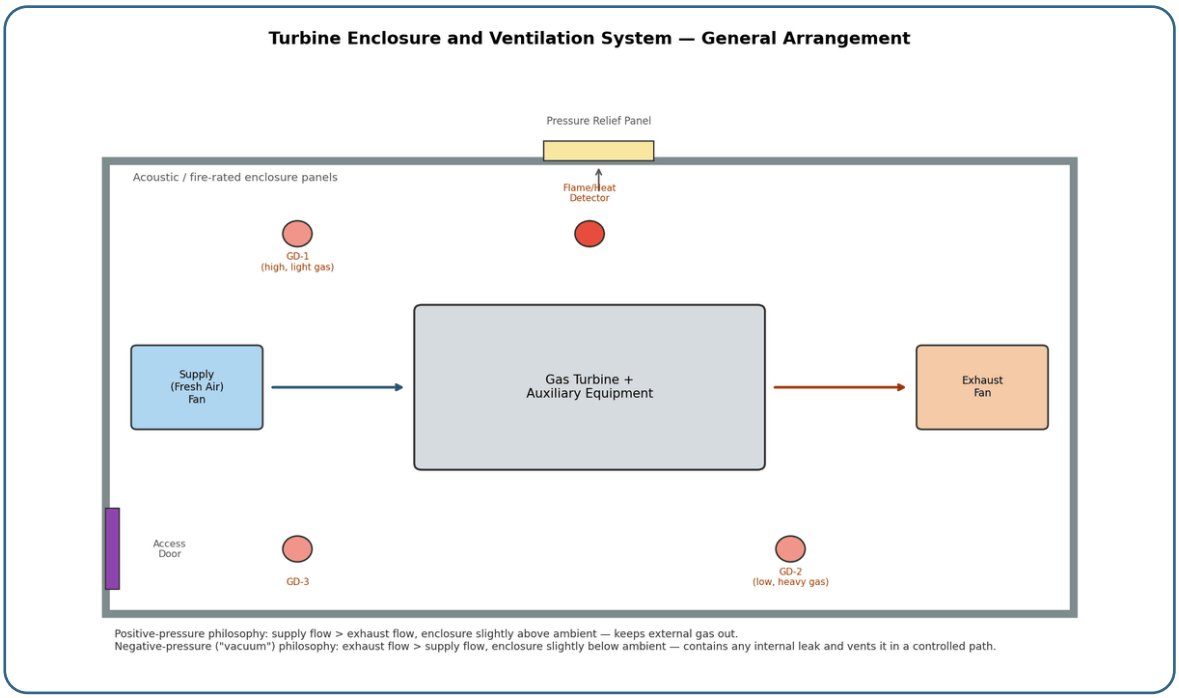
- عزل الضجيج **(Noise Attenuation)**: التوربين الغازي مصدر ضجيج عالٍ جدًا، والحجرة مبطّنة بمواد عازلة صوتيًا لخفض المستوى لحدود مقبولة للعاملين حول الوحدة.
- حصر الحريق **(Fire Containment)**: إذا حدث حريق داخل الحجرة، تمنع الجدران المقاومة للحريق انتشاره إلى المناطق المجاورة، وتحصر جو الإطفاء (خصوصًا في أنظمة CO2 أو الغازات النظيفة) داخل حيّز مغلق حتى يعمل بفعالية.
- **حصر تسرّب الغاز والسيطرة عليه**: الحجرة تحوّل أي تسرّب وقود محتمل من "انتشار حر في الجو المفتوح" إلى "حيّز محدود مراقَب بكواشف غاز وتهوية قسرية" — وهذا أفضل من ناحية الكشف المبكر.
- **الحماية من الظروف الجوية**: غبار، رمال، أمطار، رطوبة مالحة (في التطبيقات البحرية والساحلية) — كلها تتلف المعدات الحساسة والأسلاك والموصلات.
- **الحماية من الوصول غير المصرّح به**: أبواب مقفلة تمنع دخول أي شخص لمنطقة معدة دوّارة ساخنة أثناء التشغيل.

2. تصميم الحجرة (Enclosure Design)

من الناحية الإنشائية، الحجرة عبارة عن ألواح (Panels) معيارية قابلة للفك، مثبّتة على هيكل معدني، وأهم تفاصيلها:

- **ألواح عازلة صوتيًا** مكوّنة من طبقات: صفيحة معدنية خارجية، مادة عازلة داخلية (صوف صخري أو مشابه)، وصفيحة داخلية مثقّبة تسمح بامتصاص الصوت.
- إحكام الإغلاق **(Sealing)**: حشوات (Gaskets) حول الأبواب والألواح — لأن أي فجوة تعني تسرّب هواء التهوية في مسار غير محسوب، وتفقد الحجرة قدرتها على الاحتفاظ بغاز الإطفاء وقت الحاجة.

- **إنشاء مقاوم للحريق** بمعدّل مقاومة زمني محدد حسب تصميم المنشأة.
- ألواح تنفيس الضغط **(Pressure Relief Panels)**: ألواح مصممة لتنفتح عند ضغط زائد مفاجئ (كانفجار داخلي محتمل) لتنفيس الضغط في مسار آمن بدلًا من تدمير الهيكل كاملًا.
- أبواب وصول **(Access Doors)** بمزاليج سريعة الفتح من الداخل، وعادة موصولة بمفتاح موضع (Position Switch) يعطي إشارة للنظام إذا فُتح باب أثناء التشغيل.
- **إضاءة داخلية ونقاط تفتيش** مناسبة للمنطقة الخطرة (نقطة 9 أدناه).



الشكل 6.10 — الترتيب العام لحجرة التوربين: مسار هواء التهوية من مروحة التغذية إلى مروحة السحب، مع توزيع كواشف الغاز على ارتفاعات ومناطق مختلفة، وكاشف اللهب، ولوح تنفيس الضغط.

3. نظام التهوية (Ventilation System)

التهوية هي «قلب» منظومة الحجرة، ولها ثلاث وظائف: تبريد الحيّز، تخفيف أي تسرّب غاز لتركيز آمن، وتوفير مسار كشف موثوق للكواشف.

المكوّنات الأساسية: مراوح تغذية (Supply Fans) تدفع هواء نظيفًا من الخارج عبر فلاتر، ومراوح سحب (Exhaust Fans) تُخرج الهواء الساخن، مع مخمدات (Dampers) توجّه المسار. وعادة توجد مروحة احتياطية (Standby Fan) تبدأ تلقائيًا عند فشل الأساسية.

نقطة تصميمية جوهرية تتكرر في النقاشات الميدانية — **فلسفة الضغط داخل الحجرة**:

- ضغط موجب **(Positive Pressure)**: تدفّق التغذية أكبر من السحب، فيصبح داخل الحجرة ضغط أعلى قليلًا من الجو المحيط. الفائدة: يمنع دخول غاز أو غبار من الخارج للحجرة.
- ضغط سالب / تفريغ **(Negative Pressure)**: تدفّق السحب أكبر من التغذية، فيصبح الضغط داخل الحجرة أقل قليلًا من الجو المحيط. الفائدة: أي تسرّب داخلي لا يخرج إلى المناطق المجاورة، بل يُسحب إلى مسار العادم المحدد.

لا يوجد خيار «صحيح مطلقًا» — فالاختيار يعتمد على فلسفة السلامة في المنشأة نفسها وتصنيف المنطقة المحيطة. والمهم أن يعرف المهندس أي فلسفة مطبَّقة في وحدته، لأنها تغيّر تفسير أي قراءة ضغط تفاضلي شاذة.

مفهوم ثالث مهم: عدد تغييرات الهواء بالساعة **(Air Changes per Hour — ACH)** — أي كم مرة يُستبدل كامل حجم هواء الحجرة خلال ساعة. وهذا المؤشر هو الأساس في تحديد سعة المراوح المطلوبة، وكلما ازداد ازدادت سرعة تخفيف أي تسرّب.

4. كشف الغاز (Gas Detection)

كواشف الغاز داخل الحجرة موزّعة بعناية، لا عشوائيًا، والمبدأ الحاكم بسيط: **الغاز يتجمّع حسب كثافته وحسب مسار الهواء**. فالغازات الأخف من الهواء (مثل الميثان — المكوّن الرئيسي للغاز الطبيعي) تصعد إلى الأعلى، فتُركَّب كواشفها عند السقف؛ والغازات الأثقل من الهواء تتجمّع في الأسفل. ولهذا السبب ترى كواشف على ارتفاعات مختلفة.

موقع ثانٍ مهم جدًا: مجرى هواء العادم من الحجرة **(Ventilation Duct)** — فكاشف هناك يلتقط أي تسرّب انتقل مع تيار الهواء حتى لو كان مصدره في مكان لا يغطيه كاشف مباشر.

عادة يُستخدم منطق تصويت (راجع فلسفة التصويت في 7.8) بين عدة كواشف: كاشف واحد يعطي إنذارًا، واثنان يؤكدان الحدث ويسمحان بإجراء أشد — وهذا يمنع القواطع الكاذبة الناتجة عن كاشف معطّل أو ملوّث.

5. كشف الحريق (Fire Detection)

في الحجرة أنواع مختلفة من الكواشف، لكل نوع سرعة استجابة وطبيعة مختلفة:

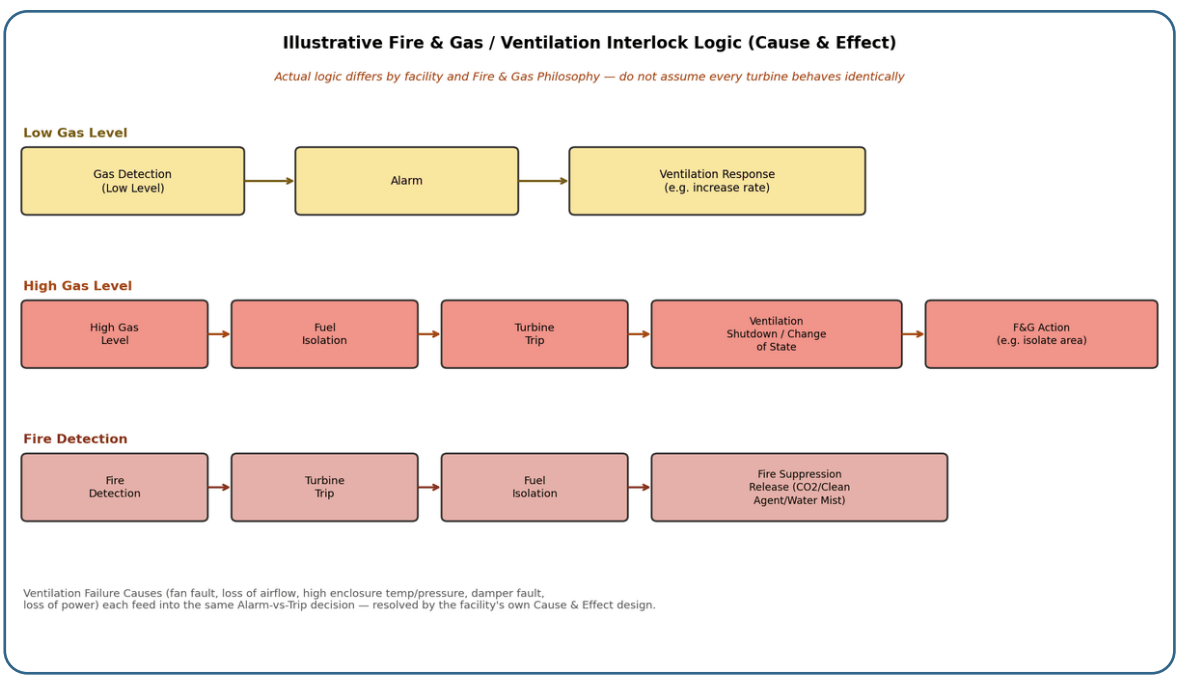
- كواشف اللهب **(Flame Detectors — UV/IR)**: تكشف الإشعاع المميّز للهب مباشرة، سريعة جدًا، مناسبة لحرائق الوقود المفاجئة.

- كواشف الحرارة **(Heat Detectors)**: تستجيب لارتفاع الحرارة أو لمعدل ارتفاعها (Rate of Rise) — أبطأ لكن أقل عرضة للإنذار الكاذب.
- كواشف الدخان **(Smoke Detectors)**: أقل شيوعًا داخل حجرة التوربين نفسها بسبب التهوية القوية التي تخفف الدخان بسرعة، لكنها تُستخدم في حجرات المعدات المساعدة والكهربائية.

نقطة عملية مهمة: كاشف اللهب داخل الحجرة **مختلف تمامًا** عن كاشف اللهب داخل غرفة الاحتراق (7.5). فالأول يفترض أن أي لهب داخل الحجرة = حريق؛ والثاني يفترض أن غياب اللهب = مشكلة. نفس التقنية، تفسير معاكس تمامًا.

6. الترابط بين الحريق والغاز والتهوية (Fire & Gas / Ventilation Interlock)

هنا يجتمع كل ما سبق بمنطق واحد. المثال التالي **توضيحي فقط** ولا يمثّل منطق أي منشأة بعينها — فمنطق السبب والأثر (Cause & Effect) يختلف جوهريًا من منشأة لأخرى حسب فلسفة الحريق والغاز المعتمدة:



الشكل 6.11 — مثال توضيحي لمنطق الترابط: مسار كشف الغاز بمستوى منخفض، مسار كشف الغاز بمستوى مرتفع، ومسار كشف الحريق. المنطق الفعلي يختلف من منشأة لأخرى.

- **كشف غاز بمستوى منخفض** ← إنذار للمشغّل + استجابة تهوية (بعض التصاميم تزيد معدل التهوية للتخفيف السريع).
- **كشف غاز بمستوى مرتفع** ← عزل الوقود + قطع التوربين + تغيير حالة التهوية + إجراء عام بنظام الحريق والغاز في المنطقة.
- **كشف حريق مؤكَّد** ← قطع التوربين + عزل الوقود + **إيقاف التهوية** ثم تحرير مادة الإطفاء.

انتبه للمفارقة المقصودة في السطر الأخير: في حالة الغاز نريد تهوية **أكثر** (للتخفيف)، وفي حالة الحريق نريد تهوية **أقل أو صفرًا** (لحصر مادة الإطفاء ومنع تغذية النار بالأكسجين). وهذا التناقض الظاهري هو بالضبط سبب وجود منطق ترابط مصمَّم بعناية بدلًا من قواعد بسيطة.

7. فشل التهوية (Ventilation Failure)

من واقع العمل الميداني، أسباب فشل التهوية الشائعة:

عطل كهربائي في محرك مروحة، فشل بدء المروحة الاحتياطية، انسداد فلاتر السحب (خصوصًا في البيئات الرملية)، مخمد عالق في موضع مغلق، فقدان التغذية الكهربائية للوحة التهوية، أو تلف حسّاس تدفق الهواء نفسه (فيبلّغ عن فشل وهمي).

هل فشل التهوية يعطي **إنذارًا** أم **قاطعًا**؟ الإجابة الصادقة: **يعتمد على تصميم المنشأة**. فبعض التصاميم تسمح بتشغيل محدود المدة بعد فقدان التهوية مع إنذار عاجل، وبعضها يقطع فورًا لأن الحجرة بلا تهوية تعني فقدان قدرة الكشف المبكر للغاز. لا تفترض سلوكًا موحّدًا — راجع مصفوفة السبب والأثر الخاصة بوحدتك.

8. حرارة الحجرة وتأثيرها (Enclosure Temperature Effects)

هذه النقطة حساسة جدًا في منطقة الخليج والمناطق الحارة، لأن حرارة الجو المحيط مرتفعة أصلًا، فأي ارتفاع إضافي داخل الحجرة يوصل المعدات إلى حدودها التصميمية بسرعة:

- **معدات التحكم والإلكترونيات**: أكثر ما يتأثر — فالبطاقات الإلكترونية وموصلاتها لها حد حرارة تشغيل، وتجاوزه يسبب أعطالًا متقطعة يصعب تشخيصها (راجع 10.18 عن القواطع الكاذبة).
- **نظام الوقود**: ارتفاع حرارة الوقود السائل يغيّر لزوجته، وارتفاع حرارة الغاز يغيّر كثافته — وكلاهما يؤثر على دقة القياس والتحكم (6.2).

- **نظام التزييت**: حرارة الحجرة تنتقل للأنابيب والخزان، فترفع حرارة الزيت وتخفض لزوجته (6.1) — وهذا يؤثر على غشاء الزيت في المحامل.
- **المعدات الكهربائية والكابلات**: العزل يتدهور بسرعة أكبر عند الحرارة العالية، وقدرة تحميل الكابل (Ampacity) تنخفض.
- **الأداء العام**: ليس تأثيرًا مباشرًا على دورة برايتون (التي تتأثر بحرارة هواء السحب، 2.4)، لكنه تأثير غير مباشر عبر كل ما سبق.

9. اعتبارات المناطق الخطرة (Hazardous Area Considerations)

حجرة التوربين التي تعمل بالغاز تُصنَّف عادة كمنطقة خطرة (Hazardous Area) لاحتمال وجود جو قابل للاشتعال. والنتائج العملية لهذا التصنيف:

- كل معدة كهربائية داخل الحجرة يجب أن تكون **معتمدة للمنطقة الخطرة** — إما مانعة للانفجار (Explosion-proof)، أو ذاتية الأمان (Intrinsically Safe)، أو مضغوطة داخليًا (Purged).
- **السيطرة على مصادر الإشعال**: منع الشرر، السيطرة على درجات حرارة الأسطح، تأريض سليم لكل المعدات.
- إحكام مداخل الكابلات **(Cable Gland Sealing)**: كل مدخل كابل للحجرة يجب أن يكون محكمًا، لأن أي فتحة تخلّ بتصنيف المعدة كاملًا — وهذه من أكثر الملاحظات المتكررة في تفتيش السلامة.
- إجراءات التصريح بالعمل **(Permit to Work)** قبل أي عمل ساخن (لحام، قطع) داخل الحجرة أو حولها.

10. أنظمة الإطفاء (Fire Suppression)

الأنواع الشائعة داخل حجرة التوربين:

النوع	مبدأ العمل	ملاحظات عملية
ثاني أكسيد الكربون (CO_2)	خنق النار بإزاحة الأكسجين	فعّال جدًا وشائع تاريخيًا، لكنه **قاتل للبشر** بالتركيزات المستخدمة — يستلزم إنذار إخلاء وتأخيرًا زمنيًا قبل التحرير
الغازات النظيفة (Clean Agent)	امتصاص حراري / تدخّل كيميائي	لا يترك بقايا، أأمن نسبيًا للأفراد، أعلى تكلفة
رذاذ الماء (Water Mist)	تبريد وإزاحة بخارية بقطرات دقيقة جدًا	استهلاك ماء أقل بكثير من المرشّات التقليدية؛ يُرجَع فيه لمعيار NFPA 750 (راجع ملحق د)

التسلسل المنطقي العام: **كشف حريق مؤكَّد ← قطع التوربين ← عزل الوقود ← إيقاف التهوية ← تحرير مادة الإطفاء**. وترتيب هذه الخطوات مقصود: فما فائدة تحرير غاز إطفاء والوقود ما زال يتدفق أو التهوية ما زالت تسحب المادة إلى الخارج؟

خلاصة القسم

حجرة التوربين هي المثال الأوضح في هذا الكتاب على أن أنظمة التوربين لا تعمل بمعزل عن بعضها: هنا يلتقي التوربين نفسه، ونظام الوقود، ونظام الحريق والغاز، ونظام التهوية، ومنطق الإيقاف الطارئ، ونظام التحكم — في منطق واحد مترابط. وأي مهندس يفهم هذا الترابط يستطيع تشخيص أحداث يصعب فهمها لو نظر إلى كل نظام على حدة.

6.8 التغذية الكهربائية المساعدة: التيار المستمر والبطاريات وUPS

نختم هذا الفصل بنظام لا يُذكر عادةً إلا عرضًا، مع أنه النظام الذي **تقف عليه كل الأنظمة الأخرى في أسوأ لحظة ممكنة**: منظومة التيار المستمر (DC System) والتغذية غير المنقطعة (UPS).

لماذا يحتاج التوربين الغازي مصدر طاقة مستقلًا أصلًا؟

السيناريو الحاكم للتصميم كله هو فقدان التغذية الرئيسية للمحطة **(Loss of AC / Station Blackout)** أثناء عمل الوحدة. في تلك اللحظة بالذات — وليس في أي لحظة أخرى — يجب أن تحدث ثلاثة أشياء معًا:

1. **أن يبقى نظام التحكم والحماية حيًا** لينفّذ إيقافًا منظّمًا ويسجّل ما يحدث — فقدان التحكم أثناء الحدث يعني إيقافًا أعمى وسجلًّا فارغًا لحظة أحوج ما نكون للبيانات (10.1).
2. **أن يستمر تزييت المحامل** طوال فترة تباطؤ العمود (Coast-Down) — وهنا تحديدًا دور مضخة الزيت الاحتياطية العاملة بالتيار المستمر **(DC Emergency Lube Oil Pump)** التي ذكرناها في 6.1: هي تعمل من البطارية مباشرة لأن السيناريو الذي صُمّمت له هو بالضبط غياب كل مصدر كهرباء متردد آخر. ودوران محامل الفيلم الزيتي (5.5) بلا زيت ولو لدقائق يعني تلفًا شبه مؤكد.
3. **أن تعمل دوائر القطع والإنارة الطارئة ومحرّكات القواطع الكهربائية** — فتح قاطع المولد (18.4) نفسه يحتاج طاقة مخزّنة.

مكونات المنظومة

- مجموعة البطاريات **(Battery Bank):** مصدر الطاقة المخزّنة، محسوبة السعة لتغطية الأحمال الحرجة لمدة محددة تصميميًا (تشمل فترة التباطؤ الكاملة لمضخة الزيت الطارئة وهامشًا بعدها).
- الشاحن **(Battery Charger / Rectifier):** يغذي الأحمال المستمرة ويبقي البطارية مشحونة بأسلوب الشحن العائم (Float Charging). والنقطة الجوهرية في التصميم: البطارية موصولة **على التوازي مع الحمل دائمًا** — فلا يوجد «تحويل» ولا زمن انقطاع إطلاقًا عند فقدان الشاحن، بل تواصل البطارية التغذية في اللحظة ذاتها.
- التغذية غير المنقطعة **(UPS / Inverter):** تحوّل التيار المستمر إلى متردد نظيف للأحمال التي تحتاج تيارًا مترددًا بلا انقطاع: شاشات التشغيل (HMI)، محطات الهندسة، معدات الاتصال والشبكة (الفصل 11)، وبعض أنظمة المراقبة.
- مراقبة التأريض **(Earth Fault Monitoring):** منظومة التيار المستمر تعمل عادة معزولة عن الأرض (Unearthed / IT System) بحيث لا يسبب أول تلامس أرضي أي انقطاع — لكنه يُنذر فورًا، لأن التلامس **الثاني** على القطب الآخر يعني قصرًا مباشرًا قد يُفعّل أو يُعطّل دوائر قطع كاملة. وإنذار التلامس الأرضي الأول ليس إنذارًا ثانويًا يُؤجّل — هو إنذار فقدان طبقة الأمان الوحيدة المتبقية.

لماذا تُغذّى دوائر القطع بالتيار المستمر تحديدًا؟

لأن المطلوب من دائرة القطع أن تعمل **في كل الظروف بلا استثناء** — بما فيها الظرف الذي تكون فيه شبكة التيار المتردد نفسها هي المضطربة أو الغائبة. فالبطارية مصدر مستقل فعليًا عن كل اضطرابات الشبكة، ولذلك تجد أن ملفات المرحّلات في مسارات القطع (7.8، 19.3) وملفات فتح القواطع الكهربائية (18.4) تُغذّى من موزّع التيار المستمر دائمًا.

من واقع الميدان — ثلاث قواعد عملية:

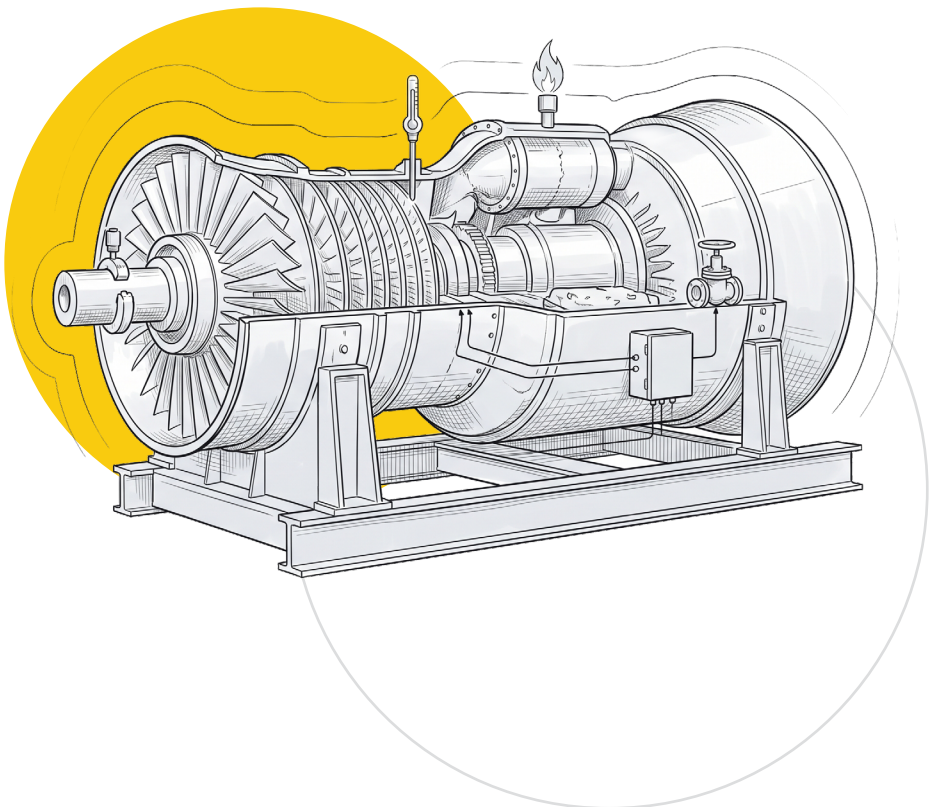
- **البطارية التي لم تُختبر بتفريغ فعلي ليست بطارية.** جهد الطفو الطبيعي على الشاشة لا يثبت أي سعة — فالبطارية المتدهورة تُظهر جهدًا مثاليًا ما دام الشاحن يغذيها، ثم تنهار خلال دقائق من أول تفريغ حقيقي. واختبار التفريغ الدوري الموثّق هو الإثبات الوحيد — وهذا تطبيق حرفي لمبدأ الاختبار الدوري للحمايات (7.8): فعطل البطارية عطل مستتر بامتياز.
- **اختبار مضخة الزيت الطارئة يجب أن يشمل مسار انطلاقها التلقائي**، لا تشغيلها اليدوي فقط: فالمطلوب إثبات أنها تنطلق وحدها عند انخفاض الضغط وغياب التيار المتردد معًا.

- **أحمال دخيلة تتسلل مع السنين.** كل من أضاف جهازًا «مؤقتًا» على موزّع الـDC أو الـUPS استهلك من زمن الصمود المحسوب تصميميًا دون أن يعلم أحد. ومراجعة قائمة الأحمال دوريًا — وإخضاع أي إضافة لإدارة التغيير (8.6) — ليست ترفًا إداريًا.

وبهذا تكتمل صورة الأنظمة المساعدة: سبعة أنظمة تخدم التوربين مباشرة، وثامن — هذا — يضمن أن تظل السبعة قادرة على العمل حين يغيب كل مصدر طاقة آخر.

الفصل السابع:

حماية التوربين الغازي

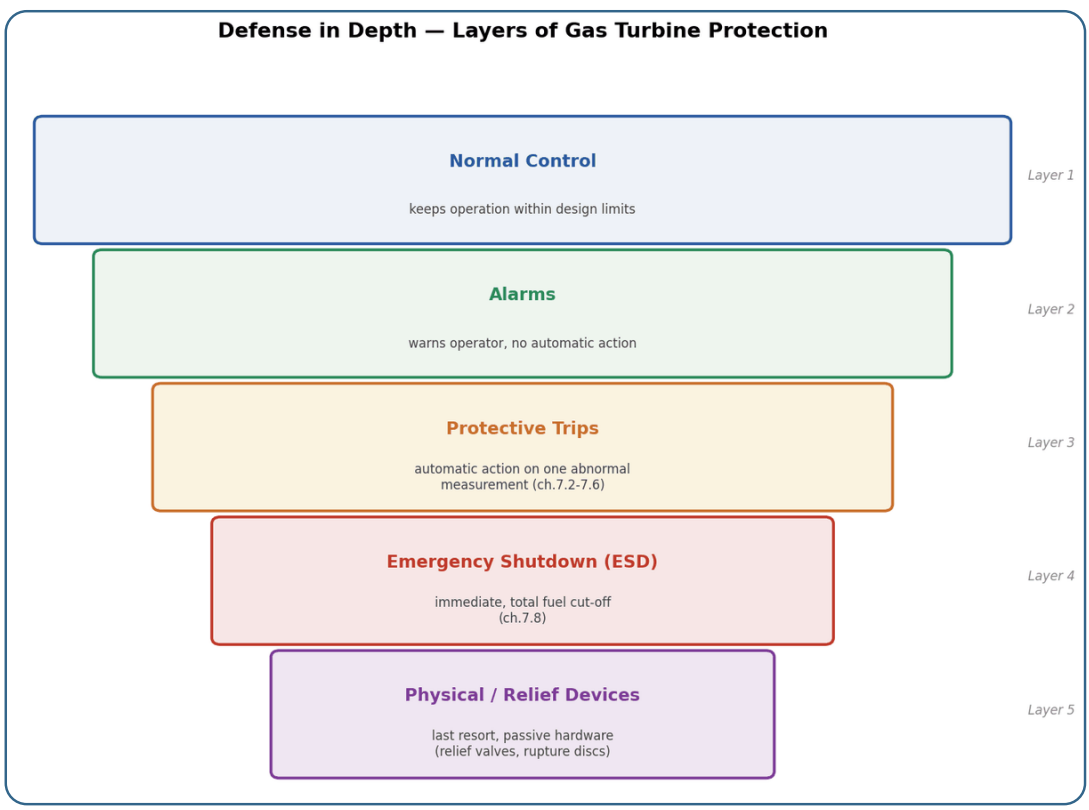


7.1 فلسفة الحماية: لماذا طبقات متعددة؟

في الفصل السادس تناولنا الأنظمة التي تُشغّل التوربين الغازي وتجعله يعمل بكفاءة (تزييت، وقود، تبريد، تحكم بالسرعة، إثارة). في هذا الفصل، الموضوع مختلف: ليس «كيف يعمل» وإنما «كيف نحميه حين يحدث خلل».

من واقع العمل الميداني، أهم درس تتعلمه في الحماية هو: **نظام التحكم العادي (الحاكم، حلقة درجة الحرارة، إلخ) ليس نظام حماية**. نظام التحكم مصمم ليجعل التوربين يعمل عند النقطة المطلوبة (سرعة، حمل، حرارة) في ظروف طبيعية. لكن لو حدث عطل — حساس تعطل، صمام لم يستجب، تسرب وقود، اهتزاز غير طبيعي — فقد لا يكتشفه نظام التحكم العادي في الوقت المناسب، بل قد يكون هو نفسه سبب المشكلة. هنا يأتي دور **نظام الحماية**: طبقة منفصلة، مستقلة قدر الإمكان عن حلقة التحكم العادية، وظيفتها الوحيدة أن تراقب وتتدخل حين تتجاوز القيم حدود الأمان — حتى لو كان معنى التدخل إيقاف الوحدة بالكامل.

الفكرة الأساسية التي تُبنى عليها كل أنظمة الحماية الحديثة هي الطبقات المتعددة **(Defense in Depth)**: لا تعتمد على وسيلة حماية واحدة، لأن أي وسيلة قد تفشل. بدلًا من ذلك، تضع عدة طبقات مستقلة، كل واحدة قادرة على إيقاف الخطر حتى لو فشلت الأخرى.

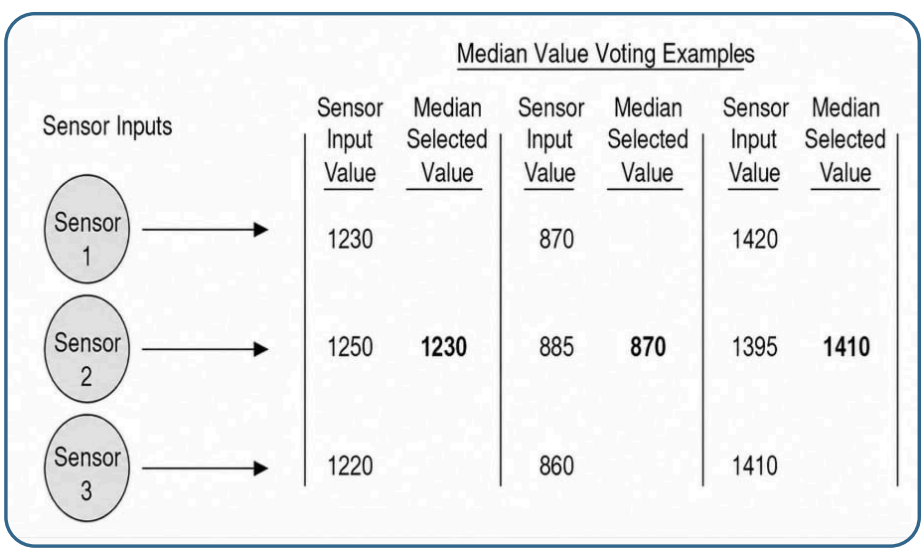


الشكل 7.1 — طبقات الحماية المتعددة (Defense in Depth): من التحكم العادي، مرورًا بالإنذارات والقواطع الوقائية، وصولًا للإيقاف الطارئ وأجهزة التنفيس الفيزيائية كخط دفاع أخير

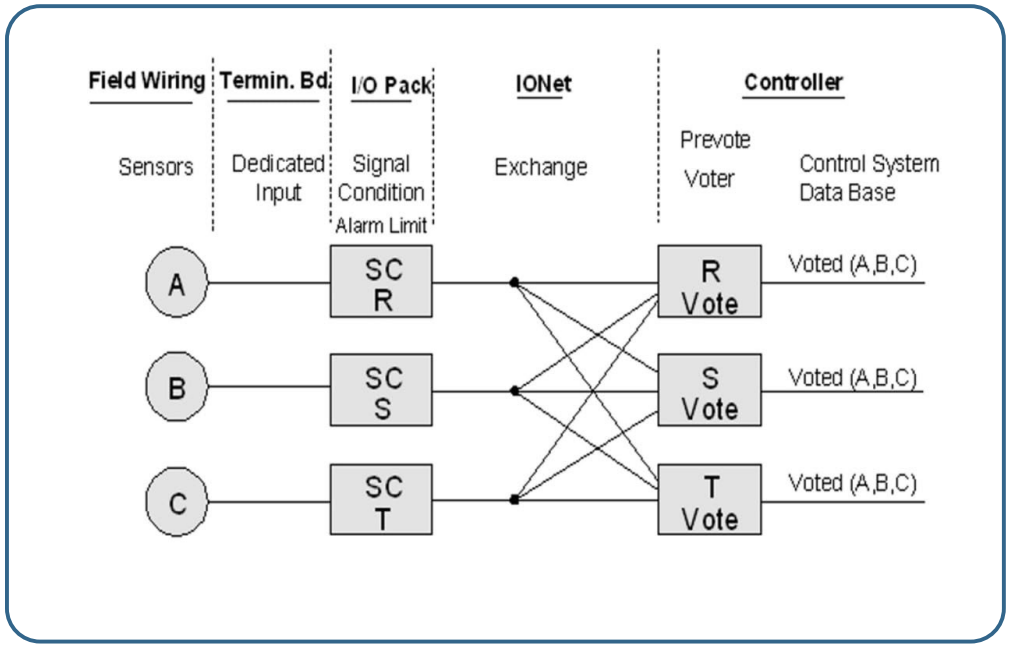
مثال عملي وواضح جدًا هو الحماية من السرعة الزائدة (سنشرحها بالتفصيل في القسم التالي): هناك حلقة إلكترونية أساسية تراقب السرعة وتتدخل أولًا، وهناك وحدة إلكترونية ثانية مستقلة تمامًا (بأسلاك ومرحلات relays منفصلة) كخط دفاع ثانٍ، وهناك — في التصاميم الأقدم والأنظمة الميكانيكية — قطعة ميكانيكية بحتة (لا تحتاج كهرباء ولا برمجة) كخط دفاع أخير. فإن فشلت الطبقة الأولى، أمسكت الثانية بالموقف. وإن فشلت الاثنتان، تدخلت الثالثة (الميكانيكية). هذا التكرار المتعمد اسمه **Redundancy**، وهو حجر الأساس في كل أنظمة الحماية الصناعية الحرجة.

مبدأ ثانٍ مهم هو **Fail-Safe**: أي عطل في نظام الحماية نفسه (انقطاع كهرباء، عطل في حساس، فقدان إشارة) يجب أن يؤدي تلقائيًا إلى حالة آمنة (إيقاف الوحدة)، لا إلى حالة خطرة. أي لو انقطع سلك الحساس، يُغلق الصمام من تلقائه — لا أن يبقى مفتوحًا لأن "إشارة الإيقاف لم تصل". هذا الفرق بسيط لكنه حاسم: نظام الحماية المصمم على نحو صحيح، فشله بحد ذاته يوقف العملية بأمان.

في أنظمة التحكم الحديثة، يتطور مفهوم التكرار خطوة أبعد بفكرة التصويت **(Voting)** — بدلًا من الاعتماد على حساس واحد لقياس متغيّر حرج (مثل السرعة أو الاهتزاز)، تضع ثلاثة حساسات مستقلة، ونظام الحماية «يصوّت»: فإن أعطى اثنان من الثلاثة القراءة الخطرة نفسها، يُتخذ الإجراء (إيقاف)، حتى لو أعطى الحساس الثالث قراءة مختلفة (فتُعتبر قراءته عطلًا في الحساس نفسه، لا إنذارًا حقيقيًا). هذا الأسلوب (يسمى غالبًا **2-out-of-3 Voting** أو **Triple Modular Redundant — TMR**) يحل مشكلة قديمة: فلو اعتمدت على حساس واحد، لأوقف أي عطل في الحساس نفسه (لا في التوربين) الوحدة بدون داعٍ (إنذار كاذب مكلف)، ولو اعتمدت على "أي حساس واحد يعطي قراءة خطرة يوقف الوحدة" بدون تصويت، لأصبحت عرضة لإيقافات كاذبة كثيرة. التصويت الثلاثي يوازن بين الأمان (ألا تفوّت خطرًا حقيقيًا) وبين الموثوقية التشغيلية (ألا توقف الوحدة بدون سبب حقيقي).



هذا مثال على نظام ال voting and redundancy in GE MK VIe



آخر نقطة، وهي عملية جدًا من واقع الميدان: نظام الحماية يجب أن يكون **مستقلًا فعليًا** عن نظام التحكم، لا «مستقلًا بالاسم» فقط. أي أسلاك منفصلة، ومصدر طاقة منفصل (أو احتياطي)، وأحيانًا وحدة معالجة (processor) منفصلة تمامًا عن معالج التحكم العادي. فلو اشترك الاثنان في المعالج نفسه أو مصدر الطاقة نفسه، لقدر عطل واحد أن يعطّل التحكم والحماية معًا في اللحظة نفسها — وهذا بالضبط ما يجب أن يمنعه نظام الحماية المصمم على نحو صحيح.

في الأقسام التالية، سنستعرض التطبيقات العملية لهذه المبادئ: الحماية من السرعة الزائدة، الحرارة الزائدة، الاهتزاز، اللهب، الحريق والغاز، وأخيرًا كيف تترتب كل هذه الإنذارات والقواطع في تسلسل منطقي واحد يسمى «التسلسل الهرمي للحماية».

7.2 الحماية من السرعة الزائدة (Overspeed Protection)

السرعة الزائدة من أخطر الحالات التي قد يتعرض لها التوربين الغازي. فلو فُقد الحمل فجأة (مثلًا انفصال المولد عن الشبكة الكهربائية) ولم يتدخل الحاكم بالسرعة الكافية لسحب الوقود، استمر العمود بالتسارع بدون أي مقاومة تقريبًا — وخلال ثوانٍ قليلة قد يصل إلى سرعة تكفي لتدمير الشفرات والمحامل بالكامل (Rotor Burst)، وهذا من أخطر الحوادث التي قد تقع في محطة كهرباء أو منصة نفط وغاز. لهذا السبب، الحماية من السرعة الزائدة هي أول وأهم طبقة حماية في أي توربين غازي.

المبدأ الأساسي (من واقع المعايير العالمية): الحاكم (Governor) الذي يتحكم بالسرعة أثناء التشغيل الطبيعي (شرحناه في القسم 6.5) **لا يُعتبر أبدًا نظام حماية**، حتى لو كان بداخله حد أقصى للسرعة مبرمج. السبب بسيط: لو كان المتحكم (Controller) نفسه الذي يتحكم بالسرعة هو المسؤول عن كشف السرعة الزائدة، فأي عطل في هذا المتحكم (في العتاد أو البرمجيات) يعطّل الاثنين معًا في اللحظة نفسها — التحكم والحماية معًا. لهذا السبب بالضبط، تشترط المعايير العالمية المعتمدة في الصناعة (مثل معايير API الخاصة بالتوربينات والمكائن الدوّارة، ومنها API 670 الخاص بأنظمة حماية المكائن، وما يتصل بها من معايير التوربينات كـ API 612/616) وجود **نظام حماية إضافي مستقل تمامًا عن نظام التحكم الأساسي** — أسلاك منفصلة، حساسات منفصلة، وغالبًا معالج (processor) أو دارة إلكترونية منفصلة بالكامل، بحيث لو تعطل نظام التحكم الرئيسي، بقي نظام الحماية عاملًا وقادرًا على إيقاف الوحدة بأمان.

عمليًا، يُترجم هذا المبدأ إلى ثلاث طبقات متتالية:

الطبقة الأولى — الحلقة الإلكترونية الأساسية: جزء من نظام التحكم نفسه (Speedtronic أو ما يعادله). حساسات مغناطيسية (Magnetic Pickups) تقرأ سرعة العمود من عجلة مسننة على العمود (Toothed Wheel)، وحين تتجاوز القراءة حدًا معيّنًا (Overspeed Setpoint) يصدر أمر قطع للوقود. هذه أول خطوط الدفاع وأسرعها استجابة، لكنها جزء من منظومة التحكم العادية نفسها.

الطبقة الثانية — الوحدة الإلكترونية الثانوية المستقلة: وحدة منفصلة فعليًا (بأسلاك ومرحلات relays خاصة بها، غير مرتبطة بدارة التحكم العادية)، تراقب حساسات السرعة نفسها (أو مجموعة موازية منها) وتقارنها بحد أعلى قليلًا من حد الطبقة الأولى. والفكرة أن تتدخل لو فشلت الطبقة الأولى لأي سبب. وأنظمة الحماية الحديثة (مثل MicroNet Safety Module التي تعتمد على معمارية TMR وتصويت 2من3- الذي شرحناه في القسم السابق) تندرج تحت هذه الفئة — معالج مستقل بالكامل، معتمد حسب معايير سلامة عالمية (IEC61508 SIL-3)، واستجابة سريعة جدًا (أقل من عشرين ميلي ثانية).



الشكل 7.2 — وحدتا حماية إلكترونية مستقلتان من نوع شائع بالصناعة، كل وحدة مخصصة لمراقبة سرعة عمود منفصل (GG SPEED للمولد الغازي، PT SPEED لتوربين القدرة) — تعرض السرعة اللحظية (RPM) وتحتوي مؤشرات Tripped / Unit Health / Alarm مستقلة عن شاشة التحكم الرئيسية. هذا مثال عملي على «الطبقة الثانية» التي وصفناها: عتاد منفصل تمامًا عن نظام التحكم، وظيفته الوحيدة الحماية.

الطبقة الثالثة — الحماية الميكانيكية (بالتصاميم الأقدم والتوربينات الصناعية الثقيلة): قطعة ميكانيكية بحتة، غالبًا بولت مُرجَّح بالقوة الطاردة المركزية (Overspeed Bolt) مركّب في علبة التروس الملحقة (Accessory Gear). فحين تزيد السرعة عن الحد المسموح، تتغلب القوة الطاردة المركزية على قوة نابض داخلي فيخرج البولت من موضعه ويصدم آلية ميكانيكية تُفرّغ ضغط الزيت الهيدروليكي المسؤول عن إبقاء صمامات الوقود مفتوحة — فتُغلق الصمامات فورًا وميكانيكيًا، **بدون أي حاجة لكهرباء أو برمجة على الإطلاق**. قد تبدو هذه الطبقة "بدائية" مقارنة بالإلكترونيات الحديثة، لكن قيمتها بالضبط أنها لا تعتمد على أي نظام إلكتروني — فلو انقطعت الكهرباء بالكامل أو تعطلت كل الدارات الإلكترونية معًا، بقيت هذه الطبقة فعّالة.

> من واقع الميدان: صيانة الحماية من السرعة الزائدة من أكثر بنود الصيانة الوقائية حساسية، وغالبًا تتطلب اختبارًا دوريًا فعليًا (رفع سرعة الوحدة عمدًا بشكل مضبوط للتأكد من أن نقطة القطع تعمل عند القيمة الصحيحة تمامًا)، لا فحصًا نظريًا للدارة فحسب. وأي تأخير أو خطأ في معايرة نقطة القطع — سواء كانت عالية جدًا (تأخير الحماية) أو منخفضة جدًا (إيقافات كاذبة متكررة تعطّل الإنتاج) — له تكلفة حقيقية، ولهذا يُعد هذا الفحص من البنود التي لا يُتهاون فيها أبدًا في جداول الصيانة.

أنظمة قياس واستشعار السرعة (Speed Measurement and Speed Sensing Systems)

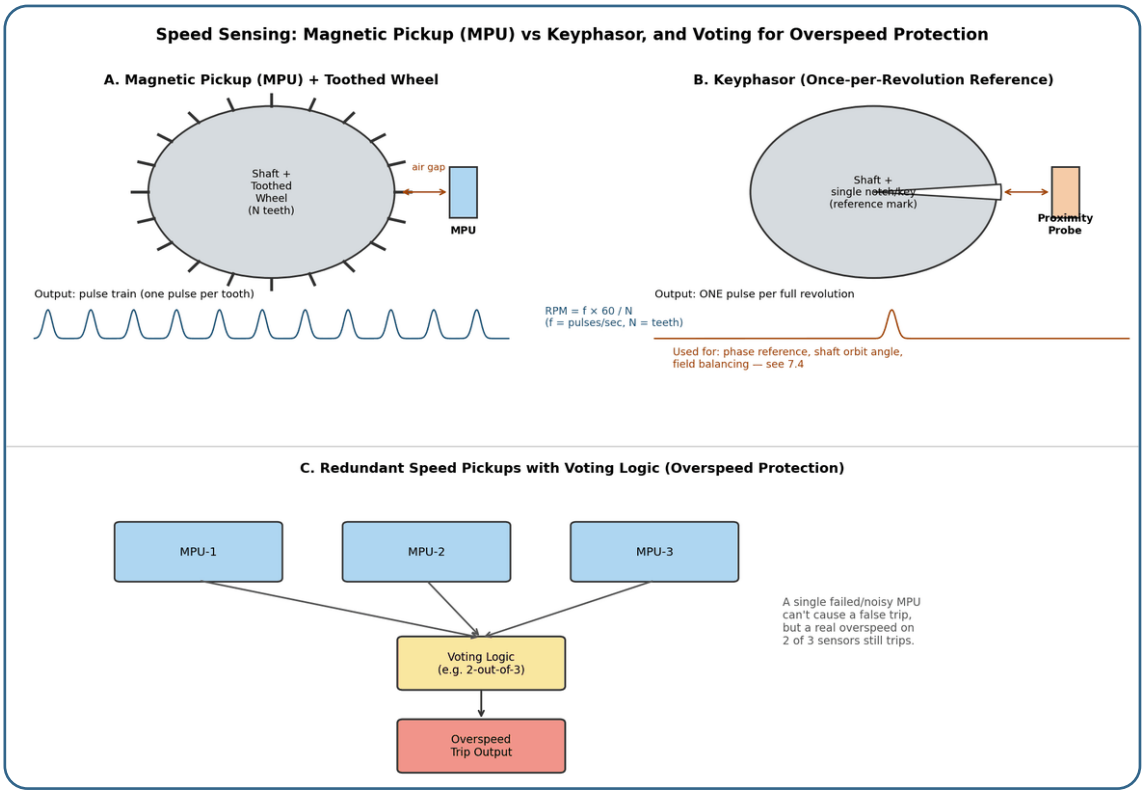
ذكرنا في الأعلى أن الطبقة الأولى من الحماية تعتمد على «حساسات مغناطيسية تقرأ سرعة العمود من عجلة مسننة». وهذه النقطة تستحق تفصيلًا مستقلًا، لأن فهم كيف تُقاس السرعة فعليًا (لا مجرد «يوجد حساس يقرأ السرعة») ضروري لفهم لماذا صُمّم نظام الحماية على الشكل الذي هو عليه، ولأنه يربط مباشرة بمواضيع لاحقة في الكتاب (تكرار الحسّاسات 9.6، ومراقبة الاهتزاز 7.4).

أربعة مفاهيم يجب عدم الخلط بينها:

- قياس السرعة **(Speed Measurement):** الحصول على قيمة رقمية لسرعة دوران العمود، تُستخدم كمدخل لحلقة التحكم (الحاكم، 6.5).
- مراقبة السرعة **(Speed Monitoring):** عرض وتسجيل هذه القيمة للمشغّل والمهندس (على شاشة HMI، وفي السجلات التاريخية) — وظيفة معلوماتية، ليست تحكمية ولا حمائية بحد ذاتها.
- الحماية من السرعة الزائدة **(Overspeed Protection):** وظيفة حماية مستقلة أو عالية الاعتمادية، هدفها الوحيد منع وصول التوربين إلى سرعة خطرة — وكما شرحنا في الأعلى، يجب أن تكون منفصلة فعليًا عن حلقة التحكم العادية.
- المرجع الطوري/إشارة مرة واحدة كل دورة **(Keyphasor / Once-per-Revolution Reference):** إشارة مختلفة جوهريًا في الغرض — ليست لقياس مقدار السرعة، بل لتحديد موضع/زاوية العمود في لحظة معيّنة (نفصّلها أدناه).

القيمة الفيزيائية نفسها (دوران العمود) تُقاس بطرق مختلفة حسب أي من هذه الأربعة نريد تحقيقه فعليًا — وهذا بالضبط سبب وجود أكثر من نوع حسّاس على العمود نفسه في معظم التطبيقات الحرجة.

الحساس المغناطيسي (Magnetic Pickup Unit — MPU):



الشكل 7.3 — آلية عمل الMPU مقابل Keyphasor، ومثال على منطق التصويت بين حساسات سرعة متعددة لحماية موثوقة من السرعة الزائدة.

- **مبدأ العمل:** حساس MPU لا تلامسي، يحتوي مغناطيسًا دائمًا وملفًا كهربائيًا. وحين يمر أمام الحساس سنّ معدني من عجلة مسننة (Toothed/Gear Wheel) مركّبة على العمود، يتغيّر المجال المغناطيسي المحيط بالملف، فيُستحث جهد كهربائي — نبضة واحدة لكل سنّ يمر. والنتيجة سلسلة نبضات (Pulse Train) بتردد يتناسب طرديًا مع سرعة دوران العمود.
- **حساب السرعة من التردد:** لو عدد أسنان العجلة N وتردد النبضات المقاس f (نبضة/ثانية)، فإن سرعة الدوران بوحدة دورة/دقيقة تُحسب: **RPM = (f × 60) / N**. هذا الحساب يجريه المتحكم إلكترونيًا وباستمرار، وهو أساس كل قراءة سرعة تظهر على شاشة HMI أو تُستخدم في حلقة تحكم الحاكم.

- **مميزاته:** بساطة التصميم (لا أجزاء متحركة داخل الحساس نفسه)، موثوقية عالية جدًا على المدى الطويل، تكلفة منخفضة نسبيًا، ودقة ممتازة في السرعات المتوسطة والعالية (نطاق التشغيل الطبيعي للتوربين).
- **عيوبه ونقاط الانتباه العملية:**
  - تأثير الفجوة الهوائية **(Air Gap):** المسافة بين طرف الحساس وسطح السن يجب أن تكون ضمن مدى دقيق محدد من الشركة المصنّعة. فجوة أكبر من المسموح تُضعف الإشارة المستحثة بشكل كبير وقد تجعلها غير قابلة للقراءة بثقة؛ وفجوة أصغر من اللازم قد تعرّض الحساس لتلامس فعلي مع الأسنان أثناء الاهتزاز الطبيعي للعمود فتتلفه. وضبط الفجوة بدقة خطوة معايرة أساسية بعد أي تركيب أو استبدال.
  - **ضعف الإشارة في السرعات المنخفضة:** بما أن الجهد المستحث يعتمد على معدل تغيّر المجال المغناطيسي، فكلما قلّت سرعة الدوران (خصوصًا أثناء بداية تسلسل بدء التشغيل، 9.3) ضعفت الإشارة الناتجة — وقد تصبح صعبة التمييز عن الضوضاء الكهربائية في السرعات المنخفضة جدًا. وهذا سبب عملي مهم وراء اعتماد بعض التصاميم على وسائل قياس سرعة بديلة أو مساعدة في مرحلة الدوران البطيء (Cranking) قبل أن يصل العمود إلى سرعة كافية لقراءة MPU موثوقة.
  - **تأثير تلف أو اتساخ أسنان العجلة:** أي ضرر فيزيائي في سن أو أكثر (كسر، تآكل، أو حتى تراكم شحوم/أوساخ في الفجوة) يشوّه النبضة الناتجة عن ذلك السن تحديدًا — وقد يظهر ذلك كقراءة سرعة «مهتزة» أو غير منتظمة رغم أن السرعة الفعلية للعمود ثابتة تمامًا، وهذا نمط يستحق الانتباه له أثناء التشخيص (راجع منهجية 10.1: لا تفترض أن تذبذب القراءة يعني تذبذبًا فعليًا في السرعة قبل التأكد من سلامة الحساس والعجلة نفسها).
  - الحاجة للتكرار **(Redundancy):** في التطبيقات الحرجة، الاعتماد على MPU واحد فقط غير مقبول — تُركَّب عادة ثلاثة حساسات مستقلة (MPU-1، MPU-2، MPU-3) حول العجلة نفسها أو حول عجلات موازية، وتُغذّى إلى منطق تصويت (Voting Logic، بفلسفة التصويت 2-من-3- نفسها التي شرحناها في 7.1 و7.2 للطبقة الثانية من الحماية). وهذا يحقق هدفين متعارضين ظاهريًا في الوقت نفسه: تجنب القطع الكاذب (Nuisance Trip) بسبب عطل أو تشويش في حساس واحد فقط، مع الحفاظ الكامل على القدرة على تنفيذ قطع حقيقي فورًا لو تجاوزت السرعة الحد الآمن فعليًا وأكّدت ذلك أغلبية الحساسات.

المرجع الطوري (Keyphasor):

وظيفة Keyphasor **ليست قياس السرعة** رغم أنه يُركَّب أحيانًا في منطقة MPU نفسها — وهذه نقطة يخلط فيها كثير من المهندسين الجدد. فKeyphasor حساس قرب (Proximity Probe، نشرحه بالتفصيل في 7.4) موجَّه إلى علامة مرجعية واحدة فقط على العمود (أخدود أو نتوء)، فيعطي **نبضة واحدة بالضبط كل دورة كاملة** — لا سلسلة نبضات مثل MPU. وهذه النبضة المرجعية الوحيدة تُستخدم لتحديد موضع/زاوية العمود لحظيًا **(Phase Reference)**، وهي أساسية جدًا لتحليل اهتزاز العمود (Shaft Vibration Analysis، 7.4): فبدون مرجع طوري، نعرف «مقدار» الاهتزاز لكن لا نستطيع تحديد «عند أي زاوية من دورة العمود» حدثت أعلى قراءة — وهذه المعلومة ضرورية لرسم مسار حركة العمود (Shaft Orbit) ولعمليات الموازنة في الموقع (Field Balancing، سنذكرها في 8.4). وأنظمة مراقبة الاهتزاز المتخصصة (مثل منظومات Bently Nevada الشائعة صناعيًا) تعتمد على إشارة Keyphasor كمرجع أساسي لكل تحليلاتها الطورية.

حساس القرب (Proximity Probe) كأداة عامة:

راجعنا حساسات القرب بالتفصيل في 7.4 كأداة قياس اهتزاز أساسية (تقيس إزاحة العمود اللا تلامسية بوحدة Mils). وتقنية حساس القرب نفسها — قياس المسافة بينه وبين هدف معدني بدون تلامس فيزيائي — تُستخدم أيضًا، حسب التصميم، لقياس السرعة (خصوصًا لإشارة Keyphasor نفسها) أو الموضع المحوري (Axial Position، وهو مهم جدًا لمراقبة محمل الدفع، 5.5). والفرق الجوهري بينه وبين MPU: أن MPU يعتمد على التحريض المغناطيسي (فيحتاج هدفًا من مادة تتفاعل مغناطيسيًا)، بينما يعتمد حساس القرب على مبدأ التيارات الدوامية (Eddy Current) ويقيس مسافة فعلية بدقة عالية جدًا — ولهذا هو المعيار المعتمد لقياس إزاحة العمود الدقيقة، بينما MPU أنسب لقياس السرعة على مدى واسع بموثوقية وبساطة أعلى.

جدول مقارنة سريع: MPU مقابل Keyphasor

العنصر	(Magnetic Pickup (MPU	Keyphasor
الوظيفة الأساسية	قياس السرعة (Speed Measurement)	مرجع طوري/موضع العمود (Phase Reference)
عدد النبضات	عدة نبضات في كل دورة (بعدد الأسنان)	نبضة واحدة فقط في كل دورة
الهدف المستهدَف	عجلة مسننة كاملة (Gear/Toothed Wheel)	علامة مرجعية واحدة فقط (Notch/Key)
قياس RPM	ممتاز، هذا غرضه الأساسي	ممكن نظريًا لكنه ليس الاستخدام المعتاد
قياس الطور/الزاوية	محدود جدًا أو غير عملي	ممتاز، هذا غرضه الأساسي
تحليل الاهتزاز	ليس الهدف الأساسي له	مهم جدًا كمرجع أساسي (7.4)

العنصر	(Magnetic Pickup (MPU	Keyphasor
مناسب لحماية Overspeed	نعم، جدًا، مع تكرار وتصويت	يمكن استخدامه حسب تصميم النظام، لكنه ليس الاختيار المعتاد لهذا الغرض
الأداء في السرعات المنخفضة	قد يكون محدودًا (إشارة ضعيفة)	يعتمد على تقنية القياس المستخدمة (غالبًا حساس قرب، أقل تأثرًا بضعف السرعة من MPU)

من واقع الميدان، أفضل طريقة لترسيخ هذه الفروقات هي تذكّر أن كل حساس «يُسأل سؤالًا مختلفًا»: فMPU يُسأل «بأي سرعة يدور العمود الآن؟»، وKeyphasor يُسأل «أين بالضبط موضع العمود في هذه اللحظة بالذات؟» — والخلط بين الاثنين (افتراض أن أي حساس قرب على العمود «يقيس السرعة» تلقائيًا) من الأخطاء المفاهيمية الشائعة التي تُصعّب تشخيص مشاكل الاهتزاز أو السرعة لاحقًا. وهذا الخيط — من نوع الحساس، إلى بطاقة الإدخال المتخصصة التي تستقبله (12.1، القسم الخاص بالاهتزاز والسرعة)، إلى منطق التحكم (9.1)، إلى منطق الحماية (7.2)، وحتى استكشاف الأعطال (10.14، 10.15) — يربط عمليًا كل الفصول المتعلقة بالقياس والتحكم والحماية بعضها ببعض.

7.3 الحماية من الحرارة الزائدة (Overtemperature Protection)

لو رجعنا إلى الفصل الثاني (2.3، 2.4)، تذكرنا أن كفاءة التوربين الغازي وقدرته ترتفعان كلما ازدادت درجة حرارة دخول التوربين (TIT — Turbine Inlet Temperature). وهذا يخلق إغراء دائمًا — من ناحية التصميم والتشغيل — للاقتراب من أقصى حد حراري ممكن. لكن هذه الحرارة نفسها هي أكبر عدو لعمر الشفرات (شرحناه في الفصل الخامس، 5.4): فكل زيادة بسيطة فوق الحد التصميمي تقلّص عمر الشفرة بشكل كبير جدًا وغير خطي. فالحماية من الحرارة الزائدة هي بالضبط خط الدفاع الذي يمنع «إغراء الأداء» من أن يتحول إلى تدمير فعلي للمكوّنات الساخنة.

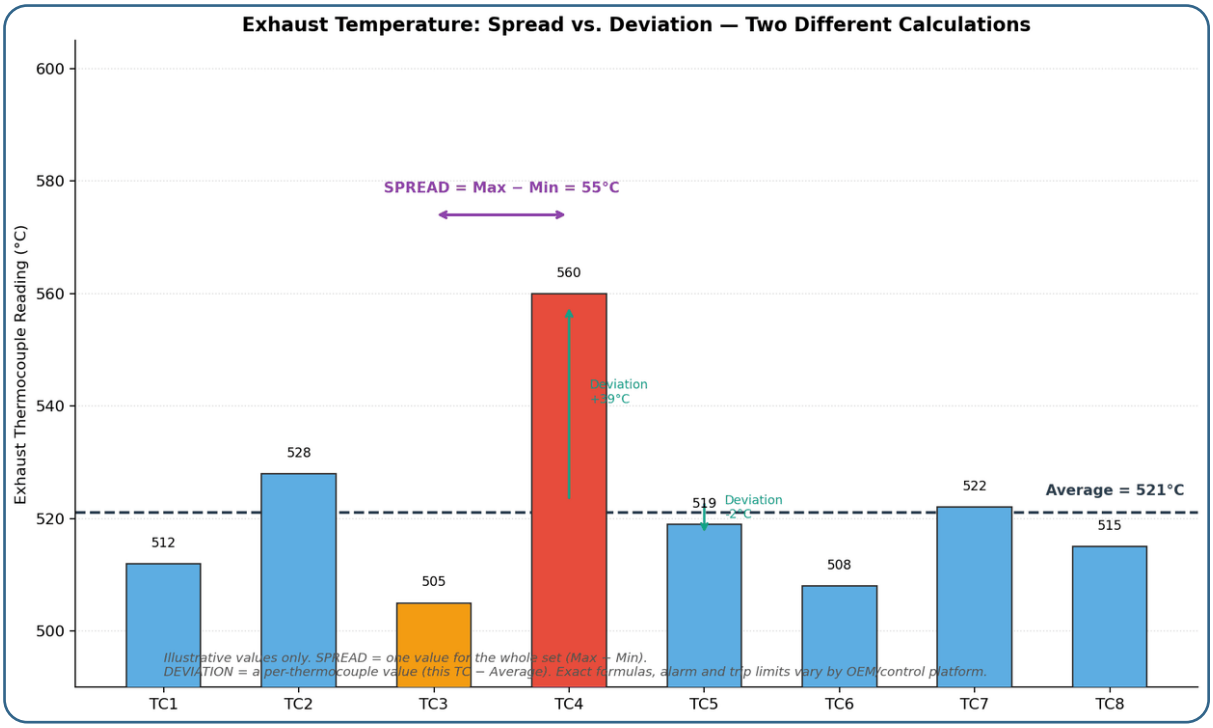
مشكلة عملية أولًا — كيف نقيس **TIT** أصلًا؟ من واقع الميدان، القياس المباشر لحرارة دخول التوربين شبه مستحيل عمليًا في معظم التصاميم: فالحساس نفسه لا يتحمل هذه الحرارة القصوى لمدة طويلة، وموقعه (مباشرة بعد غرفة الاحتراق) بيئة قاسية جدًا. والحل العملي المعتمد في الصناعة هو قياس حرارة العادم **(Exhaust Temperature)** بدلًا منها — وهي أقل بكثير وقابلة للقياس بثرموكابلات عادية — ثم حساب TIT رياضيًا من خلال علاقة معروفة بين حرارة العادم، وضغط تفريغ الضاغط (Compressor Discharge Pressure)، والسرعة. ويتكرر هذا الحساب باستمرار أثناء التشغيل، وهو الأساس الذي تُبنى عليه معظم قرارات الحماية الحرارية.

التكرار **(Redundancy)** بفلسفة القسم **7.1** نفسها**:** لا يُعتمد على ثرموكابل واحد أبدًا. فيُركَّب عدد كبير من الثرموكابلات (غالبًا 12 إلى 18 أو أكثر حسب حجم الوحدة) موزّعة بشكل دائري حول مقطع العادم، وتُعالَج قراءاتها بثلاث حسابات متكاملة — وهذه نقطة مهمة جدًا يجب توضيحها بدقة لأن كثيرًا من المهندسين يخلطون بينها:

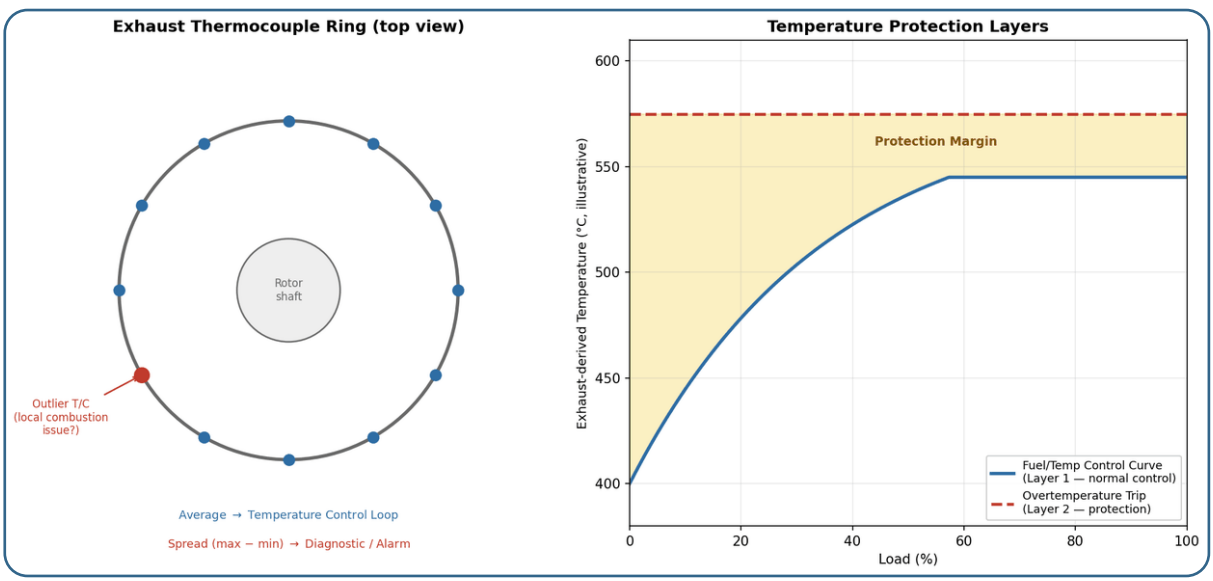
- المتوسط **(Average):** متوسط كل القراءات يُستخدم كأساس لحلقة التحكم بالحرارة أثناء التشغيل الطبيعي — وهو المتوسط نفسه الذي يحدد كمية الوقود المسموح بها ضمن منحنى التحكم الحراري، وهو أيضًا الأساس الذي تُبنى عليه قرارات القطع الحراري (Trip) في معظم الأنظمة — **لا قراءة ثرموكابل واحد**.
- الفارق **(Spread):** قيمة **واحدة تخص المجموعة كلها** — الفرق بين أعلى وأقل قراءة بين كل الثرموكابلات في لحظة معينة. ويعكس مدى «تماثل» الاحتراق حول محيط غرف الاحتراق ككل.
- الانحراف **(Deviation):** قيمة **مستقلة لكل ثرموكابل على حدة** — الفرق بين قراءة ثرموكابل معيّن والمتوسط العام (أو أحيانًا القيمة الوسيطة Median حسب النظام). تُستخدم لتحديد **أي ثرموكابل بالذات** هو مصدر الشذوذ، لا مجرد «وجود شذوذ».

لا تخلط بين **Spread** وDeviation**:** رغم أن الاثنين يقيسان الفكرة العامة نفسها (عدم تجانس قراءات العادم)، إلا أنهما مختلفان رياضيًا وعمليًا: فSpread رقم واحد يصف حالة المجموعة، بينما Deviation رقم مستقل لكل حساس. وبعض أنظمة التحكم (حسب الشركة الصانعة ومنصة التحكم) تعتمد فقط على Spread كحد إنذار/قطع، وبعضها يحسب Deviation لكل ثرموكابل بشكل منفصل ويستخدمه لاستبعاد (Exclude/Vote-out) ثرموكابل واحد شاذ من حساب المتوسط تلقائيًا بدلًا من إيقاف الوحدة كلها بسبب حساس واحد معطوب — بينما لو تجاوز عدد كافٍ من الثرموكابلات حد الانحراف في الاتجاه نفسه وفي الوقت نفسه، فهذا مؤشر على مشكلة احتراق فعلية لا على عطل حساس. التعريف الدقيق، طريقة الحساب، وحدود الإنذار/القطع **(Alarm/Trip Limits)** لكل من **Spread** وDeviation تختلف فعليًا حسب تصميم التوربين والشركة الصانعة ونظام التحكم — فلا تفترض أن رقمًا معينًا (مثلًا 65°م) عام على كل الأنظمة؛ ارجع دائمًا إلى منطق الحماية الخاص بوحدتك.

كيف تميّز الأنظمة الحقيقية بين «حساس معطوب» و«مشكلة احتراق فعلية»؟ هذه نقطة عملية دقيقة تستحق التوضيح: أنظمة الحماية المتقدمة لا تكتفي عادة بفارق واحد بسيط (أعلى ناقص أقل)، بل تحسب **أكثر من فارق بمستويات مختلفة** في اللحظة نفسها — مثلًا فارق بين الأعلى وأقل قراءة، وفارق آخر بين الأعلى وثاني أقل قراءة، وثالث بين الأعلى وثالث أقل قراءة — كل واحد بحد سماحية مختلف. والفكرة أن الحساس الواحد الفاشل عادة «يسقط» إلى قيمة متطرفة منخفضة جدًا بمفرده، بينما مشكلة الاحتراق الحقيقية (فوهة وقود مسدودة جزئيًا مثلًا) تُبرِّد **منطقة كاملة** من محيط العادم، فتظهر كقراءتين أو أكثر منخفضتين **متجاورتين فيزيائيًا** حول محيط العادم في الوقت نفسه. لذلك تضيف بعض الأنظمة فحص «تجاور» (Adjacency Check) بين أدنى القراءات كشرط إضافي قبل إصدار قطع حراري كامل — ففارق بسيط في ثرموكابل واحد بعيد عن بقية الثرموكابلات المنخفضة يُعامَل غالبًا كاحتمال عطل حساس (إنذار فقط)، بينما فارق كبير مع تجاور فيزيائي واضح يُعامَل كمشكلة احتراق حقيقية (قطع). وهذا مثال جيد على أن «التفاصيل الدقيقة تختلف حسب الشركة الصانعة» ليست مجرد تحذير عام — فالفلسفة الهندسية وراءها فعلية ومدروسة.



الشكل 7.4 — الفرق بين Spread وDeviation: الأول (البنفسجي) يقيس الفارق بين أعلى وأقل قراءة بكل المجموعة، والثاني (الأخضر) يقيس انحراف كل ثرموكابل عن المتوسط العام على حدة. القيم هنا توضيحية فقط.



الشكل 7.5 — يسار: توزيع الثرموكابلات حول محيط العادم، مع توضيح استخدام المتوسط للتحكم والانحراف للتشخيص المبكر. يمين: طبقتا الحماية الحرارية — منحنى التحكم الطبيعي، ثم قاطع تجاوز الحد بهامش أمان بينهما.

كيف تُستخدم هذه القيم الثلاث عمليًا عبر النظام كله (ولخصنا هذا لأن السؤال يتكرر كثيرًا: أين بالضبط تدخل Spread وDeviation في التحكم؟):

- **التحكم بالوقود والحمل (9.2):** المتوسط وحده هو الذي يدخل في حلقة التحكم الحراري العادية ويحدد كمية الوقود المسموحة — أما Spread وDeviation فلا يتحكمان بكمية الوقود مباشرة في التشغيل الطبيعي، لكنهما قد يفرضان تقييدًا على الحمل (Load Runback) لو تجاوزا حدًا معينًا كإجراء وقائي قبل الوصول إلى قطع كامل.
- **الإنذارات والحماية (هذا القسم، و7.7):** Spread وDeviation عادة يُستخدمان معًا — إنذار مبكر (Pre-alarm) عند تجاوز حد أول، ثم قطع (Trip) عند حد أعلى، غالبًا بشرط استمرار التجاوز لفترة زمنية معينة (Time Delay) لتفادي الإنذارات الكاذبة من تذبذب لحظي.
- **مراقبة الأداء (8.5):** اتجاه Spread وAverage معًا بمرور الوقت (Trending) من أهم أدوات تقييم حالة الاحتراق طويلة المدى — فالارتفاع التدريجي في الـSpread يستحق المتابعة حتى لو لم يبلغ حد الإنذار بعد.
- **التشخيص واستكشاف الأعطال (10.3):** حين يرتفع Spread فجأة، يكون Deviation لكل ثرموكابل على حدة هو الأداة التي تحدد أي ثرموكابل أو أي منطقة بالضبط هي مصدر المشكلة — راجع سيناريو 10.3 للتفاصيل الكاملة.

منطق الحماية نفسه يتبع مبدأ الطبقات ذاته من القسم 7,1:

الطبقة الأولى — منحنى التحكم الحراري: جزء من حلقة التحكم العادية (6.5)، يحدد كمية الوقود المسموحة عند كل ظرف تشغيل بحيث لا تتجاوز TIT المحسوبة الحد التصميمي. وهذه طبقة «تحكم» أكثر منها «حماية» — فهي تمنع الوصول إلى الحد الأقصى أصلًا في التشغيل الطبيعي.

الطبقة الثانية — القطع عند تجاوز الحد **(Overtemperature Trip):** لو تجاوزت الحرارة المحسوبة (سواء من العادم أو TIT المحسوبة) حدًا أعلى محددًا مسبقًا — بسبب عطل في حلقة التحكم، أو تغيّر مفاجئ في ظروف التشغيل، أو مشكلة احتراق — يصدر أمر قطع فوري للوقود، بشكل مستقل قدر الإمكان عن حلقة التحكم العادية (بمبدأ الاستقلالية نفسه الذي شرحناه في 7.1 و7.2).

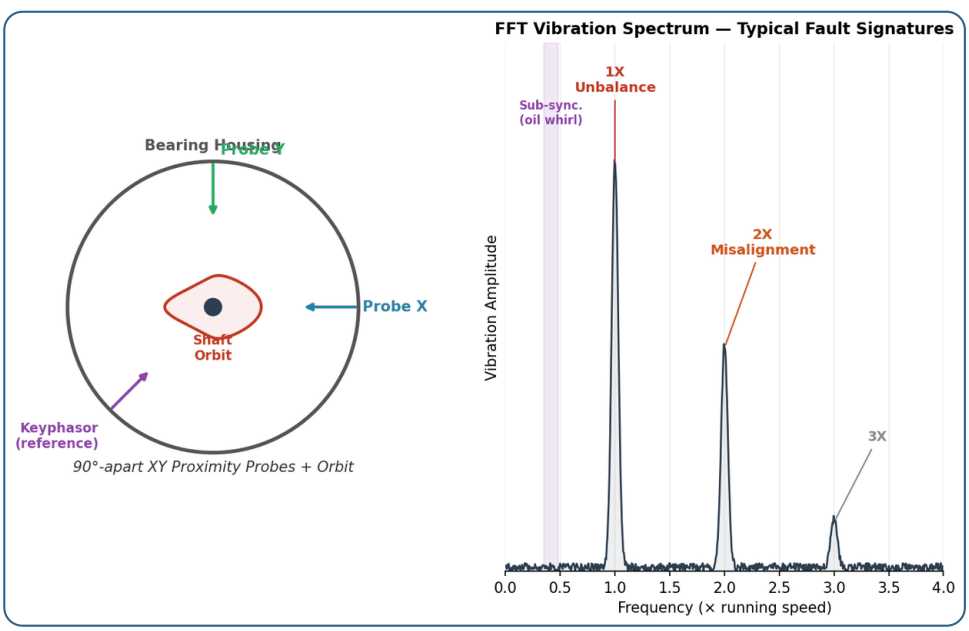
> **من واقع الميدان:** تنظيف ثرموكابلات العادم ومعايرتها بند صيانة دوري مهم — فثرموكابل واحد «ميت» أو ذو قراءة غير دقيقة قد يشوّه المتوسط الكلي (فيجعل حلقة التحكم تسمح بحرارة أعلى من اللازم دون أن تشعر)، أو يشوّه حساب الفارق أو الانحراف (فيعطي إنذارات كاذبة متكررة). والفحص الدوري لسلامة كل ثرموكابل على حدة، لا مجرد التأكد من أن «المتوسط يبدو معقولًا»، من العادات التي توفر مشاكل كبيرة لاحقًا.

7.4 مراقبة الاهتزاز (Vibration Monitoring)

يختلف الاهتزاز عن السرعة الزائدة والحرارة الزائدة في نقطة مهمة: فهو غالبًا أول عرض **(symptom)** يظهر لمشاكل ميكانيكية كثيرة قبل أن تتطور إلى عطل كبير — عدم توازن، سوء محاذاة، تلف محمل، تشقق شفرة، مشكلة في العمود نفسه. ومن واقع الميدان، مراقبة الاهتزاز ليست مجرد «نظام حماية يوقف الوحدة عند القطع»، بل أداة تشخيصية يومية تُستخدم باستمرار — ولذلك تستحق وقفة أطول من باقي أقسام هذا الفصل.

أنواع الاهتزاز التي نراقبها:

- الاهتزاز الشعاعي **(Radial / Lateral Vibration):** حركة العمود عموديًا على محور دورانه، في أي اتجاه ضمن المستوى العمودي على العمود. وهذا النوع هو الأكثر شيوعًا في المراقبة، وهو المؤشر الأساسي لعدم التوازن وسوء المحاذاة ومشاكل المحامل.
- الاهتزاز المحوري **(Axial / Thrust Vibration):** حركة العمود في اتجاه محوره نفسه (في اتجاه الدفع المحوري نفسه الذي شرحناه في محمل الدفع، الفصل الخامس 5.5). وهو أقل شيوعًا في المراقبة اليومية، لكنه مهم جدًا لأنه مؤشر مباشر على مشاكل في محمل الدفع (Thrust Bearing) — وتآكل هذا المحمل تحديدًا من أخطر أعطال العمود لأنه يسمح للأجزاء الدوّارة بملامسة الأجزاء الثابتة.



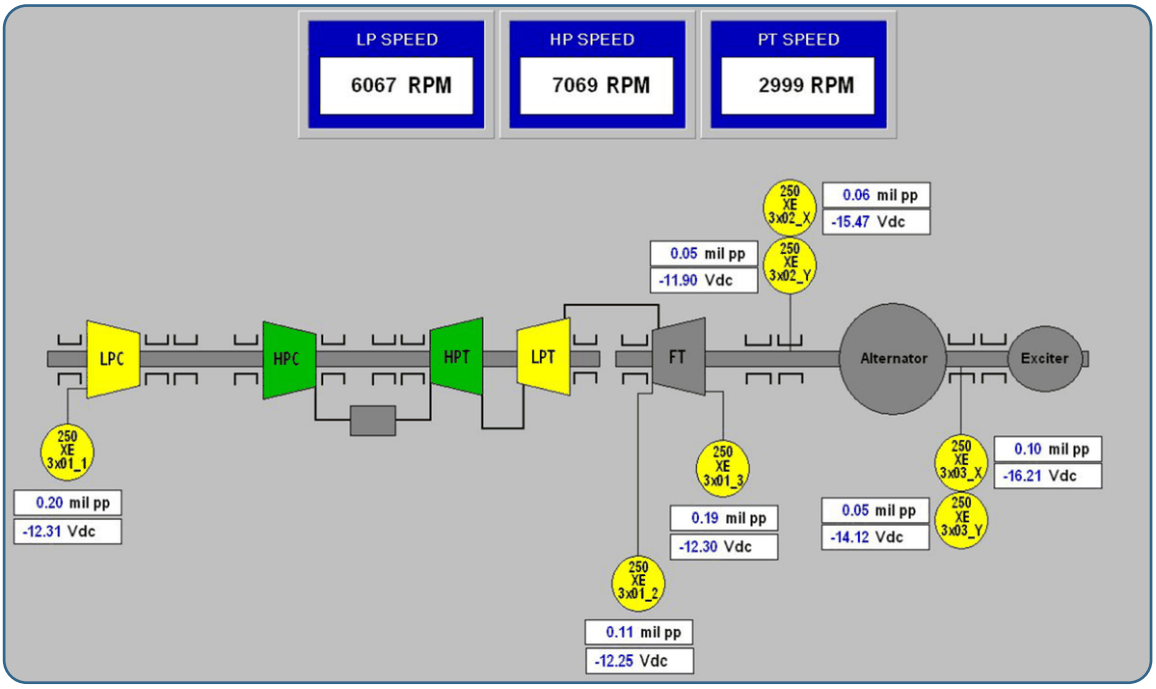
الشكل 7.6 — مثال حقيقي لشاشة مراقبة اهتزاز على مستوى قطار العمود بالكامل: كل محمل مزوّد بحساس قرب (أو أكثر) يعرض قراءة لحظية (Mil pp) بالتوازي مع قراءة السرعة لكل عمود دوّار. هذا النوع من الشاشات هو «لوحة القيادة» التي يراقبها المشغّل والمهندس المسؤول باستمرار أثناء التشغيل.

طرق القياس — نوعان أساسيان من الحساسات، كل واحد يقيس شيئًا مختلفًا فعليًا:

1. حساسات القرب **(Proximity Probes / Eddy Current Probes):** حساسات لا تلامسية (Non-Contact) تُركّب قريبة جدًا من سطح العمود نفسه (بفجوة هوائية دقيقة، عادة عند مستوى المحامل)، وتقيس **الإزاحة الفعلية للعمود** (Shaft Displacement) نسبة إلى هيكل المحمل الثابت — أي «كم تحرك العمود فعليًا داخل فراغ المحمل». وهذه الحساسات هي المعيار المعتمد في معظم المكائن الصناعية الحرجة (توربينات، ضواغط، توربينات بخارية) لأن الفراغ بين العمود والمحمل صغير جدًا، وأي حركة زائدة تعني خطر تلامس مباشر. والقياس بوحدة **Mils** (جزء من الألف من البوصة) أو أحيانًا **ميكرومتر**. ومن واقع الميدان، هذا النوع من الحساسات هو الذي يُربط عادة مباشرة بمنطق القطع (Trip)، لأنه يقيس بالضبط ما نخشاه: هل اقترب العمود من ملامسة المحمل الثابت أم لا.

- حساس مزدوج **XY (شعاعي):** يُركَّب حساسان متعامدان (X وY، بزاوية 90 درجة أحدهما على الآخر) في المستوى المحوري نفسه، بحيث يمكن رسم مسار حركة العمود **(Shaft Orbit)** — رسم بياني يبيّن الشكل الفعلي الذي يتحرك فيه مركز العمود داخل فراغ المحمل. وشكل الـ Orbit نفسه أداة تشخيصية قوية: فالدائرة المنتظمة تدل على عدم توازن بسيط، والشكل «الموزي» أو البيضاوي المفلطح يدل غالبًا على مشكلة محاذاة أو صلابة غير متساوية في الدعامات، والأشكال المعقدة (Figure-8، أو Orbit غير مستقر) تدل على مشاكل أعقد مثل الاحتكاك الداخلي أو عدم استقرار طبقة الزيت (Oil Whirl/Whip، في محامل الفيلم الزيتي التي شرحناها في الفصل الخامس 5.5).
- حساس المرجع الطوري **(Keyphasor):** حساس قرب إضافي موجَّه إلى علامة مرجعية واحدة على العمود (مثل أخدود أو نتوء صغير)، يعطي نبضة واحدة كل دورة كاملة. ووظيفته الأساسية: تحديد الطور **(Phase)** — أي «عند أي زاوية من دورة العمود حدثت أعلى قراءة اهتزاز» — وهذه المعلومة ضرورية جدًا لعمليات موازنة العمود (Balancing) في الموقع، ولتحديد نوع المشكلة بدقة (عدم توازن مفرد مقابل مشكلة في مرحلتين مختلفتين من العمود مثلًا).

2. حساسات التسارع **(Accelerometers):** تُركّب على هيكل المحمل أو جسم الوحدة نفسه (لا على العمود مباشرة)، وتقيس **تسارع الاهتزاز المنقول عبر الهيكل** بوحدة g أو يُحوَّل أحيانًا إلى سرعة اهتزاز (Velocity، وحدة mm/s أو inch/s). وهذا النوع أرخص وأسهل تركيبًا من حساسات القرب (لأنه لا يحتاج فجوة هوائية دقيقة معايَرة)، ويُستخدم غالبًا في المحامل من نوع Rolling Element (الكرات/الأسطوانات، شرحناها في الفصل الخامس 5.5) التي لا تناسبها حساسات القرب بكفاءة محامل الفيلم الزيتي نفسها. وحساسية التسارع للترددات العالية تجعله مفيدًا جدًا لكشف مشاكل مبكرة في المحامل نفسها (تآكل في مسار الكرة، تلف في القفص الداخلي) قبل أن تظهر بوضوح على قياس الإزاحة.



الشكل 7.7 — يسار: حساسا قرب متعامدان (X وY) حول العمود يرسمان مسار حركته (Shaft Orbit)، مع حساس المرجع الطوري (Keyphasor) لتحديد زاوية الطور. يمين: مخطط طيفي (FFT) نموذجي يبيّن بصمات أعطال شائعة — قمة عند 1X (عدم توازن)، قمة عند 2X (سوء محاذاة)، ومنطقة تردد دون التزامني (Sub-synchronous) المرتبطة بعدم استقرار طبقة الزيت.

التحليل — ليس مجرد «رقم واحد»، وإنما نمط:

القراءة اللحظية للاهتزاز (رقم واحد يمثل «مقدار الاهتزاز الكلي») مفيدة للحماية السريعة (تجاوز حد = قطع)، لكنها لا تكفي للتشخيص. ومن واقع الميدان، التحليل الحقيقي يعتمد على:

- الموجة الزمنية **(Time Waveform):** الشكل الخام لحركة الاهتزاز عبر الزمن. مفيد لملاحظة أحداث غير منتظمة (طرقات، احتكاك متقطع) لا تظهر بوضوح في التحليل الترددي.
- التحليل الطيفي **(FFT Spectrum Analysis):** تحويل الموجة الزمنية إلى مخطط يبيّن «أي ترددات موجودة في الاهتزاز وبأي قوة» — وهذا أهم أداة تشخيصية في مجال الاهتزازات كله. ولكل نوع عطل «بصمة» ترددية معروفة نسبة إلى سرعة دوران العمود (1X = مرة واحدة كل دورة):
  - **1X** (تردد الدوران الأساسي)**:** غالبًا عدم توازن (Unbalance) — كتلة زائدة في جهة من العمود.
  - **2X** (ضعف سرعة الدوران)**:** غالبًا سوء محاذاة (Misalignment) بين العمود والحمل المتصل به (المولد مثلًا)، أو ارتخاء ميكانيكي.

- **ترددات عالية جدًا وغير منتظمة:** غالبًا مشكلة في محمل (تآكل في مساراته الداخلية)، أو مشكلة في التروس إن وُجدت.
- تردد دون التزامني **(Sub-synchronous)**، وعادةً قرابة **0.4–0.5** من سرعة الدوران: غالبًا عدم استقرار طبقة الزيت (Oil Whirl/Whip) في محامل الفيلم الزيتي — علامة تحذيرية مهمة تستحق تدخلًا سريعًا.
- مقارنة بخط الأساس **(Baseline Trending):** المقارنة الأهم عمليًا ليست «هل الرقم عالٍ أم لا بشكل مطلق»، وإنما «هل تغيّر بشكل ملحوظ عن سلوك الوحدة الطبيعي المعروف تاريخيًا». فوحدة عمرها 15 سنة قد يكون مستوى اهتزازها الطبيعي أعلى قليلًا من وحدة جديدة، والمهم مراقبة الاتجاه **(Trend)** بمرور الوقت أكثر من القيمة اللحظية وحدها — فالارتفاع التدريجي المستمر مؤشر أقوى من قفزة مفاجئة ثم استقرار.

منطق الحماية (بفلسفة الطبقات نفسها من 7.1): عادة مستويان — **Alert/Alarm** (تنبيه، تستمر الوحدة بالعمل لكن يبدأ تتبع دقيق ومراجعة)، و**Danger/Trip** (قطع فوري، يعتمد عادة على قراءتين متتاليتين من حساسين مختلفين في المستوى نفسه — Voting بمبدأ 7.1 نفسه — لتفادي إيقاف الوحدة بسبب عطل في حساس واحد فقط). والمعايير العالمية (مثل سلسلة API 670 التي ذكرناها في 7.2) تحدد بدقة أماكن تركيب الحساسات، وعددها الأدنى لكل محمل، ومنطق التصويت المطلوب.

> **من واقع الميدان:** أكثر الأخطاء شيوعًا في مراقبة الاهتزاز هو التعامل معه كـ«مؤشر تحذير أحمر/أخضر» فقط، بينما قيمته الحقيقية في التحليل الترددي والاتجاه عبر الزمن. ففريق الصيانة الذي يراجع مخططات FFT بشكل دوري (لا عند ارتفاع القراءة فحسب) غالبًا يكتشف مشاكل ناشئة — بداية تآكل محمل، أو ارتخاء بسيط في قاعدة التثبيت — قبل أسابيع أو حتى شهور من وصولها إلى مرحلة الخطر الفعلي.

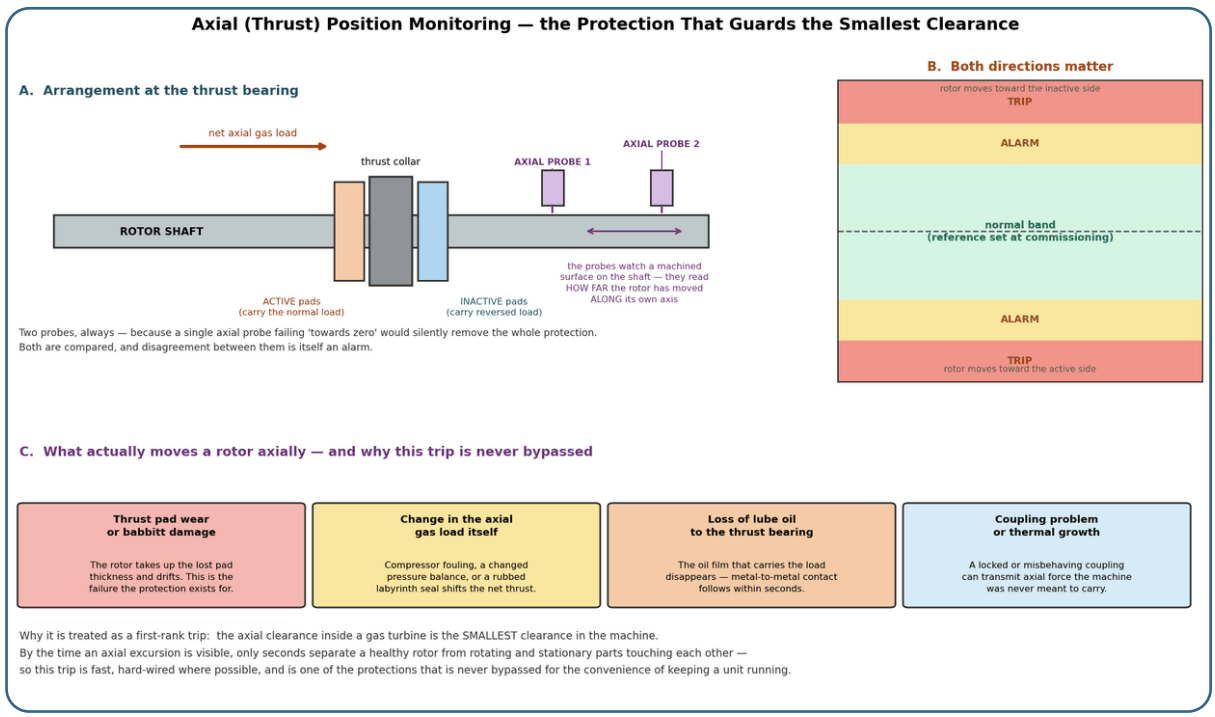
مراقبة الموضع المحوري وحماية الدفع (Axial / Thrust Position Protection)

ذكرنا في الأعلى **الاهتزاز المحوري** بسطرين، وأشرنا في الفصل الخامس (5.5) إلى محمل الدفع (Thrust Bearing) ووصفناه بأنه «من أكثر النقاط حساسية في أي توربين غازي». وهذه النقطة تستحق الآن قسمًا مستقلًا — لأنها ليست مجرد نوع آخر من مراقبة الاهتزاز، بل **قياس مختلف تمامًا يحمي من عطل مختلف تمامًا**.

تمييز أساسي أولًا: الاهتزاز المحوري ≠ الموضع المحوري

- الاهتزاز المحوري **(Axial Vibration)**: قياس **تذبذب** متكرر حول موضع ما.
- الموضع المحوري **(Axial Position / Thrust Position)**: قياس **مكان** العمود على طول محوره نسبةً لمرجع ثابت — أي «كم انزاح الروتور إلى الأمام أو إلى الخلف».

وحماية الدفع تعتمد على **الثاني**، لا الأول. فالروتور قد ينزاح محوريًا بمقدار خطير جدًا **دون أي تذبذب** — وهذا بالضبط ما يحدث عند تآكل وسادات محمل الدفع: انزياح هادئ، تدريجي، وصامت تمامًا ما لم يكن هناك من يقيس الموضع نفسه.



الشكل 7.8 — يسار: ترتيب محمل الدفع ومجسّا الموضع المحوري. يمين: مناطق الإنذار والقطع **بالاتجاهين**. أسفل: أسباب الانزياح المحوري، ولماذا لا يُتجاوَز هذا القاطع.

لماذا يوجد دفع محوري أصلًا؟

لأن الضاغط وقسم التوربين يعملان بفوارق ضغط كبيرة على وجوه الأقراص والشفرات، فينتج **حمل محوري صافٍ** يدفع الروتور بأحد الاتجاهين. محمل الدفع هو المكوّن الوحيد الذي يمنع هذا الحمل من دفع الروتور حتى يلامس الأجزاء الثابتة. وهو يعمل بنفس مبدأ الفيلم الزيتي (5.5): طوق دوّار (Thrust Collar) على العمود، ووسادات ثابتة على جانبيه يفصلها عن الطوق غشاء زيت رقيق جدًا.

الوسادات الفعّالة وغير الفعّالة (Active / Inactive Pads)

الوسادات على الجانب الذي يقع عليه الحمل الطبيعي تُسمّى الفعّالة **(Active)**، والوسادات على الجانب المقابل تُسمّى غير الفعّالة **(Inactive)**. وجود الجانب الثاني ليس ترفًا: هناك حالات تشغيلية ينعكس فيها اتجاه الحمل المحوري مؤقتًا — أثناء بعض الانتقاليات، أو عند تغيّر توزيع الضغوط الداخلية. ولهذا:

> **حماية الموضع المحوري تعمل بالاتجاهين معًا** — إنذار وقطع عند الانزياح نحو الجانب الفعّال، وإنذار وقطع عند الانزياح نحو الجانب غير الفعّال. الاكتفاء بمراقبة اتجاه واحد خطأ تصميمي شائع.

كيف يُقاس؟

بمجسّات قرب (Proximity Probes، نفس تقنية 7.4) موجّهة نحو سطح مُجهَّز على العمود، لكنها مركَّبة لتقرأ الحركة **على طول** المحور لا العمودية عليه. وتُركَّب دائمًا **بشكل مزدوج**، والسبب جوهري: مجس واحد يتعطّل وقراءته تنجرف نحو الصفر يعني **اختفاء الحماية بصمت** — يبدو كل شيء طبيعيًا بينما الحماية غير موجودة أصلًا. ولهذا يُقارَن المجسّان دائمًا، **والاختلاف بينهما بحد ذاته إنذار** (Deviation Alarm).

نقطة عملية مهمة جدًا: المرجع الصفري (Zero Reference)

القراءة ليست قيمة مطلقة، بل **إزاحة عن مرجع يُضبط أثناء التشغيل التجريبي** (17.1) والوحدة ساكنة وبوضع معلوم. وهذا يعني:

- أي عمل على المحمل أو إعادة تجميع للروتور **يستوجب إعادة ضبط المرجع وتوثيقها** — وإلا صارت كل القراءات اللاحقة مقيسة من نقطة خاطئة.
- عند مقارنة قراءات قبل وبعد فحص كبير (8.4)، **تأكد من أن المرجع نفسه لم يتغيّر** قبل أن تستنتج أن الروتور تحرّك.

ما الذي يحرّك الروتور محوريًا؟

- تآكل وسادات محمل الدفع أو تلف طبقة البِبت **(Babbitt)**: الروتور "يأخذ" السماكة المفقودة وينزاح. وهذا هو العطل الذي وُجدت الحماية أساسًا من أجله.
- **تغيّر الحمل المحوري نفسه**: تلوث الضاغط (8.5)، أو اختلال في توازن الضغوط الداخلية، أو احتكاك في ختم متاهي (Labyrinth Seal) يغيّر الحمل الصافي.

- **فقدان زيت التزييت عن محمل الدفع** (6.1): يختفي الغشاء الحامل للحمل، ويحدث تلامس معدني خلال ثوانٍ. ولهذا يرتبط هذا القاطع منطقيًا بحماية انخفاض ضغط الزيت.
- **مشكلة في القفلة أو نمو حراري غير متوقع**: قفلة عالقة قد تنقل قوة محورية لم تُصمَّم المعدة لتحملها.

لماذا يُعامَل هذا القاطع كقاطع من الدرجة الأولى؟

لأن **الخلوص المحوري داخل التوربين الغازي هو أصغر خلوص في المعدة كلها**. فعند ظهور انزياح محوري ملحوظ، لا يفصل بين روتور سليم وبين تلامس الأجزاء الدوّارة بالثابتة سوى ثوانٍ. ولهذا يكون هذا القاطع سريعًا، ويُنفَّذ بمسار سلكي مستقل حيثما أمكن (راجع الحماية الاحتياطية المستقلة في 7.8)، وهو من القواطع التي **لا تُتجاوَز** لأجل إبقاء الوحدة تعمل — مهما كان الضغط التشغيلي.

حماية مرتبطة: انعكاس اتجاه الدوران (Reverse Rotation)

نقطة صغيرة لكنها مهمة، وترتبط بمنظومة المراقبة نفسها. فبعد الإيقاف، أو عند فشل بدء تشغيل، قد يبدأ العمود بالدوران **في الاتجاه المعاكس** — بفعل تدفق عكسي للغاز، أو بسبب صمام غير محكم الإغلاق في التطبيقات التي تدير ضاغطًا (3.4). والخطر هنا مزدوج: بعض مضخات الزيت المعلّقة على العمود لا تعمل في الاتجاه المعاكس، ومحمل الدفع نفسه غير مصمَّم لتحمّل الحمل في الاتجاه المعاكس لفترة طويلة.

الكشف يتم بحسّاسات سرعة قادرة على تمييز **اتجاه** الدوران (لا مقداره فقط)، والاستجابة عادةً إنذار فوري مع منع أي محاولة بدء حتى تُعالَج الحالة. وهي أيضًا سبب مباشر لأهمية آلية الدوران البطيء (Turning Gear) بعد الإيقاف — الذي نشرحه ضمن تسلسل الإيقاف (9.3).

مستويات الاهتزاز: كيف تُحدَّد حدود الإنذار والقطع؟

سؤال يتكرر كثيرًا ميدانيًا: **من أين جاءت هذه الأرقام؟** ومن أين نعرف أن قراءة معيّنة «مرتفعة»؟

الإجابة الأمينة أن الحدود تأتي من **ثلاثة مصادر مجتمعة**، لا من مصدر واحد:

1. حدود المصنّع **(OEM Limits)**: وهي المرجع الأول والأعلى سلطة، لأنها مبنية على الخلوصات الفعلية للتصميم وعلى نتائج اختباراته. ولا تُعدَّل هذه الحدود بقرار محلي.
2. **المعايير الدولية**: توفّر إطارًا عامًا لتصنيف شدة الاهتزاز وتقييم حالة المعدة — أشهرها سلسلة **ISO 20816** (وسابقتها ISO 10816 / ISO 7919) لتقييم اهتزاز المكائن، و**API 670** (راجع ملحق د) الذي

يحدد متطلبات أنظمة حماية المكائن نفسها: أماكن المجسّات، عددها الأدنى، ومنطق التصويت المطلوب. وهذه المعايير تصنّف الحالة عادةً ضمن مناطق (من «معدة جديدة بحالة ممتازة» إلى «غير مقبول للتشغيل المستمر») بدلًا من رقم واحد مطلق.

3. خط الأساس الخاص بالوحدة نفسها **(Machine Baseline)**: وهو — من واقع الميدان — **أهمها عمليًا للتشخيص**. وحدة عمرها خمس عشرة سنة قد يكون مستواها الطبيعي أعلى قليلًا من وحدة جديدة، وكلاهما سليم. المهم هو **الانحراف عن سلوك هذه الوحدة بالذات**.

التمييز الحاسم بين الاستخدامين:

- للحماية **(Trip)**: تُستخدم حدود مطلقة ثابتة — لأن الحماية يجب أن تكون قرارًا لا يعتمد على تفسير بشري لحظي.
- للتشخيص **(Diagnostics)**: تُستخدم المقارنة بخط الأساس والاتجاه عبر الزمن — لأن **ارتفاعًا بمقدار الضِعف عن خط أساس منخفض قد يكون أخطر إشارةً** من قراءة ثابتة أعلى منه بقليل ومستقرة منذ سنوات.

وأخيرًا نقطة تحفظ من خطأ شائع: لا تُقارَن قراءة من مجس قرب (إزاحة، بالميلز أو الميكرومتر) بقراءة من حسّاس تسارع (سرعة اهتزاز، بـ mm/s) — فهما كميتان فيزيائيتان مختلفتان، ولكل منهما حدوده ومعياره. والخلط بينهما عند مقارنة وحدتين أو عند قراءة تقرير خارجي مصدر شائع لاستنتاجات خاطئة تمامًا.

7.5 مراقبة اللهب والاحتراق (Flame Monitoring)

لو رجعنا إلى تسلسل بدء التشغيل (الفصل السادس، 6.4)، ذكرنا أن مرحلة «الإشعال» (Ignition) يجب أن يتأكد فيها النظام من أن اللهب اشتعل فعليًا خلال نافذة زمنية محددة، وإلا أصدر «فشل إشعال» (Failure to Light) وأوقف التسلسل. وهذه بالضبط وظيفة مراقبة اللهب — لكن القصة لا تنتهي عند الإشعال، بل تستمر طوال فترة تشغيل الوحدة.

لماذا هذه المراقبة حرجة جدًا؟ لو انطفأ اللهب أثناء التشغيل العادي (لأي سبب — تذبذب في الوقود، مشكلة هواء احتراق، عطل في حاقن) ولم يكتشف النظام الانطفاء بسرعة، استمر الوقود بالتدفق إلى غرفة الاحتراق بدون احتراق. وهذا الوقود غير المحترق يتجمع، وبعد فترة قصيرة جدًا قد يصل إلى تركيز خطر — ولو أعيد الإشعال بعدها (أو حتى وصل إلى جزء ساخن في المسار)، فقد تكون النتيجة انفجارًا داخل غرفة الاحتراق أو مسار العادم. لهذا السبب، «فقدان اللهب» (Loss of Flame / Flame-Out) من أسرع الحالات التي يجب أن يتصرف نظام الحماية تجاهها — عادة خلال أجزاء من الثانية.

كيف نكتشف وجود اللهب من الأساس؟ الطريقة المعتمدة في معظم التوربينات الغازية هي كاشفات اللهب البصرية **(Flame Detectors / Flame Scanners)** المركّبة مباشرة على كل غرفة احتراق (أو مجموعة فرعية منها)، وتعمل بمبدأ بسيط: اللهب نفسه يصدر إشعاعًا كهرومغناطيسيًا (ضوء) بطيف معيّن مختلف عن الإشعاع الحراري العادي للمعدن الساخن المحيط. وأكثر نوعين شيوعًا:

- كاشفات الأشعة فوق البنفسجية **(UV Detectors):** تكتشف الإشعاع فوق البنفسجي المميز لهب احتراق الهيدروكربونات، وهو طيف لا يصدره المعدن الساخن العادي — وهذا يعطيها تمييزًا واضحًا بين «لهب حقيقي» و«توهج معدن ساخن» (Hot Refractory Glow)، الذي قد يخدع أنواعًا أخرى من الكاشفات.
- كاشفات الأشعة تحت الحمراء **(IR Detectors):** تكتشف الإشعاع الحراري في الطيف تحت الأحمر. وهي أرخص وأمتن أحيانًا، لكنها أكثر عرضة للخلط بين «لهب حقيقي» و«توهج حراري» من أجزاء ساخنة مجاورة (ولهذا تُستخدم غالبًا بالتزامن مع منطق إضافي، أو مع كاشف UV، لتفادي القراءات الخاطئة).

التكرار والتصويت — فلسفة الفصل بالكامل نفسها (7.1): كل غرفة احتراق (أو كل قطاع في التصاميم ذات غرف الاحتراق المتعددة، راجع الفصل الخامس 5.3) مزوّدة عادة بأكثر من كاشف لهب واحد — لتفادي إعطاء أمر «فقدان لهب» كاذب بسبب عطل في كاشف واحد فقط (كاشف متسخ بالعادم، أو عطل إلكتروني). ومنطق القرار يعتمد عادة على **نسبة** من الكاشفات (مثلًا: إذا فقدت أغلبية الكاشفات إشارة اللهب، لا كاشف واحد فقط، صدر أمر القطع)، بمبدأ التصويت نفسه الذي شرحناه في 7.1.

حالة خاصة — التصاميم بغرف احتراق متعددة **(Can-Annular):** في التصاميم التي تضم عدة غرف احتراق منفصلة (شرحناها في الفصل الخامس، 5.3)، توجد أنابيب ربط بين الغرف (Cross-Fire Tubes أو Interconnector Tubes) وظيفتها نقل اللهب من الغرف المشتعلة إلى الغرف المجاورة أثناء الإشعال، بحيث لا نحتاج شمعة إشعال في كل غرفة على حدة. ومن واقع الميدان، تصبح مراقبة اللهب هنا أدق: فالنظام يحتاج أن يتأكد من أن الإشعال «انتشر» فعليًا إلى كل الغرف خلال الوقت المسموح، لا في أول غرفة أشعلت فيها الشمعة فحسب — فلو لم يصل اللهب إلى غرفة أو أكثر، فهذا يعني احتراقًا غير متساوٍ (وربما وقودًا غير محترق يتجمع في تلك الغرفة تحديدًا) حتى لو «بدت» الوحدة مشتعلة بشكل عام من زاوية القراءة الإجمالية.

منطق الحماية:

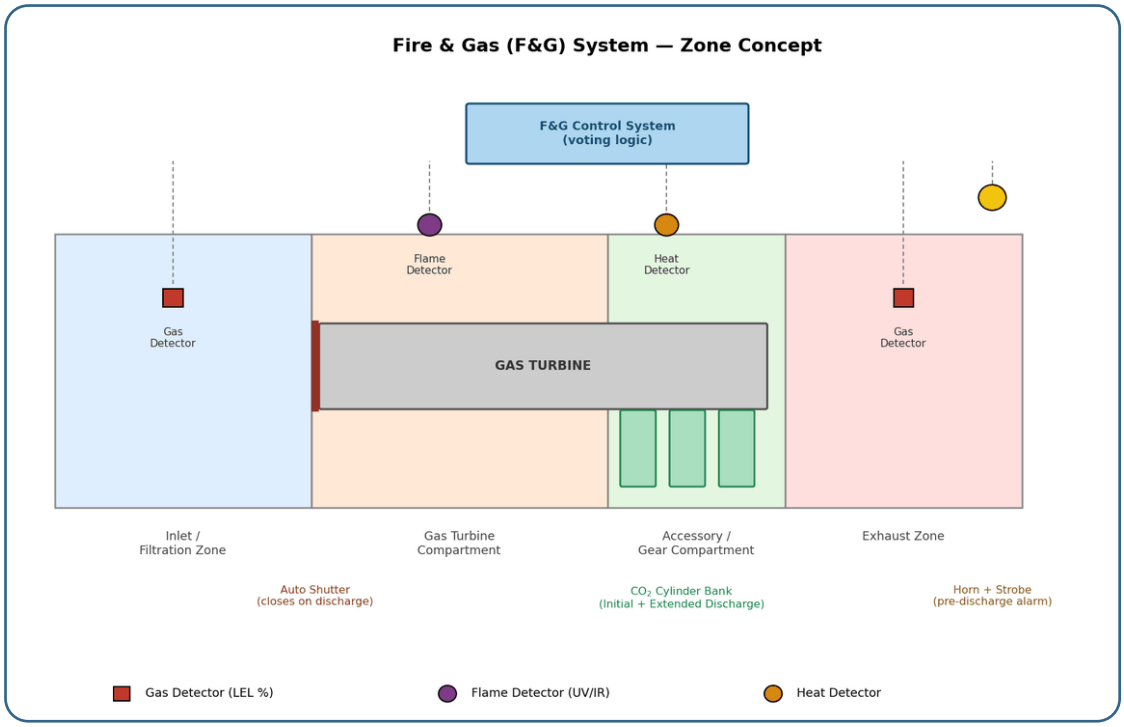
- **أثناء الإشعال (6.4):** إذا لم يتأكد وجود لهب خلال نافذة زمنية محددة بعد فتح صمام الوقود ← «فشل إشعال» (Failure to Light)، وقطع فوري للوقود، وعملية «تطهير» (Purge) قبل أي محاولة إشعال تالية — فلا يُعاد فتح الوقود مباشرة بدون تطهير أبدًا، تفاديًا لتراكم وقود غير محترق من المحاولة الفاشلة.
- **أثناء التشغيل العادي:** إذا فُقد اللهب على كل الكواشف المصوّتة (وفي بعض التصاميم على نسبة محددة منها) ← قطع فوري وشامل للوقود، بغض النظر عن حمل الوحدة وقت الحدث.

من واقع الميدان: كاشفات اللهب من أكثر العناصر التي تحتاج تنظيفًا ومعايرة دورية — فبيئة العادم مليئة بالسخام والغبار، وأي تراكم على عدسة الكاشف يقلل حساسيته تدريجيًا، وقد يصل الأمر إلى حالة «لا يرى اللهب رغم وجوده فعليًا» (False Loss of Flame) وإيقاف غير ضروري، أو الأخطر: تراكم بطيء يجعل الكاشف «يعتاد» على قراءة ضعيفة فيفوّت انطفاءً حقيقيًا. والفحص البصري الدوري لعدسات الكاشفات من أبسط بنود الصيانة الوقائية وأكثرها فائدة عمليًا.

7.6 نظام الحريق والغاز (Fire & Gas System)

ألمحنا إلى هذا النظام سريعًا في الفصل السادس (6.3) ضمن حديثنا عن التهوية، لكنه يستحق معاملة مستقلة هنا لأنه — من ناحية الحماية — نظام قائم بذاته، وله منطق تشغيل خاص مختلف تمامًا عن أنظمة الحماية التي شرحناها حتى الآن (سرعة، حرارة، اهتزاز، لهب الاحتراق الداخلي). فتلك الأنظمة كلها تراقب «صحة» التوربين نفسه من الداخل، بينما نظام الحريق والغاز (يُختصر غالبًا F&G) يراقب **سلامة البيئة المحيطة بالتوربين** — هل يوجد تسرب غاز قابل للاشتعال في المنطقة، وهل يوجد حريق فعلي في أي من الحيّزات (Compartments) المحيطة بالوحدة.

تقسيم المنطقة إلى حيّزات **(Zones):** يقسّم التصميم النموذجي محيط الوحدة إلى عدة حيّزات منفصلة، لكل واحد كاشفاته الخاصة ومنطق حمايته: حيّز التوربين نفسه (Gas Turbine Compartment)، وحيّز الملحقات (Accessory Compartment)، وحيّز ناقل الحركة/العتاد (Gear/Load Compartment)، وأحيانًا نفق أو مسار كابلات معين. وهذا التقسيم مهم لأنه يسمح للنظام بتحديد **موضع** المشكلة بدقة، وتطبيق إجراء الحماية على الحيّز المتأثر تحديدًا بدلًا من إيقاف كل شيء دفعة واحدة.



الشكل 7.9 — مفهوم عام لنظام الحريق والغاز: تقسيم الوحدة لحيّزات، كل حيّز مزوّد بكاشفات غاز/لهب/حرارة موصولة بمنطق تصويت مركزي، مع بنك أسطوانات CO_2 (تفريغ أولي + ممتد)، غالق تلقائي (Auto Shutter)، وإنذار صوتي/ضوئي مسبق قبل التفريغ.

كشف الغاز **(Gas Detection):** وظيفته اكتشاف أي تسرب غاز قابل للاشتعال (وقود غازي، أو غاز طبيعي من محيط المنشأة في التطبيقات النفطية/الغازية) قبل أن يصل تركيزه إلى نسبة خطرة. والمقياس المرجعي هنا هو الحد الأدنى للانفجار **(LEL — Lower Explosive Limit):** فالنظام يصدر عادة إنذارًا عند نسبة منخفضة من الـ LEL (مثلًا 20%) كتحذير مبكر، ويتخذ إجراء أكثر حدة (عادة إيقاف كهربائي للمعدات غير الآمنة في المنطقة، وتشغيل تهوية إضافية) عند نسبة أعلى (مثلًا 60%). وحساسات الكشف موزّعة بعناية في مسارات التهوية وداخل الحيّزات نفسها — خصوصًا عند مخارج قنوات التهوية، لأن الغاز المتسرب ينتقل مع تيار الهواء ويتجمع في نقاط معينة أسرع من غيرها.

كشف الحريق **(Fire Detection):** يعتمد على عدة أنواع كاشفات متكاملة، كل نوع يغطي سيناريو مختلف:

- كاشفات حرارية **(Heat Detectors):** تستجيب لارتفاع درجة الحرارة (إما بتجاوز حد ثابت، أو بمعدل ارتفاع سريع — Rate-Compensated). وهي مناسبة للحيّزات المغلقة التي تضم معدات ساخنة بطبيعتها، حيث قد يعطي كاشف اللهب البصري قراءات غير موثوقة.

- كاشفات لهب بصرية **(Flame Detectors, UV/IR):** بمبدأ كاشفات اللهب نفسه الذي شرحناه في 7.5، لكنها هنا موجهة نحو الحيّز بالكامل لا داخل غرفة الاحتراق تحديدًا — فتكتشف حريقًا فعليًا في معدات أو تسريبات داخل الحيّز.
- كاشفات دخان بصرية **(Smoke Detectors):** أقل شيوعًا في حيّزات التوربين نفسها (بيئة عالية الحرارة والاهتزاز)، لكنها تُستخدم أحيانًا في غرف المعدات الملحقة أو غرف التحكم.
- نقاط استغاثة يدوية **(Manual Call Points / Break Glass):** موزّعة عند مداخل الحيّزات، تتيح لأي شخص يلاحظ حريقًا أن يفعّل الإنذار يدويًا فورًا، دون انتظار الكاشفات الآلية.

نظام الإطفاء — عادة ثاني أكسيد الكربون **(CO_2 Flooding):** أكثر أنظمة الإطفاء شيوعًا في حيّزات التوربينات الغازية هو إغراق الحيّز بغاز CO_2، الذي يعمل بمبدأ بسيط: يقلل نسبة الأكسجين في الهواء إلى مستوى لا يكفي لاستمرار الاحتراق (من حوالي 21% إلى أقل من 15%). ويتكون النظام من أسطوانات CO_2 مضغوط، وصمامات تجريبية (Pilot Valves) تُفعَّل عند تأكد الحريق، وشبكة أنابيب وفوهات توزيع داخل كل حيّز. ويتم الإطفاء على **مرحلتين**:

- تفريغ أولي **(Initial Discharge):** كمية كبيرة تتدفق خلال ثوانٍ قليلة لرفع تركيز CO_2 بسرعة إلى مستوى الإطفاء.
- تفريغ ممتد **(Extended Discharge):** كمية أصغر تتدفق بمعدل أبطأ لفترة أطول، للحفاظ على التركيز المطفئ ومنع إعادة اشتعال الحريق (خصوصًا إن وُجد معدن شديد السخونة في الحيّز قد يعيد إشعال أي بقايا وقود).

وبالتزامن مع التفريغ، يُغلق النظام عادة فتحات تهوية الحيّز آليًا (لمنع تسرّب CO_2 إلى الخارج وضياع فعاليته، ولقطع أي مصدر أكسجين إضافي)، ويصدر أمر إيقاف طارئ فوري وشامل للتوربين نفسه — فالحريق في أي حيّز يعني إيقافًا كاملًا للوحدة، بغض النظر عن حالة التوربين من الداخل.

التصويت قبل التفريغ الآلي: لأن تفريغ CO_2 الكاذب مكلف جدًا (تعطيل غير ضروري للوحدة + كلفة إعادة تعبئة الأسطوانات) وخطير على أي شخص موجود في الحيّز وقتها، فإن القرار الآلي بالتفريغ لا يعتمد عادة على كاشف واحد فقط — بل يتطلب تأكيدًا من أكثر من كاشف (منطق تصويت، بفلسفة 7.1 نفسها)، مع وجود إنذار مسبق (Pre-Alarm) قبل التفريغ الفعلي يعطي فرصة قصيرة لتدخل بشري أو إلغاء يدوي لو تبيّن أنه إنذار كاذب.

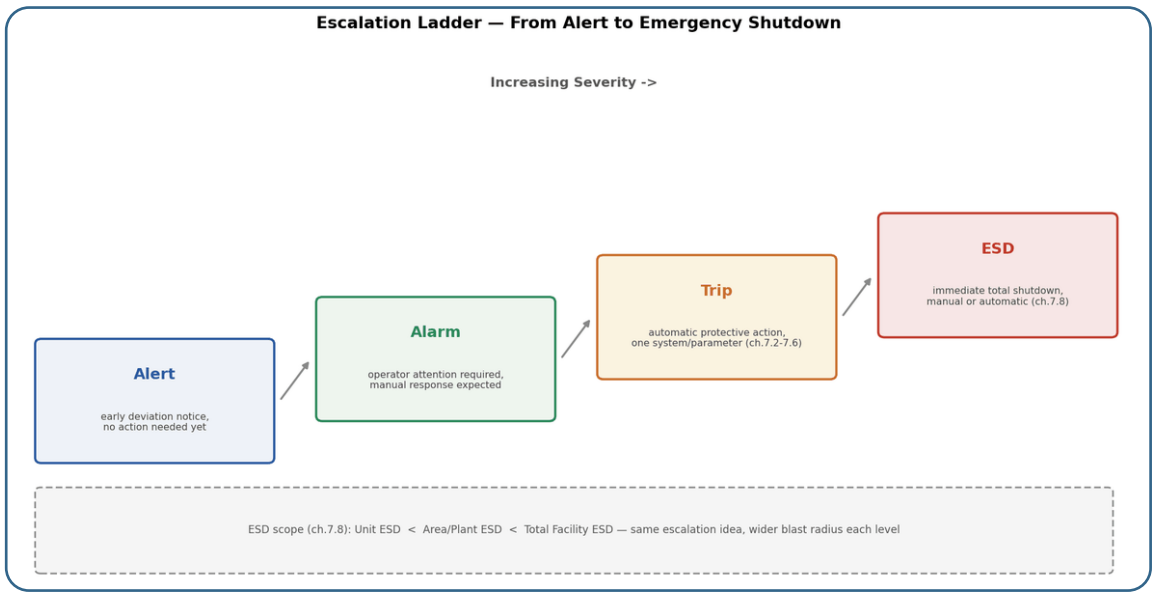
تحذير سلامة مهم: CO_2 بتركيز كافٍ للإطفاء لا يدعم الحياة — ودخول حيّز بعد تفريغ CO_2 بدون معدات تنفس مستقلة خطر مميت. لهذا السبب تكون الأنظمة الحقيقية مزوّدة دائمًا بإنذار صوتي وضوئي (بوق وفلاش) يسبق التفريغ الفعلي بثوانٍ، وتدريب الطاقم على إجراءات الإخلاء والاستجابة لهذا الإنذار تحديدًا من أهم بنود السلامة في أي منشأة فيها هذا النوع من الأنظمة. كذلك، بعد أي تفريغ فعلي، يمنع النظام عادة إعادة تشغيل الوحدة آليًا (بقفل ميكانيكي أو منطقي) حتى يتأكد فريق الصيانة من سلامة الحيّز ويعيد ضبط النظام يدويًا.

> **من واقع الميدان:** أهم درس في صيانة نظام الحريق والغاز هو أن أي عمل صيانة أو اختبار على الكاشفات يجب أن يتم بعد **عزل** قناة التفريغ الآلي (Inhibit/Bypass) بشكل موثق ومُتابع، وإلا فاحتمال تفريغ CO_2 عرضي أثناء الصيانة نفسها وارد، وقد حدث فعليًا في مواقع كثيرة — والعكس أخطر: فنسيان إعادة تفعيل النظام بعد انتهاء الصيانة يترك الوحدة بدون حماية فعلية لفترة قد تطول دون أن يلاحظها أحد.

7.7 تسلسل الإنذارات والقواطع (Alarm & Trip Hierarchy)

في الأقسام من 7.1 إلى 7.6 استعرضنا أنظمة حماية مختلفة، لكل واحد منها كاشفاته ومنطقه الخاص: سرعة، حرارة، اهتزاز، لهب، حريق وغاز. والسؤال العملي الآن: كيف تجتمع كل هذه الأنظمة في منطق واحد متماسك يحدد «متى نوقف الوحدة فعلًا»؟ هذا بالضبط دور **التسلسل الهرمي للإنذارات والقواطع**.

الفرق بين الإنذار والقاطع — تمييز أساسي: «الإنذار» (Alarm) رسالة تنبيه فقط — تستمر الوحدة بالعمل، لكن يُطلب من المشغّل الانتباه والمتابعة. أما «القاطع» (Trip) فإجراء آلي فعلي — إيقاف جزء من الوحدة أو الوحدة بالكامل، دون انتظار قرار بشري. ومن واقع الميدان، لأغلب المتغيرات المراقبة (حرارة، اهتزاز، ضغط...) **حدّان منفصلان**: حد الإنذار (Alarm Setpoint) وهو الأدنى، ويعطي وقتًا للتدخل قبل أن تصل الحالة إلى خطر فعلي، وحد القطع (Trip Setpoint) وهو الأعلى، ويعني «لا مجال للتأخير — أوقف الآن».



الشكل 7.10 — سلّم التصعيد من الإنذار المبكر (Alert) إلى الإنذار (Alarm) فالقاطع (Trip) وأخيرًا الإيقاف الطارئ (ESD)، مع ملاحظة توسّع نطاق الإيقاف الطارئ من مستوى الوحدة إلى المنشأة بالكامل (7.8)

تصنيف القواطع حسب مرحلة التشغيل: من واقع التصاميم الصناعية الشائعة، تُصنَّف القواطع عادة إلى ثلاث فئات رئيسية حسب وقت حدوثها في دورة تشغيل الوحدة:

- قواطع ما قبل الإشعال **(Pre-Ignition Trips):** هذه أقرب أصلًا إلى مفهوم «الشروط المسبقة» (Permissives) منها إلى «القواطع» بالمعنى الدقيق — شروط يجب أن تتحقق كلها قبل السماح بالانتقال إلى مرحلة الإشعال (6.4): ضغط زيت تزييت كافٍ، وغياب أي غاز مكتشف في الحيّز (7.6)، والتأكد من عدم وجود إنذار حريق نشط، وسلامة اختبارات النظام الذاتية. فإن لم يتحقق أي شرط منها، لم تنتقل الوحدة ببساطة إلى الخطوة التالية.
- قواطع ما بعد الإشعال **(Post-Ignition Trips):** تصبح فعّالة بعد تأكد الإشعال (7.5)، وتغطي كل أنظمة الحماية التي شرحناها: فقدان اللهب، سرعة زائدة، حرارة زائدة، اهتزاز مفرط، وغيرها. وهذه الفئة الأكبر والأكثر تنوعًا، لأنها تراقب الوحدة طوال فترة تشغيلها الفعلي.
- قواطع حالة الحماية العامة **(Protective Status Trips):** مجموعة قواطع مبوّبة حسب النظام الفرعي المصدر لها (تزييت، وقود، اهتزاز، كهرباء...) — تجميع منطقي يساعد المشغّل على أن يفهم بسرعة «أي منظومة بالضبط هي مصدر المشكلة» بدلًا من قائمة مسطحة طويلة من القواطع بلا تصنيف.

الإشارة الرئيسية الموحّدة **(Master Protective Signal):** في معظم أنظمة التحكم الحديثة، تصب كل هذه القواطع — بغض النظر عن مصدرها — في إشارة منطقية واحدة، تُسمى عادة «إشارة الحماية الرئيسية» أو «السماح بالتشغيل» (Master Protective / Permit-to-Run). فما دامت هذه الإشارة في حالة «صحيح» (True/1)، فالوحدة مسموح لها بالعمل. وقاطع واحد فقط — من أي مصدر — يكفي لقلب هذه الإشارة إلى «خطأ» (False/0)، وعندها تُقطع الوحدة فورًا بغض النظر عن حالة باقي الأنظمة. وهذا التصميم (منطق «و» — AND — بين كل شروط التشغيل السليم) هو ما يضمن أن أي مصدر خطر واحد كافٍ لإيقاف الوحدة، بدلًا من الاعتماد على تنسيق معقد بين عدة أنظمة منفصلة.

سجل الأحداث **(Trip Log / Sequence of Events Recorder):** حين تحدث حالة قطع فعلية، يكون السؤال الأول الذي يطرحه أي مهندس بعدها: «ما الذي حدث أولًا؟» — هل ارتفع الاهتزاز بسبب مشكلة ميكانيكية فسبب القطع، أم العكس: حدث القطع لسبب آخر فترتب عليه ارتفاع مؤقت في الاهتزاز أثناء التوقف؟ وللإجابة عن هذا السؤال، تحتفظ أنظمة التحكم الحديثة بسجل زمني عالي الدقة (غالبًا بدقة أجزاء من الثانية) لكل الإشارات والمتغيرات المهمة، لفترة قبل لحظة القطع وبعدها مباشرة. وهذا السجل — يُسمى غالبًا «سجل القطع» (Trip Log) أو «مسجّل تسلسل الأحداث» (Sequence of Events Recorder) — هو أول ما يراجعه فريق الصيانة بعد أي إيقاف طارئ، لأنه يبيّن **الترتيب الزمني الدقيق** للأحداث، وهذا الترتيب هو الذي يفرّق بين «السبب الجذري» و«الأعراض المصاحبة».

مشكلة عملية — فيضان الإنذارات **(Alarm Flood):** حين يحدث قطع كبير، ينتج عنه غالبًا سلسلة من الإنذارات الثانوية المتتالية خلال ثوانٍ قليلة (انخفاض ضغط، ارتفاع حرارة مؤقت، فقدان اتصال بجهاز معين نتيجة انقطاع الكهرباء عنه...) — وهذا يخلق ما يُعرف بـ«فيضان الإنذارات»، حيث تظهر عشرات الرسائل على شاشة المشغّل في اللحظة نفسها تقريبًا، فيصعب تمييز الإنذار «الأصلي» (السبب) وسط زحمة الإنذارات «التابعة» (النتائج). ومن واقع الميدان، هذا بالضبط سبب أهمية سجل الأحداث المذكور أعلاه — فبدلًا من الاعتماد على «أي إنذار ظهر أولًا على الشاشة» (وقد يكون مضلّلًا بسبب فروق بسيطة في زمن المعالجة)، يعطي سجل الأحداث الدقيق الترتيب الحقيقي.

> من واقع الميدان: في أنظمة التحكم الجيدة تُصمَّم رسائل الإنذار لتكون **قابلة للفعل** (Actionable) — أي أن الرسالة تقول «ما المشكلة» و«ما الإجراء المتوقع»، لا مجرد رمز تقني مجرد. وجدول تشخيص الإنذارات النموذجي (مثل الجداول المعتمدة في أنظمة SPEEDTRONIC وأمثالها) يربط كل رمز إنذار بثلاثة أعمدة: الرسالة المعروضة، والسبب المحتمل، والإجراء المطلوب — وهذا التنظيم يوفر وقت تشخيص ثمينًا جدًا وقت الأزمة، بدلًا من أن يضطر المهندس إلى البحث عن معنى كل رمز من الصفر في كل مرة.

7.8 فلسفة الإيقاف الطارئ (Emergency Shutdown — ESD)

تناولت كل الأقسام السابقة (7.1 إلى 7.7) قواطع **مصدرها قياس مباشر** — سرعة تجاوزت الحد، أو حرارة ارتفعت، أو اهتزاز زاد عن المسموح. لكن هناك فئة أخرى من الإيقاف، مختلفة في طبيعتها: الإيقاف الطارئ **(ESD)**، الذي يرتبط غالبًا بحدث خارج نطاق التوربين نفسه — حريق كبير في المنشأة، أو تسرب غاز خطير في منطقة مجاورة، أو ببساطة قرار بشري مباشر بالضغط على زر الطوارئ لأن المشغّل رأى وضعًا خطيرًا بعينه.

الفرق الجوهري عن القاطع الوقائي العادي: القاطع الوقائي (7.7) رد فعل آلي على قياس تجاوز حده. أما الESD فقد يُفعَّل يدويًا بالكامل، وقد يشمل معدات لا يوجد فيها أي عطل بالضرورة — أي أن التوربين نفسه قد يكون يعمل بشكل مثالي تمامًا، لكنه يُوقَف لأن الخطر آتٍ من مكان آخر في المنشأة، وقرار السلامة العامة يستدعي قطع كل مصادر الاشتعال المحتملة، والتوربين الغازي واحد منها.

تدرّج مستويات الإيقاف الطارئ: من واقع الميدان، تُبنى أنظمة الESD في المنشآت الصناعية الكبيرة عادة على مستويات هرمية، لا على زر واحد يوقف كل شيء:

- إيقاف طارئ على مستوى الوحدة **(Unit ESD):** يوقف التوربين الغازي المحدد فقط (وملحقاته المباشرة)، دون التأثير على باقي المعدات في المنشأة.
- إيقاف طارئ على مستوى المنطقة **(Area/Plant ESD):** يوقف كل المعدات ضمن منطقة معينة في المنشأة — عدة وحدات معًا — عادة نتيجة حدث مثل حريق أو تسرب غاز مؤكد في تلك المنطقة.
- إيقاف طارئ شامل **(Total/Facility ESD):** أعلى مستوى، يوقف المنشأة بالكامل. نادر الاستخدام، ومحجوز للحالات الحرجة جدًا.

والفكرة أن كل مستوى أعلى يشمل تلقائيًا كل ما تحته — أي أن تفعيل الإيقاف الشامل يشمل إيقاف كل الوحدات، لكن العكس ليس صحيحًا.

أزرار الإيقاف اليدوي **(Manual ESD Pushbuttons):** من واقع الميدان، توزيع هذه الأزرار في الموقع قرار هندسي مدروس، لا عشوائي — فتوضع في غرفة التحكم (وصول فوري للمشغّل المسؤول)، وفي نقاط محلية قريبة من الوحدة نفسها (لأي شخص في الموقع يلاحظ خطرًا مباشرًا)، وعلى مسارات الإخلاء الرئيسية (بحيث يستطيع أي شخص يهرب من منطقة خطر أن يضغط الزر في طريقه للخروج). ويتبع تصميمها مبدأ Fail-Safe نفسه الذي شرحناه في 7.1: الدائرة في الحالة الطبيعية «مغذّاة» (Energized-to-Run)، والضغط على الزر يقطع التغذية فعليًا — بحيث حتى لو انقطعت الأسلاك أو تعطّل الزر نفسه، كانت النتيجة إيقافًا لا استمرار تشغيل خاطئ.

ماذا يحدث فعليًا عند الـESD: الإيقاف الطارئ ليس مجرد «قطع الإشعال» — بل سلسلة إجراءات فورية ومتزامنة: إغلاق صمامات عزل الوقود (غالبًا صمامان على التوالي، بمبدأ Double Block and Bleed، مع تنفيس الفراغ بينهما للتأكد من أنه لا يوجد أي وقود متبقٍ في الخط)، وفصل المولد عن الشبكة الكهربائية (6.6)، وإيقاف مراوح التهوية أو إغلاق الشتّرات حسب طبيعة الحدث (7.6)، وفي أنظمة الغاز الطبيعي أحيانًا تنفيس مضغوط للخطوط (Blowdown) لتفريغ الغاز المحصور في أسرع وقت آمن. وكل هذه الإجراءات مرتبطة بعضها ببعض في مصفوفة منطقية تُسمى مخطط السبب والأثر (**Cause & Effect Diagram**) — جدول يربط كل سبب محتمل (كاشف غاز معيّن، زر معيّن، قاطع معيّن) بكل الإجراءات التي يجب أن تحدث نتيجة له، بحيث لا يُترك أي إجراء وقائي للذاكرة أو الاجتهاد اللحظي.

فلسفة إعادة التشغيل بعد الـESD: من واقع الميدان، هذه نقطة يستغربها كثير من المهندسين الجدد: بعد أي إيقاف طارئ، **لا يمكن إعادة تشغيل الوحدة تلقائيًا** مهما كانت الظروف طبيعية بعدها. فلا بد من إعادة ضبط يدوي (Manual Reset) من مكان محدد (غالبًا غرفة التحكم أو لوحة محلية)، وغالبًا يُشترط التحقق من سبب الإيقاف الفعلي أولًا. وحتى بعد إعادة الضبط، لا تدخل الوحدة مباشرة إلى مرحلة الإشعال — بل يجب أن تمر بدورة تطهير (Purge) كاملة من جديد (6.4)، تمامًا مثل أي بدء تشغيل عادي، للتأكد من عدم وجود أي وقود متبقٍ في غرفة الاحتراق أو خط العادم. وقد يكون هذا التأخير المتعمد مزعجًا تشغيليًا، لكنه قائم بالكامل على منطق السلامة: فالوقت المستغرق في إعادة التطهير أرخص بكثير من مخاطرة الإشعال في مكان فيه تراكم وقود غير معروف.

إلى هنا نكون قد غطّينا الحماية طبقةً طبقة: من فلسفتها العامة (7.1)، مرورًا بكل نظام حماية على حدة (7.2 إلى 7.6)، فاجتماعها في منطق موحّد (7.7)، وصولًا إلى الإيقاف الطارئ (7.8). ويبقى ثلاثة أقسام تكمل الصورة من زاوية عملية بحتة: **نظام زيت القطع** الذي تلتقي عنده كل هذه القرارات في فعل واحد (7.9)، **ومراقب الاحتراق** بمنطقه الأعقد مما يبدو (7.10)، **وحمايات سلامة الإشارة** التي تعمل حين تصبح القراءة نفسها غير موثوقة (7.11).

التسمية الرسمية: نظام الأدوات الآمن (Safety Instrumented System — SIS)

كل منطق الحماية الذي شرحناه من 7.2 إلى 7.8 — قواطع السرعة والحرارة والاهتزاز واللهب، وحتى الإيقاف الطارئ نفسه — له اسم رسمي موحّد في معايير هندسة السلامة الصناعية: نظام الأدوات الآمن (**Safety Instrumented System — SIS**)، ومرجعه الأشهر عالميًا معيار IEC 61511. والنقطة المهمة التي تستحق الإبراز في التوربين الغازي: أن الـSIS مصمَّم ليكون **مستقلًا تمامًا** عن نظام التحكم العادي (Basic Process Control System — BPCS)، أي حلقات التحكم الطبيعية بالسرعة والحرارة والحمل التي شرحناها في الفصل التاسع) — وهو مبدأ الاستقلالية نفسه الذي ذكرناه في 7.1، لكن بمصطلح معياري معترف به دوليًا. ولكل دالة حماية في الـSIS (Safety Instrumented Function — SIF) تصنيف «مستوى تكامل السلامة» (Safety Integrity Level — SIL)، من SIL1 الأقل صرامة إلى SIL4 الأعلى) يحدد مدى الموثوقية المطلوبة منها إحصائيًا، وتُختبر دوريًا باختبار الإثبات (Proof Test) — تفعيل متعمد ومتحكَّم فيه للدالة للتأكد من أنها تعمل فعلًا كما يجب، لا مجرد افتراض أنها بخير لأنها لم تُفعَّل مصادفة.

الحماية من انخفاض ضغط زيت التزييت (Low Lube Oil Pressure Protection)

بما أن هذا النظام حرج إلى هذه الدرجة، يستحق إبراز منطق حمايته صراحة كمثال كامل على فلسفة الطبقات التي شرحناها في 7.1 — رغم أنه لم يأخذ رقم قسم مستقل في الفصل السابع لأنه مرتبط عضويًا بنظام واحد بعينه (6.1): **الطبقة الأولى** إنذار مبكر (Pre-Alarm) عند انخفاض الضغط عن الحد الطبيعي بهامش بسيط — تنبيه فقط، وتستمر الوحدة بالعمل. **الطبقة الثانية** بدء تشغيل المضخة الاحتياطية/مضخة الطوارئ تلقائيًا (شرحناها في 6.1) عند انخفاض إضافي — إجراء تصحيحي آلي قبل أن يبلغ الوضع الحد الحرج. **الطبقة الثالثة** قطع كامل (Trip) إن استمر الانخفاض رغم عمل المضخة الاحتياطية، أو إن وصل الضغط إلى حد حرج جدًا مباشرة — لأن الاستمرار في تشغيل توربين بدون تزييت كافٍ يعني تلف محامل خلال ثوانٍ (كما ذكرنا في مقدمة هذا القسم). ومن واقع الميدان: زمن الاستجابة هنا حرج جدًا — أسرع بكثير من معظم قواطع الحرارة أو الأداء، لأن نافذة الوقت بين انخفاض الضغط الحرج وتلف المحمل الفعلي قصيرة جدًا، ولذلك ترتبط حساسات ضغط الزيت غالبًا مباشرة بمنطق قطع سريع الاستجابة، وأحيانًا بمسار سلكي مستقل إضافي لمزيد من السرعة (بفكرة «منطق الحماية السلكي المستقل» نفسها التي سنذكرها في 9.1).

الحماية الاحتياطية المستقلة (Independent Backup Protection — Backup) (Relay / Independent Trip System

نقطة جوهرية تستحق تأكيدًا صريحًا في هذا الفصل: نظام الحماية لا يجوز أن يعتمد دائمًا على نظام التحكم الرئيسي بالتوربين **(TCS)** وحده. ففي التطبيقات الحرجة، يُضاف مسار حماية إضافي — مستقل فعليًا عن الـcontroller الرئيسي — قادر على تنفيذ قطع (Trip) مباشر وسلكي (Hardwired) حتى لو تعطّل الcontroller نفسه بالكامل.

يجب التفريق بوضوح بين ثلاثة مستويات مختلفة تمامًا:

1. التحكم **(Control):** الـTCS يدير التشغيل الطبيعي — تحكم بالسرعة، والحمل، والحرارة، والوقود (الفصل التاسع بالكامل).
2. الحماية **(Protection):** منطق يراقب الحالات الخطرة ويصدر أمر قطع عند تجاوزها — السرعة الزائدة (7.2)، الحرارة الزائدة (7.3)، الاهتزاز العالي (7.4)، انخفاض ضغط زيت التزييت (6.1)، فشل اللهب (7.5).

3. الحماية الاحتياطية المستقلة **(Independent Backup Protection):** مسار **منفصل فعليًا** عن كل ما سبق، قادر على تنفيذ قطع سلكي مباشر يصل إلى صمامات إغلاق الوقود، حتى لو فشل الـcontroller الرئيسي بمنطقه (Control وProtection معًا) في اللحظة نفسها.

وهذا التفريق مهم لأن Control وProtection، رغم كونهما وظيفتين مختلفتين مفاهيميًا (وقد شرحنا هذا الفرق من بداية الفصل في 7.1)، غالبًا ما يزالان يعتمدان بشكل أو بآخر على عائلة العتاد الإلكتروني نفسها (الـcontroller نفسه أو معالجات مرتبطة به). والمستوى الثالث هو الذي يضمن فعليًا استقلالية حقيقية.

لماذا هذا ضروري؟ تأمل المسار الطبيعي:

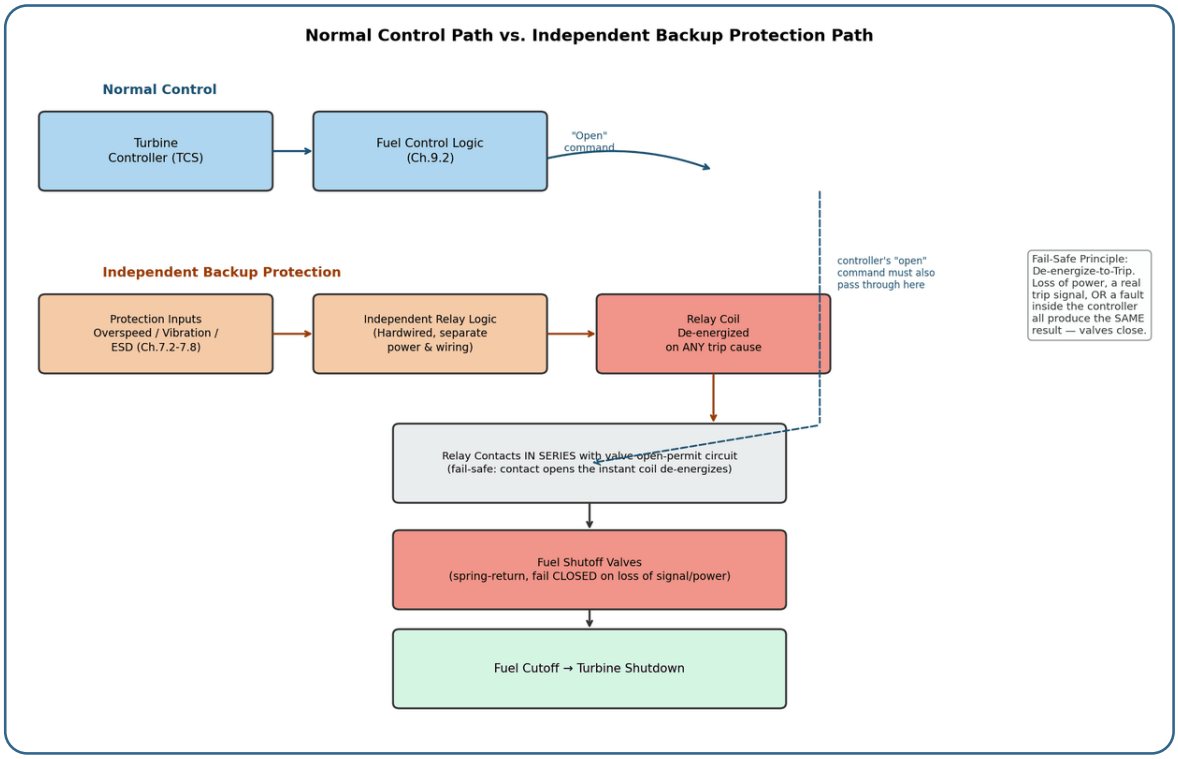
Turbine Controller → Fuel Control → Fuel Valve

لو حدث أي من هذه الأعطال داخل الـcontroller نفسه — عطل في المعالج (CPU Failure)، أو خلل برمجي (Software Fault)، أو عطل في بطاقة إدخال/إخراج (I/O Card Failure)، أو انقطاع اتصال داخلي، أو تجمّد كامل للمعالج (Controller Freeze)، أو انقطاع تغذية كهربائية عن دارات التحكم، أو حتى خطأ في منطق التحكم نفسه (Incorrect Control Logic) — فإن أي حماية «مبرمجة داخل الـcontroller نفسه» قد تتعطل في اللحظة نفسها، وللسبب نفسه بالضبط الذي شرحناه في 7.2 عن كون الحاكم نفسه لا يُعتبر أبدًا نظام حماية.

آلية العمل: منطق مرحّلات احتياطي (Backup Relay Logic):

الحل العملي الشائع هو مسار حماية مستقل بالكامل — أسلاك خاصة به، ومصدر تغذية خاص به غالبًا، ومنطق مرحّلات كهروميكانيكية (Relay Logic) أو معالج حماية مستقل — يراقب مدخلات الحماية الحرجة نفسها (سرعة زائدة، اهتزاز عالٍ، إيقاف طارئ، إلخ) بشكل موازٍ تمامًا لمسار الـcontroller الرئيسي:

Protection Inputs → Independent Relay Logic (Hardwired) → De-energize Relay → Fuel Shutoff Valves Close → Fuel Cutoff → Turbine Shutdown



الشكل 7.11 — مسار التحكم الطبيعي مقابل مسار الحماية الاحتياطية المستقلة: مبدأ «قطع التغذية = إيقاف» (De-energize-to-Trip) يضمن نفس النتيجة الآمنة بغض النظر عن مصدر العطل.

نقطة التصميم الحاسمة التي يوضّحها الشكل: ملامسات المرحّل (Relay Contacts) موصولة **على التوالي فعليًا** ضمن دارة السماح بفتح صمامات الوقود — لا مجرد «إشارة موازية» يمكن تجاهلها. وهذا يعني أن أمر «الفتح» الصادر من الـcontroller الرئيسي **يجب أن يمر فيزيائيًا** عبر هذه الملامسات ليصل فعليًا إلى الصمام. فلو فقد ملف المرحّل تغذيته لأي سبب — قطع حقيقي، أو انقطاع كهرباء، أو حتى عطل داخلي في الـcontroller يمنعه من الاستمرار في تغذية المرحّل بشكل صحيح — انفتحت الملامسات فورًا، وأُغلقت صمامات الوقود (المصمَّمة أصلًا لتُغلق تلقائيًا بنابض عند فقدان الإشارة أو التغذية، Fail-Closed) بغض النظر تمامًا عمّا «يعتقد» الـcontroller الرئيسي أنه يجب أن يحدث.

مبدأ التصميم الآمن عند الفشل (Fail-Safe Design — De-energize-to-Trip): هذا هو المبدأ نفسه الذي ألمحنا إليه في مواضع متفرقة من الكتاب (صمامات الوقود Fail-Closed في 6.2، والبولت الميكانيكي في الطبقة الثالثة من 7.2)، لكنه يستحق تسمية صريحة هنا: النظام مصمَّم بحيث **الحالة الآمنة هي الحالة الافتراضية عند فقدان أي شكل من أشكال الطاقة أو الإشارة** — فالمرحّل لا يحتاج أمرًا فعليًا بـ«الإيقاف» ليوقف الوحدة؛ بل يحتاج تغذية مستمرة ليبقيها عاملة، وأي غياب لهذه التغذية (متعمّد أو نتيجة عطل) ينتج النتيجة الآمنة نفسها تلقائيًا.

فلسفة التصويت بين المسارات المتعددة **(Voting Philosophy):** عدنا إلى مفهوم التصويت أكثر من مرة في هذا الكتاب (TMR في 9.1، وتصويت حسّاسات الاهتزاز في 7.4، وتصويت MPU في قسم قياس السرعة أعلاه). ويستحق هنا تلخيصًا رسميًا للتوليفات الشائعة صناعيًا:

التوليفة	المعنى	الأثر على الأمان مقابل التوفّر
1oo1 (One-out-of-One)	حساس أو مسار واحد فقط، بدون أي تكرار	أبسط تصميم، لكن أي عطل واحد (سواء كشف خطأ أو فشل بالكشف) يؤثر مباشرة — لا يوجد احتياط
1oo2 (One-out-of-Two)	أي من مسارين اثنين يكفي لتنفيذ القطع	يميل لصالح **الأمان**: احتمال القطع الحقيقي عند الخطر أعلى (يكفي أن يكتشفه مسار واحد)، لكن احتمال القطع الكاذب بسبب عطل في مسار واحد فقط أعلى أيضًا
2oo2 (Two-out-of-Two)	يجب أن يتفق المساران الاثنان معًا لتنفيذ القطع	يميل لصالح **التوفّر (تجنب القطع الكاذب)**: فعطل مسار واحد وحده لا يكفي لإيقاف الوحدة، لكن هذا يعني أيضًا أن عطلًا في مسار واحد قد "يخفي" خطرًا حقيقيًا لو صادف حدوثه وقت الخطر الفعلي
2oo3 (Two-out-of-Three)	يلزم اتفاق اثنين من ثلاثة مسارات مستقلة	التوليفة الأكثر توازنًا، ولهذا الأكثر استخدامًا في التطبيقات الحرجة جدًا (وهي بالضبط فلسفة TMR التي نشرحها في 9.1): تتحمّل عطل مسار واحد بأي اتجاه (كاذب أو حقيقي) دون المساس بصحة القرار النهائي

من واقع الميدان، اختيار التوليفة المناسبة قرار هندسي واعٍ يوازن بين خطرين متعاكسين: القطع الكاذب المتكرر (يعطّل الإنتاج ويكلّف ماليًا، وقد يدفع لاحقًا إلى تصرفات غير آمنة من فريق مضغوط لتقليل الإيقافات) مقابل فشل الحماية عند حدوث خطر حقيقي (ونتيجته أخطر بما لا يقاس). وهذا بالضبط سبب ميل أغلب أنظمة الحماية الحرجة في التوربينات الحديثة إلى توليفة 2oo3 كنقطة توازن مثبتة صناعيًا.

الخلاصة العملية: الحماية الاحتياطية المستقلة ليست تكرارًا زائدًا عن الحاجة — بل اعتراف صريح بحقيقة هندسية: أن أي نظام إلكتروني، مهما بلغت جودته وموثوقيته (بما فيه الـcontroller الرئيسي نفسه)، يبقى عرضة للعطل. والمسار المستقل سلكيًا وكهربائيًا هو الضمانة الأخيرة لأن العطل في مكان واحد — مهما كان حرجًا — لن يمنع التوربين من الوصول إلى حالته الآمنة عند الحاجة. وهذا المبدأ يربط مباشرة بمفهوم SIS الذي عرّفناه أعلاه: فكل ما شرحناه في هذا القسم هو بالضبط كيف يتحقق استقلال SIS عن BPCS عمليًا على مستوى الأسلاك والعتاد، لا كتسمية تنظيمية فحسب.

اختبار الحمايات دوريًا وإدارة التجاوز (Proof Testing and Bypass Management)

كل ما شرحناه في هذا الفصل يفترض شيئًا واحدًا غير مضمون إطلاقًا: **أن الحماية ستعمل فعلًا لحظة الحاجة إليها.** وهذا الافتراض هو أخطر ما في منظومة الأمان كلها، لأنه لا يُختبر من تلقاء نفسه.

المشكلة الجوهرية: العطل المستتر (Hidden / Undetected Failure)

منطق الحماية **ساكن** بطبيعته: لا يفعل شيئًا معظم عمره. مجس معطّل، أو مرحّل ملتصق، أو صمام عالق، أو منطق مضبوط خطأً — كل هذه أعطال **لا تُنتج أي عرض أثناء التشغيل الطبيعي**، لأن الحماية لا يُطلب منها شيء أصلًا. فالوحدة تعمل بشكل مثالي، والشاشة نظيفة، والحماية غير موجودة فعليًا.

وهذا يختلف جوهريًا عن أعطال التحكم: فعطل حلقة التحكم **يظهر فورًا** لأن العملية تنحرف. أما عطل الحماية فيظل صامتًا حتى اللحظة التي كان يجب أن يعمل فيها — وعندها يكون قد فات الأوان.

الحل: اختبار الإثبات الدوري (Proof Test)

هو اختبار مقصود ومجدول لكل مسار حماية، غرضه الوحيد **كشف الأعطال المستترة**. والفكرة الكمّية خلفه بسيطة ومنطقية: لو كان معدل حدوث العطل ثابتًا، فإن **متوسط المدة التي تظل خلالها الحماية معطلة دون أن يعلم أحد يساوي تقريبًا نصف الفترة بين اختبارين**. أي أن تقصير فترة الاختبار يقلل هذه المدة مباشرة — وهذا بالضبط ما تربطه معايير السلامة الوظيفية بمستوى السلامة المطلوب (SIL، راجع 7.8): **مستوى سلامة أعلى يعني إما مكوّنات أفضل، أو ردّية أكثر، أو فترة اختبار أقصر** — والثلاثة خيارات تصميمية متكافئة الأثر.

ما الذي يُختبر بالضبط؟ ثلاث طبقات، لا طبقة واحدة

الطبقة	ما يُختبر	ما لا يثبته
المستشعر (Sensor)	هل يستجيب الجهاز فعلًا للقيمة الحقيقية؟	لا يثبت أن الإشارة تصل للمنطق
المنطق (Logic Solver)	هل يصدر المنطق القرار عند تحقق الشرط؟	لا يثبت أن الأمر يُنفَّذ في الحقل
العنصر النهائي (Final Element)	هل يتحرك الصمام فعلًا ويغلق بالكامل بالزمن المطلوب؟	—

والنقطة الحاسمة هنا: **اختبار المنطق وحده ليس اختبار حماية.** فحقن قيمة وهمية في المنطق ورؤية الأمر يظهر على الشاشة يثبت الطبقة الوسطى فقط. وأكثر الأعطال المستترة الحقيقية تحدث تحديدًا في الطبقتين الأخريين — مجس مسدود، أو صمام لم يُحرَّك منذ سنوات فالتصق. ولهذا يُعتمد صناعيًا مبدأ الاختبار الكامل من الطرف إلى الطرف **(End-to-End Test)** حيثما أمكن: من إثارة الحالة عند المستشعر وحتى التحقق من إغلاق الصمام فعليًا.

اختبار الصمامات أثناء التشغيل (Partial Stroke Testing)

معضلة عملية معروفة: صمامات الإيقاف يجب اختبارها، لكن إغلاقها الكامل يعني إيقاف الوحدة. الحل الشائع هو **الاختبار الجزئي للمشوار**: تحريك الصمام بنسبة صغيرة والتحقق من استجابته وزمنها، دون إغلاقه بالكامل ودون تعطيل التشغيل. وهو **لا يغني عن الاختبار الكامل** — لكنه يكشف الالتصاق والبطء، وهما أشهر آليتي فشل، ويسمح بتمديد الفترة حتى الاختبار الكامل بشكل مبرَّر.

إدارة التجاوز (Bypass / Override / Inhibit Management)

يبقى أن أي اختبار أو صيانة قد يستلزم **تعطيل مسار حماية مؤقتًا**. وهذه أخطر لحظة في حياة المعدة، لأن الحماية تكون غائبة **بعلم الجميع هذه المرة**. والقواعد التي تجعلها مقبولة:

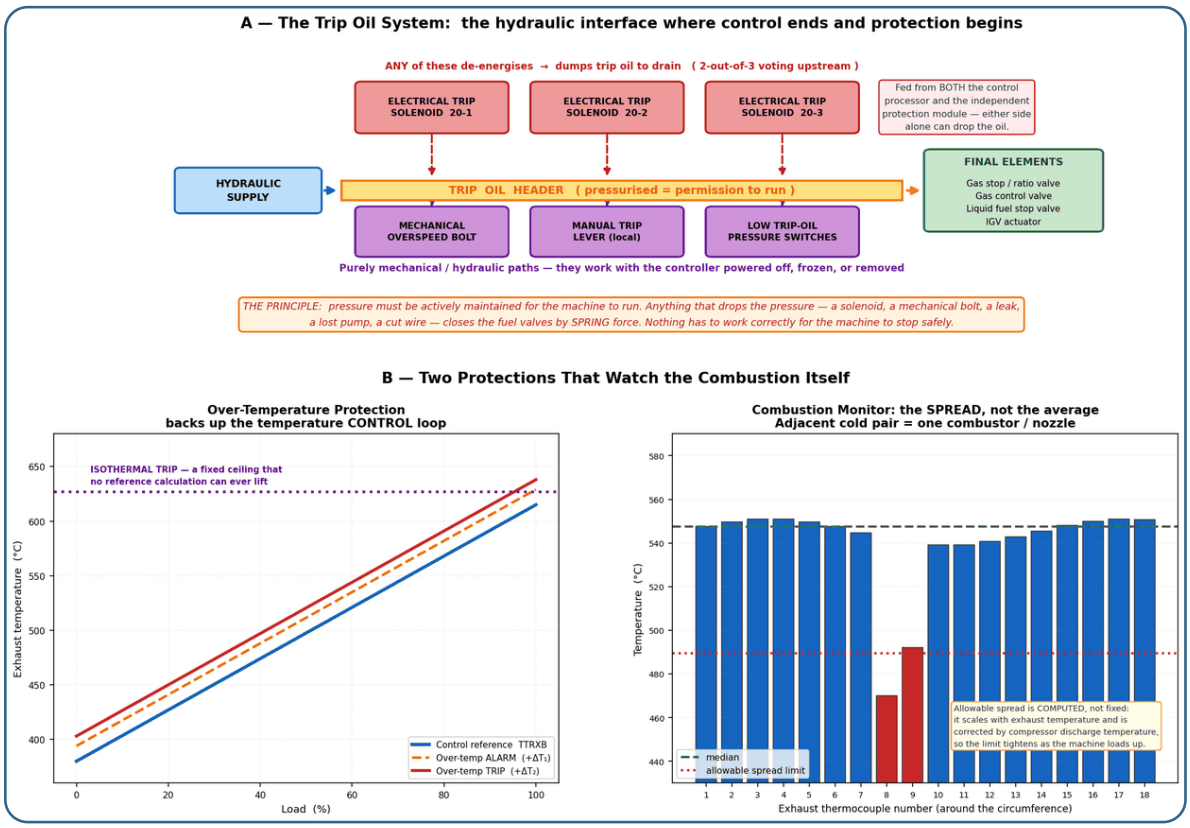
- **لا تجاوز بدون تصريح موثّق** يحدد: أي حماية، ولماذا، ومن أذن، ومن نفّذ، ومتى ينتهي.
- **حدّ زمني صريح** لكل تجاوز، لا «حتى ننتهي».
- **إظهار واضح ودائم** على شاشة التشغيل لكل تجاوز نشط — لا مخفيًا داخل شاشة فرعية. المشغّل يجب أن يرى بنظرة واحدة: كم حماية معطّلة الآن؟
- تدبير تعويضي **(Compensating Measure)** طوال مدة التجاوز: مراقبة بشرية مباشرة للقيمة المعنية، أو تقييد ظرف التشغيل، أو كليهما.
- سجل تجاوزات **(Override Register)** يُراجَع بشكل دوري — لأن أخطر ما يحدث فعليًا هو **تجاوز مؤقت يُنسى فيصبح دائمًا**.

قاعدة تختصر هذا القسم كله: المعادلة التي يجب أن ترسخ لدى كل مهندس تشغيل وصيانة هي أن **حماية لم تُختبر، أو حماية متجاوَزة، هي حماية غير موجودة** — بغض النظر عمّا يقوله المخطط أو ما هو مكتوب في المنطق. وهذه هي القاعدة نفسها التي ختمنا بها الحديث عن الاختبارات الوظيفية أثناء التشغيل التجريبي (17.5)، وتكرارها هنا مقصود.

7.9 نظام زيت القطع (Trip Oil System): الواجهة التي يلتقي عندها كل شيء

تحدثنا حتى الآن عن الحمايات كل واحدة على حدة. لكن يبقى سؤال عملي جوهري: **كيف تتحوّل هذه القرارات المتفرّقة — إشارة من مرحّل، وقرار من متحكم، وحركة من ثقل ميكانيكي — إلى فعل واحد هو إغلاق الوقود؟**

الجواب في منظومة تُعدّ من أذكى ما في هندسة التوربينات: نظام زيت القطع **(Trip Oil System)**.



الشكل 7.12 — أعلى: نظام زيت القطع كواجهة هيدروليكية بين التحكم والحماية، بمسارَي تفريغ كهربائي وميكانيكي متوازيين. أسفل: حماية الحرارة الزائدة ومراقب الاحتراق.

الفكرة الجوهرية: الضغط هو الإذن بالتشغيل

زيت القطع مشعب هيدروليكي مضغوط. **وما دام مضغوطًا، تبقى صمامات الوقود مفتوحة (أو قابلة للفتح). وحين ينهار ضغطه — لأي سبب — تُغلق الصمامات بقوة النوابض.**

ولاحظ الصياغة بدقة: **الضغط ليس «إشارة قطع» — الضغط هو «إذن بالاستمرار»**. وهذا يقلب المنطق رأسًا على عقب بالطريقة الصحيحة:

- **الحالة الآمنة هي الافتراضية.** لا شيء يحتاج أن يعمل بشكل صحيح لكي تتوقف الآلة بأمان. يكفي أن **يتوقف** شيء ما.
- **أي عطل في المنظومة نفسها** — تسريب، أو مضخة متوقفة، أو صمام عالق مفتوحًا، أو سلك مقطوع إلى ملف — **ينتج قطعًا، لا فشلًا في القطع.**
- وهذا هو مبدأ "إزالة التغذية للقطع" **(De-energize to Trip)** مطبَّقًا هيدروليكيًا لا كهربائيًا فقط، وقد شرحناه كهربائيًا في 12.12.

مسارات التفريغ: كهربائية وميكانيكية معًا

ما يجعل هذه المنظومة قوية حقًا هو أن **مسارات تفريغ الزيت متعددة ومتنوعة الطبيعة**، وكل منها كافٍ وحده:

المسارات الكهربائية:

- **صمامات كهرومغناطيسية للقطع** (عادةً ثلاثة، بتصويت 2 من 3 في المنبع). عند إزالة التغذية عن العدد الكافي منها، تُفتح مسارات التصريف وينهار الضغط.
- **وتُغذَّى هذه الصمامات من مصدرين مستقلين معًا:** من معالج التحكم، **ومن وحدة الحماية المستقلة.** أي أن كلًا من الجانبين يستطيع وحده إسقاط الزيت. وهذه بالضبط الفلسفة التي وصفناها في 12.12: **الاستقلال منفَّذ بالأسلاك والهيدروليك، لا بالبرمجيات.**

المسارات الميكانيكية والهيدروليكية البحتة:

- ثقل السرعة الزائدة الميكانيكي **(Mechanical Overspeed Bolt):** بولت مُرجَّح مركّب في علبة التروس الملحقة (كما في 7.2) يخرج عند سرعة محددة فيضرب رافعة تفتح مسار تصريف. **لا كهرباء، ولا حسّاس، ولا برمجية.** يعمل والمتحكم مطفأ أو محترق أو مفكوك.
- **رافعة القطع اليدوية المحلية:** ليقطع الإنسان الواقف عند الآلة بيده مباشرة.
- **مفاتيح ضغط زيت القطع المنخفض:** تراقب المنظومة نفسها وتؤكد القطع في نظام التحكم — أي **تغذية راجعة تثبت أن القطع حدث فعلًا**، وليس أن أمر القطع أُرسل فقط. وهذا فارق جوهري في التحقيق في الحوادث.

لماذا هذا التصميم أذكى مما يبدو

أولًا: تنوّع الطبيعة الفيزيائية. المسار الكهربائي والمسار الميكانيكي **لا يفشلان بنفس السبب**. انقطاع تغذية كهربائية شامل لا يعطّل الثقل الميكانيكي؛ وعلوق ميكانيكي لا يعطّل الملف الكهربائي. وهذا هو الدفاع الحقيقي ضد الفشل ذي السبب المشترك **(Common Cause Failure)** — وهو ما لا يوفّره تكرار ثلاث قنوات إلكترونية متطابقة مهما بلغ عددها. ثلاث بطاقات من نفس النوع قد تفشل كلها لنفس السبب (تصميم، برمجية، تغذية)؛ أما ثقل فولاذي ومِلف كهربائي فلا.

ثانيًا: القطع يعمل على كل الصمامات معًا. صمام قطع الغاز، وصمام التحكم، وصمام الوقود السائل، وحتى مشغّل IGV في بعض التصاميم — كلها تُغذَّى من نفس المشعب. **فلا يمكن أن يُقطع نصف الوقود.**

ثالثًا: قابلية الاختبار. يمكن اختبار كل مسار تفريغ على حدة (Online Trip Testing) بمنظومات مصممة لذلك، دون إيقاف الوحدة — وهذا يعالج مباشرة مشكلة **العطل المستتر** التي شرحناها في 7.8.

من واقع الميدان — ثلاث نقاط تخص هذه المنظومة تحديدًا:

1) ضغط زيت القطع مؤشر صحة لا مجرد سماحة. انخفاض تدريجي بطيء فيه — بينما يبقى فوق حد القطع — يعني تسريبًا متزايدًا أو مضخة متدهورة. راقب الاتجاه لا القيمة، تمامًا كما ننصح مع كل مؤشر آخر في هذا الكتاب.

2) الفارق بين «أمر القطع» و«القطع الفعلي» هو مسافة قد يقع فيها العطل. فقد يصدر المنطق أمر القطع بشكل سليم تمامًا، ولا ينهار الضغط لأن ملفًا لم يعمل أو صمام تصريف علق. ولهذا فإن قراءة مفاتيح ضغط زيت القطع في سجل الحدث هي التي تُثبت أن القطع نُفِّذ — لا رسالة "TRIP" على الشاشة.

3) تلوث الزيت هو العدو الأول. صمامات القطع مكوّنات هيدروليكية دقيقة، وأي جسيمات في الزيت قد تسبب علوقًا — وعلوق صمام قطع مغلقًا يعني قطعًا كاذبًا، وعلوقه مفتوحًا يعني فشلًا في القطع وهو الأخطر. وهذا يربط مباشرةً بموضوع نظافة الزيت في 8.7: نظافة الزيت ليست موضوع صيانة، إنها موضوع سلامة.

7.10 مراقب الاحتراق ومعادلة الفارق المسموح

سنتحدث في 13.10 عن فارق حرارة العادم (Spread) كأداة تشخيص. وهنا نتناوله من زاوية أخرى: **بوصفه منظومة حماية قائمة بذاتها**، لها منطق أعقد مما يظنه معظم المهندسين.

لماذا لا يكفي حدّ ثابت؟

الفكرة الساذجة: «إذا تجاوز الفارق بين أعلى ثرموكابل وأدناه قيمة معيّنة، أنذر ثم اقطع».

لكن هذا خاطئ لسببين:

الأول: الفارق الطبيعي **يتغيّر مع حالة التشغيل**. عند اللاحمل تكون درجات الحرارة منخفضة والفوارق بينها صغيرة بطبيعتها؛ وعند الحمل الكامل تكون الحرارة عالية والفوارق أكبر حتى في وحدة سليمة تمامًا. **فحدّ ثابت سيكون إما متساهلًا جدًا عند الأحمال المنخفضة، أو متشددًا جدًا عند العالية.**

والثاني: الفارق يتأثر بحرارة الهواء الداخل وبضغط ودرجة حرارة مخرج الضاغط — أي بظروف اليوم لا بصحة الآلة وحدها.

الحل: فارق مسموح محسوب لا ثابت

ولذلك يبني مراقب الاحتراق **حدًّا يُحسب لحظيًا** من صيغة تأخذ الشكل العام التالي:

$$\text{الفارق المسموح} = (k1 \times T_\text{العادم}) + k2 - (k3 \times T_\text{مخرج_الضاغط})$$

وبالقراءة الهندسية لكل حدّ:

- **الحد الأول:** الفارق المسموح **يتناسب مع حرارة العادم** — كلما ارتفعت الحرارة اتّسع الفارق الطبيعي، فيتّسع الحد.
- **الحد الثاني:** إزاحة ثابتة تمثّل الفارق الطبيعي الأدنى للآلة.
- **والحد الثالث — وهو الأذكى: طرح يتناسب مع حرارة مخرج الضاغط**، أي أن الحد **يضيق** كلما ارتفعت حرارة مخرج الضاغط. والسبب: حرارة مخرج الضاغط دالة في الحمل والظروف المحيطة، فهي تُعوّض عن كون الآلة محمّلة فعلًا لا مجرد ساخنة.

وتُضاف أحيانًا إزاحة **(Bias)** مؤقتة أثناء تحويل الوقود، لأن التحويل من غاز إلى سائل أو العكس يسبب فارقًا عابرًا لا يدل على عطل. **حماية تعرف أن تخفّف عن نفسها في ظرف تعرف أنه سيربكها — وهذا نضج هندسي حقيقي.**

طبقات مراقب الاحتراق

المنظومة عادةً متدرجة، لا حدًّا واحدًا:

المستوى	ما يعنيه	الإجراء
فارق مرتفع **(Spread 1 High)**	خروج طفيف عن المتوقع	إنذار
فارق مرتفع جدًا	تدهور واضح	إنذار مشدد، وقد يُخفَّض الحمل
فارق مع نمط زاوي محدد	مواضع الثرموكابلات الباردة **متجاورة**	مؤشر على غرفة أو حاقن بعينه
فارق يتجاوز الحد المحسوب	تدهور خطر	**قطع**

النقطة التي تفرّق بين قراءة صحيحة وقراءة خاطئة للفارق: الموضع الزاوي أهم من القيمة العددية.

ثرموكابلان باردان متجاوران ← الأرجح **غرفة احتراق أو حاقن واحد** — لأن الغاز الخارج من غرفة واحدة يصل إلى ثرموكابلين متجاورين بسبب الدوران في مرحلة التوربين. وهذه **مشكلة عملية حقيقية**.

ثرموكابل واحد شاذ وجيرانه سليمون ← الأرجح **مشكلة قياس**: الحسّاس أو الكابل أو القناة (راجع 19.5).

فوارق موزّعة عشوائيًا بلا نمط ← الأرجح **مشكلة عامة**: تحويل وقود، أو تركيبة وقود متغيرة، أو ضبط تقسيمات وقود (راجع 22.7).

ولهذا فإن أول ما ينبغي فعله عند إنذار فارق ليس قراءة الرقم — بل رسم القيم حول محيط العادم والنظر إلى الشكل. وشاشة تعرض الثرموكابلات مرتّبة بترتيبها الزاوي الحقيقي تساوي عشرة تقارير رقمية.

7.11 حمايات "سلامة الإشارة": حين تحمي المنظومة نفسها من عماها

طبقة حماية كاملة لا يذكرها كثير من الكتب، ومع ذلك هي مسؤولة عن جزء معتبر من القواطع في الوحدات الحديثة — وأكثرها إرباكًا للمهندس الذي لا يعرف بوجودها.

السؤال الذي تجيب عنه: ماذا يحدث حين **يفقد نظام الحماية قدرته على المعرفة؟** لا حين تتجاوز قيمة حدًّا، بل حين تصبح القيمة نفسها غير موثوقة أو مفقودة.

الأنماط الرئيسية

1) فقد إشارة السرعة **(Loss of Speed Signal).** إذا سقطت قراءة السرعة إلى الصفر أو إلى قيمة غير معقولة بينما الآلة تدور، فإن **حماية السرعة الزائدة أصبحت عمياء.** والمنطق الصحيح هنا **ليس** تجاهل الإشارة ومواصلة التشغيل، بل **القطع** — لأن التشغيل بحماية سرعة زائدة معطّلة مخاطرة غير مقبولة. **الاستمرار بلا حماية أخطر من التوقف بلا داعٍ.**

2) اختلاف قناة التحكم عن قناة الحماية **(Speed Signal Trouble).** التوربين الحديث يقيس السرعة بمجموعتين منفصلتين: واحدة للتحكم وأخرى للحماية (راجع 7.2). وإذا **اختلفت القراءتان بأكثر من هامش معيّن**، فذلك يعني أن إحداهما تكذب — ولا نعرف أيهما. والمنطق يعالج الحالتين بشكل منفصل ومسمّى: انحراف جهة التحكم عن الحماية، وانحراف جهة الحماية عن التحكم. **وهذا نمط عام يستحق التعميم: المقارنة بين قياسين مستقلين للشيء نفسه أداة تشخيص ذاتي قوية.**

3) فقد مدخلات الحماية **(Loss of Protective Inputs).** إذا فقدت وحدة الحماية المستقلة مدخلاتها — بطاقة، أو كابل، أو تغذية — فهي لم تعد قادرة على أداء وظيفتها. **قطع.**

4) عطل كاشف الاهتزاز **(Transducer Fault).** كاشف اهتزاز يقرأ صفرًا تمامًا أو خارج المدى المعقول ليس «لا اهتزاز» — إنه **حسّاس ميت.** والمنظومة تميّز بين الحالتين: إنذار عطل الكاشف مختلف عن إنذار الاهتزاز المرتفع، وأحدهما يخبرك عن الآلة والآخر عن نفسه.

5) عطل تغذية الحماية أو الاتصال بين الوحدات.

لماذا هذا صعب على المهندس الميداني؟

لأن الوحدة تقطع **وكل شيء يبدو طبيعيًا**. الحرارة طبيعية، والاهتزاز طبيعي، والسرعة طبيعية — ومع ذلك قطعت. **والمهندس الذي لا يعرف بوجود هذه الطبقة سيبحث في العملية ولن يجد شيئًا، وقد يعيد التشغيل بلا فهم.**

والمفتاح دائمًا في سجل الأحداث: رسالة القطع نفسها ستشير إلى فقد إشارة أو اختلاف قنوات أو عطل مدخلات، لا إلى تجاوز قيمة. **وهذا يعيدنا إلى منهجية 12.14: اقرأ معرّف الإنذار أولًا، وتتبّعه إلى المنطق الذي أطلقه — لا تخمّن من الأعراض.**

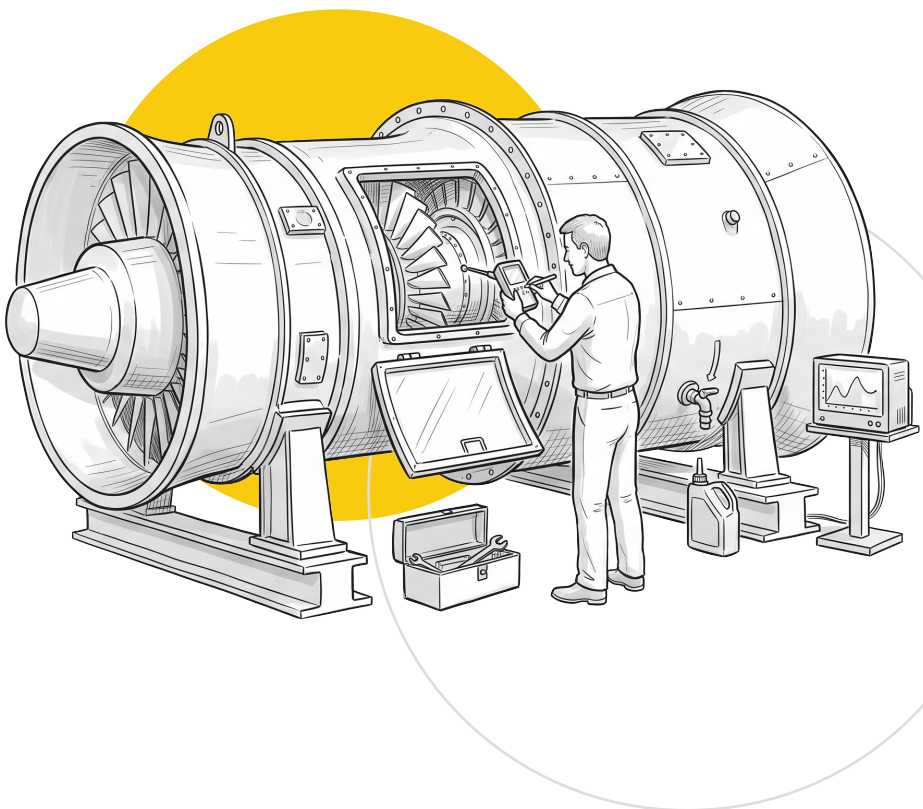
> **والدرس الفلسفي في هذه الطبقة يستحق التأمل:** منظومة الحماية الناضجة لا تحمي الآلة من الظروف الخطرة فحسب — **بل تحمي الآلة من نفسها حين تفقد القدرة على الرؤية.** وهذا هو الفرق الحقيقي بين «منظومة إنذارات» و«منظومة حماية»: الأولى تخبرك بما تراه، والثانية تعرف متى لم تعد ترى، وتتصرف بناءً على ذلك.
>
> **وهذه بالضبط النقطة التي تفصل منظومة الحماية الحتمية عن نموذج الذكاء الاصطناعي** الذي ناقشناه في 23.13: النموذج الإحصائي، بحكم بنائه، **يعطي إجابة دائمًا** — ولا يعرف متى يجب أن يقول «لا أعرف». أما منظومة الحماية فمصممة صراحةً لتعرف حدود معرفتها وتتصرف بحذر عندها. **وهذا وحده سبب كافٍ لإبقاء الحماية خارج نطاق الذكاء الاصطناعي.**

خلاصة الفصل

بهذا نكون قد أنهينا الفصل السابع بكل طبقاته: من فلسفة الحماية العامة (7.1)، مرورًا بكل نظام حماية على حدة (7.2 إلى 7.6)، فاجتماعها في منطق موحّد (7.7)، فالإيقاف الطارئ وما يتصل به (7.8)، وصولًا إلى نظام زيت القطع (7.9) ومراقب الاحتراق (7.10) وحمايات سلامة الإشارة (7.11). **والخيط الذي يجمعها كلها واحد: الحماية ليست ذكاءً، بل يقين** — منطق بسيط، مستقل، حتمي، يعمل بالطريقة نفسها في كل مرة، ويميل إلى الجانب الآمن حين يشك. والفصل القادم يأخذنا إلى جانب مختلف تمامًا: كيف تُشغَّل هذه الوحدة وتُصان يوميًا على أرض الواقع.

الفصل الثامن:

تشغيله وصيانته



في الفصل السابع تحدثنا عن كيف يحمي التوربين الغازي نفسه من الأعطال الخطيرة لحظة حدوثها. هذا الفصل يتناول موضوعًا مكمّلًا لكنه مختلف بطبيعته: كيف نتعامل مع الوحدة يوميًا وعلى المدى الطويل بحيث نقلل احتمال وصولها أصلًا لحالة تستدعي قاطعًا أو إيقافًا طارئًا. هذا هو جوهر الصيانة (Maintenance) — وهي من أكثر الجوانب التي يقضي فيها المهندس والفني وقتهما الفعلي في الميدان، أكثر بكثير من لحظات التشغيل أو الإيقاف نفسها.

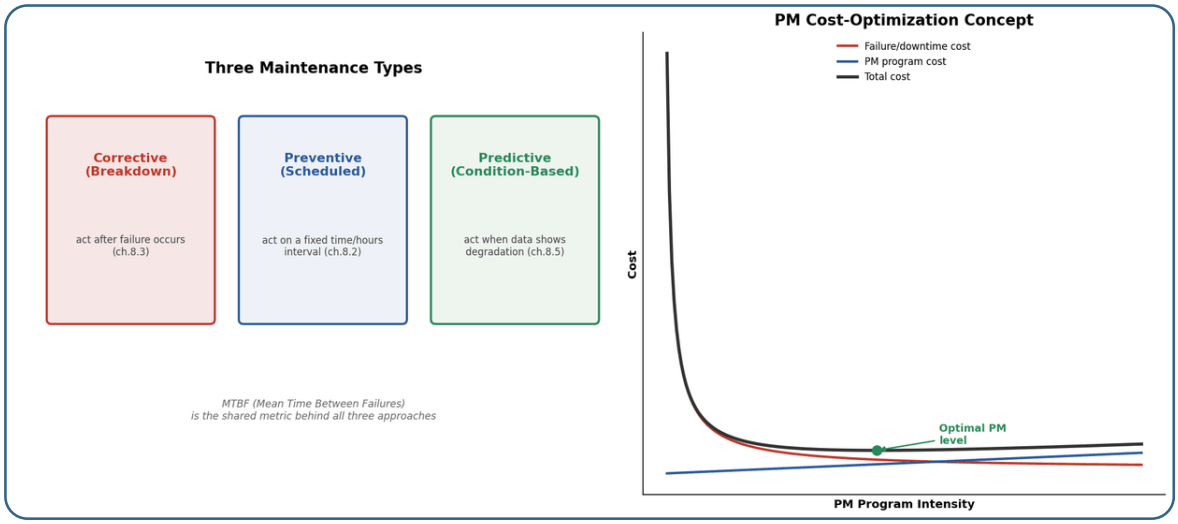
8.1 أنواع الصيانة: مفاهيم أساسية

قبل أن نغوص في تفاصيل كل نوع صيانة على حدة، يجدر أن نتفق على تصنيف واضح، لأن الكلمات المستخدمة في الميدان تتداخل أحيانًا بين المهندسين، بينما هي فعليًا مفاهيم مختلفة لها منطق مختلف تمامًا.

الصيانة التصحيحية **(Corrective / Breakdown Maintenance):** هي التدخل الذي يحدث **بعد** حدوث العطل — المعدة توقفت أو أعطت أداءً غير طبيعي، ثم نتدخل لإصلاحها. أبسط مثال: عطل مفاجئ في مضخة زيت يوقف الوحدة، فيتدخل الفني لتشخيص السبب واستبدال الجزء المعطوب. ميزتها أنك لا تصرف وقتًا أو مالًا على صيانة معدة سليمة، لكن عيبها الأساسي أن التوقف يقع **بلا سابق إنذار**، وغالبًا في أسوأ توقيت ممكن (وسط الإنتاج، أو بعد أن يُتلف الجزء المعطوب أجزاءً أخرى مجاورة له نتيجة العطل).

الصيانة الوقائية **(Preventive Maintenance):** هي التدخل المجدوَل **قبل** حدوث العطل، بناءً على فترات زمنية أو عدد ساعات تشغيل محددة مسبقًا (وفق توصيات الصانع غالبًا) — بغض النظر عن الحالة الفعلية للجزء. مثال: تغيير فلاتر الزيت كل عدد ساعات تشغيل معيّن، بصرف النظر عمّا إذا كانت الفلاتر ما زالت بحالة جيدة أم لا. ميزتها تقليل احتمال العطل المفاجئ بشكل كبير، لكن عيبها أنها قد تستبدل أجزاءً ما زالت صالحة للعمل (تكلفة زائدة)، أو في المقابل لا تكتشف عطلًا ينشأ فجأة في منتصف الفترة المجدولة.

الصيانة التنبؤية **(Predictive / Condition-Based Maintenance):** هذا النوع الثالث يحاول أن يجمع أفضل ما في النوعين السابقين — فالتدخل يكون بناءً على **الحالة الفعلية** للمعدة، لا بناءً على جدول زمني ثابت ولا بعد وقوع العطل. يعتمد على قياسات مستمرة أو دورية (اهتزاز، تحليل زيت، حرارة، أداء) لرصد أي تدهور تدريجي، ولا يقع التدخل إلا حين تشير البيانات فعلًا إلى حاجة حقيقية. هذا هو المنطق الذي شرحناه أصلًا في مراقبة الاهتزاز (7.4) وسنعود إليه بتفصيل أوسع في قسم مراقبة الأداء (8.5) — فالحدود بين «حماية» التوربين و«صيانته» ليست دائمًا خطًا واضحًا، وهذا مثال عملي على التداخل بينهما.



الشكل 8.1 — الأنواع الثلاثة للصيانة، ومنحنى التوازن الاقتصادي بين تكلفة برنامج الصيانة الوقائية وتكلفة الأعطال، الذي يحدد «المستوى الأمثل» لكثافة الصيانة الوقائية

من واقع الميدان — التوازن الاقتصادي بين الأنواع: فكرة أن «الصيانة الوقائية دائمًا أفضل من التصحيحية» تبسيط زائد للواقع. فلو زدت وتيرة الصيانة الوقائية بشكل مبالغ فيه، ارتفعت تكلفة الصيانة نفسها (قطع غيار، أيدٍ عاملة، وقت توقف مخطط) بلا داعٍ حقيقي. ولو قللتها كثيرًا، ارتفعت تكلفة الأعطال المفاجئة (توقف غير مخطط، أضرار تبعية، خسارة إنتاج). عمليًا، هناك نقطة توازن تقريبية — فمنحنى تكلفة الصيانة الكلية (مجموع تكلفة الوقائية + تكلفة التصحيحية) يبلغ أدنى قيمة له عند مستوى معيّن من تكرار الصيانة الوقائية، وأي زيادة أو نقصان عنه يرفع التكلفة الإجمالية. الشركات الكبرى تستخدم هذا المنطق (مدعومًا بمؤشر مثل متوسط الوقت بين الأعطال — MTBF: Mean Time Between Failures) لتحديد أفضل تكرار للصيانة الوقائية لكل نوع معدة، بدل الاعتماد على «شعور عام» بأنها كافية أو غير كافية.

الأقسام القادمة في هذا الفصل تستعرض كل نوع بتفصيل أوسع: الصيانة الوقائية الدورية (8.2)، الصيانة التصحيحية وأسلوب التشخيص (8.3)، الفحوصات الدورية الكبرى للتوربين تحديدًا (8.4)، ثم مراقبة الأداء كأساس للصيانة التنبؤية (8.5).

8.2 الصيانة الوقائية الدورية

بعد أن وضّحنا المفهوم العام في 8.1، يدخل هذا القسم في تفاصيل الصيانة الوقائية كما تُطبَّق فعليًا على أرض الواقع — من فحوصات بسيطة يومية إلى مهام مجدولة أوسع.

الفحص الروتيني اليومي **(Routine Servicing):** هذا أبسط مستويات الصيانة الوقائية وأكثرها تكرارًا، وهو غالبًا مسؤولية المشغّل نفسه لا فريق صيانة متخصص. من واقع الميدان، أغلب برامج الفحص الروتيني تدور حول أربع نقاط أساسية بسيطة لكن حاسمة: **النظافة العامة** (تسرب زيت أو وقود ظاهر، تراكم غبار على فتحات التهوية)، **مستويات السوائل** (خزان الزيت، سوائل التبريد إن وجدت)، **الفلاتر** (مؤشرات انسداد فلتر الهواء أو الزيت)، **ولمبات ومؤشرات الحالة** (التأكد من أن كل مؤشرات التشغيل الطبيعي تعمل وأنه لا يوجد إنذار معلّق بلا تفسير). بساطة هذه الفحوصات لا تقلل أهميتها — فأغلب الأعطال الكبيرة التي رأيتها في حياتي المهنية كان يمكن ملاحظتها مبكرًا لو وُجد انتباه يومي بسيط لهذه النقاط الأربع، بدل أن تتفاقم إلى حالة طارئة.

سجل التشغيل **(Log Book / Running Log):** جزء مهم من الانضباط في الصيانة الوقائية هو التوثيق المستمر — تسجيل القراءات الأساسية (حرارة، ضغوط، اهتزاز، ساعات التشغيل، عدد مرات بدء التشغيل) على فترات منتظمة (كل نوبة عمل مثلًا)، لا وقت حدوث مشكلة فقط. من واقع الميدان، تظهر قيمة هذا السجل الحقيقية حين تحتاج إلى المقارنة — هل الحرارة اليوم أعلى من المعتاد فعلًا، أم أن هذا تذبذب طبيعي؟ بدون سجل تاريخي منتظم، يصبح هذا السؤال تخمينًا. وهذا نفس المبدأ الذي سنبني عليه في مراقبة الأداء (8.5) لاحقًا — لكن بمستوى أعمق من التحليل.

المهام المجدولة بفترات زمنية **(Time-Based Preventive Tasks):** فوق الفحص الروتيني اليومي، توجد مهام أوسع تجري على فترات أطول (أسبوعية، شهرية، أو بعدد ساعات تشغيل محددة) — مثل تغيير فلاتر الزيت والوقود، وأخذ عينة زيت للتحليل المخبري الدوري، وفحص وشدّ التوصيلات الكهربائية، واختبار عمل أنظمة الحماية نفسها (اختبار وظيفي دوري لأجهزة مثل كاشفات الغاز أو زر الإيقاف الطارئ، للتأكد من أنها ما زالت تعمل بشكل صحيح رغم أنها نادرًا ما تُفعَّل فعليًا). هذه النقطة الأخيرة مهمة جدًا من واقع الميدان: نظام حماية لا يُختبر دوريًا هو نظام مجهول الحالة فعليًا، حتى لو بدا «موجودًا وسليمًا» في المظهر.

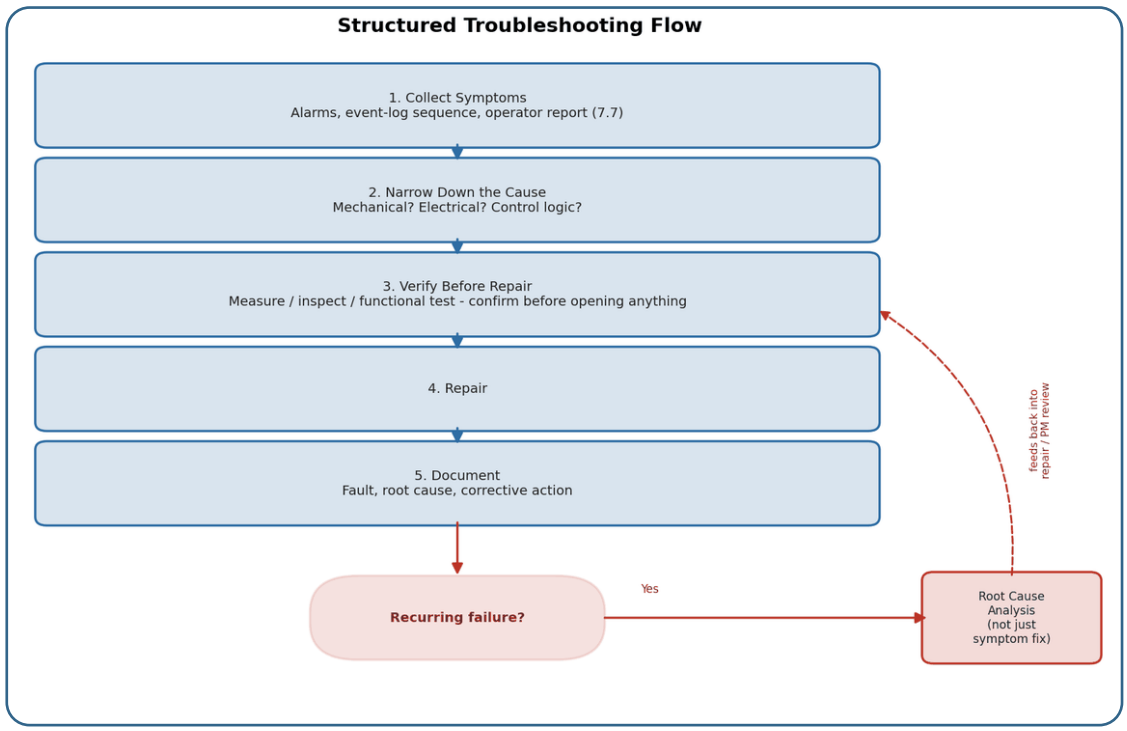
مفهوم عامل الصيانة **(Maintenance Factor):** من واقع الميدان، فترات الصيانة الوقائية الموصى بها من الصانع ليست رقمًا ثابتًا يُطبَّق بالشكل نفسه على كل وحدة — بل هي مبنية على «ظروف تشغيل مرجعية» معيّنة. فإذا كانت الوحدة تعمل في ظروف أقسى من المرجعية (بدء تشغيل متكرر بدل تشغيل مستمر، وقود أقل نظافة، حقن مياه أو بخار، بيئة مليئة بالغبار)، طُبِّق عامل تصحيح (Maintenance Factor) يقصّر الفترة الفعلية بين الفحوصات. سنعود إلى هذا المفهوم بتفصيل أكبر في قسم الفحوصات الدورية الكبرى (8.4)، لكنه يستحق الذكر هنا لأنه ينطبق على كل مستويات الصيانة الوقائية — فالجدول المكتوب في كتيّب الصانع نقطة بداية، لا قاعدة جامدة تُطبَّق دون مراعاة ظروف التشغيل الفعلية للوحدة.

من واقع الميدان: أكبر خطأ رأيته يتكرر في مواقع كثيرة هو معاملة الصيانة الوقائية كـ«قائمة مربّعات نعلّم عليها» (Checklist بالمعنى السطحي) بدل فهم حقيقي للغرض من كل بند. فنيٌّ يعلّم على بند «فحص مستوى الزيت» دون أن يلاحظ فعليًا أن المستوى انخفض بشكل غير طبيعي منذ آخر فحص — هذا يفرغ الصيانة الوقائية من قيمتها الحقيقية. الانضباط في التنفيذ مهم، لكن الانتباه الفعلي للتفاصيل أثناء التنفيذ أهم منه.

8.3 الصيانة التصحيحية وأسلوب التشخيص

مهما بلغ انضباط برنامج الصيانة الوقائية (8.2)، تبقى الصيانة التصحيحية جزءًا لا مفر منه — فبعض الأعطال بطبيعتها مفاجئة (عطل كهربائي في مكوّن إلكتروني، كسر ميكانيكي مفاجئ) ولا يمكن التنبؤ بها بجدول زمني ثابت. والفرق بين مهندس متمكن وآخر أقل خبرة غالبًا ما يظهر بالضبط هنا: في سرعة التشخيص ودقته، لا في معرفة كيف يُصلَح الجزء بعد تحديده فقط.

منهجية التشخيص المنظّم: من واقع الميدان، أكبر خطأ يقع فيه المهندسون الجدد وقت مواجهة عطل هو القفز مباشرة إلى تغيير أجزاء بناءً على تخمين، بدل اتباع منهجية تشخيص منظّمة. الترتيب العملي المجرّب: أولًا **جمع الأعراض بدقة** — أي إنذار ظهر بالضبط، وبأي ترتيب زمني (هذا بالضبط سبب أهمية سجل الأحداث الذي شرحناه في 7.7)؛ ثانيًا **تضييق نطاق الاحتمالات** — هل العطل في مكوّن ميكانيكي، أم كهربائي، أم في منطق التحكم؟ القراءات المتاحة (حرارة، ضغط، اهتزاز) تساعد على استبعاد احتمالات كاملة بسرعة بدل فحص كل شيء بالتتابع؛ ثالثًا **التحقق قبل الإصلاح** — فحص فعلي (قياس مقاومة، فحص بصري، اختبار وظيفي) يؤكد التشخيص قبل فك أي جزء، لأن فك وتركيب أجزاء سليمة يستهلك وقتًا ثمينًا وأحيانًا يُدخل مشكلة جديدة بدل أن يحل القديمة.



الشكل 8.2 — تسلسل التشخيص المنظّم: جمع الأعراض ← تضييق الاحتمالات ← التحقق قبل الإصلاح ← الإصلاح ← التوثيق، مع حلقة رجوع لتحليل السبب الجذري عند تكرار نفس العطل.

جداول التشخيص المرجعية **(Troubleshooting Tables):** أغلب أدلة الصانع الجيدة تقدم جداول تشخيص بصيغة ثابتة: **المشكلة الملاحظة ← السبب المحتمل ← إجراء التصحيح**. مثلًا: "حرارة عادم مرتفعة بشكل غير متماثل بين الحساسات ← احتمال انسداد جزئي بحقنة وقود واحدة أو أكثر ← فحص وتنظيف حقن الوقود المشتبه بها". وقيمة هذا التنظيم أنه يوفر نقطة انطلاق سريعة وقت الضغط، بدل الاعتماد على الخبرة الشخصية المتراكمة وحدها (وهي مهمة، لكنها ليست دائمًا متاحة بالمستوى نفسه لكل فني في كل مناوبة). من واقع الميدان، أفضل فرق الصيانة تبني جداول تشخيص خاصة بها مبنية على تاريخ الأعطال الفعلي لوحدتها بالذات، فوق الجداول العامة من الصانع — لأن لكل وحدة "شخصية" أعطال متكررة خاصة بها حسب ظروف تشغيلها وعمرها.

الفرق بين إصلاح العرض وإصلاح السبب الجذري: نقطة حرجة من واقع الميدان — كثير من الأعطال «المتكررة» (العطل نفسه يعود بعد فترة قصيرة من الإصلاح) سببها أن الإصلاح عالج العرض الظاهر دون معالجة السبب الجذري. مثال: استبدال حساس اهتزاز تالف بشكل متكرر قد يكون حلًا سطحيًا، بينما السبب الجذري الفعلي مشكلة محاذاة ميكانيكية (Misalignment) تستمر في إتلاف الحساسات الجديدة واحدًا تلو الآخر. تحليل السبب الجذري (Root Cause Analysis) يستحق وقتًا إضافيًا خصوصًا للأعطال المتكررة أو مكلفة التوقف، حتى لو كان الحل السريع «المؤقت» يعيد الوحدة للعمل بسرعة أكبر.

التوثيق بعد الإصلاح: كل حالة صيانة تصحيحية تستحق تسجيلًا واضحًا — ما العطل، وما السبب الفعلي (إن تم تحديده)، وما الإجراء الذي حلّه. هذا التوثيق يبني تدريجيًا «ذاكرة مؤسسية» للوحدة، ويغذّي مباشرة تحديث جداول التشخيص الخاصة المذكورة أعلاه، وأحيانًا يكشف نمطًا يستدعي تعديل برنامج الصيانة الوقائية نفسه (8.2) — فإذا تكرر العطل نفسه عدة مرات بفترات متقاربة، فهذا مؤشر على أن فترة الصيانة الوقائية لهذا الجزء بالذات تحتاج إلى تقصير، لا مجرد «سوء حظ» متكرر.

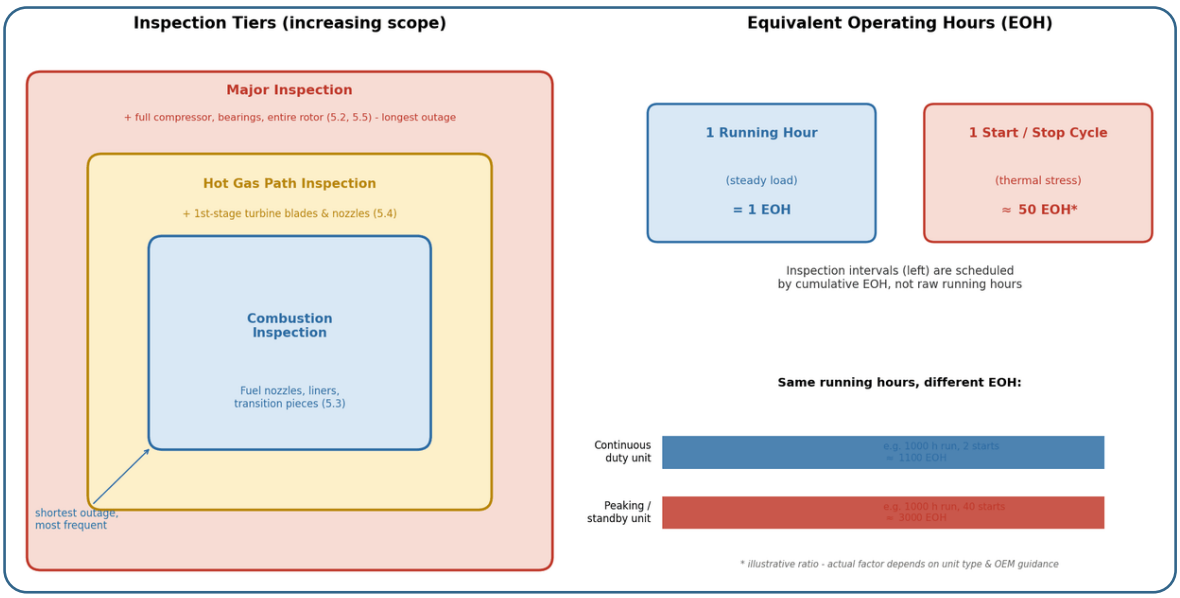
8.4 الفحوصات الدورية الكبرى

فوق الصيانة الوقائية الروتينية (8.2)، هناك مستوى ثانٍ من الفحوصات مخصص تحديدًا للتوربين الغازي نفسه — فحوصات أعمق وأوسع نطاقًا، مبنية على عدد ساعات التشغيل التراكمية، وتتدرج من الأبسط إلى الأشمل.

مبدأ التدرّج **(Inspection Tiers):** اعتمدت الصناعة تاريخيًا مفهوم ثلاثة مستويات متداخلة، كل مستوى أشمل من الذي قبله:

- فحص الاحتراق **(Combustion Inspection):** أضيق نطاقًا — يركّز على أجزاء غرفة الاحتراق (5.3) المعرّضة مباشرة للحرارة الشديدة: حاقنات الوقود، بطانات غرفة الاحتراق، قطع الانتقال (Transition Pieces). أقل الفحوصات تكلفة ووقت توقف.
- فحص الممر الحار **(Hot Gas Path Inspection):** يشمل كل ما في فحص الاحتراق، إضافة إلى فحص الصف الأول من ريش التوربين والفوهات (Nozzles) — أكثر الأجزاء تعرضًا لحرارة الغازات مباشرة بعد الاحتراق (5.4). يتطلب فتح غطاء التوربين جزئيًا.
- الفحص الكبير **(Major Inspection):** أشمل مستوى — يضيف فحصًا كاملًا للضاغط (5.2)، والمحامل (5.5)، والعمود بالكامل. يتطلب عادة فك الوحدة بشكل كبير، وأطول فترة توقف بين كل أنواع الفحوصات.

المنطق وراء هذا التدرّج بسيط: أجزاء غرفة الاحتراق تتعرض لأقسى الظروف الحرارية فتحتاج فحصًا أكثر تكرارًا، بينما أجزاء مثل المحامل بعيدة نسبيًا عن الحرارة القصوى وتتحمل فترات أطول بين الفحوصات. من واقع الميدان، لكل فحص من هذه الثلاثة جدول «معايير قبول» (Criteria) مكتوب بوضوح — قياسات تآكل أو تشقق مسموح بها كحد أقصى — وجدول «إجراءات محتملة» يوضح متى يكفي التنظيف والفحص البصري فقط، ومتى يستدعي الأمر استبدال جزء كامل.



الشكل 8.3 — يسار: تدرّج المستويات الثلاثة للفحص (كل مستوى يشمل ما قبله). يمين: مفهوم ساعات التشغيل المكافئة (EOH) — بدء تشغيل واحد يعادل عددًا أكبر بكثير من ساعات التشغيل المستمر، ولذلك وحدة تُشغَّل وتُوقَف بشكل متكرر تصل لموعد الفحص أسرع من وحدة تعمل باستمرارية عالية.

فحص البوروسكوب **(Borescope Inspection):** هذه أداة تشخيصية مهمة تسبق الفحوصات الكبرى المذكورة أعلاه (أو تغني عنها أحيانًا) — كاميرا صناعية مرنة تدخل من منافذ وصول صغيرة مخصصة في جسم التوربين، تسمح بفحص بصري داخلي لريش الضاغط والتوربين وأجزاء غرفة الاحتراق **دون فك أي جزء من الوحدة**. من واقع الميدان، البوروسكوب أداة قيّمة جدًا لأنه يعطي معلومة حقيقية عن الحالة الداخلية بتكلفة ووقت توقف أقل بكثير من فتح الوحدة فعليًا — يُستخدم دوريًا بفترات أقصر من فحص الاحتراق نفسه، وأيضًا كأداة تشخيص فورية عند الشك في مشكلة معينة (مثلًا بعد حدث غير طبيعي في التشغيل). وإذا كشف البوروسكوب ضررًا واضحًا (تآكل غير متماثل، شظايا أجسام غريبة FOD، بداية تشقق)، أصبح القرار مبكرًا: هل نكتفي بالمراقبة، أم ننتقل مباشرة إلى فحص أشمل قبل موعده المجدول؟

ساعات التشغيل المكافئة **(Equivalent Operating Hours — EOH):** من واقع الميدان، هذا مفهوم عملي مهم جدًا يوسّع فكرة «عامل الصيانة» التي ذكرناها في 8.2. فالضرر الحراري والميكانيكي الذي يلحق بأجزاء الممر الحار ليس مرتبطًا بعدد ساعات التشغيل الفعلية وحدها — فبدء التشغيل نفسه (Start) يسبب إجهادًا حراريًا ودورة تمدد/انكماش مركّزة أقسى بكثير من ساعة تشغيل مستمر بحمل ثابت. لذلك تستخدم الصناعة معادلة تحويل تقريبية (كل بدء تشغيل واحد يُحتسب كأنه يعادل عددًا معيّنًا من ساعات التشغيل المستمر — رقم شائع الاستخدام صناعيًا هو أن بدء تشغيل واحد عادي ≈ 20 ساعة تشغيل مكافئة تقريبًا (ويرتفع الرقم كثيرًا للبدء السريع أو الطارئ أو للإيقاف بقاطع)، والرقم الدقيق يختلف حسب نوع الوحدة وتوصية الصانع)، وفترات الفحوصات الثلاث المذكورة أعلاه

تُحسب بـ EOH لا بساعات التشغيل الفعلية وحدها. عمليًا، هذا يعني أن وحدة تُشغَّل وتُوقَف بشكل متكرر (تشغيل احتياطي أو Peaking) تحتاج إلى فحوصات أبكر بكثير من وحدة تعمل باستمرارية عالية بعدد الساعات الفعلي نفسه — رغم أن «عداد الساعات» وحده قد يبدو متقاربًا بين الحالتين.

من واقع الميدان: التخطيط الجيد للفحوصات الكبرى ليس مجرد انتظار الرقم المجدول والتوقف — بل هو عملية مستمرة تجمع بين نتائج البوروسكوب الدورية، واتجاه مؤشرات الأداء (سنشرحها في 8.5)، وسجل الأعطال التصحيحية (8.3)، لتقرر: هل نلتزم بالموعد المخطط بالضبط، أم نقدّمه، أم حتى نؤخره قليلًا إذا دلّت كل المؤشرات على حالة أفضل من المتوقع؟ القرار الجيد يوازن بين تكلفة التوقف المبكر غير الضروري، وخطر الانتظار لفترة أطول من اللازم.

المحاذاة والتوازن (Alignment and Balancing)

نقطة تُثار عادة أثناء الفحوصات الكبرى (8.4) خصوصًا الفحص الكبير (Major Inspection)، لكنها تستحق توضيحًا منفصلًا لأنها مفهومان مختلفان رغم تشابههما:

- المحاذاة **(Alignment):** التأكد من أن محاور دوران الوحدات المتتالية على خط العمود نفسه (التوربين، صندوق التروس إن وُجد، المولد أو الحمل المدار) متطابقة تمامًا — فأي انحراف بسيط (Misalignment) يخلق قوى جانبية متكررة على المحامل والقارنات (Couplings) في كل دورة، تسبب اهتزازًا مميزًا (غالبًا بتردد 1X أو 2X، مرتبط بـ 7.4) وتآكلًا مبكرًا. يُقاس بأجهزة ليزر دقيقة حديثًا، ويُصحَّح بإضافة/إزالة شيمات (Shims) رقيقة تحت أقدام المعدات.
- التوازن **(Balancing):** التأكد من أن توزيع الكتلة حول محور الدوران متماثل — فأي عدم توازن (Unbalance)، ولو طفيف، يخلق قوة طرد مركزي دورية تسبب اهتزازًا بتردد 1X مباشرة يزداد مع مربع السرعة تقريبًا. يُصحَّح بإضافة أوزان موازنة صغيرة في نقاط محددة على العنصر الدوّار، وأحيانًا يتطلب موازنة في موقع التشغيل نفسه (Field Balancing) إذا ظهرت المشكلة بعد التركيب.

من واقع الميدان: التمييز بين الاثنين بتحليل توقيع الاهتزاز (Vibration Signature، مرتبط بـ 7.4 و8.5) خطوة تشخيصية أساسية — فنمط الاهتزاز واتجاهه (شعاعي مقابل محوري) وعلاقته بالسرعة توجّه المهندس مباشرة إلى أي المشكلتين هي السبب الأرجح قبل أن يبدأ بأي تصحيح فعلي، لأن تصحيح توازن في مشكلة محاذاة فعلية (أو العكس) مضيعة للوقت والمال.

إدارة قطع الغيار (Spare Parts Management)

جانب لوجستي بحت لكنه يؤثر مباشرة على مدة التوقف الفعلية عند أي عطل أو فحص مجدول — فأفضل خطة صيانة في العالم لا تنفع إذا لم تكن القطعة المطلوبة موجودة وقت الحاجة. من واقع عملي، تُصنَّف قطع الغيار عادة إلى ثلاث فئات حسب الأولوية:

- قطع حرجة **(Critical/Insurance Spares):** مكوّنات وقت توريدها طويل جدًا (أشهر إلى سنة) وتوقف الوحدة بالكامل إذا تعطلت بلا بديل جاهز — تُخزَّن دائمًا في الموقع رغم تكلفتها العالية، لأن كلفة التوقف الطويل بانتظار التوريد أعلى بكثير من كلفة التخزين.
- قطع استهلاكية دورية **(Consumable/Rotable Spares):** فلاتر، حشيات، ثرموكابلات، قطع تُستبدل بشكل روتيني ضمن الصيانة الوقائية (8.2) — تُخزَّن بكميات تكفي دورة صيانة واحدة على الأقل.
- قطع حسب الطلب **(Non-Critical/Order-as-Needed):** وقت توريدها قصير نسبيًا أو يمكن تدبيرها من مصادر بديلة — لا تستدعي تخزينًا دائمًا مكلفًا.

> من واقع الميدان: يجب مراجعة قائمة قطع الغيار الحرجة وتحديثها دوريًا بالتوازي مع جدول الفحوصات الكبرى (8.4) — لأن أي تعديل في الجدول (تقديم فحص أو تأخيره بناءً على مؤشرات الأداء في 8.5) يجب أن ينعكس على توقيت طلب القطع المرتبطة به، وإلا انقلبت الميزة التي تكسبها من التخطيط الجيد للفحص إلى تأخير جديد بانتظار قطعة لم تُطلب في الوقت المناسب.

8.5 مراقبة الأداء (Performance Monitoring)

كل أنواع الصيانة التي شرحناها حتى هذه اللحظة (8.1 إلى 8.4) تتعامل مع «حالة» المعدة — سليمة أم لا، تحتاج إلى فحص أم لا. أما مراقبة الأداء فزاوية مختلفة قليلًا: تتبّع **كفاءة** الوحدة نفسها بمرور الوقت، لأن التدهور التدريجي في الأداء غالبًا أول إشارة على مشكلة ناشئة، قبل أن تصل إلى مستوى يستدعي إنذارًا أو قاطعًا فعليًا.

فكرة الخط المرجعي **(Baseline):** من واقع الميدان، مراقبة الأداء بدون خط مرجعي دقيق عديمة الفائدة تقريبًا. الخط المرجعي هو أداء الوحدة «وهي في أفضل حالاتها المعروفة» — يُسجَّل عادة مباشرة بعد التشغيل الأولي أو بعد فحص كبير (8.4)، ويُصحَّح رياضيًا حسب ظروف مرجعية موحّدة (حرارة ورطوبة هواء الدخول، ضغط الغلاف الجوي — نفس فكرة «ظروف ISO» التي شرحناها في الفصل الثاني، 2.4). وكل قراءة أداء لاحقة تُقارَن بهذا الخط المرجعي **بعد**

تصحيحها للظروف نفسها، لا بشكل مباشر — لأن انخفاض القدرة في يوم حار جدًا قد يكون طبيعيًا تمامًا ولا علاقة له بأي تدهور فعلي في المعدة.

المؤشرات الأساسية المتتبَّعة: أهمها القدرة الناتجة (Output) عند ظروف تشغيل معيّنة، ومعدل الحرارة (Heat Rate — كمية الوقود المستهلكة لكل وحدة طاقة منتجة، مؤشر مباشر على الكفاءة)، وفارق حرارة العادم بين الحساسات (Spread) الذي شرحناه في 7.3 كأداة حماية، لكنه أيضًا مؤشر أداء بحد ذاته لأن ازدياد التفاوت التدريجي (حتى لو كان ما زال ضمن حدود الأمان) يشير إلى بداية اختلال في توزيع الاحتراق بين غرف الاحتراق المتعددة.

اكتشاف تلوث الضاغط **(Compressor Fouling Detection):** من أوضح الأمثلة العملية على قيمة مراقبة الأداء. مع الوقت، تلتصق جزيئات دقيقة في الهواء (غبار، رطوبة محمّلة بالأملاح في المواقع البحرية، دخان، حشرات) تدريجيًا بريش الضاغط (5.2)، فتقلل سلاسة سريان الهواء وترفع الاحتكاك — والنتيجة انخفاض تدريجي في كفاءة الضاغط، وبالتالي في قدرة الوحدة كلها وكفاءتها، حتى لو لم يوجد أي عطل ميكانيكي فعلي. من واقع الميدان، هذا التدهور بطيء جدًا ويصعب ملاحظته من رحلة تشغيل إلى أخرى — ولا يظهر بوضوح إلا حين تتتبّع الاتجاه (Trend) على مدى أسابيع أو أشهر.

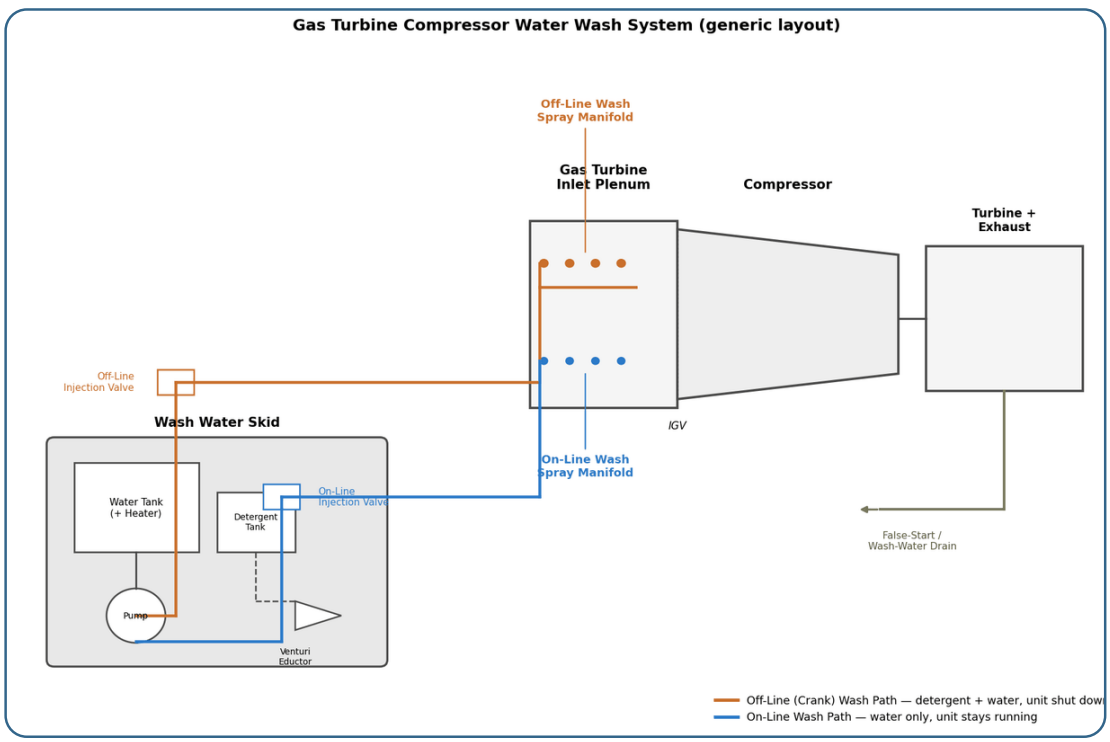
غسيل الضاغط **(Compressor Water Wash)** — لماذا ومتى وماذا يتحسن: عندما ينخفض الأداء عن حد معيّن مقارنة بالخط المرجعي، يكون الحل المعتاد هو غسيل الضاغط. **السبب (لماذا):** الترسبات الملتصقة بريش الضاغط تُفسِد الشكل الانسيابي المصمَّم أصلًا للريشة، فيزيد الاحتكاك وتقل كمية الهواء التي يستطيع الضاغط ضغطها بالجهد نفسه — وبما أن كل أداء الوحدة (2.4) مبني على كمية هواء دخول كافية، فأي نقص هنا ينعكس مباشرة على القدرة والكفاءة. **التوقيت (متى):** القرار الأفضل ليس الاعتماد على جدول زمني ثابت فقط، بل على مؤشرين معًا: تتبّع اتجاه الأداء (انخفاض القدرة أو ارتفاع معدل الحرارة مقارنة بالخط المرجعي)، مع تأكيد بصري عبر فحص البوروسكوب (8.4) لريش الضاغط الأولى وفوهة الدخول — فإذا أكّد الفحص البصري هذا الاتجاه، أصبح القرار واضحًا. **ما الذي يتحسن:** استعادة جزء معتبر من القدرة والكفاءة المفقودة بسبب التلوث تحديدًا (لا أي تدهور آخر في الوحدة — فالغسيل لا يعالج مشاكل ميكانيكية أو تآكلًا حراريًا، بل الترسبات القابلة للإزالة فقط).

نوعا الغسيل:

- الغسيل الحي **(On-Line Wash):** يجري والوحدة ما زالت تعمل بالحمل الكامل تقريبًا، دون إيقاف — يُحقن ماء فقط (بلا سائل تنظيف) عبر فوهات رذاذ في مدخل الضاغط، وعادة تُدار دورة زمنية قصيرة (حوالي نصف ساعة) بشكل متكرر. ميزته الأساسية أنه لا يتطلب توقف الإنتاج، لكن فعاليته جزئية فقط — يزيل الترسبات الطرية السطحية، ولا يستطيع إزالة الترسبات المتماسكة أو القديمة. يُستخدم عادة لإطالة الفترة بين كل غسيل بارد وآخر.

- الغسيل البارد **(Off-Line / Crank Wash):** يتطلب إيقاف الوحدة بالكامل وإدارة العمود بسرعة منخفضة (Crank Speed) دون احتراق، مع حقن سائل تنظيف مخصص (Detergent) ممزوج بالماء عبر منافذ رذاذ منفصلة عن منافذ الغسيل الحي، تليها دورة شطف بماء نظيف فقط، ثم دورة تجفيف بالإدارة دون رش. أكثر فعالية بكثير من الغسيل الحي لأنه يصل إلى كل مراحل الضاغط، لكنه يتطلب فترة توقف (عادة ساعة أو أكثر بين التبريد والغسيل والشطف والتجفيف).

من واقع الميدان — احتياط حرج: قبل أي غسيل بارد، يجب التأكد أولًا من أن حرارة أجزاء الضاغط الداخلية انخفضت إلى مستوى آمن (فترة تبريد بعد الإيقاف)، لأن الفرق الحراري المفاجئ بين ماء الغسيل والمعدن الساخن يسبب «صدمة حرارية» (Thermal Shock) قد تتلف الأجزاء الداخلية — وهذا احتياط سلامة صارم يُذكر بوضوح في كل دليل تشغيل، ويجب أن يُطبَّق بدقة مهما كان الضغط لإعادة الوحدة إلى الخدمة بسرعة.



الشكل 8.4 — مخطط عام لنظام غسيل ضاغط التوربين الغازي: مسار الغسيل البارد (برتقالي، ماء + سائل تنظيف، والوحدة متوقفة) ومسار الغسيل الحي (أزرق، ماء فقط، والوحدة تعمل)

من واقع الميدان — درس مهم: غسيل الضاغط لا يعالج إلا التلوث القابل للإزالة بالماء. فإذا كانت الترسبات زيتية أو ملتصقة بقوة (نتيجة تسرب زيت من نظام قريب مثلًا، أو تلوث كيميائي غير معتاد)، فقد لا يعطي الغسيل العادي تحسنًا ملموسًا — وهذا مؤشر على أن المشكلة أعمق من «غبار عادي»، وتستدعي تحقيقًا في السبب الجذري (8.3) بدل تكرار الغسيل بلا فائدة.

برنامج تحليل الزيت **(Oil Analysis Program):** ألمحنا إليه في 8.2 كمهمة صيانة وقائية دورية، لكنه أيضًا أداة مراقبة أداء وتنبؤ حقيقية. تُرسَل عينات دورية من زيت التزييت (5.5) إلى تحليل مخبري يفحص عدة نقاط: **معادن التآكل** (نسب دقيقة من الحديد أو النحاس أو غيرها في الزيت تشير إلى تآكل داخلي مبكر في المحامل أو التروس قبل أن يظهر كاهتزاز ملحوظ)، **التلوث** (وجود ماء أو وقود مختلط بالزيت، مؤشر على مشكلة في مانع تسرب أو حشية)، **والتحلل الكيميائي للزيت نفسه** (اللزوجة، الحموضة) الذي يحدد هل ما زال الزيت صالحًا للاستخدام أم يحتاج إلى تغيير مبكر عن الجدول المعتاد. من واقع الميدان، اتجاه معادن التآكل بمرور الوقت (لا رقم عينة واحدة منفردة) هو ما يعطي إنذارًا مبكرًا حقيقيًا — فارتفاع مفاجئ في معدن معيّن بين عينتين متتاليتين أهم بكثير من القيمة المطلقة لعينة واحدة.

مراقبة الاهتزاز كأداة أداء، لا حماية فقط: رجوعًا إلى 7.4، شرحنا مراقبة الاهتزاز بصفتها نظام حماية (إنذار وقاطع عند تجاوز حد معيّن). لكن من واقع الميدان، تُستخدم القراءات نفسها أيضًا لمراقبة الأداء طويلة المدى — فتتبّع اتجاه مستوى الاهتزاز عند تردد معيّن (1X، 2X...) بمرور الوقت يكشف تدهورًا تدريجيًا في المحاذاة أو التوازن قبل أن يصل إلى حد الإنذار أصلًا، وهذا يسمح بجدولة تصحيح استباقي (موازنة أو تصحيح محاذاة) بدل الانتظار حتى حد الإنذار أو القاطع.

> **من واقع الميدان:** أفضل برامج مراقبة الأداء التي رأيتها تجمع كل هذه المؤشرات (قدرة، معدل حرارة، فارق حرارة عادم، تلوث ضاغط، تحليل زيت، اتجاه اهتزاز) في لوحة متابعة واحدة تُراجَع دوريًا، لا في ملفات منفصلة يراجعها كل قسم وحده. وحين تجتمع كل هذه الاتجاهات في مكان واحد، تصبح الصورة الكاملة لصحة الوحدة أوضح بكثير من مجموع أجزائها منفردة — وهذا بالضبط جوهر الانتقال من الصيانة التصحيحية (نتفاعل بعد وقوع العطل) إلى الصيانة التنبؤية (نتوقع المشكلة ونتدخل قبل تفاقمها) التي بدأنا الفصل بالحديث عنها (8.1).

اتجاه حديث: الصيانة التنبؤية بالذكاء الاصطناعي والتوأم الرقمي (حتى 2026)

كل الأدوات التي ذكرناها أعلاه (خط مرجعي، اتجاهات، تحليل زيت، اتجاه اهتزاز) هي جوهر الصيانة التنبؤية التقليدية — لكن السنوات الأخيرة شهدت قفزة إضافية عبر أدوات الذكاء الاصطناعي وتعلّم الآلة (Machine Learning):

- **النماذج التنبؤية بتعلّم الآلة:** بدل الاعتماد فقط على حدود ثابتة (Threshold) أو اتجاه بسيط، تُدرَّب نماذج إحصائية/ذكاء اصطناعي على بيانات تشغيل تاريخية ضخمة (حرارة، اهتزاز، ضغوط، قدرة) لتتعلّم «الشكل الطبيعي» لتشغيل الوحدة بكل ظروفها المختلفة، وتكتشف أي انحراف طفيف عن هذا النمط الطبيعي (Anomaly Detection) قبل أن يتطور إلى عطل فعلي — أحيانًا بأسابيع كاملة قبل ظهور أي إنذار تقليدي.

- التوأم الرقمي **(Digital Twin)**: نسخة افتراضية محاكاة للوحدة الفعلية، تُحدَّث باستمرار ببيانات التشغيل الحقيقية، وتُستخدم لمحاكاة سيناريوهات مختلفة (مثل: «لو استمر هذا الاتجاه في الاهتزاز، فمتى نتوقع الوصول إلى حد الإنذار؟») دون أي مخاطرة على الوحدة الفعلية، وأيضًا لتحسين جدولة الفحوصات الكبرى (8.4) بناءً على الحالة الفعلية بدل جدول زمني ثابت فقط (مفهوم يُعرف بـ Condition-Based Maintenance، امتداد لفكرة الـ EOH التي ذكرناها في 8.4).

هذه الأدوات لا تُلغي خبرة المهندس الميداني ولا تحل محل الفهم الهندسي الأساسي الذي شرحناه في هذا الفصل — هي طبقة إضافية تعالج بيانات أكثر بكثير مما يستطيع إنسان متابعته يدويًا، وتنبّه المهندس إلى أنماط دقيقة قد تفوته، لكن القرار النهائي (هل نوقف الوحدة، هل نجدول فحصًا مبكرًا) يبقى قرارًا هندسيًا بشريًا مبنيًا على فهم السياق الكامل — فالأدوات تدعم القرار، ولا تصنعه بدل المهندس.

ويبقى في هذا الفصل بابان عمليان لا يقلّان أهمية عمّا سبق: **السلامة أثناء العمل** — العزل والإقفال والوسم وتصاريح العمل وإدارة التغيير (8.6)، **ومراقبة حالة الزيت** بوصفها ثالث أضلاع المراقبة التنبؤية (8.7).

8.6 السلامة أثناء العمل: العزل والتصريح وإدارة التغيير

كل ما سبق في هذا الفصل يخص **ماذا نصون ومتى**. هذا القسم يخص شيئًا لا يقل أهمية ويُغفل عادةً من الكتب التقنية: **كيف نعمل على المعدة بأمان، ومن يقرر أن العمل مقبول أصلًا**. ومن واقع العمل الميداني، معظم الحوادث الجسيمة حول التوربينات الغازية لم تقع أثناء التشغيل الطبيعي، بل **أثناء العمل على معدة يُفترض أنها متوقفة**.

أولًا: العزل والإقفال والوسم (Isolation / LOTO — Lock Out, Tag Out)

المبدأ الحاكم في جملة واحدة: **"متوقفة" لا تساوي "آمنة"**. التوربين الغازي ليس معدة ذات مصدر طاقة واحد، بل تجتمع فيه أنواع طاقة متعددة، وكل واحدة تحتاج عزلًا مستقلًا وإثباتًا مستقلًا:

مصدر الطاقة	مثاله في التوربين الغازي	ما الذي يجب إثباته
كهربائية	تغذية المحركات المساعدة، الإثارة، لوحات التحكم	فصل، وقفل، وإثبات انعدام الجهد فعليًا
كيميائية / قابلة للاشتعال	وقود الغاز أو السائل (6.2)	عزل مزدوج وتنفيس بينهما، وإثبات خلوّ الجو
ضغط مخزَّن	هواء التشغيل، هيدروليك، مراكم الضغط	تنفيس فعلي وإثبات انعدام الضغط عند نقطة قياس
حرارية	معدن ساخن، زيت ساخن، مسار العادم	زمن تبريد كافٍ قبل أي دخول أو لمس
ميكانيكية مخزَّنة	نوابض، كتل مرفوعة، عمود قابل للدوران	تثبيت ميكانيكي يمنع الحركة، لا مجرد إيقاف الأمر
خامدة / خانقة	غاز الإطفاء داخل الحجرة (6.7)	عزل نظام الإطفاء قبل الدخول، وتهوية وإثبات نسبة أكسجين

النقاط العملية التي تصنع الفرق:

- **العزل يُثبَت، لا يُفترض.** إغلاق صمام لا يعني أنه أغلق فعلًا؛ فصل قاطع لا يعني انعدام الجهد. الإثبات بالقياس عند نقطة العمل هو الخطوة التي لا تُختصر أبدًا.
- **قفل شخصي لكل فرد يعمل.** الفكرة ليست إدارية: من يعمل داخل المعدة هو من يملك مفتاح إعادة تشغيلها.
- **الاتفاق على حالة نهاية العمل مسبقًا:** ما الذي يعود لوضعه، ومن يتحقق، ومن يرفع الأقفال — وبأي ترتيب.

ثانيًا: تصريح العمل (Permit to Work)

نظام يجعل أي عمل غير روتيني **قرارًا موثّقًا** لا اجتهادًا فرديًا. وأهم ما يجب أن يتضمنه عمليًا:

- **وصف دقيق للعمل وحدوده:** ما المسموح تحديدًا — وما هو خارج هذا التصريح. أكثر الحوادث تقع عند "توسّع" العمل بلا تصريح جديد.

- **نوع المخاطر ومتطلباتها**: عمل ساخن (لحام، قطع، جلخ) داخل منطقة خطرة يستلزم قياس غاز مستمرًا (6.7، 7.6)؛ دخول حيّز محصور يستلزم قياس أكسجين وغازات ومراقبًا خارجيًا؛ عمل على ارتفاع، أو عمل كهربائي حي، لكلٍّ متطلباته.
- **الربط الصريح بالحمايات المتجاوَزة**: أي تجاوز لمسار حماية أثناء العمل يجب أن يظهر **على التصريح نفسه** (راجع 7.8 — إدارة التجاوز)، لا بسجل منفصل لا يقرأه أحد.
- تعارض التصاريح **(Simultaneous Operations)**: عملان بريئان كل على حدة قد يكونان قاتلين معًا — لحام قرب حجرة التوربين بينما يعمل فريق آخر على فتح خط وقود. من يمنح التصاريح يجب أن يرى الصورة كاملة.
- الإغلاق الرسمي **(Close-Out)**: التصريح ينتهي بإعادة الحالة وتوقيع، لا بانتهاء الوردية.

ثالثًا: إدارة التغيير (Management of Change — MOC)

هذه النقطة تحديدًا هي **أكثر ما يفرق بين منشأة ناضجة وأخرى**، وهي شديدة الارتباط بكل ما سبق في هذا الكتاب.

التعريف العملي: أي تغيير **غير مطابق للأصل** — قطعة بديلة من مواصفة مختلفة، تعديل في منطق التحكم، تغيير نقطة ضبط حماية، تعديل في إجراء تشغيلي، أو حتى تغيير في نوع الوقود أو الزيت — يجب أن يمر بمراجعة موثّقة قبل التنفيذ، لا بعده.

لماذا؟ لأن التغييرات الصغيرة هي بالضبط ما لا يظهر في أي مخطط، ولا يعرفه من يأتي بعدك. ثلاثة أمثلة من صميم هذا الكتاب:

- **تغيير نقطة ضبط أو حزام تخميد** في حلقة حماية (12.11) يبدو تعديلًا تافهًا على الشاشة، بينما هو تعديل على **طبقة أمان**.
- **استبدال حسّاس بمواصفة مختلفة قليلًا** يغيّر مدى القياس أو زمن الاستجابة، فينعكس على منطق مبني عليه (19.2).
- **إضافة أو حذف عنصر في مسار الوقود أو التهوية** يغيّر افتراضات مصفوفة السبب والأثر (6.7) دون أن يعلم من كتبها.

العناصر التي تجعل نظام MOC فعّالًا لا شكليًا:

1. **تقييم أثر مكتوب**: على السلامة، على الحماية، على الأداء، وعلى الأنظمة الأخرى المرتبطة.
2. **موافقة من المستوى المناسب** لحجم التغيير — لا كل تغيير يحتاج نفس مستوى الموافقة، لكن **كل تغيير يحتاج موافقة ما**.
3. **تحديث التوثيق فورًا**: المخططات، مصفوفة السبب والأثر، قوائم نقاط الضبط، وإجراءات التشغيل. تغيير غير موثّق هو تغيير **مؤقت بطبيعته حتى لو دام عشر سنوات** — لأن أول من سيصادفه لاحقًا سيعامله كخطأ.
4. **تدريب وإبلاغ من يتأثر**: المشغّل الذي لا يعلم أن سلوك الوحدة تغيّر سيشخّص السلوك الجديد كعطل.
5. **مراجعة ما بعد التنفيذ**: هل تصرّفت المعدة كما توقّع التقييم؟

الرابط مع الفصل السابع عشر: ذكرنا هناك أن «التوثيق غير المحدَّث» من أكثر ما يتعثّر أثناء التشغيل التجريبي، وأن أثره لا يظهر يوم التسليم بل بعد سنوات عند أول تحقيق جدّي. نظام MOC هو تحديدًا الآلية التي تمنع تراكم هذه الفجوة على مدى عمر الوحدة — لا وثيقة إدارية تُملأ بعد الانتهاء.

خلاصة تربط القسم بالفصل كله: الصيانة الجيدة ليست فقط أن تعرف **ماذا تفحص ومتى**، بل أن تصل المعدة إلى نهاية العمل **بحالة معلومة وموثّقة** — بنفس الإعدادات التي يُفترض أن تكون عليها، وبكل الحمايات مُعادة، وبتوثيق يعكس الواقع فعلًا. عمل صيانة ينتهي بمعدة تعمل لكن بحالة غير معلومة هو عمل لم ينتهِ بعد.

8.7 مراقبة حالة الزيت: أرخص نافذة على صحة المعدة

في القسم 8.5 تحدثنا عن مراقبة الأداء (حرارة، ضغط، كفاءة). وهنا نتحدث عن أداة تشخيصية مختلفة تمامًا وأقل كلفة بكثير: **الزيت نفسه**.

الفكرة الجوهرية: زيت التزييت (6.1) يمر على **كل** سطح متحرك في المعدة — المحامل، الأسنان، الأختام، المشغّلات الهيدروليكية. وأي تدهور يبدأ في أي منها **يترك أثره في الزيت قبل أن يظهر في أي قياس آخر**: جسيمات معدنية، تغيّر لزوجة، حموضة، أو ماء. ولهذا يُقال بحق إن **تحليل الزيت أرخص فحص تشخيصي في أي معدة دوّارة، وأكثرها إهمالًا**.

أولًا: كيف يتدهور الزيت نفسه؟

الأكسدة **(Oxidation)** هي الآلية الأساسية: تفاعل الزيت مع الأكسجين، ويتسارع بشدة مع الحرارة. والقاعدة التقريبية المعروفة صناعيًا: **كل ارتفاع بمقدار عشر درجات مئوية تقريبًا في حرارة الزيت قد يضاعف معدل الأكسدة ويُنصّف عمره**. ومن هنا يظهر الرابط المباشر مع 6.7: حجرة توربين حارة تعني زيتًا أسخن تعني عمر زيت أقصر — بلا أي عطل ظاهر.

العوامل المسرّعة للأكسدة، وكلها قابلة للتحكم:

- **الحرارة المرتفعة** — نقاط ساخنة موضعية، أو مبرّد زيت متسخ، أو حرارة حجرة عالية.
- الهواء المستحلب في الزيت **(Entrained Air)** — فقاعات هواء تزيد سطح التلامس مع الأكسجين زيادة هائلة. سببها الشائع: مستوى زيت منخفض، أو تسريب هواء في جانب السحب، أو مسار عودة يخلق دوّامات.
- **الماء** — يُسرّع الأكسدة، ويكوّن مستحلبًا، ويقلل قدرة الزيت على حمل الحمل.
- **الملوّثات الصلبة** — بعض المعادن (النحاس والحديد خصوصًا) تعمل **كمحفّز** للأكسدة، لا كملوّث خامل فقط.

ونواتج الأكسدة لها أسماء يجب أن يعرفها المهندس:

- الحمأة **(Sludge):** رواسب لزجة داكنة تتجمع في قاع الخزان وفي المسارات الراكدة — تسدّ الفلاتر وتضيّق الفتحات الدقيقة.
- الورنيش **(Varnish):** طبقة رقيقة لاصقة صفراء أو بنية تترسب على الأسطح المعدنية. **وهو الأخطر عمليًا** رغم مظهره البسيط: لأنه يترسب على **الأسطح الحرجة الدقيقة** — صمامات التحكم، الصمامات المؤازرة (Servo Valves)، ومحامل الدفع — فيُنتج التصاقًا وبطء استجابة. وهذا يفسّر مباشرة نمطًا رأيناه أكثر من مرة في هذا الكتاب: **صمام يتحرك ببطء أو يلتصق (تدريب 6 في الفصل 21، والنمط الثاني في 13.13) وسببه الجذري زيت متدهور، لا الصمام نفسه.**

علامات مبكرة على بدء الأكسدة: تغيّر لون الزيت إلى الداكن، زيادة ملحوظة في اللزوجة، رائحة مميزة، وظهور طبقة ورنيش على الأسطح المكشوفة.

ثانيًا: التلوث — والتصنيف الذي يجب أن تعرفه

تُصنَّف نظافة الزيت صناعيًا بشيفرة نظافة قياسية (وفق ISO 4406) تتكوّن من ثلاثة أرقام تمثّل أعداد الجسيمات فوق ثلاثة مقاسات مختلفة. والقاعدة العملية: **كلما صغرت الأرقام كان الزيت أنظف، وكل زيادة برقم واحد تعني تقريبًا مضاعفة عدد الجسيمات.**

وثلاث ممارسات تُحدث فرقًا حقيقيًا وتُهمل باستمرار:

- **الزيت الجديد ليس زيتًا نظيفًا.** الزيت كما يصل من البرميل غالبًا **أوسخ من حد التشغيل المطلوب** — لأنه تلوّث في النقل والتخزين والتعبئة. ولهذا القاعدة الصحيحة: **رشّح الزيت الجديد قبل إضافته**، ولا تضفه مباشرة من البرميل إلى الخزان.
- متنفّس الخزان **(Breather)** هو الباب الخلفي للتلوث. الخزان يتنفس مع تغيّر المستوى والحرارة، وما يدخل معه هو غبار ورطوبة الجو — أو رذاذ ملحي في المواقع الساحلية والبحرية (3.4). متنفّس بفلتر دقيق ومادة مجففة (Desiccant) إجراء رخيص جدًا وأثره كبير.
- **افتح عناصر الفلاتر المستبدلة وافحصها.** هذه من أثمن الممارسات وأقلها كلفة: قصّ عنصر الفلتر وفحص ما احتجزه يخبرك **بنوع** ما يتآكل — برادة برونزية أو بابِت تشير للمحامل، وبرادة فولاذية تشير للأسنان أو للأجزاء الصلبة، وجسيمات غريبة تشير لتلوث خارجي. إن رمي الفلتر دون فتحه هو إتلاف لتقرير تشخيصي مجاني.

ثالثًا: أدوات تحليل الزيت — ماذا يقيس كل منها؟

الفحص	ما يقيسه	ماذا يخبرك
عدّ الجسيمات (Particle Count)	عدد وحجم الجسيمات	مستوى نظافة الزيت واتجاهه — إنذار مبكر عام
التحليل الطيفي (Spectroscopy)	تركيز العناصر المعدنية	**أي مكوّن** يتآكل: حديد، نحاس، رصاص/قصدير (بابِت)، كروم، سيليكون (غبار)
الفيروغرافيا (Ferrography)	شكل وحجم جسيمات التآكل	**نوع** آلية التآكل: تآكل طبيعي، حكّ، تقشّر، أم كلال سطحي
اللزوجة (Viscosity)	سماكة الزيت	أكسدة (ارتفاع) أو تخفيف بوقود/سائل آخر (انخفاض)
الرقم الحمضي (Acid Number)	حموضة الزيت	تقدّم الأكسدة — مؤشر عمر الزيت المتبقي
محتوى الماء	نسبة الماء	تسريب مبرّد، أو تكثّف، أو دخول رطوبة من المتنفّس

القاعدة الحاكمة لقراءة أي تحليل زيت: المهم ليس الرقم المطلق بل **اتجاهه عبر الزمن** — تمامًا كما قلنا في الاهتزاز (7.4) والأداء (8.5). قفزة مفاجئة في تركيز معدن معيّن أهم بكثير من قيمة ثابتة مرتفعة قليلًا منذ سنوات. **والنمط قبل القيمة**، مرة أخرى.

رابعًا: بصمات التلف التي يكشفها الزيت والفحص البصري

عند فحص محمل أو تروس (5.5) — أو عند تفسير نتائج تحليل زيت — هذه أشهر الأنماط وما يميّز كلًّا منها:

النمط	مظهره	سببه الحقيقي
التنقّر الكاذب (False Brinelling)	علامات متباعدة بانتظام على مسار المحمل	**اهتزاز والمعدة متوقفة:** حِمل ثابت + عدم دوران + اهتزاز خارجي يطرد غشاء الزيت من نقاط التلامس
التآكل الاحتكاكي (Fretting Corrosion)	مسحوق أحمر-بني في مواضع التركيب	حركة نسبية دقيقة جدًا بين سطحين مركّبين — تركيب غير محكم أو اهتزاز
الخدش (Scoring)	خطوط طولية في اتجاه الحركة	جسيمات كاشطة في الزيت، أو انهيار غشاء الزيت بسبب حمل/حرارة
التقشّر (Spalling)	تقشّر رقائقي في سطح التلامس	كلال سطحي متقدم — وغالبًا يبدأ من جسيمة منغرزة
التنقّر التآكلي (Corrosive Pitting)	حفر صغيرة منتشرة	ماء أو رطوبة — وأسوأها الرطوبة المالحة في المواقع البحرية

والنمط الأول يستحق وقفة خاصة لأنه يخص وحداتنا الاحتياطية تحديدًا: التنقّر الكاذب يحدث **بينما المعدة متوقفة** — ويكفي لحدوثه أن تنقل الأرضية اهتزازًا من وحدة مجاورة تعمل، أو من معدة قريبة. أي أن **وحدة احتياطية «مرتاحة» قد تتلف محاملها وهي متوقفة**. وهذا يفسّر عمليًا لماذا يُوصى بتدوير الأعمدة دوريًا (Periodic Rotation / Shaft Turning) للمعدات المتوقفة لفترات طويلة — إجراء يبدو شكليًا وهو في الحقيقة حماية حقيقية. وهو مرتبط مباشرة بما سنذكره عن التآكل في حالة السكون **(Standby Corrosion)** في 16.2: المعدة المتوقفة ليست معدة آمنة تلقائيًا.

خامسًا: خلاصة عملية

- **حدّد حدودًا مكتوبة** لكل مؤشر (نظافة، لزوجة، حموضة، ماء، معادن) وتتبّعها كاتجاه، لا كقراءة منفردة.
- **رشّح الزيت الجديد**، واعتنِ بالمتنفّس، وافتح الفلاتر المستبدلة.
- **راقب حرارة الزيت كما تراقب حرارة المحامل** — فهي المتغيّر الأول الذي يحدد عمر الزيت.
- **إذا التصق صمام أو بطؤت استجابته، ضع الورنيش على قائمة المشتبه بهم** قبل تفكيك الصمام.
- **المعدة المتوقفة تحتاج عناية أيضًا** — تدوير دوري، ورقابة على الرطوبة، وخطة حفظ (Preservation) إن طال التوقف.

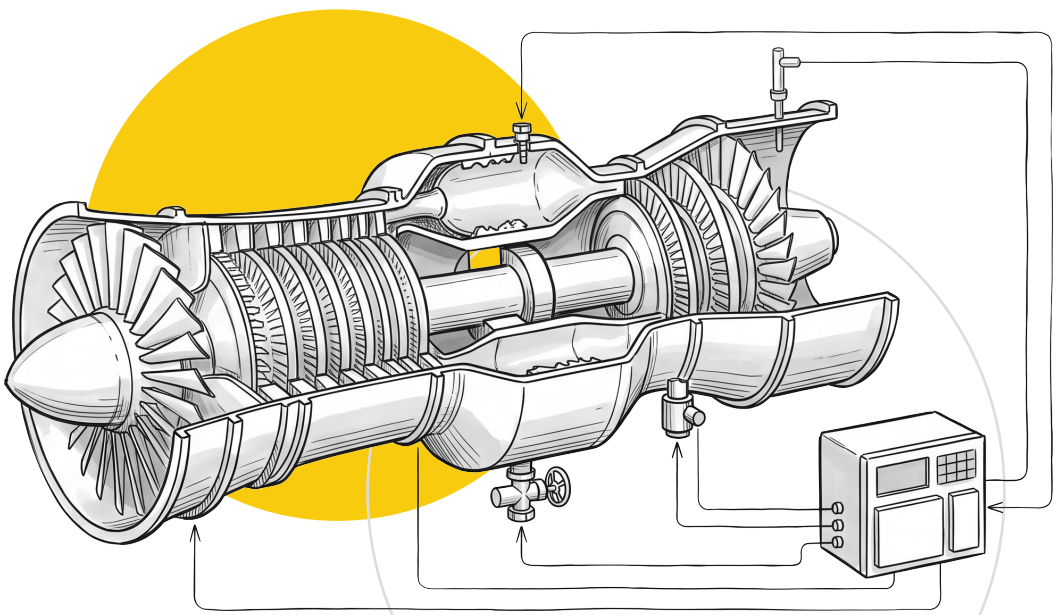
وبهذا يكتمل ثالوث المراقبة التنبؤية في هذا الكتاب: **الاهتزاز** يخبرك بما يحدث للأجزاء الدوّارة (7.4)، **والأداء** يخبرك بما يحدث للدورة الحرارية (8.5)، **والزيت** يخبرك بما يحدث للأسطح المتلامسة — وثلاثتها معًا تكشف ما لا يكشفه أي منها وحده.

خلاصة الفصل

بهذا نكون قد أنهينا الفصل الثامن كاملًا: من أنواع الصيانة وفلسفتها (8.1 إلى 8.4)، مرورًا بمراقبة الأداء والحالة (8.5)، فالسلامة أثناء العمل والعزل والتصريح وإدارة التغيير (8.6)، وصولًا إلى مراقبة حالة الزيت (8.7). **وبهذا يكتمل ثالوث المراقبة التنبؤية: الاهتزاز، والأداء، والزيت** — وثلاثتها معًا تكشف ما لا يكشفه أي منها وحده. والفصل القادم يأخذنا إلى قلب القرار نفسه: كيف «يقرر» نظام التحكم، لحظةً بلحظة، كم وقودًا يعطي ومتى يبدأ ومتى يتوقف.

الفصل التاسع:

التحكم في التوربين الغازي



في الفصلين السابقين تحدثنا عن حماية التوربين الغازي (الفصل السابع) وعن تشغيله وصيانته (الفصل الثامن). وهذا الفصل يدخل إلى قلب الموضوع من زاوية ثالثة: كيف «يقرر» نظام التحكم كل لحظة كم وقودًا يعطي، ومتى يبدأ ومتى يتوقف، وكم هواءً يسمح بدخوله إلى الضاغط؟ هذا الفصل موجّه بشكل خاص من واقع عملي كمهندس تحكم في التوربينات الغازية، وسنحاول تبسيط المنطق الداخلي لنظام التحكم بلغة عملية بعيدة عن التعقيد الأكاديمي.

9.1 نظرة عامة على منطق التحكم

غرفة التحكم المحلية

قبل الدخول في منطق التحكم نفسه، يفيد أن نعرف أين «يعيش» هذا المنطق فعليًا. كل توربين غازي (أو على الأقل كل وحدة/باقة Package) له غرفة تحكم محلية (Local Control Room) تجمع المعدات المسؤولة عن التحكم والمراقبة والحماية. وبشكل عام، تجد في الغرفة:

- واجهة تشغيل (HMI — Human Machine Interface): الشاشة التي يتابع منها المشغّل الوحدة ويتدخل بأوامر التشغيل والإيقاف.
- وحدة/وحدات التحكم (Unit Controller): وهي «الدماغ» الذي ننفّذ من خلاله منطق التحكم الذي سنشرحه في هذا الفصل.
- لوحة تغذية المحركات المساعدة (MCC — Motor Control Center): تغذي مضخات الزيت والمراوح وباقي المحركات المساعدة التي شرحناها في الفصل السادس.
- لوحة مراقبة الاهتزاز (Vibration Monitor Panel): مرتبطة بما شرحناه في 7.4.
- لوحة الحريق والغاز (F&G Panel): مرتبطة بما شرحناه في 7.6.
- شاحن البطاريات (Battery Charger): يغذي أنظمة الطوارئ والتحكم بتيار مستمر حتى لو انقطعت التغذية الرئيسية.
- في حال وجود مولد كهربائي مرتبط (Power Generation Package)، تضاف لوحة حماية المولد (Generator Protection Panel) مع الدارة المثيرة (Exciter) ووحدة المزامنة (Synchronizer) — وهذه مواضيع شرحناها في 6.6.

يختلف هذا التوزيع في التفاصيل من مصمم لآخر ومن موقع لآخر، لكن الفكرة العامة ثابتة: كل نظام حماية أو مراقبة شرحناه في الفصل السابع له عادة لوحة أو بطاقة مخصصة له داخل هذه الغرفة، وكلها تتغذى وتتحاور مع وحدة التحكم المركزية.

فكرة «أقل قيمة تفوز» (Minimum Value Select)

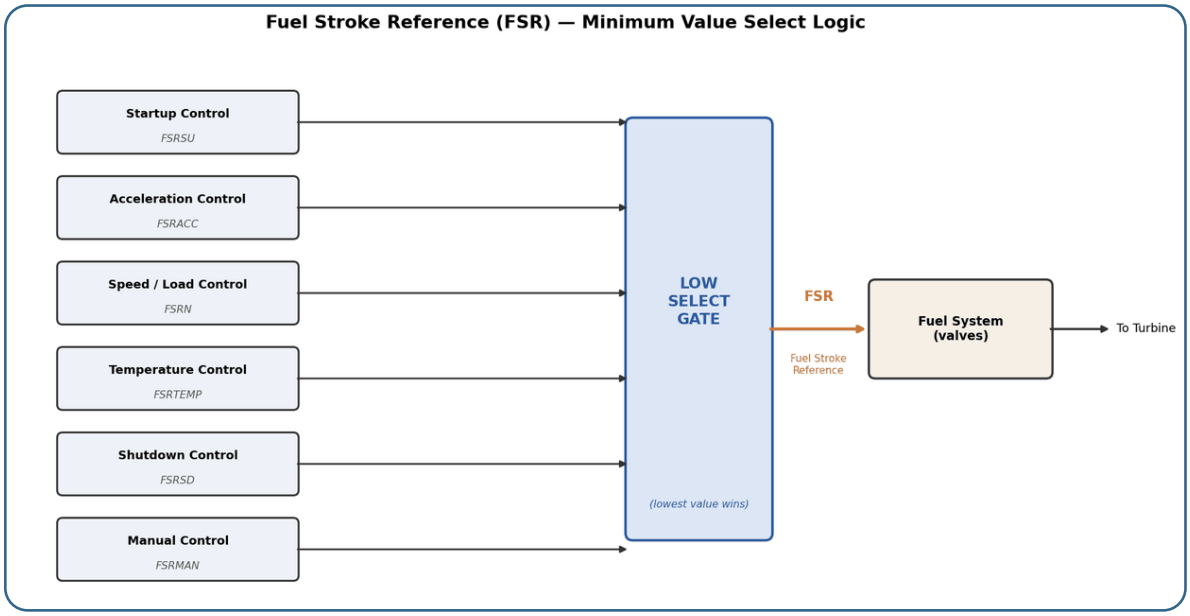
لا يعمل نظام التحكم في التوربين الغازي بمنطق «حساب واحد» يحدد كمية الوقود. بدلًا من ذلك، تعمل عدة حسابات متوازية في اللحظة نفسها، كل واحد منها يمثل «رأيًا» مختلفًا في كمية الوقود المناسبة حسب حالة تشغيلية معيّنة، ثم يُختار من بينها الرأي الأكثر تحفظًا. ويُعرف هذا المبدأ بـ Minimum Value Select، ويُختصر MVS.

الحسابات المتوازية النموذجية هي:

- تحكم بدء التشغيل (Startup Control): يتحكم بمعدل تسريع الوحدة أثناء الإقلاع، ويرمز له عادة FSRSU.
- تحكم التسريع (Acceleration Control): يمنع تسريعًا مفاجئًا يضر بالتوربين، ويرمز له FSRACC.
- تحكم السرعة/الحمل (Speed/Load Control): يضبط الوقود حسب السرعة المطلوبة أو الحمل الكهربائي، ويرمز له FSRN — وهذا هو نظام «الحاكم» (Governor) الذي عرّفناه في الفصل السادس (6.5).
- تحكم الحرارة (Temperature Control): يمنع تجاوز حرارة العادم/الاحتراق للحد الآمن، ويرمز له FSRT — ومرتبط مباشرة بما شرحناه في 7.3.
- تحكم الإيقاف (Shutdown Control): يخفّض الوقود تدريجيًا أو فوريًا عند أمر إيقاف، ويرمز له FSRSD.
- تحكم يدوي (Manual Control): يسمح للمشغّل بالتدخل المباشر في كمية الوقود عند الحاجة (اختبار أو ظرف استثنائي)، ويرمز له FSRMAN.

كل هذه الحسابات تصدر قيمة تسمى Fuel Stroke Reference (تُختصر FSR)، وهي القيمة التي تمثل «كمية الوقود المطلوبة» بلغة نظام التحكم. والمنطق بعد ذلك بسيط: من بين كل قيم FSR الصادرة من الحسابات المتوازية، يختار النظام أقلها، وهذه القيمة هي التي تنزل فعليًا إلى صمامات الوقود.

لماذا «الأقل» تحديدًا؟ لأن كل حساب موجود أصلًا كطبقة حماية أو ضبط لحالة معيّنة — فلو قال حساب الحرارة مثلًا «قلّل الوقود لأن الحرارة اقتربت من الحد الأقصى»، فلا نريد أن يُتجاوَز لمجرد أن حسابًا آخر (كالسرعة/الحمل) يطلب وقودًا أكثر. واختيار أقل قيمة يضمن أن أي طبقة تحفّظ تفوز تلقائيًا، دون الحاجة إلى منطق شرطي معقّد لكل حالة على حدة.



الشكل 9.1 — منطق أقل قيمة تفوز (Minimum Value Select) لتحديد مرجع كمية الوقود (FSR): كل حساب تحكم متوازٍ (بدء تشغيل، تسريع، سرعة/حمل، حرارة، إيقاف، يدوي) يصدر قيمته الخاصة، ثم تُختار أقل قيمة لتذهب فعليًا لصمامات الوقود

من واقع عملي، هذا المبدأ هو أهم فكرة تحتاج أن تفهمها قبل أي تفصيل آخر في نظام التحكم — لأن كل عطل أو سلوك غريب في الوقود (زيادة أو نقصان غير متوقع) أول سؤال يُطرح فيه: «ما الحساب الفائز الآن؟» ومعظم شاشات التشغيل الحديثة تعرض فعليًا للمشغّل أي حساب هو المسيطر في أي لحظة، بالضبط لتسهيل هذا التشخيص.

الردّية الثلاثية (TMR) — تكرار المعالجة نفسها

في الفصل السابع (7.1) عرّفنا فكرة TMR (Triple Modular Redundant) بشكل عام كمبدأ حماية. وفي سياق التحكم، يُطبَّق هذا المبدأ حرفيًا على وحدة التحكم نفسها: فبدل معالج واحد ينفّذ كل الحسابات التي شرحناها أعلاه، توجد ثلاثة معالجات (تُرمز عادة R وS وT) تنفّذ المنطق نفسه بالتوازي وبشكل مستقل عن بعضها.

كل قراءة حسّاس تدخل إلى النظام تُقارَن بين المعالجات الثلاثة، وتُعتمد القيمة الوسطى (Median Value) منها — وبهذا الشكل، لو أعطى معالج واحد قراءة شاذة (بسبب عطل داخلي مثلًا)، فلن تؤثر على القرار النهائي لأن المعالجَين الآخرين يتجاوزانه. وتتكرر الفكرة نفسها في جهة الإخراج: أي أمر يُرسل إلى صمام أو جهاز فعلي يحتاج موافقة معالجَين من أصل ثلاثة (2-out-of-3 Voting) قبل أن يُنفَّذ.

وبالإضافة إلى المعالجات الثلاثة R/S/T، تضيف بعض الأنظمة معالجًا رابعًا مستقلًا مخصصًا للحماية فقط (يُرمز له أحيانًا P)، ينفّذ فحوصات الحماية الأساسية (كالسرعة الزائدة التي شرحناها في 7.2) بشكل منفصل تمامًا عن معالجات التحكم الثلاثة — بحيث لو حدث عطل في منطق التحكم نفسه، بقيت طبقة الحماية عاملة بشكل مستقل.

وهذا التصميم يفسّر لماذا نادرًا ما توقف أعطال المعالج الواحد الوحدةَ فورًا في أنظمة التحكم الحديثة — فالنظام مصمم أصلًا ليتوقع أن معالجًا واحدًا قد يتعطل، ويستمر في العمل بمعالجين سليمين لحين إصلاح الثالث أو استبداله أثناء التشغيل في كثير من الأحيان.

ملاحظة: منطق حماية سلكي مستقل

بالإضافة إلى منطق التحكم البرمجي الذي شرحناه أعلاه، تحتفظ أغلب الأنظمة الصناعية بطبقة حماية إضافية «سلكية» (Hardwired Relay Logic) مستقلة تمامًا عن معالجات التحكم البرمجية. والفكرة: بعض إشارات الإيقاف الحرجة (كأزرار الإيقاف الطارئ المحلية، أو إشارة إيقاف من منظومة الحريق والغاز) تُوصَّل مباشرة إلى ريلايات تتحكم بصمامات قطع الوقود، دون أن تمر أصلًا عبر أي معالج أو برنامج. وهذا يعني أنه حتى لو تعطّل نظام التحكم بالكامل (عطل برمجي أو عطل في كل المعالجات الثلاثة)، يصل أمر الإيقاف الطارئ إلى صمام الوقود مباشرة عبر الدارة السلكية. وهذا المبدأ يكمّل فلسفة الإيقاف الطارئ التي شرحناها في 7.8 — طبقة حماية «لا تعتمد» على سلامة النظام الذي تحميه.

9.2 التحكم بكمية الوقود لضبط السرعة وحرارة العادم

بعد أن فهمنا في 9.1 كيف يتحدد «مرجع الوقود» (FSR)، يشرح هذا القسم شيئين: أولًا كيف تُترجم القيمة النهائية إلى فتحة فعلية على صمام الوقود، وثانيًا الحسابين الأكثر أهمية في التشغيل اليومي من بين حسابات 9.1 — تحكم السرعة/الحمل وتحكم الحرارة — لأنهما هما اللذان يحددان عمليًا كم وقودًا يحتاج التوربين في أي لحظة تشغيل عادي (بعيدًا عن الإقلاع أو الإيقاف).

تحكم السرعة والحمل: Droop مقابل Isochronous

في الفصل السادس (6.5) عرّفنا «الحاكم» (Governor) كمفهوم عام. ومن الناحية العملية، يعمل حاكم التوربين الغازي بأحد وضعين:

- وضع **Droop** (الانحدار)**:** تنخفض السرعة قليلًا كلما ازداد الحمل — نفس فكرة أي محرك ميكانيكي كلاسيكي. وهذا الوضع هو الافتراضي عند تشغيل عدة وحدات على الشبكة الكهربائية نفسها (Parallel Operation)، لأنه يسمح للوحدات بأن تتقاسم الحمل فيما بينها تلقائيًا وبثبات، دون أن «تتنازع» كل وحدة على فرض سرعتها الخاصة على الشبكة.
- وضع الأيزوكرونس **(Isochronous):** تُثبَّت السرعة عند قيمة واحدة ثابتة بغض النظر عن الحمل. ويُستخدم غالبًا عند تشغيل وحدة واحدة منفردة تغذي حِملًا معزولًا (Island Mode)، لأنه لا توجد هنا وحدات أخرى تتشارك معها الحمل — فيجب أن تثبّت هي وحدها تردد الشبكة.

بعض أنظمة التحكم الحديثة تضيف مفهوم «الانحدار الثابت القابل للضبط» (Constant Settable Droop)، وفكرته أن نسبة الانحدار نفسها (كم بالمئة تنخفض السرعة مقابل كل زيادة في الحمل) تصبح رقمًا يُدخله المهندس ويُضبط حسب متطلبات الشبكة، بدل أن تكون خاصية ميكانيكية ثابتة في الحاكم القديم. ومن واقع عملي، ضبط نسبة الانحدار بشكل خاطئ (سواء عالية جدًا أو منخفضة جدًا) من أكثر أسباب تذبذب توزيع الحمل بين الوحدات المشغّلة بالتوازي — وهو أول ما يُراجَع عند أي شكوى من «عدم استقرار» تقاسم الحمل.

تحكم الحرارة كبديل عملي لحرارة الاحتراق

في الفصل السابع (7.3) شرحنا خطر الحرارة الزائدة وأهمية حمايتها. لكن هنا نقطة تستحق التوضيح: حرارة الاحتراق الفعلية (Firing Temperature) داخل غرفة الاحتراق عالية جدًا لدرجة أنه لا يوجد حسّاس تجاري يتحمّل أن يُوضع فيها مباشرة بشكل موثوق لفترة طويلة. والحل العملي المعتمد في معظم الأنظمة: قياس حرارة العادم (Exhaust Temperature) بدلًا منها — وهي أقل بكثير وأسهل قياسًا بحسّاسات عادية — ثم استخدامها كـ«نائب» أو مؤشر غير مباشر لحرارة الاحتراق.

والمشكلة أن العلاقة بين حرارة العادم وحرارة الاحتراق ليست ثابتة — فهي تتغير حسب نسبة ضغط الضاغط (Compressor Pressure Ratio، CPR) التي شرحناها في الفصل الثاني (2.4). فكلما ارتفع CPR (كأن يكون الجو أبرد فترتفع كثافة الهواء وتدفقه الكتلي فترتفع نسبة الضغط)، انخفضت حرارة العادم المقابلة لنفس حرارة الاحتراق. لهذا لا يقارن نظام التحكم حرارة العادم برقم ثابت واحد، بل بمنحنى مرجعي (Reference Curve) يربط حرارة العادم المسموحة بقيمة CPR الحالية لحظيًا — وكلما تغيّر CPR، انزاح المنحنى المرجعي معه تلقائيًا.

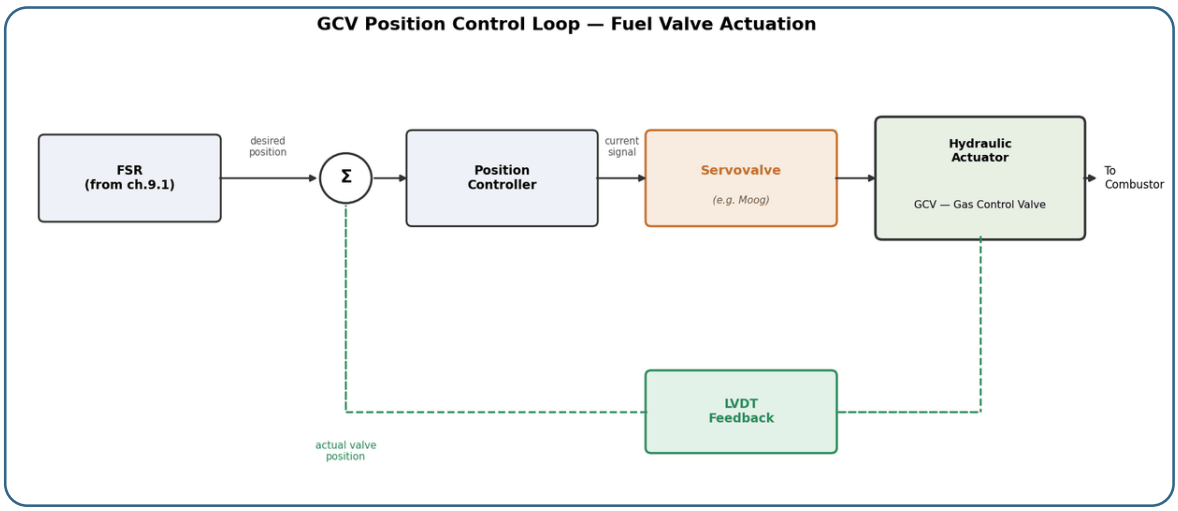
ونقطة ثانية مهمة: زاوية ريش التوجيه عند مدخل الضاغط (IGV، التي سنشرحها بالتفصيل في 9.5) تُدخَل كتصحيح إضافي (IGV-angle Bias) على المنحنى المرجعي نفسه، لأن فتح IGV أو إغلاقها يغيّر كمية الهواء الداخل، وبالتالي يغيّر العلاقة بين حرارة العادم وحرارة الاحتراق الفعلية للحظة نفسها. وبالخلاصة: حساب تحكم الحرارة (FSRT من 9.1) لا يراقب رقم حرارة واحدًا فقط — بل يراقب حرارة العادم مقارنة بمنحنى متحرك يعتمد على CPR وزاوية IGV معًا.

من FSR إلى فتحة صمام فعلية: حلقة التحكم بموضع الصمام

بعد أن يتحدد FSR النهائي (سواء فاز فيه حساب السرعة أو الحرارة أو غيرهما)، يحتاج أن يتحول إلى فتحة فعلية على صمام التحكم بالغاز (GCV — Gas Control Valve). ويحدث هذا التحويل عبر حلقة تحكم مغلقة (Closed-Loop) مستقلة، مبدؤها بسيط ويتكرر في أغلب أنظمة التحكم الصناعية:

1. FSR يدخل كـ«موضع مطلوب» لوحدة تحكم الموضع.
2. وحدة التحكم تصدر إشارة تيار كهربائي لصمام تحكم دقيق يُسمى الصمام الخادم (Servovalve) — من أشهر الأنواع التجارية صمامات Moog.
3. الصمام الخادم يوجّه الزيت الهيدروليكي إلى محرّك (Actuator) هيدروليكي يحرّك جسم صمام GCV فعليًا.
4. حسّاس موضع من نوع LVDT (Linear Variable Differential Transformer) مركّب على الصمام يقرأ الموضع الفعلي لحظيًا ويرجّعه لوحدة التحكم.
5. وحدة التحكم تقارن الموضع الفعلي بالموضع المطلوب، وتصحّح الفرق باستمرار — وهذا ما يجعلها «حلقة» مغلقة.

وهذا التصميم يفسّر لماذا قد يسبب عطل بسيط في حسّاس LVDT واحد سلوكًا غريبًا في موضع الصمام (تذبذب أو توقف عند قيمة ثابتة) حتى لو كان FSR نفسه سليمًا تمامًا — لأن الحلقة تفقد مرجعها الحقيقي لموضع الصمام الفعلي وتعمل «بالعمى».



الشكل 9.2 — حلقة التحكم بموضع صمام الوقود (GCV): من مرجع كمية الوقود FSR، عبر الصمام الخادم والمحرك الهيدروليكي، إلى موضع الصمام الفعلي، مع مسار التغذية الراجعة من حسّاس LVDT

من واقع عملي، فهم هذه الحلقة بالذات هو أول ما يُراجَع عند أي شكوى من «عدم استقرار الحمل» أو «تذبذب حرارة العادم» — لأن كثيرًا من الحالات التي تبدو لأول وهلة مشكلة في منطق التحكم، تكون فعليًا مشكلة ميكانيكية بسيطة في الصمام الخادم أو حسّاس LVDT نفسه.

9.3 التحكم بالتشغيل والإيقاف

في الفصل السادس (6.4) عرّفنا نظام البدء كمعدة، وفي الفصل السادس والعشرين نتتبّع المراحل من زاوية المشغّل: ما يحدث فعلًا وما يجب أن يُراقب. ويعود هذا القسم إلى الموضوع نفسه من زاوية ثالثة — **زاوية منطق التحكم**: ما الشروط التي يجب أن تتحقق قبل السماح بالبدء أصلًا، وما الذي ينقل الوحدة من مرحلة إلى التالية، وكيف يحدث الإيقاف بأنواعه المختلفة — العادي، الطارئ، وغير المخطط له.

السماحات اللازمة قبل البدء (Start Permissives)

لا يسمح نظام التحكم بإصدار أمر بدء إلا إذا تحقق كل شرط من مجموعة شروط محددة مسبقًا (Permissives). ولو كان شرط واحد غير متحقق، بقي الوضع «غير جاهز للبدء» (Not Ready to Start) ولم يُنفَّذ أي أمر بدء حتى لو ضغط المشغّل الزر. ومن واقع عملي، تتوزع هذه الشروط على فئات:

- **شروط عامة/خارجية:** لا توجد قواطع نشطة (No Trips Present)، وضع التحكم مضبوط بشكل صحيح (Local/Remote، Auto/Manual)، سماحية من أنظمة خارجية (كنظام إدارة الطاقة PMS في التطبيقات المرتبطة بشبكة كهربائية).
- **شروط الحماية:** خط الإيقاف الطارئ سليم (ESD Line Healthy، مرتبط بـ 7.8)، منظومة الحريق والغاز سليمة (مرتبط بـ 7.6)، مراقب الاهتزاز سليم (مرتبط بـ 7.4).
- **شروط الأنظمة المساعدة:** حرارة وضغط ومستوى زيت التزييت في المدى الطبيعي (مرتبط بـ 6.1)، صمامات الوقود في الوضع الصحيح (مغلقة قبل البدء)، انتهاء مؤقت التهدئة بعد آخر إيقاف (Coastdown Timer) — لأنه لا يصح أن تبدأ التوربين وهو ما زال يدور من إيقاف سابق.
- **شروط خاصة بمصدر الطاقة:** جهد البطاريات/التغذية الكهربائية كافٍ، قاطع البطارية مغلق.

هذا النمط من التصنيف (سماحات عامة، حماية، أنظمة مساعدة، تغذية) يتكرر في معظم أنظمة التحكم الصناعية بغض النظر عن الشركة المصنّعة، وإن اختلفت التسميات والرموز الداخلية من نظام لآخر. وقائمة الفحص القبلي الميدانية التي تسبق هذه السماحات — والسبب الهندسي وراء كل بند فيها — في 26.3.

فحص الأنظمة المساعدة قبل البدء

قبل أن يُصدر أمر التدوير الفعلي، يشغّل نظام التحكم تلقائيًا سلسلة تحقق من الأنظمة المساعدة (شرحناها في الفصل السادس): تشغيل مضخة الزيت المساعدة والتأكد من وصول الضغط إلى قيمته الطبيعية، تشغيل مراوح التهوية والتأكد من إغلاق أبواب الغلاف (Enclosure Doors)، والتأكد من جاهزية نظام الحريق والغاز. وهذا التسلسل التلقائي يشبه من حيث الفكرة فحص «النقاط الأربع» الذي شرحناه في 8.1 كجزء من الصيانة الروتينية — والفرق أنه هنا يحدث آليًا وقبل كل بدء تشغيل، لا في جولة تفتيش يدوية دورية.

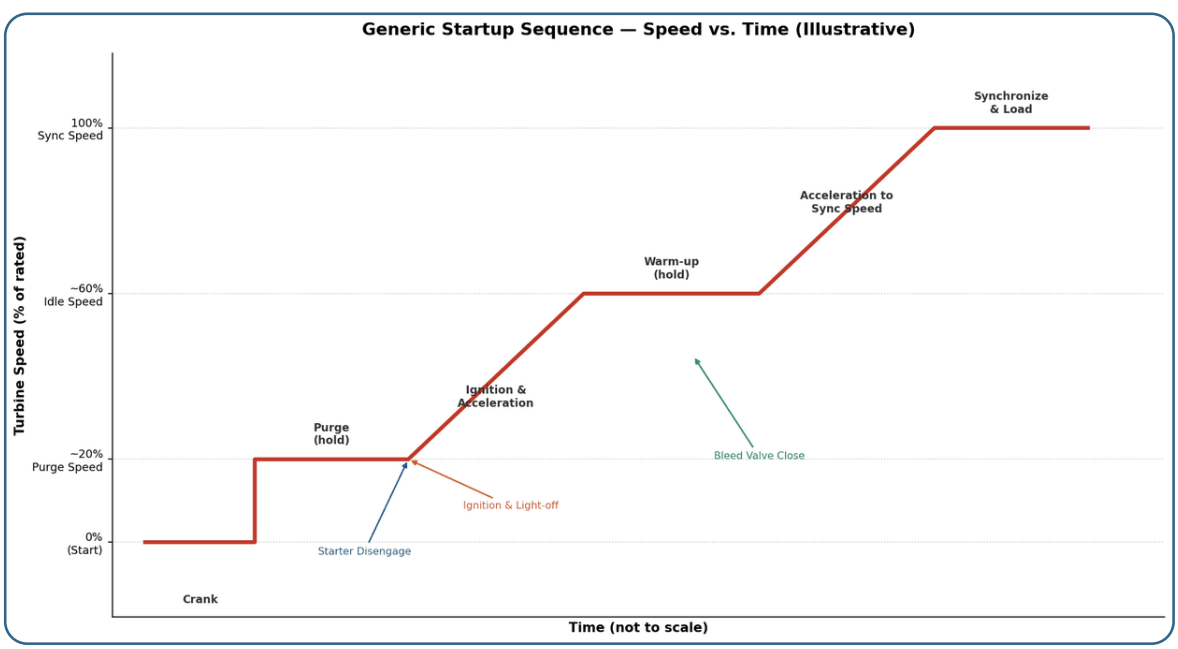
ما الذي ينقل الوحدة من مرحلة إلى أخرى؟

هذه هي النقطة التي تخصّ مهندس التحكم تحديدًا: **معظم الانتقالات بين مراحل البدء تتحدد بناءً على السرعة الفعلية للتوربين، لا بمرور وقت ثابت.** فكل مرحلة «تنتظر» بلوغ عتبة سرعة محددة قبل أن تسمح بالتالية، باستثناء ما يُقاس بالزمن عمدًا — كمؤقّت التطهير ومدة الإحماء.

والعتبات الأربع التي يجدر بمهندس التحكم أن يعرفها بالاسم:

العتبة	ما يحدث عندها	لماذا
سرعة التطهير	تثبيت السرعة وتشغيل مؤقّت التطهير	ضمان مرور حجم هواء كافٍ لطرد أي مزيج قابل للاشتعال
سرعة الإشعال	خفض متعمد للسرعة، ثم الإشعال بتدفق وقود محسوب مسبقًا (FSRSU من 9.1)	سرعة هواء منخفضة عند الحاقن تسمح لجبهة اللهب بالاستقرار
سرعة فصل جهاز البدء	فصل المُبدئ	التوربين صار يولّد عزمًا ذاتيًا كافيًا
عتبة إغلاق صمامات النزف	إغلاق النزف (9.5)	الضاغط خرج من منطقة خطر الانحباس

ثم يأتي التسريع النهائي إلى سرعة التزامن، فالربط بالشبكة. **والتزامن يعني مطابقة أربع قيم قبل السماح بإغلاق قاطع المولد:** التردد، الجهد، زاوية الطور، وترتيب الأطوار (يُتحقق منه مرة واحدة عند التوصيل الأولي لا عند كل بدء). ويتولّى ذلك جهاز تزامن تلقائي، خلفه دائمًا حماية مستقلة (Sync-Check Relay) تمنع الإغلاق إن لم تكتمل الشروط ولو أُرسل أمر يدوي بالخطأ. وتفصيل التزامن ومنطق الحاكم ومنظّم الجهد في 18.1 و18.6.



الشكل 9.3 — تسلسل بدء التشغيل من زاوية منطق التحكم: السرعة مقابل الزمن (تقريبي، لأغراض التوضيح)، موضحًا نقاط فصل محرك البدء وإغلاق صمامات النزف ضمن مراحل التسريع

من واقع عملي، فهم أن الانتقالات مبنية على سرعة فعلية (لا على وقت ثابت) مهم جدًا للتشخيص — فلو «تعلّقت» الوحدة عند مرحلة معينة (مثلًا لم تصل سرعة فصل محرك البدء في الوقت المتوقع)، فأول سؤال هو: هل وصلت السرعة فعليًا إلى العتبة المطلوبة ولا توجد نبضة تحرّك المرحلة التالية؟ أم أن السرعة نفسها متأخرة عن الطبيعي لسبب ميكانيكي (كاحتكاك زائد أو نقص في عزم محرك البدء)؟ التفريق بين الحالتين يوفر وقت تشخيص كبيرًا.

الحالة الحرارية وأثرها على منحنى البدء

منطق التحكم واحد في كل بدء، لكن **سلوك الآلة يختلف باختلاف حالتها الحرارية قبله** — وهذا يفسّر لماذا يتصرف التوربين نفسه بشكل مختلف بين بدء وآخر. والتصنيف العملي (بارد/دافئ/ساخن) وما يترتب عليه من فترات إحماء ومعدلات تحميل في 26.5. وما يعني ذلك لمنطق التحكم نقطتان:

- **الخلوصات.** بعد توقف قصير، تبرد الأجزاء الرقيقة (كالريش) أسرع من السميكة (كالعمود والغلاف)، فتتغيّر الخلوصات بين الدوّار والثابت (5.4) عن حالة البدء البارد — وقد يستدعي ذلك تعديل نقاط التثبيت أو معدلات التسريع في منحنى البدء تفاديًا لاحتكاك أو إجهاد غير محسوب.
- انحناء العمود **(Rotor Bow).** لو توقف العمود الساخن عن الدوران قبل تفعيل آلية الدوران البطيء (6.4، 26.4)، انحنى انحناءً طفيفًا مؤقتًا بفعل التبريد غير المتساوي حول محيطه. وعرضه الميداني كلاسيكي: **اهتزاز مرتفع غير طبيعي عند السرعات المنخفضة يختفي تدريجيًا مع الدوران** (7.4) — ويجب ألا يُخلط بمشكلة اهتزاز حقيقية في المحمل.

البدء الأسود (Black Start)

في معظم الحالات، يفترض تسلسل البدء الذي شرحناه وجود مصدر كهربائي خارجي (من الشبكة أو من وحدة أخرى في المحطة) يغذّي محرك بدء التشغيل ومضخات الزيت المساعدة والتحكم نفسه. لكن هناك تطبيقات — خصوصًا محطات معزولة أو منصات بحرية (راجع 3.4) أو محطات مخصصة لدعم استعادة الشبكة بعد انهيار كامل (Black Start Capability) — تحتاج أن تقدر الوحدة على البدء **دون أي اعتماد على مصدر كهربائي خارجي إطلاقًا**. وهذا يتطلب:

- مصدر بدء مستقل تمامًا (محرك ديزل صغير مخصص للتدوير، أو نظام هوائي/هيدروليكي مضغوط مسبقًا، بدل محرك بدء كهربائي يعتمد على الشبكة).
- نظام بطاريات (DC) كافٍ لتغذية التحكم نفسه ومضخات الزيت الأولية، مستقل تمامًا عن أي تغذية AC خارجية.

- نظام إثارة (Excitation، راجع 6.6) قادر يبني الجهد على المولد ذاتيًا (Self-Excitation) دون الاعتماد على جهد شبكة موجود مسبقًا كمرجع.

والقدرة على البدء الأسود ميزة تصميمية تُطلب صراحة عند شراء الوحدة، وليست خاصية موجودة تلقائيًا في كل توربين — فكثير من الوحدات الصناعية العادية لا تملكها أصلًا لأنها تفترض دائمًا وجود شبكة أو مولد آخر يعمل ويوفر التغذية الأولية.

تسلسل الإيقاف

للإيقاف نفس منطق «التدرج» الذي شرحناه للبدء، لكن بالاتجاه المعاكس، وله مساران مختلفان تمامًا حسب سبب الإيقاف:

- الإيقاف العادي **(Normal Stop):** يبدأ بتخفيف الحمل الكهربائي تدريجيًا (Unloading) حتى يصل إلى صفر، ثم فصل قاطع المولد، ثم تخفيض السرعة تدريجيًا (Deceleration) حتى سرعة خمول منخفضة تُحفَظ عليها الوحدة فترة «تبريد» (Cooldown) — نفس فكرة الإحماء في البدء لكن بالعكس، تمنع إجهادًا حراريًا مفاجئًا من التبريد السريع. بعدها تُقطع كمية الوقود بالكامل ويستمر العمود يدور بالقصور الذاتي (Coastdown) حتى يتوقف تمامًا، وغالبًا مع استمرار تشغيل مضخة الزيت لفترة إضافية لحماية المحامل أثناء التوقف (شرحناها في 6.1)، ثم تُفعَّل آلية الدوران البطيء تلقائيًا (راجع أعلاه).
- الإيقاف الطارئ **(Emergency Stop / ESD):** شرحناه بالتفصيل في 7.8 — قطع فوري وكامل للوقود دون أي تدرج في الحمل أو السرعة، لأن الأولوية هنا حماية المعدة والأشخاص فورًا، لا حماية المعدن من الإجهاد الحراري. والفرق الجوهري بين المسارين: الإيقاف العادي «يفاوض» الوحدة كي يحميها من إجهاد التبريد السريع، بينما الإيقاف الطارئ يضحي بهذه الحماية مقابل السرعة.

رفض الحمل المفاجئ (Load Rejection)

هذه حالة مختلفة جوهريًا عن الإيقاف العادي أو الطارئ، وتستحق توضيحًا منفصلًا لأنها غالبًا تُخلط بغيرها: رفض الحمل يعني أن الوحدة **تفقد الحمل الكهربائي المتصلة به فجأة وبشكل غير مخطط له** — مثلًا يفتح قاطع المولد فجأة (بسبب خلل في الشبكة، أو حماية كهربائية في جانب الشبكة)، بينما التوربين نفسه ما زال يعمل بكامل قوته ومزوّدًا بكمية وقود تناسب الحمل الكامل. والنتيجة: كمية طاقة كبيرة كانت «تُستهلك» في توليد الكهرباء أصبحت فجأة بلا مخرج، فيميل العمود إلى التسارع بسرعة كبيرة جدًا خلال أجزاء من الثانية.

وهذه بالضبط الحالة التي تختبر حلقة التحكم بالسرعة (9.2) وحماية السرعة الزائدة (7.2) معًا: فحلقة التحكم يجب أن تكتشف الانخفاض المفاجئ في الحمل (عادة عبر إشارة موضع قاطع المولد نفسها، لا عبر ارتفاع السرعة وحده الذي يكون قد فات أوانه قليلًا) وتقلّل كمية الوقود بسرعة قصوى — أسرع بكثير من أي تغيير حمل عادي أثناء التشغيل الطبيعي. فلو كانت استجابة حلقة التحكم كافية، ارتفعت السرعة مؤقتًا (Speed Excursion) لكنها تعود للاستقرار عند سرعة اللا-حمل (No-Load Speed) دون أن تصل إلى حد القطع. ولو كانت الاستجابة غير كافية أو كان هناك عطل ميكانيكي في صمام الوقود (بطء في الإغلاق، مرتبط بـ 9.7 وحلقة التحكم بالموضع)، فقد تتجاوز السرعة حد القطع الفوري (7.2) فيصبح القطع الفعلي هو خط الدفاع الأخير.

> **من واقع الميدان:** اختبار استجابة الوحدة لرفض حمل مفاجئ (Load Rejection Test) من أهم اختبارات القبول (Commissioning) والفحص الدوري لأي توربين مرتبط بشبكة كهربائية — فهو يثبت عمليًا أن حلقة التحكم بالسرعة وحماية السرعة الزائدة تعملان بالتنسيق الصحيح تحت أسوأ سيناريو تحميل واقعي، لا بمحاكاة نظرية فقط.

إعادة التشغيل بعد القطع (Restart after Trip)

بعد أي قطع (Trip)، لا تعود الوحدة «جاهزة للبدء» تلقائيًا بمجرد أن تتوقف — بل يجب أن تمر بخطوات محددة تختلف حسب نوع القطع:

- إقرار السبب وإعادة التصفير **(Master Reset):** يجب أن يقرّ المشغّل (Acknowledge) سبب القطع من قائمة الإنذارات (مرتبط بـ 7.7)، ثم يصدر أمر إعادة تصفير عام (Master Reset) يُعيد منطق التحكم إلى حالته الطبيعية. ولو كان سبب القطع ما زال موجودًا فعليًا (مثلًا ضغط زيت ما زال منخفضًا)، فلن تنفع إعادة التصفير — يبقى النظام في حالة «قطع» حتى يُعالَج السبب الجذري فعليًا.
- أقفال يدوي إلزامي **(Manual Lockout)** لبعض أنواع القطع: بعض القواطع الحرجة جدًا (كقطع السرعة الزائدة الميكانيكي، أو قطع نتج عن ارتفاع اهتزاز حاد جدًا) مصمَّمة عمدًا **دون إعادة تصفير تلقائي أو حتى بعيد** — فهي تتطلب تدخلًا وفحصًا يدويًا فعليًا في الموقع (وأحيانًا موافقة مهندس مختص) قبل السماح بإعادة التشغيل، لأن احتمال وجود ضرر ميكانيكي فعلي عالٍ ولا يصح المخاطرة بإعادة تشغيل تلقائية.

- **دورة تنظيف كاملة من جديد:** حتى لو كانت الوحدة تعمل لثوانٍ معدودة قبل القطع، تمر إعادة البدء بكامل تسلسل البدء من الصفر — بما فيه سرعة التطهير — لأن الافتراض الآمن دائمًا وجود بقايا وقود في مسار الغاز.

> من واقع الميدان: **مقاومة إغراء «التصفير السريع» وإعادة المحاولة دون فهم السبب الجذري** من أهم انضباطات العمل الميداني — فقطع متكرر بالسبب نفسه خلال فترة قصيرة يجب أن يوقفك فورًا عن إعادة المحاولة العشوائية ويحوّلك إلى منهجية التحقيق المنظم التي نشرحها في الفصل العاشر (10.1)، خصوصًا سيناريو «القواطع المتكررة» في 10.18.

9.4 المعطيات الأساسية: نقاط الضبط والمراقبة

بعد أن شرحنا منطق التحكم (9.1)، وحساباته الأساسية (9.2)، وتسلسل التشغيل (9.3)، يبقى سؤال عملي يومي: كمهندس أو فني تحكم، ما الذي أراقبه باستمرار؟ وما الذي أستطيع تعديله فعليًا؟ الفرق بين النوعين مهم جدًا، وهذا القسم يوضحه.

معطيات تُراقب فقط (Monitored Parameters)

هذه قيم يقرأها نظام التحكم من حسّاسات فعلية، ويتابعها المهندس لكنه لا يتحكم فيها مباشرة — فهي انعكاس لحالة التوربين الفعلية:

- السرعة **(Speed):** في التوربينات ذات العمود الواحد سرعة واحدة، وفي التوربينات ثنائية العمود (كالتوربينات المشتقة من الطيران التي شرحناها في 5.1 وبالتفصيل في الفصل الرابع والعشرين) عادة سرعتان منفصلتان — سرعة مولّد الغاز (Gas Generator Speed) وسرعة توربين القدرة (Power Turbine Speed) — وكل واحدة منهما تُراقب وتُعامَل بمنطق تحكم شبه مستقل.
- حرارة العادم **(Exhaust Temperature):** ليست رقمًا واحدًا بل عدة قراءات من عدة ثرموكابل موزعة حول محيط العادم (شرحنا مفهوم «فارق حرارة العادم» (Spread) بينها في 7.3) — تُراقَب القراءة الفردية وأيضًا مدى التشتت بينها.
- الاهتزاز **(Vibration):** مرتبط بـ 7.4، يُراقَب كقيمة حماية وأيضًا كمؤشر أداء يتغيّر مع الوقت.
- ضغط تفريغ الضاغط **(CDP — Compressor Discharge Pressure):** مؤشر مباشر على نسبة ضغط الضاغط (CPR)، ويُستخدم كما شرحنا في 9.2 كمرجع لمنحنى حرارة العادم.

- موضع صمام الوقود وموضع **IGV:** قراءات فعلية من حسّاسات LVDT (شرحناها في 9.2)، تُقارَن بالقيمة المطلوبة للتأكد من صحة استجابة الصمام فعليًا.
- **حرارة وضغط زيت التزييت، ضغط وحرارة غاز الوقود:** معطيات الأنظمة المساعدة (الفصل السادس) التي تدخل ضمن سماحات البدء (9.3) وتستمر مراقبتها أثناء التشغيل.

من واقع عملي، تجمع شاشة المراقبة الرئيسية في غرفة التحكم عادة أهم هذه المعطيات في مكان واحد مع رسم بياني زمني (Trend) للقيم الأكثر أهمية — لأن القيمة اللحظية وحدها لا تكفي أحيانًا للتشخيص، والاتجاه (هل ترتفع تدريجيًا أم مستقرة أم تذبذب مفاجئ) يعطي معلومة أهم بكثير من الرقم نفسه.

معطيات قابلة للضبط (Setpoints & Control Constants)

هذه قيم يستطيع المهندس أو المشغّل تغييرها فعليًا لتوجيه سلوك التحكم — لكن حتى هي نفسها نوعان مختلفان تمامًا في التأثير:

- نقاط ضبط تشغيلية **(Setpoints):** مثل مرجع السرعة أو الحمل المطلوب، ونسبة الانحدار (Droop %، شرحناها في 9.2)، أو هوامش تحفّظ إضافية على حرارة العادم. وهذه عادة يغيّرها المشغّل بشكل روتيني حسب حاجة التشغيل، وتأثيرها فوري ومحدود بحدود آمنة مبرمجة مسبقًا.
- ثوابت التحكم **(Control Constants):** قيم أعمق تضبط «شخصية» منطق التحكم نفسه — كمعاملات حساب PID، أو حدود زمنية لمؤقتات التسلسل، أو معايرة منحنى مرجعي. وهذه تغييرات أعمق بكثير وتحتاج صلاحية أعلى وحذرًا أكبر، لأنها تغيّر كيف «يفكر» النظام، لا أي قيمة يستهدف فقط.

ونقطة تستحق التوقف عندها من واقع عملي: في أنظمة التحكم التي تعتمد بنية TMR (شرحناها في 9.1)، أي تغيير على ثابت تحكم يمر بمرحلتين مختلفتين تمامًا في التأثير:

1. تغيير مؤقت **(RAM-only):** يُطبَّق فورًا على الذاكرة المؤقتة للمعالجات، مفيد للاختبار أو الضبط الدقيق أثناء التشغيل، لكنه **يُفقَد** عند أي إعادة تشغيل أو فقدان تغذية للمعالج.
2. تنزيل دائم **(Permanent Download):** يكتب القيمة الجديدة على الذاكرة الدائمة لكل معالج من معالجات TMR الثلاثة، وعادة يتطلب إعادة تشغيل (Reboot) منظّم للمعالجات واحدًا تلو الآخر حتى لا تنقطع الردّية أثناء العملية — وهو بالضبط نفس مبدأ «معالج واحد يتعطل والباقي يستمر» الذي شرحناه في 9.1، لكنه هنا مستخدَم عمدًا لتحديث المعالجات دون إيقاف الوحدة.

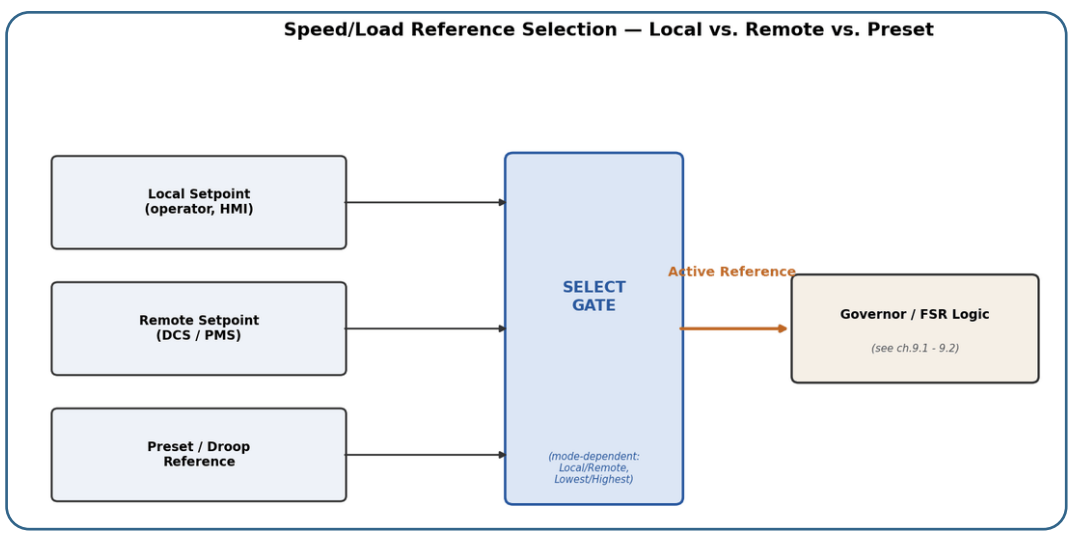
من واقع عملي، الخلط بين النوعين خطأ شائع عند المهندسين الجدد — تغيير يُختبَر بنجاح أثناء المناوبة، ثم «يختفي» بعد أول إعادة تشغيل للنظام لأنه لم يُنزَّل بشكل دائم. والقاعدة العملية: أي تعديل تحققت منه واختبرته وقررت اعتماده فعليًا، يجب أن يُنزَّل بشكل دائم، لا أن يُترك في الذاكرة المؤقتة.

اختيار مرجع السرعة/الحمل: محلي مقابل بعيد

ونقطة تحكم مهمة أخرى تتعلق بـ«مصدر» مرجع السرعة أو الحمل نفسه. ففي التطبيقات المرتبطة بشبكة كهربائية أو نظام إدارة طاقة (PMS)، يستقبل نظام التحكم عادة أكثر من مرجع محتمل في الوقت نفسه:

- مرجع محلي (Local Setpoint): يضبطه المشغّل مباشرة من شاشة HMI في غرفة التحكم.
- مرجع بعيد (Remote Setpoint): يُرسَل من نظام إدارة طاقة مركزي أو نظام تحكم أعلى مستوى (DCS/PMS)، مفيد خصوصًا لتقاسم الحمل التلقائي بين عدة وحدات.
- مرجع ثابت/احتياطي (Preset أو Droop Reference): قيمة افتراضية تُستخدم كحد أدنى أو كمرجع أساسي.

ونفس مبدأ «أقل قيمة تفوز» الذي شرحناه في 9.1 يتكرر هنا بشكل مشابه (أحيانًا بمنطق «أعلى قيمة تفوز» حسب الحالة): بوابة اختيار (Select Gate) تحدد أي مرجع من هذه المصادر هو الفعّال في أي لحظة، حسب وضع التشغيل المختار (محلي/بعيد).



الشكل 9.4 — بوابة اختيار مرجع السرعة/الحمل: من بين المرجع المحلي والبعيد والثابت، تُختار قيمة واحدة فعّالة تُغذّي منطق الحاكم/FSR

تنظيم شاشات HMI

من واقع عملي، تُقسَّم شاشات التشغيل الحديثة (HMI) عادة إلى عدة شاشات متخصصة بدل شاشة واحدة مزدحمة: شاشة بدء التشغيل (Startup Display) تعرض تفاصيل تسلسل 9.3، وشاشة الوقود (Fuel/DLN Display) تعرض تفاصيل 9.2، وشاشة FSR تعرض منطق 9.1، وشاشة IGV (سنشرحها في 9.5)، وشاشة خاصة بالمولد والإثارة (مرتبطة بـ 6.6). وهذا التقسيم يسهّل التشخيص السريع — فبدل أن تفتش وسط شاشة واحدة مزدحمة بكل المعطيات، تذهب مباشرة إلى الشاشة المرتبطة بالمشكلة المحتملة. وتجدر الإشارة إلى أن هذا التصميم ليس حكرًا على مصنّع واحد — فمنصات تحكم من شركات أخرى (كمنصات Woodward التجارية) تتبع فلسفة تقسيم الشاشات نفسها، وإن اختلفت التسميات والتفاصيل الداخلية.

9.5 التحكم بكمية الهواء الداخل

في الأقسام السابقة تحدثنا كثيرًا عن التحكم بالوقود. لكن الاحتراق الجيد يحتاج نسبة صحيحة بين الوقود والهواء (شرحنا هذا المبدأ في الفصل الثاني والخامس) — فالتحكم بكمية الهواء الداخل إلى الضاغط لا يقل أهمية عن التحكم بالوقود نفسه.

لماذا نتحكم بكمية الهواء الداخل؟

على عكس الوقود، لا يوجد «صمام» واحد بسيط يتحكم بكمية الهواء — فالهواء يدخل عبر الضاغط نفسه (5.2)، والتحكم فيه يحدث بتغيير هندسة مسار الهواء داخل الضاغط لحظيًا. ولهذا التحكم عدة أهداف عملية:

- حماية الضاغط من الانحباس **(Surge):** عند سرعات دوران منخفضة (كأثناء بدء التشغيل، 9.3)، تكون كمية الهواء التي يقدر الضاغط على التعامل معها بثبات أقل بكثير من التصميم الكامل. فلو دخل هواء أكثر من طاقته عند هذه السرعة، حدث اضطراب شديد في جريان الهواء (Surge) قد يضر بريش الضاغط.
- **دعم منحنى تحكم الحرارة:** شرحنا في 9.2 أن زاوية IGV تدخل كتصحيح على منحنى حرارة العادم المرجعي — لأن تغيير كمية الهواء الداخل يغيّر نسبة الوقود إلى الهواء وبالتالي حرارة الاحتراق الفعلية لنفس كمية الوقود.
- **تحسين الكفاءة عند الأحمال الجزئية:** تقليل كمية الهواء عند حمل منخفض يحافظ على حرارة عادم أعلى نسبيًا حتى بحمل منخفض، وهذا يحسّن الكفاءة الكلية مقارنة بضخ هواء كامل لحمل جزئي (مرتبط بمفهوم الكفاءة الذي شرحناه في 2.5).

ريش التوجيه المتغيرة عند المدخل (IGV / VIGV)

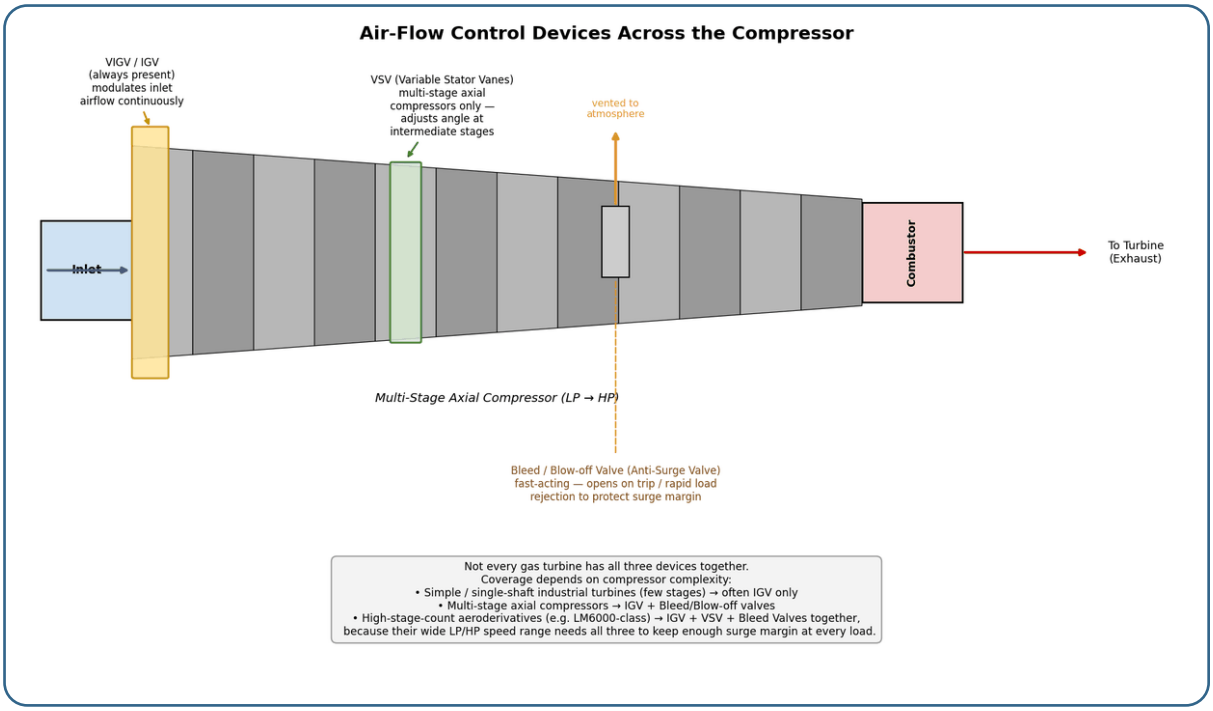
هذا أهم عنصر تحكم بالهواء، وقد أشرنا له مرارًا في الأقسام السابقة. وهو عبارة عن حلقة من الريش القابلة للدوران مركّبة عند مدخل الضاغط مباشرة، تتحكم زاويتها بكمية واتجاه الهواء الداخل إلى المرحلة الأولى:

- **آلية التحريك:** كل ريش الحلقة مربوطة بذراع تحكم واحدة (Actuation Ring) تتحرك بمحرك هيدروليكي، بنفس مبدأ حلقة التحكم التي شرحناها في 9.2 لصمام الوقود (صمام خادم + محرك هيدروليكي + تغذية راجعة من حسّاس LVDT) — والفرق أن الناتج هنا زاوية دوران، لا فتحة صمام.
- **مدى الحركة:** من وضعية شبه مغلقة (تُستخدم أثناء البدء والسرعات المنخفضة لتقليل كمية الهواء الداخل وحماية الضاغط من الانحباس) إلى وضعية مفتوحة بالكامل عند الحمل الكامل.

الريش الموجهة المتغيرة بين المراحل (VSV) وصمامات النزف المتغيرة (VBV)

في الضواغط متعددة المراحل، لا تكفي IGV وحدها أحيانًا لحماية كل مراحل الضاغط من الانحباس عبر كامل مدى السرعة، فتُضاف طبقتان إضافيتان:

- الريش الموجهة المتغيرة **(VSV — Variable Stator Vanes):** تشبه IGV من حيث المبدأ، لكنها مركّبة على أول مرحلتين أو ثلاث مراحل من الضاغط (لا المدخل فقط)، وتتحرك بزاوية تتناسب مع السرعة الفعلية للحفاظ على زاوية اصطدام هواء صحيحة على ريش الدوّار في كل مرحلة — لأن هذه الزاوية تتغير مع تغيّر سرعة الدوران.
- صمامات النزف المتغيرة **(VBV — Variable Bleed Valves):** صمامات تُفتح عند السرعات المنخفضة لتفريغ جزء من الهواء المضغوط من منتصف الضاغط إلى الخارج مباشرة (بدل أن يكمل مساره)، وهذا يمنع تراكم هواء زائد في مراحل الضاغط الأخيرة أثناء التسريع. وتذكر من 9.3 أن «إغلاق صمامات النزف» كان أحد الأحداث المرتبطة بسرعة معينة أثناء تسلسل بدء التشغيل — وهذا بالضبط هو الصمام نفسه.



الشكل 9.5 — عناصر التحكم بالهواء داخل الضاغط: ريش التوجيه المتغيرة عند المدخل (IGV)، الريش الموجهة المتغيرة بأول المراحل (VSV)، وصمام النزف المتغير (VBV) بمنتصف الضاغط تقريبًا

من واقع عملي، الفكرة العامة التي تربط الثلاثة معًا: عند السرعات المنخفضة، تكون IGV شبه مغلقة وVBV مفتوحة (لتقليل الهواء وتفريغ الزائد منه)، وVSV بزاوية مناسبة لسرعة منخفضة. وكلما ازدادت السرعة، فتحت IGV تدريجيًا، وأُغلقت VBV (حسب عتبة سرعة محددة كما شرحنا في 9.3)، واستمرت VSV تعدّل زاويتها مع السرعة. والهدف الموحّد للثلاثة: إبقاء الضاغط يعمل ضمن «منطقة مستقرة» آمنة في كل نقطة تشغيل، من بدء التشغيل حتى الحمل الكامل.

لماذا لا تضم كل التوربينات التوليفة نفسها؟

نقطة مهمة عمليًا: ليس كل توربين غازي يملك العناصر الثلاثة معًا. فالتوليفة تعتمد على مدى تعقيد الضاغط نفسه وعدد مراحله:

- **توربينات صناعية بسيطة (عدد مراحل قليل نسبيًا):** أحيانًا تكتفي بـ IGV فقط عند المدخل، لأن مدى السرعة الذي تعمل فيه أضيق ولا يستدعي حماية إضافية معقدة.

- **ضواغط متعددة المراحل:** عادة تضيف IGV + صمامات نزف (Bleed/Blow-off Valves) دون الحاجة الضرورية لـ VSV.

- توربينات مشتقة من الطيران متعددة المراحل **(Aeroderivative)** بعدد مراحل ضاغط كبير: مثل توربينات فئة LM6000 (خمس مراحل ضاغط ضغط منخفض + أربع عشرة مرحلة ضاغط ضغط عالٍ) — فهذه تحتاج الثلاثة معًا (IGV + VSV + Bleed Valves)، لأن مدى السرعة الواسع بين الضاغط منخفض الضغط وعالي الضغط (لكل واحد سرعة دوران مستقلة عن الآخر، مرتبط بمفهوم العمود المزدوج) يفرض هامش حماية أدق وأكثر طبقات عند كل نقطة تشغيل.

والقاعدة العملية: كلما ازداد عدد مراحل الضاغط واتسع مدى سرعات التشغيل بين الحمل الأدنى والحمل الكامل، ازدادت الحاجة إلى عدد أكبر من عناصر التحكم بالهواء تعمل معًا — لأن هامش الانحباس (شرحناه في 5.2) يصعب المحافظة عليه بعنصر تحكم واحد فقط عبر مدى واسع.

9.6 أجهزة القياس وتكرارها

في كل الأقسام السابقة من هذا الفصل ذكرنا حسّاسات كثيرة (سرعة، حرارة، اهتزاز، لهب، موضع) بشكل عابر. ويعود هذا القسم إلى هذه الحسّاسات نفسها بالتفصيل: كم عدد الحسّاسات المطلوب لكل قياس، ولماذا تُكرَّر بعض القياسات أكثر من غيرها.

تفريق مهم: تكرار المعالجات مقابل تكرار الحسّاسات

في 9.1 شرحنا فكرة TMR — ثلاثة معالجات تحكم مستقلة تصوّت على القرار النهائي. وهذا مفهوم مختلف تمامًا عن تكرار الحسّاسات نفسها، وإن كان الاثنان يخدمان الهدف نفسه (الموثوقية). والفرق:

- تكرار المعالجات **(TMR):** ثلاث نسخ من «الدماغ» الذي يعالج البيانات نفسها ويتخذ القرار.
- **تكرار الحسّاسات:** أكثر من جهاز استشعار فعلي يقيس المتغير الفيزيائي نفسه (مثلًا السرعة) بشكل مستقل، بحيث لو تعطّل حسّاس واحد أو أعطى قراءة خاطئة، استمر الباقي في إعطاء قراءة صحيحة.

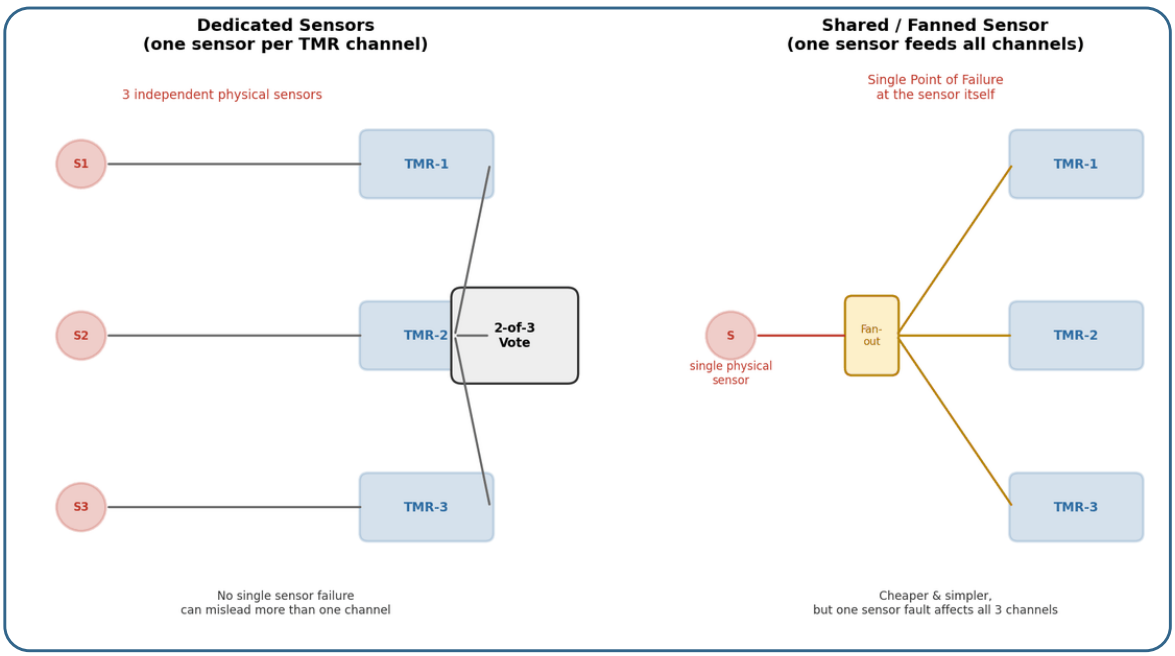
وفي الأنظمة عالية الموثوقية، يعمل الاثنان معًا: عدة حسّاسات مستقلة تغذّي عدة معالجات مستقلة، وكل معالج يقارن القراءات من كل الحسّاسات المتاحة له.

تصنيف الحسّاسات: مخصص مقابل مشترك

من الناحية العملية، تُصنَّف الحسّاسات بطريقتين مختلفتين في التوصيل:

- حسّاس مخصص **(Dedicated):** كل حسّاس مربوط بمعالج واحد فقط من معالجات TMR الثلاثة — أي أن لكل معالج «عينه» الخاصة المستقلة تمامًا عن باقي المعالجات.
- حسّاس مشترك **(Shared/Fanned):** قراءة حسّاس واحد تُوزَّع (Fan-out) على المعالجات الثلاثة عبر دارة توزيع، بحيث كل المعالجات «ترى» القراءة نفسها من الحسّاس الفيزيائي نفسه.

والفرق العملي بينهما: الحسّاسات المخصصة توفر حماية أعلى من عطل الحسّاس نفسه (لأن لكل معالج مصدرًا مستقلًا تمامًا)، بينما الحسّاسات المشتركة أرخص وأبسط تركيبًا لكنها تبقى نقطة عطل واحدة مشتركة (Single Point of Failure) لو تعطّل الحسّاس نفسه — حتى لو كانت المعالجات الثلاثة سليمة تمامًا.



الشكل 9.6 — يسار: توصيل مخصص، كل حسّاس مربوط بمعالج واحد فقط، مع تصويت 2-من-3 لاحقًا. يمين: توصيل مشترك (Fan-out)، حسّاس واحد يغذّي المعالجات الثلاثة، فيبقى نقطة عطل واحدة مشتركة رغم استقلالية المعالجات.

درجات التكرار حسب أهمية القياس

من واقع عملي، يعتمد عدد الحسّاسات لكل قياس على مدى حرجية هذا القياس، وليس العدد نفسه لكل شيء:

- **قياسات حرجة للحماية (كالسرعة، شرحناها في 7.2):** عادة تُقاس بثلاثة حسّاسات مخصصة مستقلة تمامًا (Triple Redundant)، بمنطق تصويت 2من3- (Median/Logical Vote) — وهو نفس مبدأ تصويت المعالجات الذي شرحناه في 9.1، لكنه مطبَّق هنا على مدخلات القياس نفسها قبل أن تصل إلى المعالجة أصلًا.
- **قياسات موزّعة بطبيعتها (كحرارة العادم، شرحناها في 7.3):** لا تُقاس بحسّاس واحد مكرر ثلاث مرات في النقطة نفسها، بل بعدد كبير من الثرموكابل الموزعة حول محيط العادم (قد يصل لعدد كبير حسب حجم الوحدة) — وهذا التوزيع نفسه يعطي نوعًا من التكرار الطبيعي، لأن فقدان ثرموكابل واحد أو اثنين لا يفقد القياس بالكامل، ويسمح أيضًا بحساب «فارق حرارة العادم» بين القراءات كمؤشر إضافي.
- **قياسات حماية إضافية (كالاهتزاز واللهب، شرحناها في 7.4 و7.5):** عادة حسّاس أو اثنان لكل نقطة قياس (كل محمل، كل كاشف لهب)، حسب تصميم الوحدة.
- **قياسات مراقبة عامة (كضغط وحرارة زيت التزييت):** غالبًا حسّاس واحد كافٍ، لأنها ليست قياس حماية مباشر بحد ذاتها بقدر ما هي مؤشر حالة تشغيلية.

والقاعدة العملية التي تلخّص هذا كله: كلما ازدادت خطورة القرار المبني على قياس معيّن (كإيقاف الوحدة كاملة)، ازداد عدد الحسّاسات المستقلة التي تغذّي هذا القرار — لأن كلفة «إنذار كاذب» بسبب عطل حسّاس واحد أقل بكثير من كلفة «فشل حماية حقيقي» بسبب الاعتماد على حسّاس وحيد.

ملاحظة: التصويت البرمجي بين المعالجات

حتى لو كانت كل الحسّاسات مخصصة والمعالجات الثلاثة مستقلة تمامًا، تبقى هناك طبقة تصويت برمجي (تُعرف أحيانًا بمفهوم Software Implemented Fault Tolerance) تقارن باستمرار القيم التي وصلت إلى كل معالج، وتكتشف انحراف معالج واحد عن الاثنين الآخرين — سواء بسبب عطل في الحسّاس المخصص له أو عطل داخلي في المعالج نفسه. وهذه الطبقة هي التي تجعل اكتشاف الأعطال الجزئية ممكنًا قبل أن تتراكم وتصبح مشكلة حقيقية في الحماية.

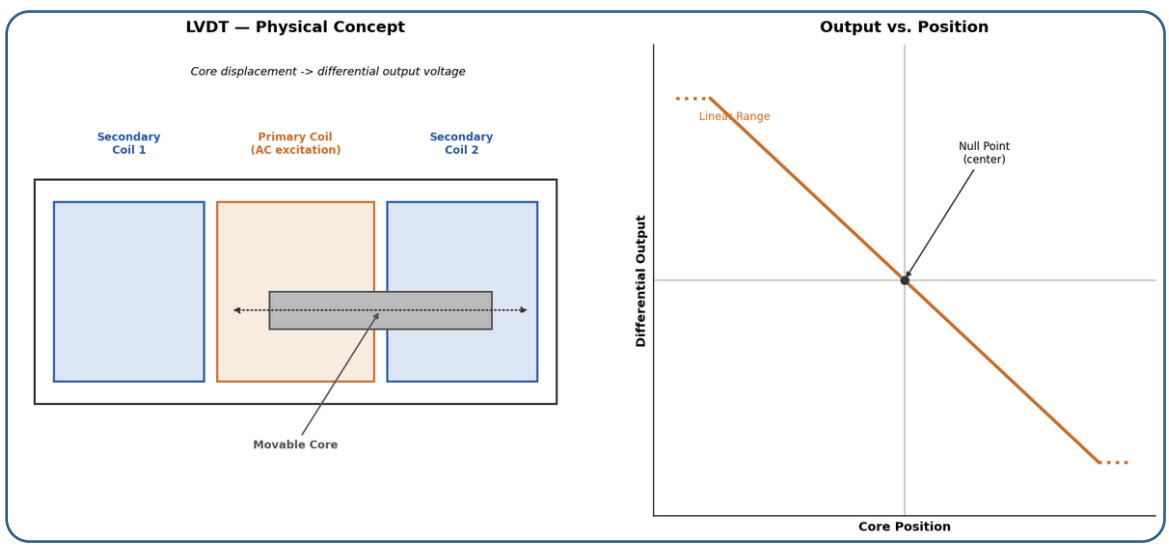
9.7 حسّاس LVDT: أهم حسّاس موضع بالتحكم

ذكرنا LVDT (Linear Variable Differential Transformer) عدة مرات في هذا الفصل — في حلقة تحكم موضع صمام الوقود (9.2) وفي حلقة تحكم IGV (9.5). وكونه يتكرر في كل حلقة تحكم حرجة تقريبًا، فهو يستحق قسمًا مستقلًا يشرحه بالتفصيل.

كيف يعمل فيزيائيًا

LVDT مبني على فكرة بسيطة نسبيًا: ملف كهربائي أساسي (Primary Coil) يُغذّى بتيار متردد (إثارة)، ومحاط بملفّين ثانويين (Secondary Coils) متماثلين موضوعين على جانبيه. وقلب معدني متحرك (Core) مربوط ميكانيكيًا بالجزء الذي نريد قياس موضعه (جسم صمام الوقود، أو حلقة IGV) يتحرك داخل الملفات الثلاثة.

وعندما يكون القلب في المنتصف تمامًا (بين الملفين الثانويين بالتساوي)، يكون الجهد المستحث في كل ملف ثانوي متساويًا، فيساوي الفرق بينهما (Differential Output) صفرًا — وتُسمى هذه «نقطة الصفر» (Null Point). ولو تحرك القلب إلى أي جهة، أصبح أقرب إلى ملف ثانوي وأبعد عن الآخر، فيرتفع الجهد المستحث في الملف القريب وينخفض في البعيد، وينتج فرق جهد يتناسب (بشكل خطي ضمن مدى معيّن) مع مقدار واتجاه إزاحة القلب عن المنتصف.



الشكل 9.7 — مبدأ عمل LVDT: ملف أساسي بينه ملفان ثانويان، وقلب معدني متحرك يُنتج جهدًا تفاضليًا يتناسب مع موضعه، مع منحنى الجهد التفاضلي مقابل الموضع موضّحًا نقطة الصفر والمدى الخطي

لماذا يُستخدم تحديدًا في حلقات التحكم الحرجة؟

من واقع عملي، السبب الرئيسي أن LVDT ليس فيه أي تلامس كهربائي متحرك (Non-Contact) — فالقلب يتحرك ميكانيكيًا داخل الملفات دون أي فرشاة أو تلامس كهربائي منزلق يحتك ويتآكل مع الوقت (عكس بعض أنواع الحسّاسات الأقدم). وهذا يعطيه:

- احتكاكًا ميكانيكيًا منخفضًا جدًا، فلا يؤثر على حركة الصمام أو الريش نفسها.
- عمرًا تشغيليًا طويلًا جدًا مقارنة بحسّاسات الاحتكاك الكهربائي المباشر.
- دقة وثباتًا عاليًا في القراءة، وهذا بالضبط سبب الاعتماد عليه في حلقات تحكم حرجة مثل موضع صمام الوقود — فأي خطأ في قراءة الموضع ينعكس مباشرة على دقة كمية الوقود الفعلية (9.2).

ملفات ثانوية مزدوجة للتكرار

تطبيقًا لمبدأ تكرار الحسّاسات الذي شرحناه في 9.6، تُصنَّع كثير من مجسّات LVDT المستخدمة في تطبيقات التحكم الحرجة بأربعة ملفات ثانوية (لا اثنين فقط) — أي زوجين مستقلين من الملفات الثانوية حول القلب المتحرك نفسه، بحيث يعطي كل زوج إشارة موضع مستقلة تمامًا عن الزوج الآخر، رغم أنهما يشتركان في القلب المتحرك نفسه والملف الأساسي نفسه. وهذا يسمح بتغذية معالجين مختلفين (أو أكثر) بقراءة موضع مستقلة من المجسّ الفيزيائي الواحد نفسه — تكرار جزئي أرخص وأخف وزنًا من تركيب مجسّين منفصلين بالكامل، مع فائدة حماية حقيقية من عطل دارة إلكترونية واحدة.

مفهوم المعايرة

بما أن القراءة كلها جهد كهربائي يُترجَم إلى موضع، فلا بد من معايرة دورية تربط الجهد المقاس بالموضع الفعلي بدقة:

- معايرة نقطة الصفر **(Null/Zero Calibration):** التأكد من أن الجهد التفاضلي يساوي فعلًا صفرًا (أو قيمة مرجعية معروفة) عندما يكون الصمام أو الريش في موضعه المرجعي الفعلي (كموضع الإغلاق الكامل مثلًا).
- معايرة المدى الخطي **(Span/Range Calibration):** التأكد من أن العلاقة بين الجهد والموضع تبقى خطية ودقيقة عبر كامل مدى حركة الصمام أو الريش، من طرف إلى طرف.

من واقع عملي، انحراف بسيط في معايرة LVDT (حتى لو ببضع بالمئة فقط) ينعكس مباشرة كخطأ في موضع الصمام الفعلي مقارنة بالموضع المطلوب من FSR — وهذا النوع من الأعطال يصعب تشخيصه أحيانًا لأنه لا يعطي رسالة عطل واضحة، لكنه يظهر كسلوك تحكم «غريب قليلًا» (استجابة أبطأ أو أسرع من المتوقع، أو عدم استقرار خفيف) قبل أن يتفاقم إلى عطل واضح.

9.8 الأمن السيبراني لأنظمة التحكم (OT Cybersecurity)

لعقود طويلة، كانت أنظمة التحكم الصناعي (مثل Mark VIe أو أي نظام مشابه يتحكم بتوربينك الغازي) محمية «طبيعيًا» لأنها كانت معزولة فيزيائيًا عن أي شبكة خارجية — لا إنترنت، ولا حتى اتصال بشبكة الشركة الإدارية. وكان هذا العزل (Air Gap) هو خط الدفاع الوحيد تقريبًا. أما اليوم فقد تغيّر الوضع جذريًا: أصبح نظام التحكم نفسه متصلًا بشبكة المصنع لأسباب مشروعة تمامًا — المراقبة عن بعد، وجمع بيانات الأداء التاريخية (المرتبطة بموضوع الصيانة التنبؤية الذي ذكرناه في 8.5)، والدعم الفني من الشركة المصنّعة، وتحديثات البرمجيات. وهذا الاتصال يفتح بابًا لم يكن موجودًا سابقًا: احتمال اختراق سيبراني يصل إلى نظام التحكم الفعلي في المعدة — أي شيء من تعطيل التشغيل إلى التلاعب بمنطق الحماية نفسه في أسوأ الحالات.

وقد أصبح هذا الموضوع جزءًا لا يتجزأ من عمل مهندس ومشغّل التوربينات الغازية الحديث، حتى لو لم يكن تخصصه الأصلي في تقنية المعلومات — لأنه يعرف نظام التحكم من الداخل، وهذا بالضبط ما يجعله طرفًا أساسيًا في أي نقاش عن حمايته.

الفرق بين IT وOT: لماذا لا يصلح نهج حماية الشبكات المكتبية نفسه؟

أنظمة تقنية المعلومات التقليدية (IT — أجهزة الموظفين، البريد الإلكتروني، السيرفرات الإدارية) وأنظمة التحكم الصناعي (OT — Operational Technology، مثل نظام التحكم بالتوربين) لها أولويات مختلفة جذريًا رغم أنها تشترك في المفاهيم التقنية الأساسية نفسها:

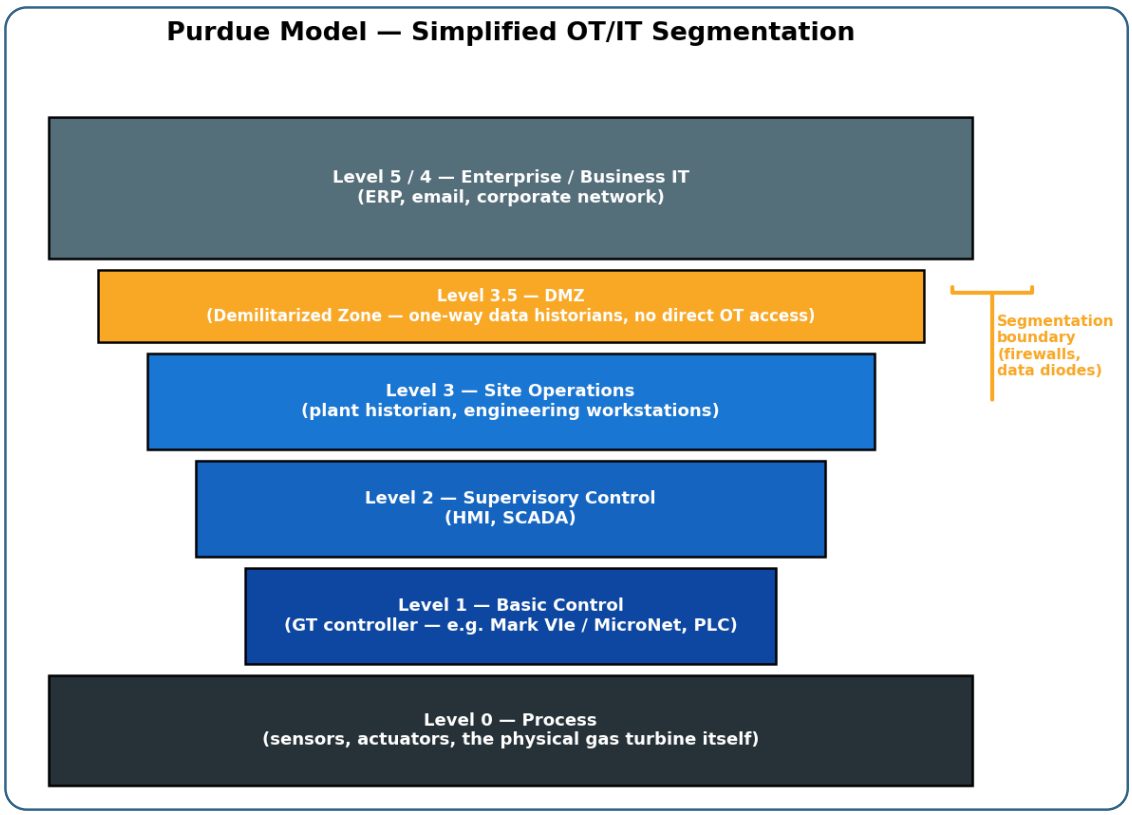
- في **IT:** الأولوية عادة تكون سرّية البيانات (Confidentiality) — منع تسرّب المعلومات.
- في **OT:** الأولوية القصوى هي التوفّر واستمرارية التشغيل (Availability) وسلامة العملية (Safety) — فنظام التحكم يجب أن يعمل بشكل مستمر وموثوق، وأي تعطيل غير مخطط له قد يعني إيقاف توربين أو حتى خطر سلامة فعلي.

وهذا الفرق مهم عمليًا: فإجراء أمني قياسي في عالم الـ IT (مثل إعادة تشغيل جهاز فورًا لتثبيت تحديث أمني) قد يكون غير مقبول إطلاقًا في عالم الـ OT، لأنه يعني إيقاف تشغيل معدة حرجة دون تخطيط. فالحماية السيبرانية لأنظمة التحكم الصناعي تحتاج نهجًا خاصًا يوازن بين الأمان والحاجة لاستمرارية التشغيل.

نموذج بردو (Purdue Model): كيف نفهم طبقات الشبكة؟

النموذج الأكثر شيوعًا لفهم شبكات التحكم الصناعي وتصميمها هو نموذج بردو **(Purdue Enterprise Reference Architecture)**، الذي يقسّم الشبكة إلى مستويات هرمية:

- المستوى **0** — العملية الفعلية **(Process):** المعدات الفيزيائية نفسها — الحسّاسات والمشغّلات (مثل LVDT الذي شرحناه في 9.7، وحسّاسات الاهتزاز والحرارة من الفصل السابع).
- المستوى **1** — التحكم الأساسي **(Basic Control):** نظام التحكم نفسه (Mark VIe أو ما يعادله) الذي ينفّذ منطق التحكم المباشر.
- المستوى **2** — الإشراف **(Supervisory):** محطات HMI وSCADA التي يرى منها المشغّل الحالة ويتحكم بها.
- المستوى **3** — عمليات الموقع **(Site Operations):** أنظمة إدارة الإنتاج والصيانة على مستوى الموقع كامل.
- المستوى **3.5** — المنطقة منزوعة السلاح **(DMZ):** طبقة حاجزة مخصصة تفصل عالم OT (المستويات 0-3) عن عالم IT (المستويات 4-5) — لا يوجد أي اتصال مباشر بين الطرفين، فكل تبادل بيانات يمر عبر هذه المنطقة الوسيطة.
- المستويات **4 و5** — شبكة المؤسسة **(Enterprise IT):** شبكة الشركة الإدارية والاتصال بالإنترنت.



الشكل 9.8 — نموذج بردو: هرم المستويات من المعدة الفعلية (المستوى صفر) وصولًا لشبكة المؤسسة (المستويات 5/4)، مع طبقة DMZ الفاصلة عند المستوى 3.5 وحدود التقسيم بالجدران النارية وصمامات البيانات

والفكرة العملية الأساسية من هذا النموذج: التقسيم **(Segmentation)**. فبدل شبكة واحدة مسطّحة يستطيع أي جهاز مخترق فيها الوصول إلى أي جهاز آخر، تُقسَّم الشبكة إلى مناطق، ويمر كل انتقال بين منطقة وأخرى عبر نقطة تفتيش محكومة — جدار ناري (Firewall) مضبوط بقواعد صارمة، أو في الحالات الأكثر حساسية صمام بيانات **(Data Diode)** يسمح بمرور البيانات باتجاه واحد فقط (من نظام التحكم إلى الخارج، لا العكس) — أي أنه حتى لو تعرّض إنترنت الشركة بالكامل للاختراق، فلا يوجد طريق تقني للرجوع إلى نظام التحكم نفسه.

من واقع الميدان: عمليًا، أكثر نقطة ضعف رأيتها لم تكن في تصميم الشبكة نفسه، بل في ممارسات يومية بسيطة تكسر التقسيم دون قصد: فني يوصّل لابتوب شخصي (يحمل فيروسًا لا يعلم به) مباشرة بمنفذ الشبكة الخاص بنظام التحكم كي «يسحب نسخة من إعدادات البرنامج فقط»، أو USB يُستخدم لنقل ملف بين جهاز مكتبي وجهاز HMI دون فحص. وهذه أبواب جانبية تلتف حول كل طبقات الحماية المصممة بعناية على مستوى الشبكة، وهذا بالضبط سبب أن الوعي والالتزام بالإجراءات على مستوى الأفراد لا يقل أهمية عن تصميم الشبكة نفسه.

الأطر الإرشادية: IEC 62443 وNIST

الجهة المرجعية الأكثر اعتمادًا عالميًا في أمن أنظمة التحكم الصناعي هي معيار **IEC 62443**، الذي يوفّر إطارًا شاملًا يغطي: تقييم المخاطر، والتقسيم الشبكي (Zones and Conduits — نفس فكرة المستويات والحواجز التي شرحناها)، ومتطلبات أمنية حسب مستوى الحساسية، ودورة حياة كاملة من التصميم إلى التشغيل إلى التقاعد. وبالتوازي، يقدّم إطار **NIST Cybersecurity Framework** (من المعهد الوطني الأمريكي للمعايير والتقنية) نهجًا عمليًا مبنيًا على خمس وظائف أساسية: التعرّف (Identify) على الأصول والمخاطر، والحماية (Protect) بالتقسيم والتحكم بالوصول، والكشف (Detect) عن أي نشاط غير طبيعي، والاستجابة (Respond) عند وقوع حادث، والتعافي (Recover) لاستعادة التشغيل الطبيعي.

والمبدأ المشترك بين الإطارين الذي يستحق أن يترسخ عند أي مهندس تحكم: الأمان بالتصميم (Security by Design) أفضل بكثير من محاولة إضافته لاحقًا على نظام قائم أصلًا — وتمامًا مثل فلسفة «طبقات الحماية المتعددة» التي شرحناها في الفصل السابع (7.1)، يحتاج الأمن السيبراني بدوره طبقات متعددة (تقسيم شبكي + تحكم بالوصول + مراقبة + خطة استجابة)، لا الاعتماد على خط دفاع واحد فقط.

9.9 داخل منطق التوربين: مستويات السرعة، الإذن الرئيسي، ومنحنى تحكم الحرارة

هذا القسم ينزل درجة أعمق داخل منطق التحكم الفعلي — إلى ثلاثة مفاهيم يتعامل معها مهندس التحكم يوميًا على أي منصة، وقلّما تُشرح مجتمعة: كيف «يرى» المنطق السرعة، وكيف تتجمع كل الحمايات في إشارة واحدة، وكيف تُحمى حرارة لا يستطيع أحد قياسها.

أولًا: مستويات السرعة (Speed Level Signals) — المنطق لا يقرأ RPM

مفاجأة لطيفة لمن يفتح منطق أي توربين لأول مرة: أغلب قرارات التسلسل لا تُبنى على قيمة السرعة الرقمية مباشرة، بل على **إشارات بولیانية مشتقة منها** — «مستويات سرعة» تنقلب حالتها عند عتبات محددة. والنمط العام (النسب توضيحية وتختلف بين التصاميم):

المستوى	العتبة التقريبية	ماذا يعني للمنطق
السرعة الصفرية (Zero Speed)	~0%	العمود ساكن فعليًا — شرط لتعشيق التدوير البطيء وأعمال معينة
السرعة الدنيا (Minimum Speed)	بضعة بالمئة	العمود "متوقف" لأغراض البدء — **سماحة التدوير تتطلب هبوط هذا المستوى**، فلا يُعشَّق المبدِئ على عمود ما زال يدور
سرعة التسارع (Accelerating Speed)	~50% تقريبًا	تجاوزنا مرحلة الإشعال والتسخين — تتغير أوضاع صمامات النزف وIGV
سرعة التشغيل (Operating Speed)	~95%+	قرب السرعة الكاملة — تبديل المضخات المساعدة من المدفوعة كهربائيًا إلى المدفوعة من العمود، وتفعيل جاهزية التزامن (18.1)

والقيمة التشخيصية لهذا الفهم مباشرة: حالات «الوحدة لا تدوّر» (تدريب 9 في الفصل 21) كثيرًا ما يكون سببها **إشارة مستوى سرعة لم تهبط** — عمود ما زال يُدار بالتدوير البطيء، أو قناة سرعة معطلة تُظهر سرعة وهمية صغيرة — فيرفض المنطق التعشيق **بشكل صحيح تمامًا**. ولمّا كانت هذه المستويات مشتقة من قنوات القياس نفسها التي شرحناها في 7.2، فكل ما قلناه هناك عن ضعف إشارة MPU عند السرعات المنخفضة ينطبق هنا مباشرة.

ثانيًا: الإذن الرئيسي (Master Protective Signal) — كل الحمايات بإشارة واحدة

كل مسارات القطع التي شرحناها في الفصل السابع تلتقي منطقيًا عند **إشارة واحدة مجمّعة**: إشارة الحماية الرئيسية — سليمة تعني «لا يوجد قاطع نشط والوحدة مأذون لها»، وساقطة تعني قطع الوقود فورًا. (في منصات GE تحمل تاريخيًا الاسم الشهير L4 — والمفهوم نفسه موجود في كل منصة بأسماء مختلفة.)

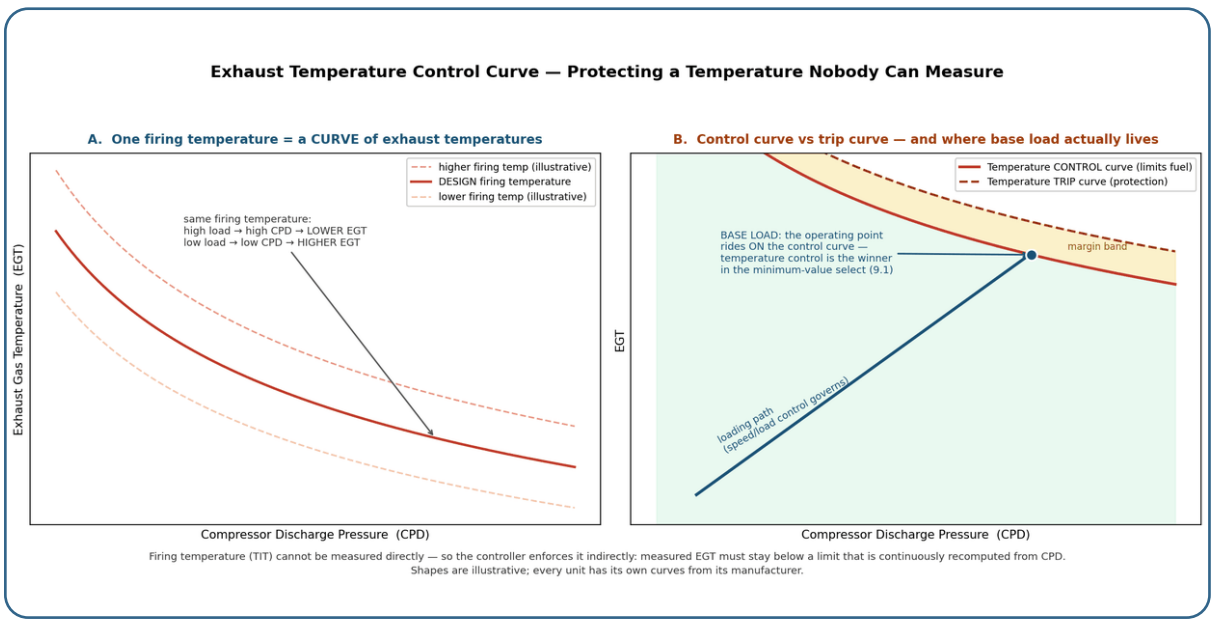
ثلاث نتائج عملية لهذا التصميم:

- البدء يتطلب "تصفيرها" أولًا **(Master Reset)**: ولا تقبل التصفير ما دام أي سبب قطع قائمًا — ولهذا فإن فشل التصفير **معلومة تشخيصية** لا إزعاج: هناك قاطع ما زال محقَّقًا، والمطلوب إيجاده لا تكرار الضغط على الزر (راجع «إعادة التشغيل بعد القطع» في 9.3).
- هي التطبيق البرمجي لمبدأ **De-Energize-to-Trip**: الإشارة **مغذّاة** في الحالة السليمة وساقطة عند القطع، فأي عطل يفقدها يقود إلى الحالة الآمنة (7.8).
- **عند التحقيق في أي قطع، هي نقطة الالتقاء:** سجل تسلسل الأحداث سيُظهر سقوطها — والسؤال دائمًا: **أي رافد أسقطها أولًا؟** (First-Out، 7.7).

ويرتبط بها شرط بدء آخر يستغربه البعض عند رؤيته في قائمة السماحات: اتفاق المعالجات **(Controller Agreement)** — ففي الأنظمة الثلاثية TMR (9.1) يُشترط قبل البدء أن تكون المعالجات الثلاث سليمة ومتفقة؛ فبدء التشغيل بمعالج معطّل يعني بدءًا بردّية منقوصة عمدًا، وهذا قرار لا يُتخذ بصمت.

ثالثًا: منحنى تحكم الحرارة (Temperature Control Curve) — حماية حرارة لا تُقاس

في 9.2 قلنا إن حرارة العادم تُستخدم بديلًا عمليًا عن حرارة الاحتراق. والخطوة الأعمق: الحد المفروض على حرارة العادم **ليس رقمًا واحدًا، بل منحنى**.



الشكل 9.9 — يسار: حرارة الاحتراق الواحدة تقابل **منحنى** كاملًا من حرارات العادم حسب ضغط تفريغ الضاغط. يمين: منحنى التحكم (يحدّ الوقود) ومنحنى القطع (حماية) فوقه بهامش، ومسار التحميل حتى ملامسة المنحنى عند الحمل الأساسي. الأشكال توضيحية — لكل وحدة منحنياتها من مصنّعها.

المنطق الفيزيائي: عند حرارة احتراق ثابتة، كلما زاد ضغط تفريغ الضاغط (CPD) زادت نسبة التمدد عبر التوربين، فخرجت الغازات **أبرد**. أي أن نفس حرارة الاحتراق التصميمية تقابل حرارة عادم **منخفضة** عند الحمل العالي و**مرتفعة** عند الحمل المنخفض. فلو فرضنا حدًا ثابتًا واحدًا لحرارة العادم لكنّا إما نحرق المعدة عند الأحمال المنخفضة أو نهدر قدرتها عند العالية.

التنفيذ: يقيس المتحكم CPD باستمرار، ويحسب منه لحظيًا **الحد المسموح لحرارة العادم** من منحنى معايَر يمثّل حرارة الاحتراق التصميمية، ويُدخل هذا الحد كأحد المتنافسين في منطق أقل قيمة تفوز (9.1). والنتيجة التي تفسّر سلوكًا يراه كل مشغّل: عند الحمل الأساسي **(Base Load)**، نقطة التشغيل تركب على منحنى التحكم حرفيًا — فحلقة الحرارة هي الفائزة بالوقود، ولهذا لا يزيد الحمل مهما رفع المشغّل الطلب. و«الوحدة لا تعطي حملها الكامل» صيفًا (10.17، والمثال 5 في 2.6) هي غالبًا وحدة تركب منحناها بشكل صحيح تمامًا.

تفاصيل عملية ثلاث تكمل الصورة:

- **منحنى القطع فوق منحنى التحكم بهامش** (7.3): التحكم يحدّ الوقود قبل الوصول للخطر، والقطع طبقة مستقلة فوقه — نفس فلسفة الطبقات دائمًا.
- مسار احتياطي عند فقدان إشارة **CPD:** فقدان قياس الضغط لا يجوز أن يُسقط حماية الحرارة، فتتحول المنظومة عادة إلى منحنى احتياطي (على أساس آخر أو حد متحفظ ثابت) مع إنذار — مثال حي على تصميم «الفشل نحو الأمان» في الحسابات لا في الدوائر فقط.
- التحكم بالتسارع **(Acceleration Control)** شقيقها أثناء البدء: أثناء الصعود للسرعة، متنافس آخر في منطق MVS يحدّ الوقود بحيث لا يتجاوز **معدل** تغيّر السرعة جدولًا محددًا — حمايةً من الحرق الزائد أثناء التسارع ومن مناطق الانحباس (5.2)، وهو سبب «بطء» البدء المتعمد الذي شرحنا حكمته في 9.3.

رابعًا: منطق التحويل التلقائي للوقود وصحّة أنظمة الحماية

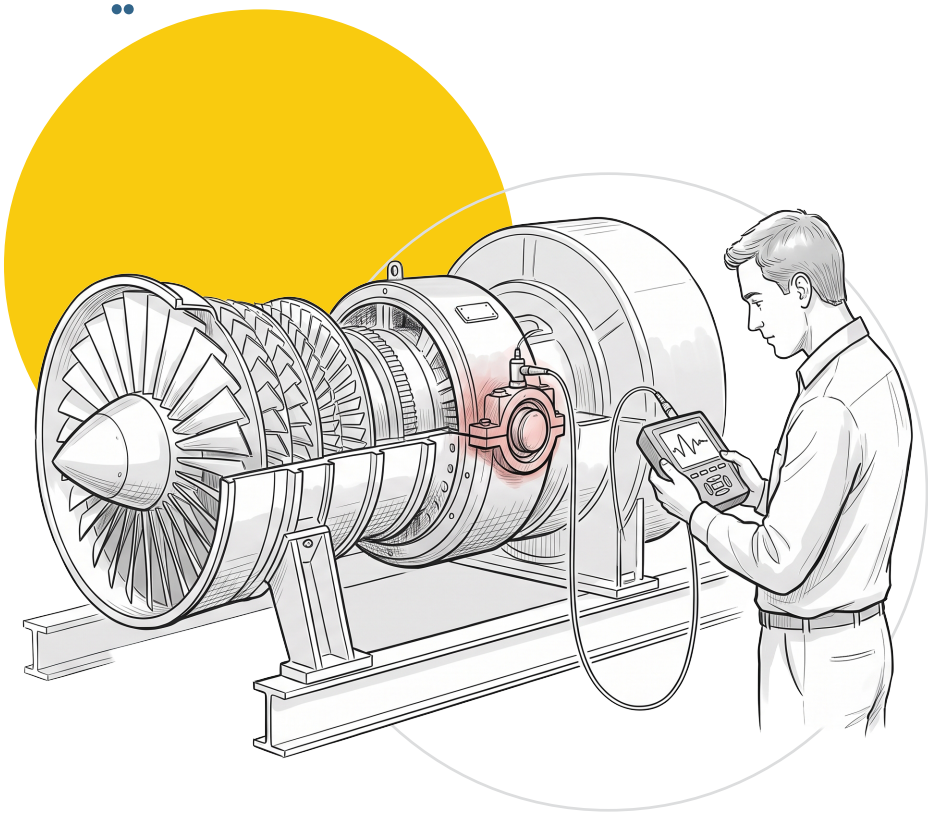
خيطان أخيران من النسيج نفسه يستحقان الذكر هنا:

- التحويل التلقائي **(Auto Fuel Transfer):** في 6.2 شرحنا التحويل بين الوقودين كإجراء. والمنطق يذهب أبعد: ففي وحدات كثيرة يُطلق التحويل **تلقائيًا** عند تدهور إمداد الوقود النشط — وأشهر مثال: هبوط متواصل في ضغط إمداد الغاز يُطلق تحويلًا تلقائيًا للوقود السائل **قبل** أن يصل الضغط إلى حد فقدان اللهب. أي أن التحويل هنا **فعل حمائي استباقي** لا خيار مشغّل — ونجاحه مرهون بجاهزية المسار الاحتياطي التي أكدنا عليها هناك («الوقود الاحتياطي الذي لا يُختبر ليس احتياطيًا»).
- **صحّة منظومة الحماية كشرط تشغيل:** ماذا لو تعطلت أو عُطّلت كل حسّاسات مجموعة حماية كاملة (كل قنوات اهتزاز محمل مثلًا)؟ التصاميم المحترمة لا تعتبر ذلك «فقدان قياس» يُسجَّل وينتهي — بل تبدأ **إيقافًا منظّمًا**، لأن الاستمرار بلا تلك الطبقة يعني تشغيلًا بلا حماية، وهذا بالضبط جوهر قاعدة الفصل السابع: الحماية غير القادرة على العمل حماية غير موجودة، والمنطق الجيد يعرف ذلك عن نفسه.

الخلاصة: هذه المفاهيم الأربعة — مستويات السرعة، والإذن الرئيسي، ومنحنيات التحكم، والمنطق الحمائي الاستباقي — هي «القواعد النحوية» لأي منطق توربين ستفتحه في حياتك، على أي منصة وبأي أسماء محلية. فمن يفهمها يقرأ منطقًا لم يره من قبل بسرعة مدهشة؛ ومن لا يفهمها يظل يقرأ أسطرًا متفرقة بلا قصة.

الفصل العاشر:

استكشاف الأعطال والتحقيق في مشاكل التوربين الغازي



الفصول السابقة شرحت كيف يعمل التوربين الغازي (2-6)، وكيف يحمي نفسه (7)، وكيف يُصان ويُراقَب أداؤه (8)، وكيف يُتحكم فيه (9). هذا الفصل يجمع كل هذه المعرفة في منهجية عملية واحدة: ماذا تفعل حين يظهر عندك عرض غير طبيعي ولا تعرف سببه بعد؟

10.1 منهجية التحقيق المنظّم

أي تحقيق ناجح في مشكلة توربين غازي يمر بالتسلسل المنطقي نفسه، بغض النظر عن نوع المشكلة:

1. فهم العَرَض **(Symptom):** ما الذي حدث بالضبط، وفي أي لحظة، وتحت أي ظروف تشغيل (حمل، حرارة جو، وقت من دورة التشغيل — بدء تشغيل، تشغيل مستقر، أو انتقالية)؟ العرض الغامض («الوحدة ليست مرتاحة») يجب أن يتحول إلى وصف دقيق قابل للقياس قبل أي خطوة أخرى.
2. **جمع وتحليل البيانات:** مراجعة كل القراءات ذات العلاقة من نظام التحكم والمراقبة — السرعة، حرارة العادم وتوزيعها، ضغط ونسبة الوقود، اهتزاز المحامل (7.4)، ضغط تفريغ الضاغط، حرارة وضغط الزيت (6.1)، إشارات الحماية والإنذارات والقواطع (7.7). المهم هنا ليس «القيمة اللحظية» فقط، بل الاتجاه (Trend) قبل حدوث المشكلة — هل كان هناك انحراف تدريجي، أم كانت القفزة مفاجئة؟ (هذا بالضبط سبب أهمية مراقبة الأداء المستمرة التي شرحناها في 8.5).
3. **وضع الفرضيات:** بناءً على البيانات، تُوضع قائمة بالأسباب المحتملة، مرتبة من الأبسط والأكثر شيوعًا إلى الأعقد والأندر — لا العكس.
4. **اختبار الفرضيات:** كل فرضية تُختبر بطريقة منهجية (فحص بصري، قياس مباشر، مقارنة قراءات متكررة، اختبار عزل مكوّن) قبل الانتقال للفرضية التالية.
5. تحليل السبب الجذري **(Root Cause Analysis — RCA):** عندما يتحدد السبب المباشر، يجب أن نسأل «ولماذا حدث هذا السبب أصلًا؟» — أحيانًا السبب المباشر (مثلًا صمام تعطّل) هو نفسه نتيجة لسبب أعمق (برنامج صيانة وقائية غير كافٍ، أو تصميم غير مناسب للبيئة التشغيلية).
6. **الإجراء التصحيحي:** يعالج السبب الجذري فعلًا، لا العَرَض فقط — وإلا فالمشكلة ستعود.

القاعدة الذهبية التي لا تتغير: لا تستبدل أي مكوّن لمجرد أن إشارة أو إنذارًا يشير إليه. يجب أولًا أن تثبت فعليًا أن هذا المكوّن هو سبب المشكلة — عبر قياس مباشر أو اختبار عزل — قبل أن تقرر الاستبدال. استبدال مكوّن سليم لا يحل المشكلة (وأحيانًا يخلق مشكلة جديدة)، ويكلّف وقتًا وقطع غيار بلا داعٍ.

من واقع عملي، أكثر خطأ يقع فيه الفنيون الجدد في التشخيص هو القفز مباشرة من «العرض» إلى «الحل» دون المرور بمرحلتي جمع البيانات والفرضيات — يرون عرضًا مشابهًا لحالة قديمة، فيطبقون الحل نفسه دون التأكد من أن السبب هو نفسه هذه المرة.

فيما يلي أشهر 17 حالة تشغيلية تستدعي تحقيقًا منظّمًا، كل واحدة ضمن الإطار نفسه: العرض الأولي، البيانات الواجب مراجعتها، الفرضيات الشائعة (من الأبسط إلى الأعقد)، والاختبارات التشخيصية النموذجية.

10.2 ارتفاع حرارة العادم (High Exhaust Gas Temperature)

العرض الأولي: قراءة حرارة العادم (أو المتوسط المرجّح) أعلى من المتوقع لنفس ظروف الحمل والحرارة المحيطة.

البيانات: منحنى حرارة العادم مقابل FSR (9.2)، قراءات كل الثرموكابل الفردية (9.6)، زاوية IGV الفعلية (9.5)، ضغط تفريغ الضاغط.

الفرضيات (من الأبسط): معايرة حسّاس حرارة منحرفة ← منحنى تحكم الحرارة (9.2) بحاجة إلى تحديث بعد تغيّر ظروف مرجعية ← زاوية IGV غير صحيحة (تفتح أقل من المطلوب فيرتفع تركيز الحرارة) ← تلوث/تدهور أداء الضاغط (8.5) يقلل كفاءة الضغط فيرتفع الحمل الحراري لنفس القدرة ← تدهور فعلي في مكونات مسار الغاز الساخن.

الاختبارات: مقارنة قراءة كل ثرموكابل بالباقي (كشف انحراف حسّاس واحد)، مراجعة اتجاه الحرارة عبر تاريخ تشغيلي طويل (كشف تدهور تدريجي = تلوث ضاغط)، فحص زاوية IGV الفعلية مقابل المطلوبة.

10.3 ارتفاع فارق حرارة العادم (High Exhaust Temperature Spread)

العرض الأولي: الفارق بين أعلى وأدنى قراءة ثرموكابل حول محيط العادم يتجاوز الحد الطبيعي — عرض مختلف جوهريًا عن «ارتفاع الحرارة المتوسطة» (10.2)، لأنه يشير إلى توزيع غير متساوٍ للحرارة حول محيط العادم لا إلى ارتفاعها ككل.

البيانات: خريطة قراءات كل ثرموكابل فردي حول المحيط (لا المتوسط فقط)، ضغط الوقود لكل حاقن (لو متاح)، تاريخ آخر عملية معايرة/تنظيف لحاقنات الوقود.

الفرضيات: حاقن وقود مسدود جزئيًا أو تغذية وقود غير متساوية بين الحاقنات (5.3) ← عطل في إحدى الشمعات/ كاشفات اللهب يخلق احتراقًا غير متزامن (7.5) ← عطل جزئي في مكوّن من مسار الغاز الساخن (ريشة تالفة تغيّر توزيع الجريان) ← ثرموكابل واحد منحرف (يُستبعد أولًا لأنه أبسط تفسير).

الاختبارات: فحص نمط توزيع القراءات (هل الانحراف موضعي في منطقة واحدة أم موزّع؟ — موضعي يرجّح حاقنًا أو ريشة، موزّع يرجّح مشكلة أعمق)، فحص Borescope لمنطقة الانحراف، مراجعة ضغوط توزيع الوقود بين الحاقنات.

10.4 ارتفاع الاهتزاز (High Vibration)

هذا العرض مرتبط مباشرة بـ 7.4 (مراقبة الاهتزاز)، فراجع أساسيات الفهم هناك. من زاوية التحقيق تحديدًا:

البيانات: طيف التردد (Spectrum) لا القيمة الإجمالية فقط — تردد يساوي سرعة الدوران (1x) يرجّح عدم توازن، ومضاعفات السرعة (2x, 3x) ترجّح مشاكل محاذاة أو ميكانيكية أخرى. واتجاه الاهتزاز عبر الزمن (مفاجئ أم تدريجي؟).

الفرضيات: عدم توازن (تلوث غير متساوٍ على ريش الضاغط، أو فقدان جزء صغير من ريشة) ← سوء محاذاة بين التوربين والحمل ← تدهور محمل ← رنين هيكلي عند سرعة تشغيل معينة.

الاختبارات: تحليل طيفي، مقارنة اتجاه الاهتزاز قبل وبعد آخر غسيل مائي (8.5 — فإن تحسّن بعد الغسيل فالسبب تلوث لا عطل ميكانيكي)، فحص Borescope.

10.5 انخفاض ضغط تفريغ الضاغط (Low Compressor Discharge Pressure)

العرض الأولي: ضغط خروج الضاغط أقل من المتوقع لنفس السرعة وزاوية IGV.

البيانات: اتجاه الضغط عبر الزمن مقارنة بخط أساس نظيف (8.5)، حرارة هواء المدخل (تؤثر على الكثافة والضغط المُنتَج)، حالة فلاتر الهواء.

الفرضيات: تلوث تدريجي في ريش الضاغط (الأشيع بكثير) ← انسداد جزئي في فلاتر الهواء ← تسريب داخلي في أحد الأختام بين المراحل ← عطل في حسّاس الضغط نفسه (يُستبعد أولًا).

الاختبارات: مقارنة بخط أساس الوحدة وهي نظيفة، فحص فرق الضغط عبر فلاتر الهواء، جدولة غسيل مائي تجريبي ومراقبة الاستجابة.

10.6 انحباس/ترنح الضاغط (Compressor Surge / Stall)

راجع 5.2 لفهم الظاهرة نفسها وخريطة الضاغط، ومن زاوية التحقيق:

البيانات: توقيت الحدث بالضبط (أثناء Trip؟ رفض حمل مفاجئ؟ بدء تشغيل؟)، سجل حركة IGV/VSV وصمامات النزف (9.5) في اللحظة نفسها، عدد دورات الانحباس المسجّلة.

الفرضيات: تأخر استجابة صمامات النزف/التفريغ عن الأمر الصادر (سواء بسبب مشكلة ميكانيكية في الصمام، أو ضعف في هواء التحكم، أو تأخر في منطق الكشف والأمر) ← منطق تحكم IGV غير متزامن بشكل صحيح مع التغيّر السريع في السرعة أثناء الانتقالية ← تلوث ضاغط شديد يقلّل هامش الانحباس الطبيعي أصلًا (فيجعل الوحدة أقرب إلى خط الانحباس حتى في التشغيل العادي).

ملاحظة ميدانية: من واقع خبرتي، واجهت حالة انحباس فعلية سببها الأساسي تأخر صمامات النزف (Bleed Valves) عن الفتح في التوقيت المطلوب أثناء انتقالية سريعة — فما إن تأخرت استجابة الصمامات عن التغيّر السريع في حالة التشغيل، حتى فقد الضاغط هامش الاستقرار ودخل في دورة انحباس. هذا مثال مباشر على أهمية مزامنة زمن استجابة عناصر التحكم بالهواء (9.5) مع سرعة التغيّر الفعلية أثناء الانتقاليات الحرجة — فالتصميم الصحيح للمنطق ليس كافيًا وحده، بل يجب أن يجاري زمنُ التنفيذ الفعلي للمشغّلات (Actuators) هذا المنطق.

الاختبارات: مراجعة زمن استجابة صمامات النزف المسجّل مقابل الزمن المصمَّم له، فحص ضغط هواء التحكم المغذي للمشغّلات وقت الحدث، فحص Borescope لريش الضاغط بعد أي حدث انحباس (حتى لو لم يظهر اهتزاز غير طبيعي فورًا) لتقييم أي ضرر تراكمي.

10.7 فشل بدء التشغيل (Failure to Start)

راجع 9.3 لتسلسل بدء التشغيل والسماحات اللازمة. من زاوية التحقيق:

البيانات: أي سماحة (Permissive) بالضبط لم تتحقق (تُسجَّل عادة بوضوح في سجل الأحداث)، وحالة الأنظمة المساعدة وقت المحاولة.

الفرضيات: سماحة واحدة غير محققة (الأشيع — سبب واضح ومباشر في السجل) ← عطل في جهاز بدء التشغيل نفسه (6.4) ← عطل حسّاس يمنع تحقق سماحة رغم أن الحالة الفعلية سليمة.

الاختبارات: مراجعة سجل السماحات مباشرة (أسرع تشخيص في هذه الحالة تحديدًا)، فحص فيزيائي للحالة الفعلية مقابل ما يقوله الحسّاس.

10.8 فشل التسارع (Failure to Accelerate)

العرض الأولي: الوحدة تبدأ بالدوران لكنها لا تصل إلى السرعة المطلوبة في الزمن المتوقع، أو تتوقف عن التسارع في منتصف الطريق.

البيانات: منحنى السرعة مقابل الزمن الفعلي مقارنة بمنحنى نموذجي، قدرة جهاز بدء التشغيل الفعلية، FSR الفعلي أثناء المحاولة.

الفرضيات: قدرة جهاز بدء التشغيل غير كافية (خصوصًا إذا كانت الحرارة المحيطة عالية جدًا وتؤثر على أداء المحرك الهوائي أو الديزل) ← حمل ميكانيكي زائد غير طبيعي (احتكاك محمل، مثلًا) ← منطق تحكم يحدّ من FSR بشكل غير مقصود (كتحديد حرارة تحفّظي زائد).

الاختبارات: مقارنة منحنى التسارع الحالي بمنحنيات تاريخية للوحدة نفسها، فحص FSR الفعلي مقابل السرعة (هل هو محدود صناعيًا أم أنه فعلًا يحاول ويفشل؟).

10.9 فشل الإشعال (Flame Failure)

راجع 7.5 لتفاصيل مراقبة اللهب. من زاوية التحقيق:

البيانات: هل أعطى كاشف اللهب قراءة «لا لهب» رغم احتراق فعلي (كشف خاطئ)، أم لم يحدث إشعال فعلًا؟ وتوقيت الحدث بالنسبة إلى تسلسل بدء التشغيل (6.4).

الفرضيات: نظافة نافذة الكوارتز في كاشف اللهب (الأشيع بكثير من عطل حقيقي في الكاشف) ← ضعف في مصدر الإشعال (الشمعة) ← نسبة وقود/هواء خارج المدى القابل للاشتعال وقت المحاولة ← عطل حقيقي في صمام الوقود يمنع وصول وقود كافٍ.

الاختبارات: فحص نظافة نافذة الكاشف مباشرة (أول وأبسط فحص)، مقارنة قراءة أكثر من كاشف لهب واحد إن توفر، فحص ضغط الوقود وقت محاولة الإشعال.

10.10 ارتفاع حرارة المحمل (High Bearing Temperature)

البيانات: حرارة المحمل مقارنة بحرارة زيت التزييت الداخل (6.1)، اتجاه الحرارة عبر الزمن، الحمل الفعلي على المحمل وقت الحدث.

الفرضيات: انخفاض تدفق أو ضغط زيت التزييت (10.11 أدناه) ← تدهور المحمل نفسه (تآكل، بداية فشل) ← اهتزاز غير طبيعي يزيد الحمل الديناميكي على المحمل (مرتبط بـ 10.4) ← عطل في حسّاس الحرارة نفسه.

الاختبارات: فحص فرق الحرارة (Delta-T) بين دخول وخروج الزيت من المحمل نفسه (فرق كبير يرجّح مشكلة تزييت لا مشكلة حسّاس)، ربط الحدث باتجاه الاهتزاز في الفترة نفسها.

10.11 انخفاض ضغط زيت التزييت (Low Lubricating Oil Pressure)

راجع 6.1 لتفاصيل نظام التزييت. من زاوية التحقيق:

الفرضيات (من الأبسط): انسداد جزئي في فلتر الزيت (فرق الضغط عبر الفلتر يرتفع تدريجيًا — يُكتشف بمراقبة روتينية بسيطة) ← تسريب في خط التزييت ← عطل في مضخة الزيت الرئيسية (وهنا يدخل دور المضخات الاحتياطية/الطوارئ التي شرحناها ضمن فلسفة الحماية في الفصل السابع) ← لزوجة زيت غير مناسبة لحرارة التشغيل الفعلية.

الاختبارات: فحص فرق الضغط عبر الفلتر مباشرة، فحص مستوى الخزان، فحص تسلسل انتقال المضخات (هل انتقلت المضخة الاحتياطية تلقائيًا كما يجب؟).

10.12 مشاكل صمام/محرك الوقود (Fuel Valve / Actuator Problems)

راجع 6.2 (نظام الوقود) و9.2 و9.7 (حلقة تحكم الموضع وLVDT). من زاوية التحقيق:

الفرضيات: انحراف معايرة LVDT (9.7) — يعطي سلوكًا «غريبًا قليلًا» قبل أن يتفاقم، كما شرحنا هناك) ← ضعف في هواء أو زيت التحكم الهيدروليكي المغذي للمحرك ← تلوث/احتكاك ميكانيكي في جسم الصمام نفسه ← عطل في دارة التغذية الراجعة الإلكترونية.

الاختبارات: مقارنة موضع الصمام المطلوب (من FSR) بالموضع الفعلي المُقاس (فرق مستمر يرجّح مشكلة معايرة أو ميكانيكية، وفرق متذبذب يرجّح مشكلة في جودة الإشارة أو الهيدروليك)، إعادة معايرة نقطة الصفر والمدى (9.7) كخطوة تشخيصية أولى قبل أي تفكيك ميكانيكي.

10.13 فقدان اتصال نظام التحكم (Loss of Control-System Communication)

راجع 9.1 (TMR) و9.8 (الأمن السيبراني وتقسيم الشبكة) لفهم البنية. من زاوية التحقيق:

الفرضيات: عطل في كابل شبكة أو منفذ فردي (الأشيع والأبسط) ← عطل في محوّل شبكة (Switch) ← ازدحام شبكة بسبب حركة بيانات غير طبيعية ← عطل في معالج واحد من الثلاثة (يُفترض أن يتحمّله TMR دون تأثير على التحكم نفسه، لكنه يستحق تشخيص سببه).

الاختبارات: فحص حالة منافذ الشبكة الفيزيائية ومؤشرات الLED عليها، مراجعة سجلات الشبكة إن توفرت، والتأكد من أن فقدان الاتصال لم يؤثر فعليًا على منطق التحكم نفسه (بفضل TMR) قبل التركيز على الجانب الشبكي وحده.

10.14 قاطع السرعة الزائدة (Overspeed Trip)

راجع 7.2 بالتفصيل. من زاوية التحقيق: أهم سؤال أول هو: هل كان القاطع استجابة صحيحة لسرعة فعلية زائدة حقيقية (رفض حمل مفاجئ مثلًا، وقد أدى القاطع وظيفته كما يجب)، أم كان قاطعًا كاذبًا بسبب عطل حسّاس سرعة أو منطق تصويت (9.6)؟ الفرق بين الاثنين جوهري: الأول يستدعي مراجعة سبب رفض الحمل نفسه، والثاني يستدعي تشخيص حسّاسات السرعة.

الاختبارات: مقارنة السرعة المسجّلة من الحسّاسات الثلاثة وقت الحدث (تطابق = سرعة حقيقية، انحراف واحد = عطل حسّاس)، مراجعة حالة الحمل والشبكة وقت الحدث.

10.15 سرعة مولد الغاز غير طبيعية (Abnormal Gas Generator Speed)

هذا العرض يخص تحديدًا التوربينات ثنائية العمود (مثل فئة LM2500 التي ناقشناها في 3.5) — فمولد الغاز (الضاغط + توربينه المحرِّك) دورانه مستقل عن توربين القدرة.

الفرضيات: حمل غير متوقع على توربين القدرة ينعكس على سرعة مولد الغاز عبر الترابط الغازي (لا الميكانيكي) بينهما ← مشكلة في التحكم بالوقود تمنع مولد الغاز من الوصول إلى السرعة المطلوبة ← تدهور أداء الضاغط (10.5) يجعل مولد الغاز يحتاج إلى سرعة أعلى لإنتاج ضغط التفريغ نفسه.

الاختبارات: مراجعة العلاقة بين سرعة مولد الغاز وحمل توربين القدرة (هل العلاقة بينهما طبيعية أم منحرفة عن المنحنى المعروف للوحدة؟).

10.16 مشاكل سرعة توربين القدرة (Power Turbine Speed Problems)

أيضًا خاص بالتوربينات ثنائية العمود. **الفرضيات:** عطل في حلقة تحكم السرعة/الحمل نفسها (Droop/Isochronous، 9.2) ← عدم توازن بين مولد الغاز وتوربين القدرة (فإن لم يعطِ الأول طاقة غازية كافية، لم يستطع الثاني الحفاظ على سرعته تحت الحمل) ← عطل في حسّاس سرعة توربين القدرة تحديدًا (منفصل عن حسّاسات مولد الغاز).

الاختبارات: فحص استقرار الحمل مقابل السرعة (هل التذبذب مرتبط بتغيّر الحمل أم مستقل عنه؟)، مراجعة حسّاسات السرعة المخصصة لتوربين القدرة تحديدًا.

10.17 ارتفاع استهلاك الوقود / انخفاض الأداء (High Fuel Consumption / Low Performance)

هذا عرض «بطيء» يظهر في مراقبة الأداء طويلة المدى (8.5) أكثر مما يظهر كإنذار فوري. **الفرضيات:** تلوث تدريجي في الضاغط (الأشيع، 10.5) ← تدهور كفاءة مسار الغاز الساخن (تآكل أو تدهور الطلاءات الحرارية في الريش) ← منحنى تحكم حرارة غير محدّث لظروف مرجعية تغيّرت ← تسريب داخلي غير مكتشف (في ختم أو صمام).

الاختبارات: مقارنة منحنى الأداء الحالي (حرارة عادم مقابل قدرة) بخط الأساس النظيف المصحّح للظروف المرجعية نفسها (8.5)، تقييم الاستجابة بعد غسيل مائي تجريبي كخطوة تشخيصية رخيصة قبل أي فحص أعمق.

10.18 قواطع متكررة وقواطع كاذبة (Frequent and Nuisance Trips)

هذا عرض مختلف بطبيعته عن باقي الحالات — المشكلة هنا ليست في مكوّن واحد، بل في نمط متكرر يستدعي تحليلًا إحصائيًا لا فحصًا لحدث واحد.

البيانات: سجل كامل لكل القواطع خلال فترة زمنية معقولة (شهر أو أكثر)، لا حدث واحد فقط — نبحث عن نمط: هل تتكرر للسبب نفسه؟ في التوقيت نفسه من دورة التشغيل؟ في ظروف الطقس نفسها؟

الفرضيات: حسّاس واحد في حالة حدّية (يعطي قراءة تتأرجح حول عتبة الإنذار بالضبط، فيتكرر القاطع رغم أن الحالة الفعلية مستقرة نسبيًا) ← عتبة إنذار مضبوطة بتحفّظ زائد لا يناسب ظروف التشغيل الفعلية ← مشكلة أعمق حقيقية تتكرر لأن أحدًا لم يعالج سببها الجذري بعد (فرق بين «قاطع كاذب» و«قاطع حقيقي متكرر لسبب لم يُحل»).

الاختبارات: تحليل تكرار كل نوع قاطع عبر الزمن (Pareto — أي سبب يشكّل أكبر نسبة من التكرار؟)، فحص هامش القراءة الفعلية حول عتبة الإنذار وقت كل قاطع (قريبة جدًا من العتبة = يرجّح حالة حدّية، بعيدة عنها = يرجّح سببًا حقيقيًا مختلفًا كل مرة).

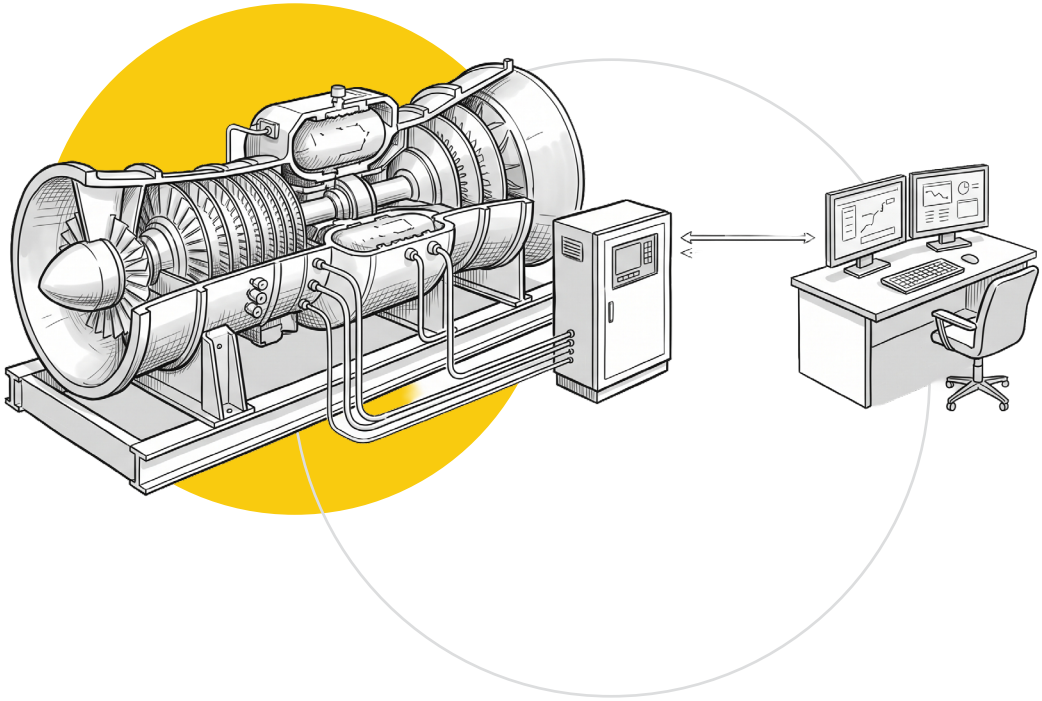
من واقع عملي، هذه الحالة تحديدًا (القواطع المتكررة) من أخطر الأنماط على المدى الطويل — لأنها تخلق ميلًا نفسيًا عند فريق التشغيل إلى «تجاوز» إنذار معيّن أو التقليل من أهميته بعد أن يتكرر دون ضرر واضح، وهذا بالضبط النمط الذي يسبق كثيرًا من الحوادث الصناعية الكبرى: إنذار حقيقي يُهمَل لأنه «دائمًا كاذب» حسب تجربة الفريق السابقة.

خلاصة الفصل

هذا الفصل ليس قائمة أعطال تُحفظ، بل **طريقة تفكير**. والخيط الذي يجمع مؤشراته الثمانية عشر واحد: العَرَض الذي تراه على الشاشة نادرًا ما يكون المشكلة نفسها — هو أثرها. ولذلك كان الترتيب في كل مؤشر ثابتًا: **تأكّد من صحة القياس، ثم اقرأ النمط لا القيمة، ثم اسأل ما الذي تغيّر، ثم افحص ما تستطيع فحصه بأقل تدخّل.** ومن التزم هذا الترتيب سيشخّص أعطالًا لم ترد في هذا الفصل أصلًا؛ ومن حفظ الأعراض دون الترتيب سيقف عاجزًا أمام أول عطل خارج القائمة. وسنعود إلى الفكرة نفسها مطبَّقة على حالات ميدانية كاملة في الفصل الثالث عشر، وعلى تدريبات تحكم وقياس في الفصل الحادي والعشرين.

الفصل الحادي عشر:

التكامل والاتصال بين نظام التحكم بالتوربين والـ DCS



كل الفصول السابقة تناولت التوربين الغازي ونظام التحكم الخاص به (Turbine Control System — TCS) كأنه «يعيش وحده». لكن في الواقع، أي توربين غازي في محطة صناعية أو محطة توليد كهرباء يكون جزءًا من منظومة أكبر بكثير — محطة كاملة فيها معدات أخرى (مراجل، ضواغط، مضخات، أنظمة معالجة) يُشرَف عليها كلها من نظام تحكم موزّع مركزي (Distributed Control System — DCS). هذا الفصل يشرح كيف يتكامل TCS مع DCS، وهذه نقطة يتجاهلها كثير من الكتب النظرية رغم أنها من أكثر النقاط التي تسبب مشاكل تشغيلية حقيقية في الميدان.

11.1 الفرق بين Turbine Control System وDCS

رغم أن الاثنين «أنظمة تحكم»، فوظيفتهما مختلفة جوهريًا:

- نظام التحكم الخاص بالتوربين **(TCS):** مخصص بالكامل للتوربين نفسه — وهو الذي شرحنا كل تفاصيله في الفصل التاسع: منطق MVS (9.1)، التحكم بالوقود والسرعة والحرارة (9.2)، تسلسل البدء والإيقاف (9.3)، والتحكم بالهواء (9.5). يعمل بسرعة استجابة عالية جدًا (أجزاء من الثانية) لأن قرارات مثل حماية السرعة الزائدة (7.2) لا تحتمل أي تأخير.
- نظام التحكم الموزّع **(DCS):** يشرف على العملية الصناعية كاملة — التوربين جزء واحد منها فقط، إلى جانب معدات أخرى كثيرة. دوره أقرب إلى «الإدارة والإشراف» منه إلى «التنفيذ اللحظي الدقيق»: يعطي أوامر تشغيل عامة، ويستقبل حالة كل معدة، ويعرض الصورة الكاملة للمشغّل في غرفة التحكم المركزية.

لماذا لا نعتمد على **DCS** وحده لتنفيذ وظائف حماية التوربين الحرجة؟ السبب الجوهري هو الزمن والاستقلالية. الـDCS مصمَّم للإشراف على منظومة واسعة، فزمن استجابته وبنيته البرمجية ليسا مصمَّمَين لقرارات حماية في أجزاء من الثانية مثل قاطع السرعة الزائدة (7.2). كذلك، لو اعتمدنا على DCS وحده، فأي عطل أو ازدحام في شبكة المحطة كاملة (التي تخدم عشرات المعدات) قد يؤثر على حماية توربين واحد — بينما TCS المستقل (بمنطقه المكرر TMR، 9.1) يحافظ على وظيفة الحماية حتى لو انقطع الاتصال بـDCS كليًا.

11.2 طرق الاتصال بين النظامين

يجري الاتصال بين TCS وDCS عبر طبقتين مختلفتين تمامًا في طبيعتهما:

- الإشارات السلكية المباشرة **(Hardwired Signals):** أهم الإشارات الحرجة (خصوصًا إشارات القواطع والحماية) تُوصَّل بأسلاك كهربائية مباشرة، لا عبر شبكة رقمية — بحيث لا تعتمد على أي طبقة اتصال وسيطة قد تتعطل أو تتأخر. هذا نفس مبدأ «منطق الحماية السلكي المستقل» الذي أشرنا إليه في 9.1.

- الاتصال الرقمي **(Digital Communication):** لباقي الإشارات (الأكثر عددًا لكن الأقل حرجية زمنيًا)، تُستخدم بروتوكولات اتصال رقمية عبر شبكة، أشهرها:
  - **Modbus (TCP أو RTU):** من أقدم وأبسط البروتوكولات الصناعية، وما زال منتشرًا جدًا لبساطته وتوافقه الواسع بين المصنّعين المختلفين.
  - **OPC / OPC UA:** معيار أحدث وأكثر مرونة، مصمَّم خصيصًا للتبادل الآمن والموحّد للبيانات الصناعية بين أنظمة من مصنّعين مختلفين — OPC UA تحديدًا أضاف طبقة أمان وتشفير أقوى من الجيل الأقدم (OPC Classic).
  - اتصال قائم على **Ethernet:** البنية التحتية الفيزيائية التي تحمل غالبًا البروتوكولات أعلاه.
  - لكل شركة مصنّعة (Siemens، GE، وغيرها) عادةً بروتوكولاتها أو إضافاتها الخاصة فوق هذه المعايير العامة، فمن المهم عمليًا مراجعة توثيق المصنّع تحديدًا عند أي مشروع تكامل جديد.

11.3 الإشارات المتبادلة بين TCS وDCS

من واقع عملي، قائمة الإشارات النموذجية التي تُتبادَل بين النظامين تشمل:

- أوامر البدء والإيقاف (Start/Stop Commands).
- مرجع السرعة (Speed Reference) ومطلب الحمل (Load Demand) — نفس المفاهيم التي شرحناها في 9.2 و9.4، لكن المصدر هنا هو DCS بدل الشاشة المحلية.
- ضغط/تدفق غاز الوقود.
- حالة التوربين العامة (Turbine Status — جاهز، يعمل، متوقف، في حالة عطل).
- الإنذارات (Alarms) والقواطع (Trips) — إشارات مهمة جدًا للDCS حتى لو لم يتحكم فيها مباشرة، لأن المشغّل يحتاج إلى رؤيتها ضمن الصورة الكاملة للمحطة.
- السماحات (Permissives) والتشابكات (Interlocks) — أحيانًا يُمرَّر شرط تشغيل في معدة أخرى بالمحطة (مثلًا: نظام آخر يجب أن يكون جاهزًا) كسماحة من DCS إلى TCS.
- إشارات الجاهزية والتشغيل (Running/Ready Signals).
- حالة الإيقاف الطارئ (Emergency Shutdown Status).

11.4 فلسفة التحكم

النقطة الأهم التي يجب أن ترسخ في هذا الفصل: **DCS** يعطي أوامر تشغيل عامة أو نقاط ضبط **(Setpoints)**، بينما **TCS** هو الذي يتحقق فعليًا من السماحات **(9.3)** وينفّذ التسلسل **(6.4)** ويتحكم بالوقود والسرعة والحمل **(9.2)** بنفسه. الDCS لا «يتحكم» بالتوربين مباشرة بمعنى تنفيذ القرارات اللحظية — هو يطلب، وTCS يقرر كيف ينفّذ هذا الطلب بأمان.

أما وظائف الحماية الحرجة (السرعة الزائدة 7.2، الحرارة الزائدة 7.3، الاهتزاز 7.4) فتبقى بالكامل ضمن منظومة الحماية المخصصة للتوربين — لا تمر عبر DCS إطلاقًا، ولا تعتمد على أي قرار أو إشارة قادمة منه. هذا التوزيع للمسؤوليات هو جوهر فلسفة «طبقات الحماية المتعددة» التي شرحناها في 7.1، مطبّقًا هنا على مستوى بنية الأنظمة نفسها لا على مستوى الكاشفات والمنطق الداخلي فقط.

11.5 الاعتمادية والردّية بالاتصال (Redundancy and Communication Reliability)

من واقع الميدان، هذه من أكثر النقاط التي تستحق اهتمامًا عمليًا فعليًا:

- فقدان الاتصال **(Communication Loss):** لو انقطع الاتصال بين TCS وDCS، فالسؤال المهم عمليًا هو: ماذا يحدث للتوربين نفسه؟ التصميم السليم يجعل TCS يستمر في العمل بآخر نقطة ضبط معروفة (أو بمنطق تحفّظي آمن مُعرَّف مسبقًا)، ولا يوقف التوربين تلقائيًا لمجرد فقدان اتصال DCS — لأن إيقافًا مفاجئًا لتوربين يعمل بحمل كامل بسبب مشكلة شبكة بحتة قد يكون أخطر من استمرار التشغيل بآخر نقطة معروفة لفترة قصيرة.
- ازدحام الشبكة **(Network Congestion):** في محطة فيها عشرات المعدات تتشارك البنية التحتية نفسها للشبكة، قد تُبطئ حركة بيانات زائدة من معدة أخرى (تحديثات متكررة، تسجيل بيانات مكثّف) استجابة الإشارات الخاصة بالتوربين، حتى لو لم يكن هناك عطل فعلي في أي جزء.
- بطاقات الاتصال **(Communication Cards)** والمحوّلات **(Network Switches):** نقاط عطل فيزيائية حقيقية — بطاقة اتصال واحدة تتعطل قد تقطع مسارًا كاملًا، وهذا بالضبط سبب أن المسارات المزدوجة (Redundant Paths) عبر بطاقات ومحوّلات مستقلة أصبحت ممارسة قياسية في المشاريع الحديثة، لا رفاهية إضافية.

- **تأثير فقدان الاتصال على التشغيل الفعلي:** حتى لو استمر التوربين في العمل بأمان بعد فقدان الاتصال، يفقد المشغّل في غرفة التحكم المركزية الرؤية المباشرة لحالته — وهذا بحد ذاته خطر تشغيلي يستحق إجراءات تعويضية (تنبيه فوري لفريق التشغيل المحلي، مثلًا).

11.6 استكشاف أعطال الاتصال (Troubleshooting Communication Problems)

بنفس منهجية الفصل العاشر (10.1)، هذه أشهر أعراض مشاكل الاتصال بين TCS وDCS وأسبابها الشائعة:

- **DCS لا يرى التوربين إطلاقًا:** غالبًا مشكلة في مستوى الشبكة الفيزيائية (كابل، منفذ، محوّل) أو إعدادات عنوان الشبكة (IP) غير متطابقة — تُفحص أولًا قبل الشك في أي مشكلة برمجية أعمق.
- **فقدان بعض الإشارات فقط (لا كل الاتصال):** يرجّح مشكلة في تهيئة نقطة بيانات محددة (Point Configuration) بدل مشكلة اتصال عامة — الإشارات الأخرى تصل بشكل طبيعي.
- معايرة خاطئة **(Wrong Scaling):** القيمة تصل لكن بمقياس غير صحيح (مثلًا القيمة الفعلية 50% لكن DCS يعرضها 100%) — سبب شائع جدًا عمليًا ويسهل إغفاله لأن الإشارة «تتحرك» بشكل طبيعي، لكن بمقياس خاطئ.
- إشارة مجمّدة **(Signal Frozen):** القيمة المعروضة ثابتة تمامًا رغم أن الحالة الفعلية تتغيّر — يرجّح فقدان تحديث في جانب الاتصال (لا في الحسّاس نفسه)، لأن الحسّاس في جانب TCS مستمر في التحديث الفعلي.
- انتهاء مهلة الاتصال **(Communication Timeout):** الجهاز المستقبِل لا يتلقى ردًا خلال الوقت المتوقع — يرجّح ازدحام شبكة أو حمل معالجة زائدًا في أحد الطرفين.
- فقدان مسار الاتصال الاحتياطي **(Loss of Redundant Communication Path):** المسار الرئيسي يعمل والمشغّل لا يلاحظ شيئًا، لكن المسار الاحتياطي معطّل بصمت — خطر لأنه غير مرئي حتى يفشل المسار الرئيسي أيضًا، فمن المهم عمليًا مراقبة حالة المسارين بشكل مستقل لا الاكتفاء بمراقبة النتيجة النهائية فقط.
- عدم تطابق بين الأمر والتغذية الراجعة **(Command/Feedback Mismatch):** DCS يرسل أمرًا لكن التغذية الراجعة تُظهر أن التوربين لم يستجب فعليًا — يستدعي تفريقًا دقيقًا: هل وصل الأمر أصلًا إلى TCS، أم وصل ولم يُنفَّذ لسبب تشغيلي (سماحة غير محققة مثلًا، 10.7)؟

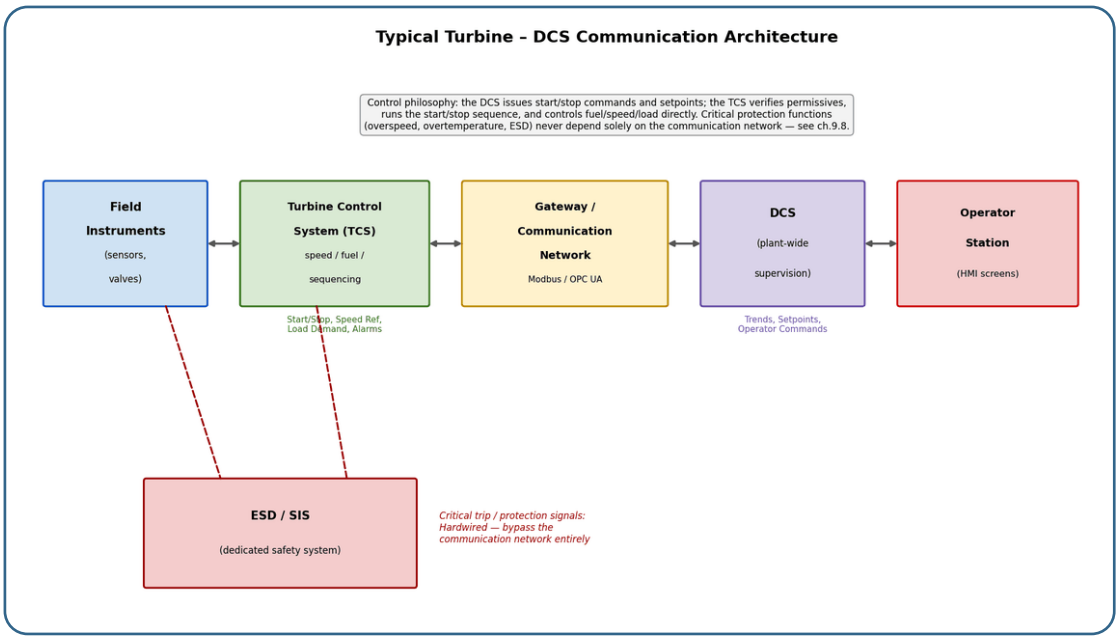
- فقدان اتصال متقطع **(Intermittent Communication Loss):** الأصعب تشخيصًا بين كل الأعراض، لأنه لا يتكرر بثبات — يستدعي تسجيلًا مستمرًا لحالة الاتصال عبر فترة طويلة (شبيه بمنهجية القواطع المتكررة، 10.18) بدل انتظار حدوثه أثناء الفحص المباشر.
- قاطع كاذب بسبب فشل اتصال **(Nuisance Trip Due to Communication Failure):** نقطة تستحق تنبيهًا خاصًا — يجب أن يكون التصميم واضحًا تمامًا في أن فقدان اتصال DCS بحد ذاته **لا** يُفترض أن يسبب قاطعًا فعليًا للتوربين (حسب فلسفة 11.4 و11.5)؛ فإذا وقع قاطع مرتبط بفقدان الاتصال، فهذا مؤشر على خلل في فلسفة التصميم نفسها يستحق مراجعة جذرية، لا مجرد إصلاح نقطي.

11.7 الأمن السيبراني (Cybersecurity)

كل أساسيات الأمن السيبراني التي شرحناها في 9.8 (نموذج بردو، التقسيم الشبكي، IEC 62443) تنطبق هنا بشكل مباشر جدًا، لأن الاتصال بين TCS وDCS هو بالضبط أحد أهم «حدود التقسيم» التي تستحق حماية خاصة:

- الفصل بين شبكتي **DCS** وTCS**:** حتى لو كانا يتبادلان بيانات باستمرار، فهذا لا يعني أنهما يجب أن يكونا على الشبكة المسطّحة نفسها بلا حواجز — التقسيم (Segmentation) يبقى ضروريًا حتى بين نظامين «متعاونين» بشكل وثيق.
- الجدران النارية **(Firewalls)** والتحكم بالوصول **(Access Control):** نقطة الاتصال بين TCS وDCS (البوابة/Gateway المذكورة في مخطط 11.8 أدناه) هي بالضبط المكان الذي يجب أن تُطبَّق فيه قواعد صارمة — أي حركة بيانات تعبر منها يجب أن تكون محددة ومرخّصة، لا مفتوحة بالكامل.
- بنية الشبكة **(Network Architecture):** التصميم السليم يجعل أي اختراق محتمل في جانب DCS (وهو عادة أكثر تعرضًا لأنه متصل بمنظومة أوسع) عاجزًا عن الوصول مباشرة إلى منطق التحكم الحرج في التوربين — تمامًا كمبدأ صمام البيانات أحادي الاتجاه الذي ذكرناه في 9.8.

11.8 البنية النموذجية للاتصال



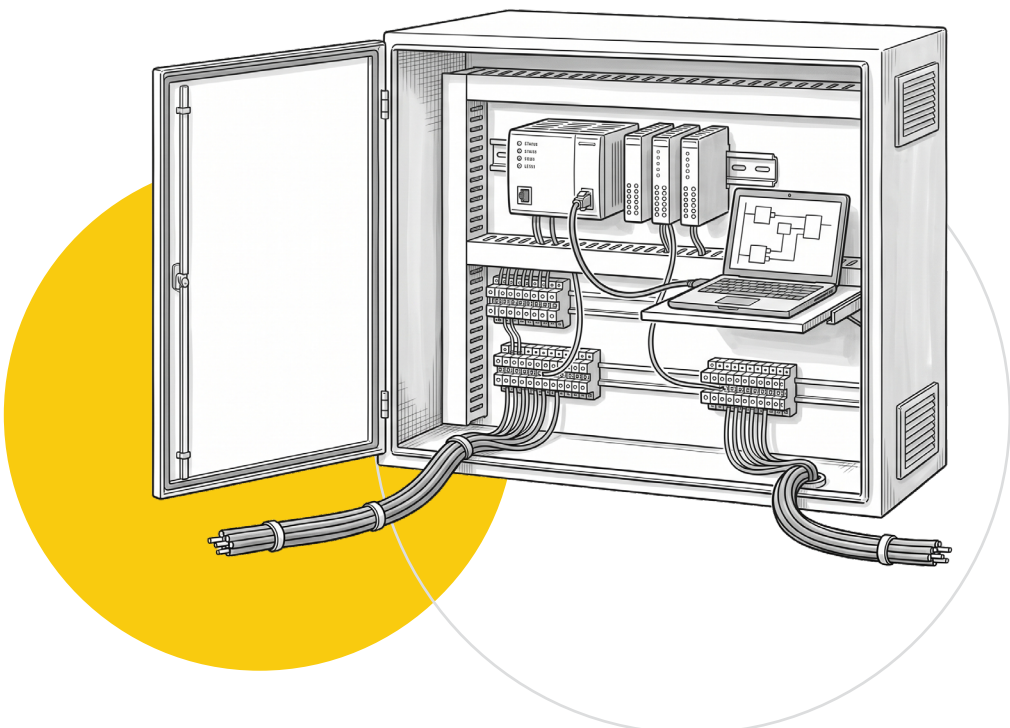
الشكل 11.1 — البنية النموذجية للاتصال بين التوربين والDCS: من الأجهزة الحقلية (Field Instruments)، إلى نظام تحكم التوربين (TCS)، إلى بوابة/شبكة الاتصال، إلى الDCS، وصولًا لشاشة المشغّل — مع إشارات الحماية الحرجة موصّلة سلكيًا مباشرة لمنظومة الإيقاف الطارئ (ESD/SIS) بمعزل عن شبكة الاتصال

هذا المخطط يلخّص جوهر الفصل بصريًا: المسار الأفقي (Field → TCS → Gateway → DCS → Operator Station) هو مسار المعلومات والإشراف العام، بينما المسار الرأسي المتقطع (من الأجهزة الحقلية وTCS مباشرة إلى منظومة ESD/SIS) هو مسار الحماية الحرجة الذي **لا يمر عبر شبكة الاتصال إطلاقًا**. الفصل الفيزيائي بين هذين المسارين هو بالضبط ما يضمن أن أي مشكلة في جانب DCS أو الشبكة (عطل، ازدحام، أو حتى اختراق سيبراني) لا تستطيع تعطيل وظائف الحماية الأساسية للتوربين.

من واقع عملي، أي مهندس أو فني يعمل في محطة فيها هذا التكامل يستفيد كثيرًا من فهم هذا المخطط تحديدًا قبل أي شيء آخر — لأنه يفسّر مباشرة لماذا يحدث أحيانًا أن «التوربين يعمل تمامًا لكن DCS لا يعرض شيئًا صحيحًا» (مشكلة في المسار الأفقي فقط)، بينما يحدث أحيانًا أخرى أن «قاطعًا فعليًا وقع رغم أن كل شيء في DCS كان طبيعيًا» (لأن الحماية أصلًا لم تكن تعتمد على DCS من الأساس).

الفصل الثاني عشر:

بنية نظام التحكم بالتوربين وبرمجته



فهم لغات البرمجة وحدها (التي نشرحها في هذا الفصل) لا يكفي لفهم الـController فعليًا. يجب أن يعرف القارئ أولًا: كيف تدخل الإشارة أصلًا إلى الـController، وكيف تُعالَج في الداخل، وكيف تخرج منه لتحرّك مشغّلًا فعليًا أو تصل إلى الـDCS. لهذا نبدأ الفصل ببنية العتاد (Hardware Architecture) قبل أن ننتقل إلى البرمجة نفسها.

12.1 بطاقات الإدخال والإخراج ومسار الإشارة داخل نظام التحكم

يتكون الـTurbine Controller عادةً من مجموعة بطاقات إدخال وإخراج (I/O Cards)، ويُختار نوع كل بطاقة حسب طبيعة الإشارة الفيزيائية التي تتعامل معها — فليست كل الإشارات تصلح لنفس نوع البطاقة:

نوع البطاقة	الوظيفة	أمثلة
AI (Analog Input)	استقبال إشارات تناظرية	ضغط، تدفق، مستوى
AO (Analog Output)	إرسال إشارات تحكم تناظرية	موضع صمام الوقود، صمام تحكم
DI (Digital Input)	استقبال إشارات ثنائية	كاشف نهاية شوط (Limit Switch)، حالة، إنذار
DO (Digital Output)	إرسال أوامر ثنائية	ملف (Solenoid)، ريلاي، أمر تشغيل/إيقاف
RTD Input	قياس حرارة (مقاومة حرارية)	حرارة المحمل، حرارة الزيت
Thermocouple Input	قياس حرارة (ثرموكابل)	حرارة العادم
Speed Input	قياس السرعة	سرعة التوربين/مولد الغاز (راجع 7.2 لمبدأ MPU)
Frequency Input	قياس التردد	إشارات مرتبطة بالمولد/السرعة
Vibration Input	مراقبة الاهتزاز	اهتزاز المحمل/العمود (راجع 7.4)
Special/High-Speed I/O	إشارات سريعة/حماية	السرعة الزائدة، حماية حرجة

بعض أنظمة التوربينات تضيف بطاقات متخصصة إضافية لوظائف تحتاج معدل أخذ عينات (Sampling Rate) أعلى بكثير من الـI/O التقليدي — مثل حماية السرعة الزائدة (7.2) أو التزامن مع الشبكة الكهربائية (Synchronization) — لأن هذه الوظائف لا تحتمل تأخير المعالجة العادي.

النقطة الجوهرية: نوع الإشارة الفيزيائية هو الذي يحدد نوع بطاقة الI/O وطريقة معالجتها داخل الController — إشارة ثرموكابل (ميلي فولت ضعيف جدًا، يحتاج تعويض نقطة مرجعية Cold Junction Compensation) تختلف جذريًا في معالجتها عن إشارة تناظرية عادية 4-20mA، رغم أن الاثنين «قراءة حرارة أو ضغط» من منظور المشغّل على شاشة HMI.

أمثلة على أنواع الإشارات بالتوربين الغازي

نوع الإشارة	مثال في التوربين الغازي	مثال عملي
AI	ضغط الوقود	Fuel Gas Pressure Transmitter
AI	ضغط زيت التزييت	Lube Oil Pressure Transmitter
AI	ضغط تفريغ الضاغط	Compressor Discharge Pressure
AI	تدفق الوقود	Fuel Gas Flow
AI	تغذية راجعة للموضع	Fuel Valve Position (LVDT، راجع 9.7)
AO	التحكم بصمام الوقود	Fuel Gas Control Valve
AO	نقطة ضبط لمشغّل	IGV Position Command
AO	إشارة تحكم بالسرعة/الحمل	Speed or Load Reference
DI	حالة صمام	Valve Open/Closed
DI	مفتاح ضغط	Low Lube Oil Pressure Switch
DI	كاشف نهاية شوط	Starter/Valve Position
DI	إيقاف طارئ	E-Stop Status
DO	تشغيل ملف كهرومغناطيسي	Fuel Shutoff Solenoid
DO	أمر بدء	Starter Motor/Starter Valve
DO	فتح/إغلاق صمام	On/Off Valve
RTD	حرارة المحمل	Journal/Thrust Bearing
RTD	حرارة الزيت	Oil Supply/Return
RTD	حرارة محمل المولد	Generator Bearing Metal Temperature
Thermocouple	حرارة العادم	EGT / T5

نوع الإشارة	مثال في التوربين الغازي	مثال عملي
Thermocouple	مراقبة حرارة الاحتراق	Exhaust Thermocouple Array
Thermocouple	حرارة قسم التوربين	Turbine Section Temperature
Speed	سرعة مولد الغاز	N1 / N2
Speed	سرعة توربين القدرة	Np
Speed	سرعة المولد	RPM
Frequency	تردد المولد	5060/ Hz
Vibration	اهتزاز العمود	X/Y Proximity Probes
Vibration	اهتزاز المحمل	Accelerometer/Velocity Sensor
Special/High-Speed	السرعة الزائدة	Dedicated Speed Pickup
Special/High-Speed	كشف اللهب	Flame Detector
Special/High-Speed	ديناميكية الاحتراق	Dynamic Pressure Sensor

RTD أم Thermocouple؟

سؤال شائع جدًا عمليًا: لماذا نستخدم RTD في موضع وThermocouple في موضع آخر، رغم أن الاثنين «يقيسان حرارة»؟ القاعدة السطحية «RTD = حرارة منخفضة، Thermocouple = حرارة عالية» ليست خاطئة تمامًا لكنها ناقصة جدًا — الاختيار الحقيقي يعتمد على الدقة المطلوبة، سرعة الاستجابة، بيئة التشغيل، مدى الحرارة، تكلفة النظام، وطريقة التركيب مجتمعين، لا على مدى الحرارة وحده.

RTD (Resistance Temperature Detector): يعتمد على تغيّر مقاومة المعدن مع درجة الحرارة (أشهر الأنواع الصناعية Pt100). ميزاته: دقة عالية، ثبات (Stability) ممتاز، وقابلية تكرار (Repeatability) جيدة على المدى الطويل — لكن مداه الحراري محدود نسبيًا واستجابته أبطأ من الثرموكابل. لهذا يُفضَّل في التوربين الغازي لقياسات لا تحتاج حرارة شديدة الارتفاع لكن تحتاج دقة وثبات طويل الأمد: حرارة معدن المحمل، حرارة الزيت (دخول/خروج)، حرارة علبة التروس، حرارة محمل المولد.

Thermocouple: يولّد جهدًا كهربائيًا صغيرًا جدًا (ميلي فولت) ناتج عن فرق الحرارة بين نقطتين، وميزته الأساسية قدرته على العمل عند حرارة أعلى بكثير من أغلب تطبيقات RTD، مع استجابة أسرع وتحمّل أفضل للظروف القاسية — على حساب دقة وثبات أقل نسبيًا من RTD. لهذا يُستخدم لحرارة العادم (EGT)، حرارة قسم التوربين، ومراقبة الاحتراق عمومًا — كل الحالات التي تكون الحرارة فيها مرتفعة جدًا وسرعة الاستجابة أهم من الدقة المطلقة.

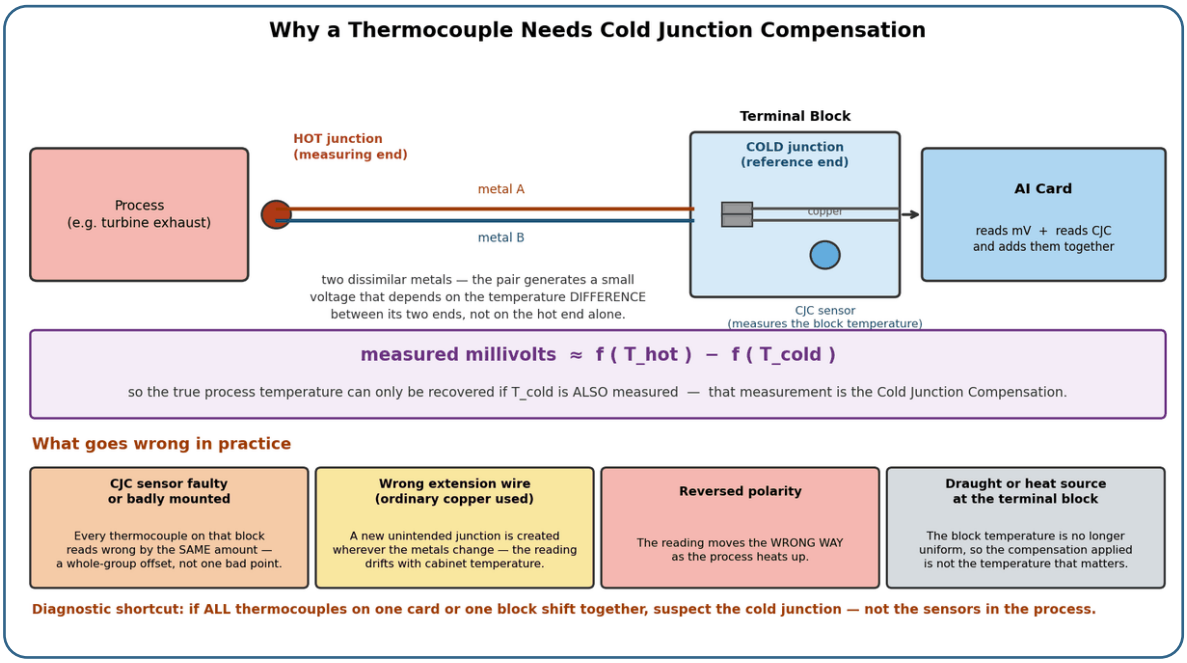
من واقع عملي، في التوربين الغازي تحديدًا غالبًا تجد عدة ثرموكابل موزّعة حول محيط العادم بدل الاعتماد على حسّاس واحد — ليس فقط لحساب متوسط الحرارة، بل لحساب ومراقبة فارق حرارة العادم **(Exhaust Temperature Spread)** الذي شرحناه في 10.3، وهي قيمة حرجة لاكتشاف مشاكل حاقنات الوقود، عدم توازن الاحتراق، أنماط لهب غير طبيعية، أو حتى عطل في ثرموكابل واحد فقط من المصفوفة.

القاعدة العملية الموصى بها (أدق من «حرارة منخفضة/عالية» فقط):

- حرارة ميكانيكية/محامل/زيت (Bearing / Oil / Mechanical Temperature) ← غالبًا **RTD** (الأولوية للدقة والثبات).
- حرارة العادم/الاحتراق (Exhaust / Combustion / High Temperature) ← غالبًا **Thermocouple** (الأولوية لمدى الحرارة الواسع، سرعة الاستجابة، وتحمّل الظروف القاسية).

تعويض الوصلة الباردة للثرموكابل (Cold Junction Compensation)

هذه النقطة تستحق شرحًا مستقلًا لأنها **أكثر مفاهيم القياس الحراري إثارةً للالتباس في الميدان**، وسبب مباشر لأخطاء قراءة تبدو غامضة تمامًا — خصوصًا في التوربين الغازي حيث تعتمد حماية الحرارة كاملة (7.3) وحساب فارق حرارة العادم (10.3) على مصفوفة من الثرموكابل.



الشكل 12.1 — الثرموكابل لا يقيس حرارة مطلقة بل **فارق حرارة** بين طرفيه، ولذلك يجب قياس حرارة الطرف المرجعي أيضًا — وأشهر أربعة أعطال ترتبط بهذه النقطة.

المبدأ الفيزيائي بجملة واحدة

الثرموكابل ليس «حسّاس حرارة» بالمعنى المباشر. هو زوج من معدنين مختلفين، والجهد الصغير الذي يولّده يعتمد على **فارق الحرارة بين طرفيه**، لا على حرارة الطرف الساخن وحده:

الجهد المقاس ≈ دالة (حرارة الوصلة الساخنة) − دالة (حرارة الوصلة الباردة)

- الوصلة الساخنة **(Hot Junction)**: الطرف الموجود في العملية — في مسار العادم مثلًا.
- الوصلة الباردة **(Cold Junction / Reference Junction)**: الطرف الآخر، حيث ينتهي سلك الثرموكابل ويبدأ سلك نحاسي عادي — أي عمليًا **عند بلوك الأطراف داخل الخزانة**.

النتيجة المنطقية: من الجهد وحده يستحيل معرفة حرارة العملية. نحتاج أن نعرف حرارة الوصلة الباردة أيضًا. ولهذا يُركَّب حسّاس صغير مستقل (عادة RTD أو ثرمستور) **على بلوك الأطراف نفسه**، ويجمع النظام قراءته مع الجهد المقاس ليستخرج الحرارة الحقيقية. هذه العملية هي تعويض الوصلة الباردة **(CJC)**.

تاريخيًا كانت الوصلة المرجعية تُغمر بحمّام ثلج عند صفر مئوية للحصول على مرجع ثابت معلوم — ومن هنا جاءت التسمية «الوصلة الباردة». أما صناعيًا اليوم فتُقاس حرارة البلوك فعليًا ويُطبَّق التصحيح رقميًا داخل البطاقة.

ولهذا يجب استخدام سلك تمديد مطابق **(Extension / Compensating Cable)** — لا سلك نحاسي عادي. القاعدة الفيزيائية: **أي نقطة يتغيّر عندها نوع المعدن تصبح وصلة جديدة تولّد جهدًا خاصًا بها**. فلو استُخدم نحاس عادي من صندوق الوصل حتى الخزانة، تكون الوصلة الباردة الفعلية قد انتقلت — بدون علم أحد — إلى صندوق الوصل الحقلي، بينما يقيس النظام حرارة البلوك داخل الخزانة. النتيجة: خطأ يتغيّر مع حرارة الجو حول صندوق الوصل، ويظهر ويختفي مع تغيّر الطقس أو ساعات النهار — وهو من أصعب الأعطال تشخيصًا إن لم يكن هذا المفهوم واضحًا.

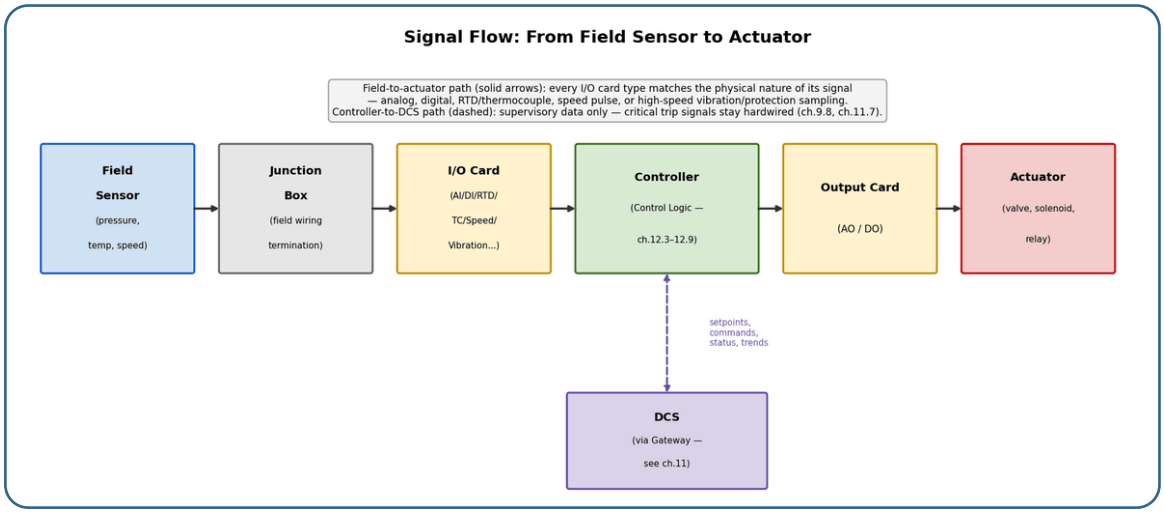
الأعراض الأربعة الشائعة وما يدل عليه كل منها

العرض	السبب الأرجح	ملاحظة تشخيصية
كل الثرموكابل على نفس البطاقة أو نفس البلوك منزاحة بنفس المقدار	عطل أو سوء تركيب لحسّاس CJC	العطل في الوصلة الباردة، لا في الحسّاسات داخل العملية
القراءة تنجرف مع حرارة الخزانة أو مع ساعات اليوم	سلك تمديد خاطئ (نحاس عادي)	ابحث عن نقطة تغيّر المعدن
القراءة تتحرك **بالاتجاه المعاكس** عند تسخين العملية	انعكاس القطبية	خطأ تركيب، يُكتشف عادةً في أول فحص حلقات (17.1)
قراءة غير مستقرة رغم استقرار العملية	تيار هواء أو مصدر حرارة قرب بلوك الأطراف	حرارة البلوك لم تعد منتظمة، فالتعويض المطبَّق ليس الحرارة الصحيحة

الاختصار التشخيصي الذي يوفّر وقتًا كبيرًا: لو انزاحت **مجموعة كاملة** من قراءات الثرموكابل معًا وبنفس المقدار، فالاحتمال الأول هو **الوصلة الباردة** (حسّاس CJC، أو بيئة البلوك)، لا الحسّاسات نفسها في العادم — فمن غير المعقول أن تنحرف عشرة ثرموكابل موزّعة حول محيط العادم بنفس المقدار وبنفس اللحظة. وهذا التمييز مهم جدًا عند التحقيق في ارتفاع أو انخفاض قراءة الحرارة الكلية (10.2) قبل الحكم بوجود مشكلة احتراق فعلية.

الاهتزاز والسرعة: أكثر من مجرد AI عادية

نقطة تستحق تأكيدًا خاصًا: إشارات الاهتزاز والسرعة لا تُعامَل كإشارة **AI** عادية بالضرورة، رغم أنها في جوهرها الفيزيائي قد تبدو «قيمة تناظرية» مثل الضغط أو الحرارة. وفي التطبيقات الحرجة للتوربين، تحتاج هذه الإشارات بطاقات مراقبة عالية السرعة مخصصة (Dedicated High-Speed Monitoring Cards) — لأن معدل أخذ العينات وطريقة معالجة الإشارة نفسها مهمان جدًا لوظيفة الحماية، لا مجرد قراءة قيمة لحظية للعرض على شاشة HMI. وحماية السرعة الزائدة (7.2) تحتاج أن تكتشف تجاوز العتبة خلال أجزاء من الثانية لتتجنب ضررًا ميكانيكيًا حقيقيًا؛ ومراقبة الاهتزاز (7.4) تحتاج تحليلًا طيفيًا (Spectrum) يتطلب معدل عينات أعلى بكثير من إشارة ضغط تتغيّر ببطء نسبي. هذا الفرق في المتطلبات التقنية هو بالضبط سبب وجود الفئة المنفصلة «Special/High-Speed I/O» في جدول البطاقات أعلاه، بدل إدراجها ضمن AI العادية.



الشكل 12.2 — مسار الإشارة من الحسّاس الحقلي وحتى المشغّل: Field Sensor → Junction Box → I/O Card → Controller (منطق التحكم) → Output Card → Actuator، مع مسار منفصل (متقطع) بين الـController والـDCS يحمل نقاط الضبط والأوامر والاتجاهات فقط — لا إشارات الحماية الحرجة، التي تبقى سلكية مباشرة كما شرحنا في 9.8 و11.7

مسار الإشارة النموذجي (من الحقل حتى الفعل):

Field Sensor → Junction Box → I/O Card → Controller → Control Logic → Output Card → Actuator

الحسّاس الحقلي يولّد إشارة خام، تصل عبر الأسلاك إلى صندوق التوصيل (Junction Box — نقطة تجميع وتوصيل وسيطة قبل أن تدخل إلى غرفة التحكم)، فتدخل بطاقة الـI/O المناسبة التي تحوّلها إلى قيمة رقمية يفهمها الـController، فتُعالَج ضمن منطق التحكم (Control Logic — كل ما شرحناه في الفصل التاسع، ويُبرمَج بأحد الأساليب التي سنشرحها في باقي هذا الفصل)، ثم يصدر القرار عبر بطاقة إخراج إلى مشغّل فعلي (صمام، ملف، ريلاي).

مسار الإشارة مع الـDCS (يبني على ما شرحناه في الفصل الحادي عشر):

Field Sensor → TCS → Control Logic → DCS (بيانات مراقبة وحالة تصعد للـDCS)

DCS Command → Communication/Hardwired Signal → TCS → Logic → Actuator (أوامر ونقاط ضبط تنزل من الـDCS، يتحقق منها TCS عبر السماحات قبل التنفيذ — بالضبط فلسفة 11.4)

بهذا يكتمل الخيط المنطقي للكتاب: مكونات التوربين (الفصل 5) ← أجهزة القياس (9.6، 9.7) ← بطاقات الإدخال/الإخراج وبنية الـController (12.1) ← برمجة منطق التحكم (12.2 وما بعده) ← فلسفة التحكم والتكامل مع DCS (الفصل 11) ← استكشاف الأعطال (الفصل 10).

تهيئة الإشارة (Signal Conditioning)

قبل أن تصل أي إشارة حقلية إلى معالج التحكم فعليًا، غالبًا تمر بخطوة «تهيئة» على بطاقة الإدخال نفسها — لا مجرد قراءة رقم خام مباشرة. من أشيع أنواع التهيئة: التضخيم **(Amplification)** لإشارات ضعيفة جدًا كالثرموكابل (بالميلي-فولت) قبل تحويلها لرقمي، الترشيح **(Filtering)** لإزالة تشويش كهربائي عالي التردد (خصوصًا في البيئات الصناعية المزدحمة كهربائيًا قرب محركات ومولدات كبيرة)، العزل الكهربائي **(Isolation)** بين دائرة الحساس ودائرة المعالج لمنع أي فرق جهد أرضي (Ground Loop) من التأثير على القراءة أو حتى إتلاف البطاقة، وتعويض الوصلة الباردة **(Cold Junction Compensation)** الخاص تحديدًا بالثرموكابلات — لأن قراءة الثرموكابل أصلًا فرق جهد بين وصلتين، فيجب أن تعرف البطاقة حرارة «الوصلة المرجعية» (عادة بلوك الأطراف الذي تنتهي عنده أسلاك الثرموكابل) بدقة كي تحسب حرارة الوصلة الفعلية بشكل صحيح. من واقع الميدان، بطاقة إدخال ثرموكابلات في حالة سيئة (تلوث بالأتربة، رطوبة) قد تفسد تعويض الوصلة الباردة فتعطي قراءة حرارة مزاحة بشكل ثابت (Offset) عن كل الثرموكابلات المتصلة بها — عرض يسهل الخلط بينه وبين مشكلة احتراق فعلية (راجع 7.3) إن لم تنتبه إلى أن الإزاحة موحّدة على كل القنوات في البطاقة نفسها تحديدًا.

12.2 لماذا هذا الموضوع يهم مهندس التوربينات؟

مهندس أو فني التحكم الذي يفهم فقط «ما الذي يفترض أن يحدث» (السماحة الفلانية، القاطع الفلاني) لكنه لا يستطيع قراءة منطق البرمجة الفعلي على شاشة ToolboxST أو ما يعادلها، يبقى معتمدًا بالكامل على غيره في أي تشخيص أعمق من مستوى الإنذار السطحي. والقدرة على قراءة (حتى لو لم تكن كتابة) منطق البرمجة الفعلي تحوّل التشخيص من «تخمين مبني على وصف المشكلة» إلى «رؤية مباشرة لسبب اتخاذ القرار على هذا النحو» — فرق جوهري في منهجية التحقيق التي شرحناها في 10.1.

12.3 (LD) Ladder Diagram

أقدم وأشهر أساليب البرمجة الصناعية، وتصميمها مقصود يحاكي الدوائر الكهربائية التقليدية (السبب التاريخي: أول مبرمجي PLC كانوا فنيي كهرباء اعتادوا قراءة مخططات الريلاي، فصُمم LD ليكون مألوفًا لهم بأقل جهد تحول). يتكون من «سلالم» (Rungs) أفقية بين خطين رأسيين (Power Rails) يمثلان مصدر الطاقة المنطقي:

- التلامسات **(Contacts):** ترمز لشروط دخل — تلامس مفتوح عادة (Normally Open) يمثّل «الشرط يجب أن يكون صحيحًا»، وتلامس مغلق عادة (Normally Closed) يمثّل «الشرط يجب أن يكون خطأً» (أي NOT منطقي).

- الملفات **(Coils):** ترمز لنتيجة الخرج — لو كل التلامسات على نفس السلّم متصلة بالتسلسل (Series) وكانت كلها «صحيحة»، يمر «التيار» المنطقي ويُفعَّل الملف.
- التسلسل يعني **AND**، التوازي يعني **OR:** تلامسات على التوالي = شرط AND (يجب أن يكون الكل صحيحًا)؛ مسارات متوازية (بديلة) = شرط OR (يكفي واحد صحيح).

يُستخدم بكثرة في منطق التتابع (Sequential Logic) والتشابكات (Interlocks) لأن قابليته للقراءة البصرية السريعة عالية جدًا لفني ميداني معتاد على قراءة مخططات كهربائية — وهذا بالضبط سبب بقائه الأكثر انتشارًا في منطق PLC رغم قِدَمه.

قفل السنّة وإعادة التصفير (Latching & Reset Logic)

من أهم أنماط المنطق المتكررة في أي نظام تحكم توربين: القرار اللحظي (مثل تجاوز حد حرارة معيّن لجزء من الثانية) يجب أن «يُحفَظ» حتى لو زال السبب الأصلي بسرعة — وهذا يُسمى القفل **(Latch)**. مثال عملي: لو وقع قاطع سرعة زائدة (7.2)، وعادت السرعة طبيعية خلال ثانية واحدة بعد قطع الوقود، لا يصح أن يُلغي منطق القطع نفسه تلقائيًا فور عودة السرعة إلى الطبيعي — بل يجب أن يبقى مقفولًا (Latched) حتى يتدخل المشغّل بأمر إعادة تصفير صريح (Manual Reset، شرحناه في 9.3 ضمن «إعادة التشغيل بعد القطع»). وفي منطق Ladder Diagram (12.3)، هذا يُبنى عادة بحلقة تغذية راجعة ذاتية (Seal-in Contact): تلامس موازٍ لتلامس أمر التفعيل الأصلي، مغذّى من خرج الملف نفسه، بحيث الملف «يمسك نفسه» مشغّلًا حتى لو زال شرط التفعيل الأصلي — ولا يُفصل إلا بتلامس إعادة تصفير منفصل يقطع الحلقة كاملة.

المؤقتات والعدّادات (Timers & Counters)

عنصر أساسي ثانٍ يتكرر في كل تسلسل تشغيل تقريبًا (راجع تسلسل البدء والإيقاف في 9.3): المؤقت **(Timer)** يؤخر تفعيل أو إلغاء تفعيل خرج معيّن لمدة زمنية محددة — مثلًا فترة التطهير (Purge) بسرعة معينة يجب أن تستمر مدة كافية قبل أن يُسمح بالانتقال إلى الإشعال، أو فترة تأخير قبل إصدار إنذار (Time Delay) لتفادي إنذارات كاذبة من تذبذب لحظي في قراءة حساس (أشرنا إلى هذا المبدأ في 7.3 عند شرح Spread وDeviation). النوعان الأساسيان: مؤقت تأخير التشغيل **(On-Delay / TON)** يبدأ العد عندما يتفعّل شرط الدخل، ولا يُفعّل الخرج إلا بعد انقضاء المدة المحددة؛ ومؤقت تأخير الإيقاف **(Off-Delay / TOF)** يُفعّل الخرج فورًا لكنه يؤخر إلغاء تفعيله بعد أن يزول شرط الدخل. العدّاد **(Counter)** يشابه المؤقت في الفكرة لكنه يعدّ أحداثًا مميزة بدل الوقت — مثلًا عدد مرات بدء التشغيل المتراكمة (مرتبط مباشرة بمفهوم ساعات التشغيل المكافئة EOH الذي شرحناه في 8.4)، أو عدد محاولات بدء فاشلة

متتالية قبل أن يُقفَل منطق البدء ويستدعي تدخلًا يدويًا (نمط شائع لمنع دورة «محاولة-فشل-محاولة» متكررة تستهلك محرك البدء أو تراكم وقود غير محترق في مسار العادم).

12.4 (FBD) Function Block Diagram

بدل التلامسات والملفات، FBD يبني المنطق من «كتل وظيفية» (Function Blocks) — كل كتلة تمثّل عملية معينة (AND، OR، مقارنة، عملية حسابية، دالة PID كاملة) بمدخل أو أكثر ومخرج واحد أو أكثر، والكتل تُربَط ببعضها بخطوط تمثّل تدفق الإشارة.

الفرق الجوهري عن LD: FBD أكثر ملاءمة للعمليات الحسابية والتحكمية المعقدة (مثل حلقات PID الكاملة التي شرحناها ضمنيًا في مفهوم تحكم السرعة، 9.2) لأن الكتلة الواحدة تستطيع تمثيل عملية كاملة معقدة (لا مجرد منطق بولياني بسيط مثل AND/OR)، بينما LD يبقى أنسب للمنطق البولياني المباشر (تشابكات، سماحات). هذا بالضبط سبب شيوعه الكبير في أنظمة DCS التي تتعامل مع حلقات تحكم تناظرية (Analog Control Loops) لا مجرد منطق تشغيل/إيقاف.

12.5 (ST) Structured Text

لغة نصية عالية المستوى، تشبه لغات البرمجة التقليدية (قريبة من Pascal ببنيتها: IF/THEN/ELSE، حلقات FOR/WHILE، متغيرات مسمّاة). بعكس LD وFBD اللذين هما «رسوميان» بطبيعتهما، يُكتب ST سطرًا بسطر مثل أي كود برمجي تقليدي.

يناسب تحديدًا الحالات التي يصعب أو يصبح غير عملي تمثيلها رسوميًا: عمليات حسابية معقدة بعدة خطوات متتالية، منطق شرطي متداخل بعمق (شروط داخل شروط)، أو تسلسلات (Sequences) طويلة بمنطق قرار معقد — مثل بعض تفاصيل حساب FSR النهائي (9.2) الذي يجمع عدة قيم مرشّحة (Min Value Select) بمعادلات وشروط متعددة.

12.6 (IL) Instruction List

أسلوب نصي منخفض المستوى، أقرب لغة تجميع (Assembly) من لغة برمجة عالية المستوى — كل سطر يمثّل أمرًا واحدًا بسيطًا جدًا (تحميل قيمة، مقارنة، قفزة شرطية). كان مستخدمًا في أنظمة PLC الأقدم لأنه يتطلب موارد معالجة قليلة جدًا، لكنه أصبح أقل استخدامًا في الأنظمة الحديثة — فالمعالجات الحالية لديها قدرة كافية تغنيها عن التضحية بسهولة القراءة والصيانة مقابل الكفاءة القصوى التي كان IL يوفرها. ويُذكر هنا أساسًا للسياق التاريخي وللتعرف عليه إن صادفته في أنظمة قديمة جدًا ما زالت في الخدمة.

12.7 (SFC) Sequential Function Chart

هذا الأسلوب يستحق اهتمامًا خاصًا في كتاب عن التوربينات، لأنه بالضبط الأنسب لتمثيل التسلسلات التي شرحناها بالتفصيل في 6.4 و9.3: **تسلسل بدء تشغيل التوربين الغازي وتسلسل الإيقاف**. SFC يمثّل المنطق كسلسلة «خطوات» (Steps) متتابعة، كل خطوة تُفعَّل الإجراءات الخاصة بها، والانتقال من خطوة إلى أخرى يحدث عبر «شروط انتقال» (Transitions) — بالضبط نفس فكرة «لا يُصدر أمر التدوير الفعلي إلا بعد تحقق كل السماحات» (9.3) و«سرعة معينة تُفعِّل حدث معيّن» (كإغلاق صمامات النزف، 9.5).

فائدة SFC الحقيقية هنا: أنه يجعل التسلسل الكامل (من أمر البدء وحتى الوصول للحمل الكامل، أو من أمر الإيقاف وحتى توقف الدوران الكامل) مرئيًا خطوة-بخطوة بدل أن يكون مدفونًا داخل شروط IF متداخلة بلغة نصية — وهذا يسهّل كثيرًا تتبع «في أي خطوة بالضبط توقف التسلسل» أثناء التحقيق في حالة فشل بدء تشغيل (10.7).

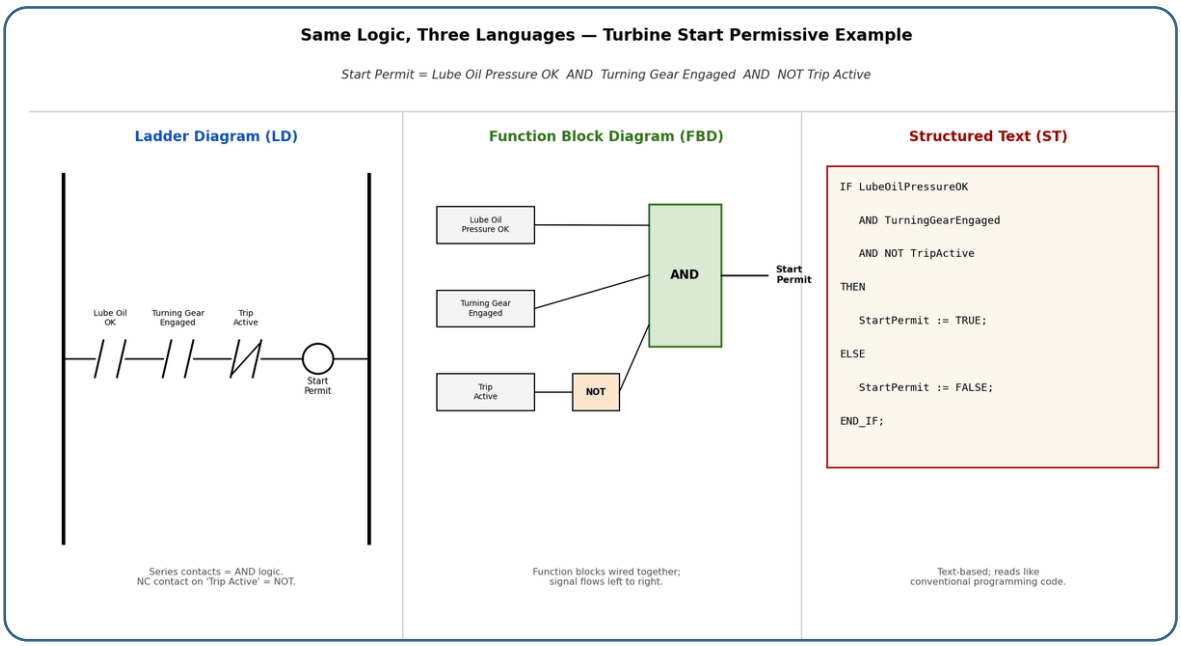
12.8 البرمجة التقليدية/الخاصة بالمصنّع (Traditional/Proprietary Coding)

بعض أنظمة التحكم الخاصة بالتوربينات (خصوصًا الأقدم أو الأكثر تخصصًا) تستخدم بيئات برمجة أو لغات خاصة بالشركة المصنّعة نفسها، قد تتضمن كودًا مخصصًا (Custom Blocks) أو سكربتات (Scripting) لا تتبع أي معيار عام من المعايير أعلاه بشكل صريح. من واقع عملي، هذا يعني أن أي مهندس ينتقل بين منصات تحكم من مصنّعين مختلفين (راجع ملحق ج للمقارنة العامة بين المنصات) يجب أن يتوقع منحنى تعلّم إضافيًا خاصًا ببيئة البرمجة نفسها، لا بمنطق التوربين فقط — حتى لو كانت المفاهيم الأساسية (سماحات، تشابكات، تسلسل) متطابقة جوهريًا بين كل المنصات.

12.9 مثال تطبيقي: نفس المنطق بثلاث طرق

أفضل طريقة نرى بها الفرق العملي بين هذه الأساليب هي مثال واحد بسيط منفّذ بثلاث طرق مختلفة. خذ منطق سماحة بدء تشغيل مبسّط (جزء صغير من المنطق الكامل الذي شرحناه في 9.3):

سماحة البدء = ضغط زيت التزييت سليم AND عتاد الدوران البطيء مُدخَل AND لا يوجد قاطع فعّال



الشكل 12.3 — نفس منطق سماحة البدء ممثَّلًا بثلاث لغات برمجة مختلفة: Ladder Diagram (تلامسات على التوالي)، Function Block Diagram (كتلة AND)، وStructured Text (شرط IF نصي) — نفس النتيجة المنطقية بثلاث طرق تمثيل مختلفة تمامًا

لاحظ أن الثلاثة تعبّر عن **نفس القرار المنطقي بالضبط** — تلامسان على التوالي في LD يكافئان كتلة AND في FBD ويكافئان عبارة AND في ST. والفرق الحقيقي ليس في النتيجة، بل في طريقة التفكير والقراءة: LD يُقرأ كـ«مسار كهربائي»، FBD يُقرأ كـ«تدفق إشارة بين وحدات معالجة»، وST يُقرأ كـ«قرار برمجي نصي تقليدي». فني ميداني معتاد على الكهرباء غالبًا يفهم LD بأسرع وقت؛ مهندس تحكم متمرّس بمعالجة الإشارات التناظرية غالبًا يفضّل FBD؛ ومبرمج له خلفية برمجة تقليدية غالبًا يفضّل ST.

12.10 من المنطق البسيط إلى التسلسل الكامل

كل الأمثلة أعلاه كانت لقرار منطقي واحد بسيط. لكن منطق التحكم الفعلي في التوربين الغازي هو **تسلسل مترابط** من هذه القرارات الصغيرة، يمكن تلخيصه في التسلسل التالي (وكلها مواضيع شرحناها بالتفصيل في فصول سابقة):

منطق التحكم بالتوربين ← تسلسل البدء (6.4، 9.3) ← التحكم بالوقود (6.2، 9.2) ← التحكم بالسرعة (6.5، 9.2) ← التحكم بالحمل (9.2، 9.4) ← السماحات (9.3) ← التشابكات ← الإنذارات (7.7) ← القواطع (7.7) ← منطق الإيقاف (7.8، 9.3)

كل حلقة في هذه السلسلة تُبنى فعليًا من نفس الكتل الأساسية التي شرحناها في هذا الفصل — مئات أو آلاف من عبارات AND/OR/NOT البسيطة (LD أو FBD)، مربوطة بحلقات تحكم تناظرية (FBD غالبًا)، ومنظّمة ضمن تسلسل خطوات كبير (SFC) يمثّل رحلة التوربين الكاملة من الإيقاف التام إلى الحمل الكامل والعودة. وكل هذا المنطق، بدوره، يعتمد بالكامل على بنية الـI/O التي شرحناها في 12.1 — فبدون بطاقة إدخال تقرأ الإشارة الفيزيائية بشكل صحيح أصلًا، لا يوجد منطق برمجي مهما كان متقنًا يستطيع أن يعوّض عن قراءة خاطئة من الأساس.

12.11 مكتبة الكتل الوظيفية القياسية: أمثلة عملية

في الأقسام السابقة شرحنا **لغات** البرمجة (ST، FBD، LD...). هذا القسم ينزل درجة أعمق: ما هي **الكتل الجاهزة** التي يبني منها المهندس منطقه فعليًا داخل بيئة البرمجة؟

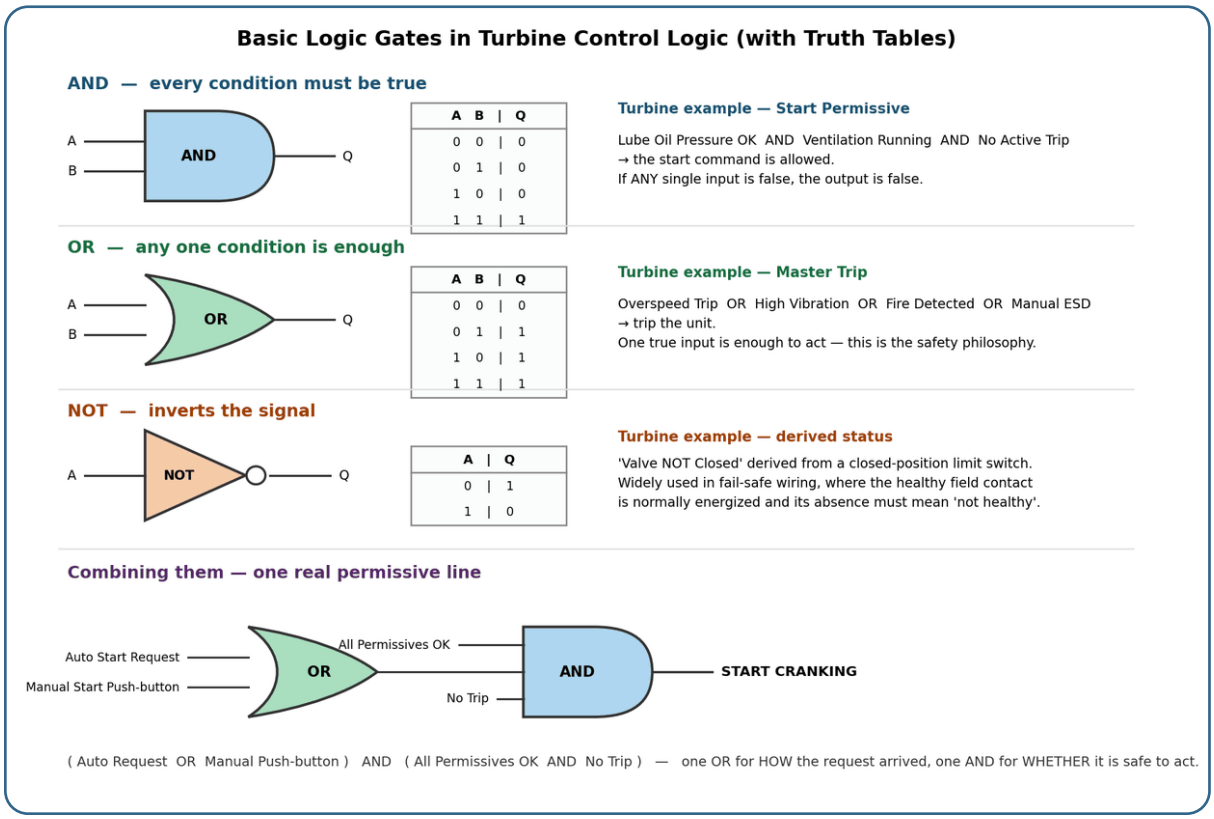
أي بيئة برمجة تحكم — سواء Mark VIe أو MicroNet مع GAP أو Studio 5000 (راجع الفصل الخامس عشر) — تأتي بمكتبة كتل جاهزة (Block Library). الأسماء تختلف من منصة لأخرى، لكن **الوظائف نفسها متطابقة تقريبًا**، وهذا بالضبط ما يجعل الانتقال بين المنصات أسهل مما يبدو لأول وهلة. الجدول التالي أشهرها:

الفئة	كتل نموذجية	الوظيفة بجملة واحدة
منطقية (Logic)	AND، OR، NOT، XOR	تركيب شروط بوليانية
مقارنة (Compare)	EQ، NE، GE، LE، GT، LT، ومقارنة بحزام تخميد	تحويل قيمة تناظرية إلى قرار بوليان
توقيت (Timers)	TON، TOF، TP	إدخال البُعد الزمني على المنطق
عدّ (Counters)	CTU، CTD	عدّ أحداث (مثل عدد محاولات الإشعال)
ذاكرة (Latch)	SR، RS، Set/Reset	تثبيت حالة حتى تصفير صريح
اختيار (Select)	Select، LSS، HSS	اختيار إشارة من عدة إشارات
حسابية (Math)	ADD، SUB، MUL، DIV، AVG	حسابات على القيم التناظرية
تحكم (Control)	Filter، Rate Limiter، PID	حلقات التحكم المستمر
تدرّج ومعالجة	Dead-band، Scaling، Ramp	تشكيل الإشارة قبل أو بعد الحساب

فيما يلي أهم أربع فئات بالتفصيل مع أمثلة من التوربين الغازي.

أولًا: الكتل المنطقية (AND / OR / NOT)

هذه أبسط الكتل وأكثرها استخدامًا على الإطلاق، ومع ذلك تحمل **فلسفة السلامة كاملة** بداخلها.



الشكل 12.4 — الكتل المنطقية الأساسية مع جداول الحقيقة، وأمثلة تطبيقية مباشرة من منطق التوربين الغازي، وتركيبها معًا في سطر سماحة واحد.

النقطة الجوهرية التي تستحق ترسيخًا: السماحات تُبنى بـ AND، والقواطع تُبنى بـ OR — وهذا ليس اختيارًا اعتباطيًا بل انعكاس مباشر لفلسفة الحماية (7.1):

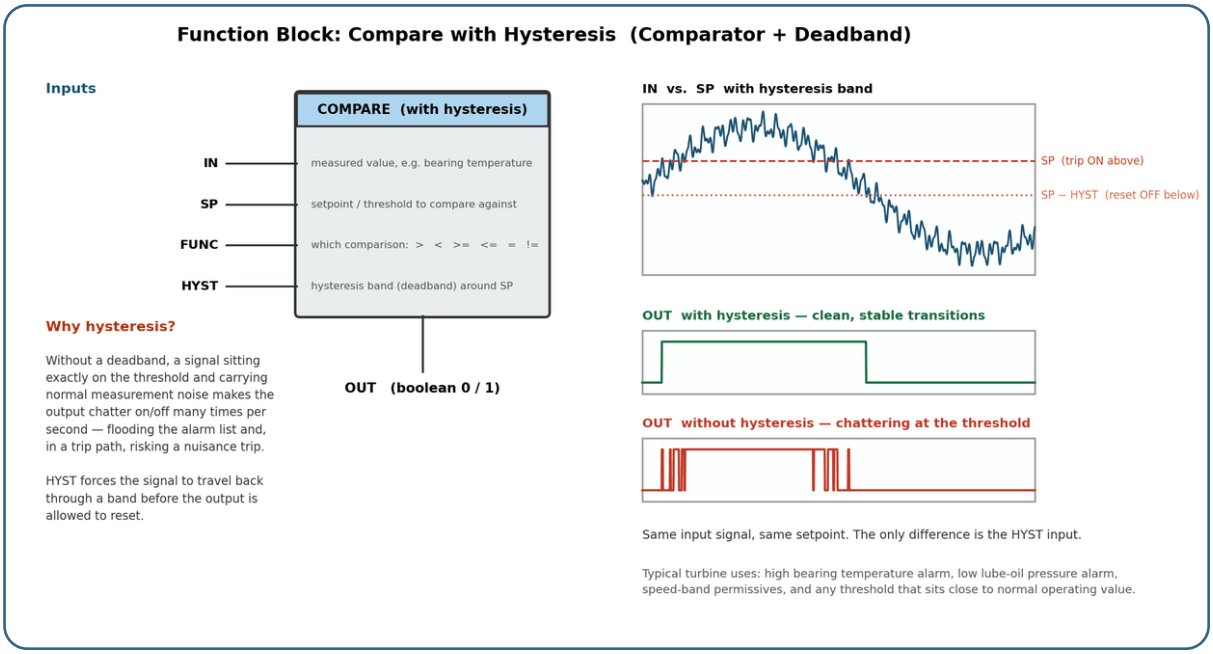
- **السماحة (Permissive) تعني «لا تسمح بالفعل إلا إذا كان كل شيء سليمًا» ← أي شرط ناقص يمنع الفعل ← AND.**
- **القاطع (Trip) يعني «توقّف فورًا إذا حدث أي شيء خطير» ← أي سبب واحد كافٍ للفعل ← OR.**

لو انعكس المنطق — لو بنينا القطع بـ AND — لأصبح التوربين يحتاج حدوث كل الأخطار مجتمعة حتى يتوقف، وهذا خطأ تصميمي كارثي. من واقع العمل، هذا بالضبط نوع الخطأ الذي يُكتشف أثناء مراجعة المنطق (Logic Review) قبل التشغيل، ولذلك تُراجَع كل سطور القطع بندًا بندًا.

أما **NOT** فهي أكثر ما تُستخدم في منطق فشل-آمن (Fail-Safe): الإشارة الحقلية السليمة تكون **مغذّاة كهربائيًا** بالحالة الطبيعية، فغياب الإشارة (سواء بسبب حالة فعلية أو انقطاع سلك) يعني «غير سليم». الكتلة NOT هي التي تترجم هذا الاصطلاح إلى منطق داخلي مقروء.

ثانيًا: كتلة المقارنة مع حزام التخميد (Compare with Hysteresis)

كتلة المقارنة هي الجسر بين العالم التناظري (حرارة، ضغط، سرعة) والعالم البوليان (إنذار، سماحة، قاطع). لكن المقارنة المجردة «هل القيمة > الحد؟» غير كافية عمليًا، ولهذا تحتوي معظم المكتبات على نسخة مزوّدة بمدخل حزام تخميد **(Hysteresis / Deadband)**.



الشكل 12.5 — كتلة المقارنة مع حزام تخميد: نفس الإشارة ونفس نقطة الضبط، والفرق الوحيد هو مدخل HYST — وأثره على استقرار الخرج واضح تمامًا.

مداخل الكتلة النموذجية:

- **IN** — القيمة المقاسة (مثلًا حرارة محمل، ضغط زيت، سرعة).
- **SP / IN2** — نقطة الضبط أو الحد المراد المقارنة معه.

- **FUNC** — أي مقارنة مطلوبة: أكبر من، أصغر من، أكبر أو يساوي... وهكذا. تُختار كإعداد، فتُغطّي الكتلة الواحدة كل الحالات.
- **HYST** — عرض حزام التخميد.
- **OUT** — النتيجة البوليانية.

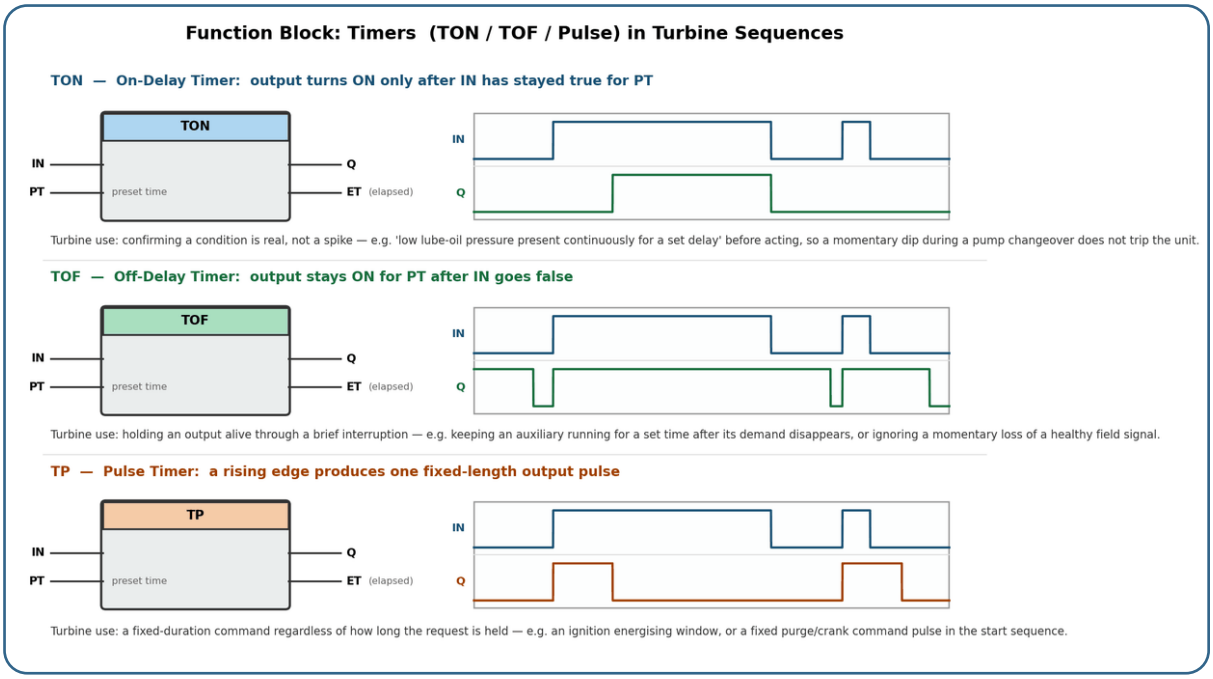
لماذا الحزام ضروري؟ أي إشارة تناظرية حقيقية تحمل ضجيجًا صغيرًا. لو استقرت القيمة **بالضبط** عند الحد، فالمقارنة المجردة ستنتج خرجًا يتذبذب (Chattering) عشرات المرات في الثانية. النتيجة العملية: فيضان في سجل الإنذارات يخفي الأحداث المهمة، وإذا كانت المقارنة على مسار قطع — احتمال قاطع كاذب فعلي (راجع 10.18 و13.5). الحزام يُلزم الإشارة بأن ترجع مسافة محددة قبل السماح بإعادة التصفير، فيصبح الخرج نظيفًا ومستقرًا.

> **قاعدة عملية:** عرض الحزام يُختار أكبر من مستوى الضجيج المتوقع في الإشارة، وأصغر بكثير من الفارق بين حد الإنذار وحد القطع — وإلا فقدت طبقة الإنذار المبكر معناها.

ملاحظة مهمة للمهندس الميداني: نقاط الضبط وأحزمة التخميد هذه عادةً ليست أرقامًا مكتوبة داخل المنطق، بل ثوابت قابلة للضبط **(Tunables / Control Constants)** لها أسماء رمزية في قاعدة بيانات النظام (راجع 9.4 و15.4). تعديل أي منها إجراء **مضبوط بصلاحيات ويُوثَّق**، لأنه يغيّر سلوك حماية فعلي — لا مجرد تعديل عرض على الشاشة.

ثالثًا: كتل التوقيت (Timers)

المنطق البوليان وحده لا يعرف الزمن، ومعظم قرارات التوربين الغازي **زمنية بطبيعتها**: هل الشرط قائم فعلًا، أم كان مجرد ومضة؟ كم من الوقت يجب أن نستمر في التدوير قبل السماح بالوقود؟ متى ننهي نافذة الإشعال؟ كتل التوقيت هي الإجابة.



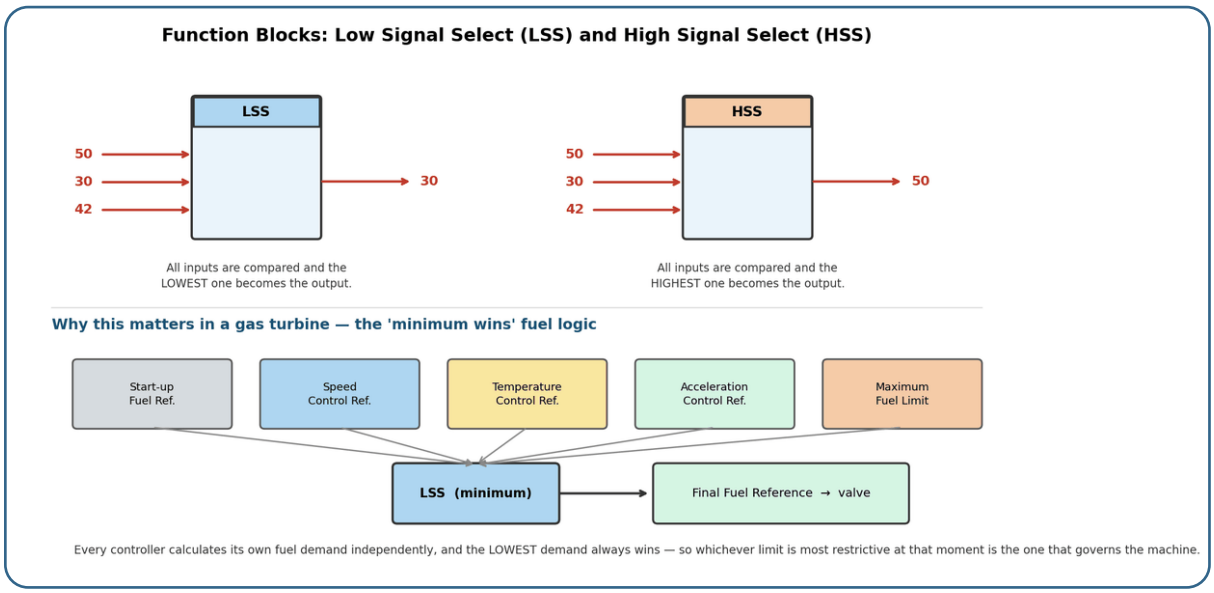
الشكل 12.6 — الأنواع الثلاثة الأساسية للمؤقتات: TON (تأخير عند التشغيل)، TOF (تأخير عند الإيقاف)، TP (نبضة ثابتة الطول) — بنفس إشارة الدخل، لملاحظة الفرق مباشرة.

- **TON — مؤقت تأخير التشغيل (On-Delay):** الخرج يشتغل فقط بعد بقاء الدخل صحيحًا مدة كاملة. **الاستخدام الأشهر في التوربين:** تأكيد أن الحالة حقيقية وليست ومضة عابرة — مثلًا انخفاض ضغط زيت التزييت يجب أن يستمر مدة محددة قبل التصرف، حتى لا يقطع انخفاض لحظي أثناء تبديل مضخة (6.1) الوحدةَ بلا داعٍ. هذا التأخير هو **موازنة صريحة بين تجنّب القواطع الكاذبة وسرعة الاستجابة**، ولذلك يُحدَّد بعناية ولا يُزاد اعتباطيًا.
- **TOF — مؤقت تأخير الإيقاف (Off-Delay):** الخرج يبقى شغّالًا مدة محددة بعد اختفاء الدخل. **الاستخدام:** إبقاء مخرَج حيًّا عبر انقطاع قصير — مثل استمرار تشغيل معدة مساعدة فترة بعد زوال طلبها، أو تجاهل فقدان لحظي لإشارة سليمة.
- **TP — مؤقت النبضة (Pulse):** الحافة الصاعدة تنتج نبضة واحدة ثابتة الطول بغض النظر عن مدة استمرار الدخل. **الاستخدام:** أمر بمدة محددة سلفًا — مثل نافذة تنشيط الإشعال أثناء تسلسل البدء (9.3).

وبطبيعة الحال، تُركَّب المؤقتات مع الكتل الأخرى: نمط شديد الشيوع هو مقارنة ← مؤقت **TON** ← قفل **(Latch)** ← قاطع، أي: تجاوزت القيمة الحد، واستمر التجاوز مدة كافية، فثبّت الحالة ولا تسمح بإلغائها إلا بتصفير صريح من المشغّل (راجع منطق القفل وإعادة التصفير في 12.3).

رابعًا: كتل اختيار الإشارة (HSS / LSS)

هذه الكتل بسيطة بشكل خادع: تقارن عدة مداخل وتُخرج أعلاها (HSS) أو أدناها (LSS). لكنها في التوربين الغازي تحديدًا تحمل واحدة من أهم أفكار التحكم في الكتاب كله.



الشكل 12.7 — كتلتا LSS وHSS، وتطبيق LSS كقلب منطق «أقل قيمة تفوز» الذي يحدد مرجع الوقود النهائي.

هنا نربط مباشرة بمنطق "أقل قيمة تفوز" **(Minimum Value Select)** الذي شرحناه في 9.1: كل حلقة تحكم (البدء، السرعة، الحرارة، التسارع، الحد الأقصى) تحسب مرجع وقود مستقلًا، وكتلة LSS تختار **الأقل** منها ليكون المرجع النهائي. النتيجة: أي قيد هو الأشد في تلك اللحظة هو الذي يحكم المعدة فعليًا، بدون الحاجة إلى منطق تحويل معقّد بينها.

وبنفس الفكرة تُستخدم **HSS** في مواضع أخرى — مثل اختيار أعلى قراءة حرارة من مجموعة قراءات لمقارنتها بحد الحماية، أو أعلى قراءة اهتزاز بين محملين، بحيث تكون المقارنة دائمًا مع «الأسوأ» وليس مع المتوسط.

نقطة تشخيصية عملية مهمة جدًا: عند فحص أي منطق مبني على LSS، السؤال الأول ليس «كم قيمة مرجع الوقود؟» بل **"أي مدخل هو الفائز الآن؟"** — لأن هذا وحده يفسّر سلوك الوحدة. وحدة «لا تحمّل بالشكل المتوقع» غالبًا ليست معطلة، بل ببساطة يفوز فيها مرجع حلقة الحرارة على مرجع حلقة السرعة (راجع 9.2 و10.17). أغلب بيئات البرمجة توفّر نافذة مراقبة للمتغيرات (Watch Window / Live Values) تُظهر القيم الحيّة عند كل مدخل ومخرج في المنطق أثناء التشغيل — وهذه هي الأداة العملية الأولى للإجابة على هذا السؤال بدل التخمين.

كيف تُقرأ صفحة منطق فعلية؟

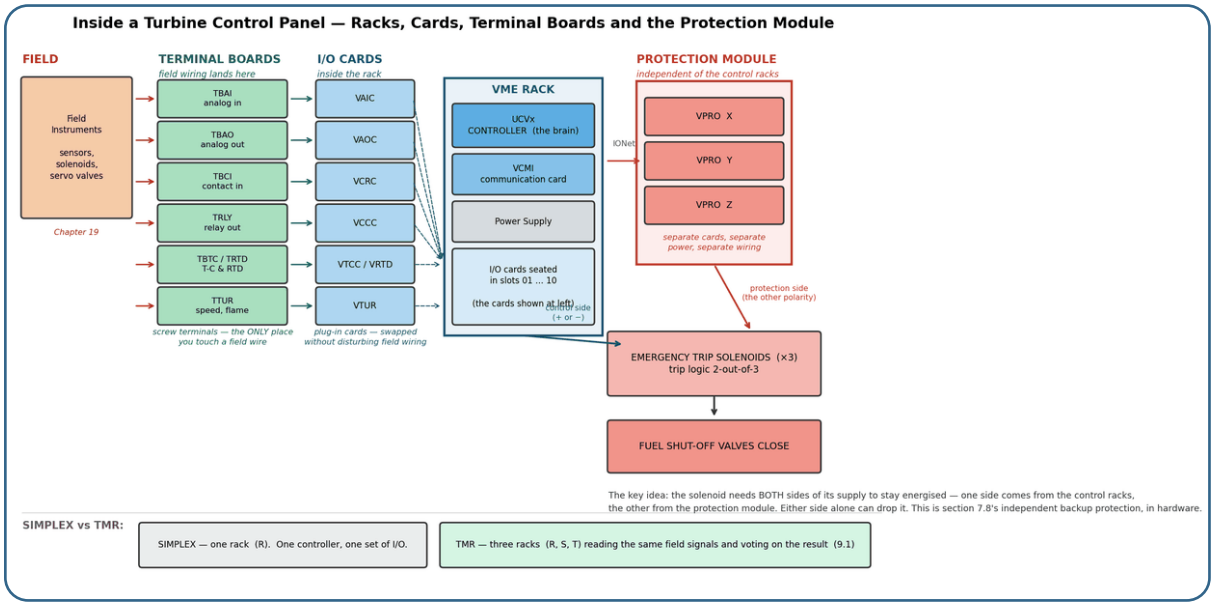
في معظم بيئات FBD، تظهر صفحة المنطق كشبكة كتل مرقّمة موصولة بخطوط، وبجوار كل خط قيمته الحيّة أثناء التشغيل. المهارة العملية المطلوبة من المهندس ليست حفظ أسماء الكتل، بل **تتبّع الإشارة عكسيًا**: تبدأ من الخرج غير المتوقع، وترجع كتلةً كتلةً حتى تصل للمدخل الذي يفسّره. ثلاث ملاحظات تسرّع هذا التتبع كثيرًا:

- الأرقام الظاهرة بجوار الخطوط هي قيم لحظية — قارنها بما تتوقعه، والفارق نفسه هو دليلك.
- المدخل الذي يأتي من **ثابت قابل للضبط** يختلف جوهريًا عن مدخل قادم من حسّاس: الأول يعني احتمال إعداد خاطئ، والثاني يعني احتمال مشكلة قياس (راجع 12.1).
- الكتلة التي تُظهر خرجًا «ثابتًا لا يتغيّر رغم تغيّر مداخلها» غالبًا كتلة قفل (Latch) لم تُصفَّر، أو مؤقت لم تكتمل مدته — لا كتلة معطوبة.

بهذا نكون قد أغلقنا الدائرة: من الإشارة الحقلية وبطاقة الإدخال (12.1)، إلى لغة البرمجة (12.3–12.8)، إلى الكتل الجاهزة التي يُبنى منها المنطق فعليًا (12.11) — وهذا كله هو ما يجعل قراءة منطق أي توربين ممكنة حتى على منصة لم تعمل عليها من قبل.

12.12 داخل خزانة التحكم: الرفوف والبطاقات ولوحات الأطراف

شرحنا في 12.1 بطاقات الإدخال والإخراج كمفهوم، وفي الفصل التاسع عشر مسار الإشارة كاملًا. هذا القسم يفتح **باب الخزانة فعليًا** ويُري المهندس ما سيجده بداخلها — لأن الانتقال من فهم المخطط إلى الوقوف أمام خزانة حقيقية يربك كثيرين بلا داعٍ.



الشكل 12.8 — البنية المادية لخزانة تحكم توربين نموذجية: الحقل ← لوحات الأطراف ← البطاقات ← الرف والمتحكم، مع وحدة الحماية المستقلة ومسار القطع. التسميات هنا من عائلة منصة شائعة، والمبدأ نفسه بكل المنصات بأسماء مختلفة.

المبدأ التنظيمي الأهم: فصل لوحة الأطراف عن البطاقة

هذه التفرقة تبدو تفصيلًا شكليًا وهي في الحقيقة **قرار هندسي عميق**:

- لوحة الأطراف **(Terminal Board):** هنا — وهنا فقط — **تنتهي أسلاك الحقل**. مثبّتة في جسم الخزانة، ولها مسامير ربط، ولا تُنزع عادةً.
- البطاقة **(I/O Card):** تُركّب في فتحة (Slot) داخل الرف، وتتصل بلوحة الأطراف عبر كابل أو موصل مخصص.

والفائدة العملية هائلة: استبدال بطاقة معطلة **لا يتطلب فك سلك حقلي واحد**. فكل أخطاء إعادة التوصيل التي حذّرنا منها في الفصل التاسع عشر — سلك في مكان خطأ، قطبية معكوسة — تُستبعد من عملية الاستبدال أصلًا. وهذه بالمناسبة إجابة سؤال يتكرر كثيرًا: لماذا لا تُوصَّل أسلاك الحقل مباشرة بالبطاقة؟ لأن البطاقة **قطعة قابلة للاستهلاك** والأسلاك **بنية دائمة**، وخلط الاثنين يجعل كل استبدال مغامرة.

العناصر التي ستجدها داخل الرف

العنصر	وظيفته	ملاحظة عملية
بطاقة المتحكم (Controller)	"العقل" — ينفّذ منطق التحكم دورةً بعد دورة	لكل رف بطاقة متحكم واحدة
بطاقة الاتصال (Communication Card)	تربط المتحكم ببطاقات الإدخال والإخراج وبالرفوف الأخرى وبالشبكة	عطلها يظهر كفقدان جماعي للإشارات (حالة 3 في الفصل 13)
بطاقات الإدخال والإخراج	كل نوع إشارة وبطاقته: تناظري، تلامسات، ثرموكابل، RTD، سرعة ولهب	العطل قد يكون **في قناة واحدة** لا في البطاقة كلها (19.2)
وحدة توزيع القدرة	تغذي الرف من مصادر التيار المستمر والمتردد	راجع 6.8 — التغذية نفسها منظومة تستحق عناية

شبكة الإدخال والإخراج (I/O Network)

في المنصات الحديثة لا تُوصَّل البطاقات بالمتحكم بأسلاك متوازية، بل عبر **شبكة داخلية مخصصة** — عادةً إيثرنت مخصص ومعزول عن شبكة المحطة. وأهم ما يعنيه هذا عمليًا:

- **سرعة تحديث القراءات محكومة بدورة هذه الشبكة** — لا بسرعة الحسّاس وحده.
- **تشخيصات الشبكة نفسها معلومة تشخيصية ثمينة**: عدّادات الأخطاء، وحالة كل عقدة (Node).
- **وهي منفصلة مفاهيميًا عن شبكة المحطة** التي تحمل بيانات الشاشات والDCS (الفصل 11) — الخلط بينهما عند التحقيق يضيّع وقتًا كبيرًا.

وحدة الحماية المستقلة: أروع تجسيد مادي لما شرحناه في 7,8

في المنصات الجادة، لا تكتفي الحماية بأن تكون منطقًا داخل نفس المتحكم — بل تُنفَّذ على **بطاقات حماية منفصلة** (غالبًا ثلاث: X وY وZ) داخل **وحدة مستقلة** لها تغذيتها وأسلاكها الخاصة، وتتصل بالمتحكم لتبادل المعلومات فقط.

والتفصيلة التي تستحق التأمل حقًا — وهي مثال هندسي بديع على مبدأ الحماية الاحتياطية المستقلة:

> ملفات القطع الطارئ (Trip Solenoids) تُغذّى من الجانبين معًا: طرف الملف الأول يأتي من جانب التحكم، وطرفه الآخر يأتي من جانب الحماية. فالملف لا يبقى مغذّى إلا إذا وافق الاثنان. وأيّ منهما وحده يستطيع إسقاطه.

النتيجة: لا يستطيع عطل بالمتحكم — مهما كان — أن يمنع القطع؛ ولا يستطيع عطل بوحدة الحماية أن يمنعه أيضًا. وتُبنى فوق ذلك عادةً ثلاثة ملفات بمنطق **2 من 3**، فتجتمع الحماية من العطل ومن القطع الكاذب معًا (7.8). وهذه هي فلسفة «de-energize to trip» مطبَّقة **بالأسلاك لا بالبرمجيات**.

Simplex مقابل TMR — بالشكل المادي

في التصميم البسيط (Simplex) يوجد **رف واحد**: متحكم واحد ومجموعة بطاقات واحدة. أما في التصميم الثلاثي (TMR، راجع 9.1) فتوجد **ثلاثة رفوف كاملة** — يُشار إليها عادةً بحروف مثل R وS وT — كلٌّ برفه ومتحكمه وبطاقاته، وثلاثتها تقرأ نفس الإشارات الحقلية وتتفق على القرار بالتصويت.

النتيجة الميدانية المهمة: في نظام TMR يمكن استبدال بطاقة في رف واحد **والوحدة تعمل** — لأن الرفين الآخرين يواصلان. لكن هذا **لا يعني أن العملية بلا مخاطر**: أثناء الاستبدال تعمل المنظومة فعليًا بردّية منقوصة (2 بدل 3)، ولهذا يجب أن تكون العملية موثّقة ومحدودة الزمن وبتصريح — بنفس منطق إدارة التجاوز الذي شرحناه في 7.8.

12.13 بيئة الهندسة والبرمجة: كيف يُعدَّل المنطق فعليًا؟

لغات البرمجة (12.3–12.8) والكتل الجاهزة (12.11) هي «المحتوى»؛ وهذا القسم عن **الأداة** التي تُحرَّر بها — لأن أخطاء كثيرة في الميدان مصدرها سوء فهم آلية الأداة لا سوء فهم المنطق نفسه.

المفهوم الأول — والأكثر إرباكًا: الإشارة مقابل نقطة الإدخال/الإخراج

هذا التمييز جوهري ويستحق التأني:

- نقطة الإدخال/الإخراج **(I/O Point):** موقع ذاكرة مرتبط بـ**طرف مادي محدد** على لوحة أطراف محددة. تكتبه أو تقرأه **مشغّلات البطاقة** (Drivers).

- الإشارة **(Signal):** الاسم الذي يستخدمه **منطق التحكم** داخليًا.

والربط بينهما **خطوة تهيئة صريحة ومستقلة**: تُعرَّف الإشارة أولًا (اسمها، نوعها، مداها، وصفها)، ثم **تُربط** بنقطة الإدخال المقابلة.

ولماذا يهم هذا عمليًا؟ لأن ثلاثة أعطال شائعة تعيش تحديدًا في هذه الفجوة:

1. **إشارة مُعرَّفة لكنها غير مربوطة بأي نقطة** — فتبقى بقيمتها الافتراضية أبدًا، وتبدو «طبيعية» على الشاشة (وهذه بالضبط جذور تحذير 19.2: القيمة على الشاشة لا تثبت أن الجهاز موصول).
2. **إشارة مربوطة بالنقطة الخطأ** — فتُقرأ قيمة جهاز آخر باسم هذا الجهاز.
3. **تعديل التهيئة دون تنزيلها إلى البطاقة** — فتظل البطاقة تعمل بالإعداد القديم بينما الأداة تُظهر الجديد.

اصطلاح تسمية يستحق المعرفة: كثير من المنصات تميّز بالتسمية بين إشارة **مرتبطة فعليًا بطرف مادي** وإشارة **داخلية محسوبة بالمنطق فقط**. معرفة اصطلاح منصتك يوفّر وقتًا كبيرًا عند التحقيق — لأنك تعرف من الاسم وحده هل تبحث عن حسّاس بالحقل أم عن حساب داخلي.

المفهوم الثاني: هرمية البرنامج

منطق التوربين ليس ملفًا واحدًا مسطحًا، بل هرم منظّم — بالمعنى العام: **وظائف تحكم** ← **وحدات** ← **مهام** ← **كتل**. وأهم ما في هذا التنظيم أن **وظائف التحكم تقابل تمامًا ما شرحناه في الفصل التاسع**: تحكم البدء، تحكم التسارع، تحكم السرعة، تحكم الحمل، تحكم حرارة العادم — أي أن من فهم الفصل التاسع سيجد نفسه أمام هيكل مألوف حين يفتح المنطق لأول مرة.

ونقطة إدارية-هندسية مهمة: كثير من المنصات تميّز بين وحدات **مسموح بتعديلها** (منطق التطبيق الخاص بالمنشأة) ووحدات **محمية من التعديل** (منطق أساسي من المصنّع). وهذه حماية مقصودة — تجاوزها ليس مهارة بل مخاطرة.

المفهوم الثالث: دورة التعديل الآمنة

أي تعديل يمر بأربع مراحل، وتخطّي أي منها هو مصدر أعطال حقيقي:

1. التحرير **(Edit):** التعديل داخل الأداة — لا أثر له على المعدة بعد.
2. التحقق **(Validate):** فحص آلي لسلامة التهيئة قبل البناء، ويُظهر التعارضات والنواقص.
3. البناء **(Build):** تحويل التهيئة إلى صيغة قابلة للتنفيذ داخل المتحكم — وهنا تظهر الأخطاء والتحذيرات.
4. التنزيل **(Download):** إرسال البرنامج للمتحكم فعليًا.

وتفصيلة حرجة يجب أن يعرفها كل مهندس تحكم: التنزيل قد يكون إلى الذاكرة العاملة **(RAM)** أو إلى الذاكرة الدائمة **(Flash)**. والفرق ليس تقنيًا فقط: تعديل نُزِّل إلى الذاكرة العاملة فقط **قد يختفي عند إعادة تشغيل المتحكم** — فتعود المعدة لسلوكها القديم فجأة، ويقف الفريق حائرًا أمام «عطل غامض» سببه في الحقيقة **تعديل لم يُثبَّت**. هذه واحدة من أكثر الحالات إرباكًا، وأسهلها تجنّبًا.

المفهوم الرابع: مقارنة الإصدارات

الأدوات الجيدة تقارن تلقائيًا بين ما في الحاسوب وما في المتحكم، وتميّز عادةً بين **اختلاف كبير** (بنية المنطق نفسها مختلفة) و**اختلاف صغير** (قيم ثوابت أو تفاصيل أقل أثرًا). والقاعدة العملية: **قبل أي تحقيق جدّي في منطق، تأكد أولًا أن النسخة التي تقرأها هي النسخة التي تعمل** — فتشخيص منطق غير مطابق للمُنزَّل هو إهدار وقت مضمون، وقد يقود لاستنتاج خاطئ تمامًا.

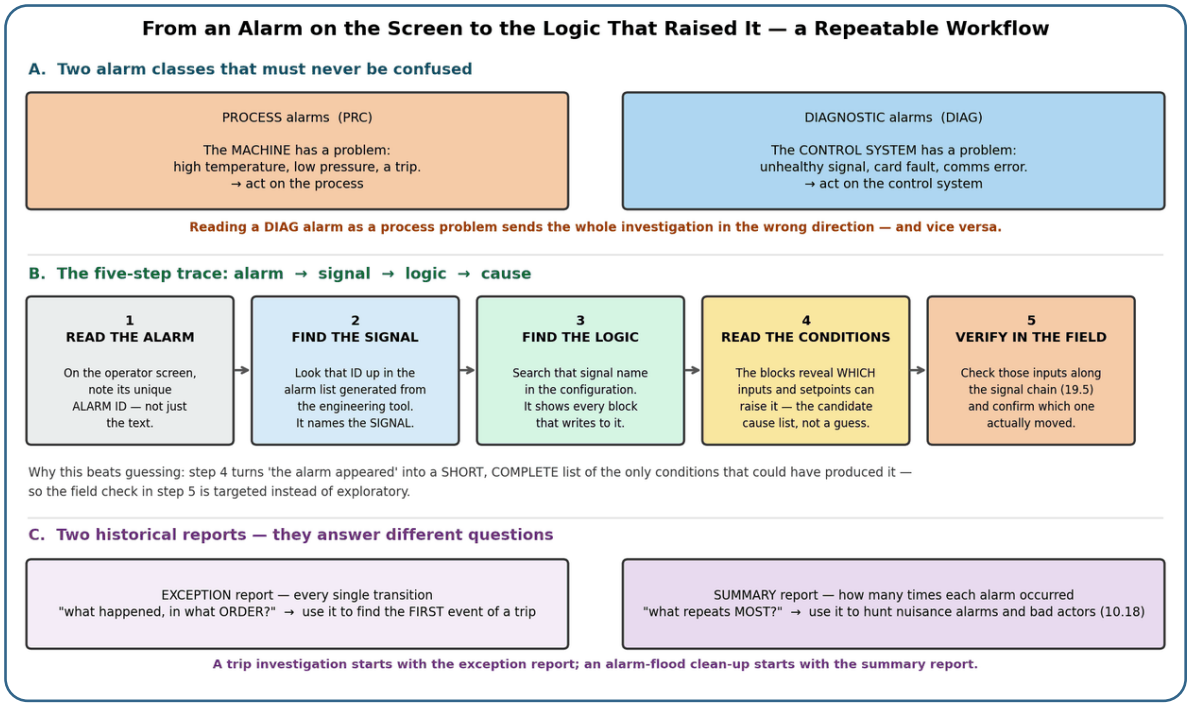
أدوات المراقبة الحيّة — وهي جوهر التشخيص العملي

- نافذة المراقبة **(Watch Window):** تعرض القيم الحيّة لمجموعة إشارات تختارها. وهذه هي الأداة التي تجيب على سؤال 12.11 الذهبي: **أي مدخل هو الفائز الآن في منطق أقل قيمة تفوز؟**
- مسجّل الاتجاهات **(Trend Recorder):** يرسم عدة إشارات على نفس المحور الزمني — وهو أداة **المقارنة الثلاثية** (نقطة الضبط، القيمة المقاسة، خرج المتحكم) التي بنينا عليها الفصل العشرين كله.
- أداة البحث **(Finder):** تجد كل مواضع استخدام إشارة معيّنة داخل المنطق — وهي الخطوة الثالثة في منهجية تتبع الإنذارات أدناه.

قاعدة سلامة تُختم بها هذه الأدوات: بعض هذه العمليات — التنزيل، تعديل ثابت، إعادة تهيئة بطاقة — لها **أثر مباشر على معدة تعمل**. ولذلك: تُنفَّذ بصلاحيات مضبوطة، وبتوثيق، وبعلم المشغّل، وتحت إدارة التغيير (8.6). **وأي تعديل على منطق حماية يستوجب إعادة اختبار ذلك المسار** بعده (7.8) — لا الاكتفاء بأن «التنزيل نجح».

12.14 الإنذارات: تصنيفها وتتبّعها حتى المنطق الذي أطلقها

نختم الفصل بمهارة عملية تفصل بين مهندس تحكم متمرّس وآخر مبتدئ: **كيف تتتبّع إنذارًا حتى سببه داخل المنطق؟**



الشكل 12.9 — أعلى: صنفا الإنذارات اللذان لا يجوز الخلط بينهما. وسط: منهجية التتبع الخمسية. أسفل: تقريرا السجل التاريخي وأي سؤال يجيب عليه كل منهما.

أولًا: صنفان مختلفان جوهريًا

- إنذارات العملية **(Process Alarms): المعدة** لديها مشكلة — حرارة مرتفعة، ضغط منخفض، قاطع.
- إنذارات التشخيص **(Diagnostic Alarms): نظام التحكم** لديه مشكلة — إشارة غير سليمة، عطل ببطاقة، خطأ اتصال، تعارض بين المعالجات.

والخلط بينهما خطأ مكلف في الاتجاهين: فريق يفتح تحقيقًا في منظومة الوقود بينما الإنذار يقول «قناة القياس غير سليمة»؛ أو فريق يعامل إنذار حرارة حقيقيًا كأنه «مشكلة في النظام» فيتجاهله. **اقرأ صنف الإنذار قبل نصّه** — فهو يحدد **أي فريق** يجب أن يبدأ العمل أصلًا.

ثانيًا: منهجية التتبع الخمسية

هذه المنهجية تحوّل «ظهر إنذار» إلى **قائمة أسباب قصيرة ومكتملة** — لا تخمين:

1. اقرأ الإنذار وسجّل معرّفه الفريد **(Alarm ID)** — لا نصّه فقط، فالنصوص قد تتشابه والمعرّف لا يتكرر.
2. **جد الإشارة:** ابحث عن هذا المعرّف في قائمة الإنذارات المستخرجة من أداة الهندسة — ستعطيك **اسم الإشارة** التي يمثّلها الإنذار.

3. **جد المنطق:** ابحث عن اسم الإشارة داخل التهيئة (بأداة البحث) — ستظهر لك **كل الكتل التي تكتب لهذه الإشارة**.

4. **اقرأ الشروط:** الكتل نفسها تكشف **أي مداخل وأي نقاط ضبط** يمكن أن ترفع هذا الإنذار — وهذه هي قائمة الأسباب المرشحة، مستخرجة من المنطق لا من الذاكرة.

5. **تحقق بالحقل:** افحص تلك المداخل تحديدًا عبر سلسلة الإشارة (19.5)، وحدّد أيها تحرّك فعلًا.

قيمة المنهجية بجملة: الخطوة الرابعة تحوّل السؤال المفتوح «لماذا ظهر هذا الإنذار؟» إلى **قائمة محدودة ومكتملة** — فيصبح الفحص الميداني موجّهًا بدل أن يكون استكشافيًا. وهي تنطبق بنفس القوة على **القواطع** لا الإنذارات فقط.

ثالثًا: تقريران تاريخيان يجيبان على سؤالين مختلفين

- تقرير الاستثناءات **(Exception Report):** يسرد **كل** تحوّل لكل إنذار وحدث بالفترة المحددة، بالترتيب الزمني. سؤاله: **"ماذا حدث، وبأي ترتيب؟"** — وهو تقرير **تحقيق القاطع**، لأنه الطريق لإيجاد الحدث الأول (First-Out، 7.7).

- تقرير الملخص **(Summary Report):** يسرد **عدد مرات** حدوث كل إنذار. سؤاله: **"ما الذي يتكرر أكثر؟"** — وهو تقرير **تنظيف فيضان الإنذارات** وتحديد الإنذارات المزعجة المتكررة (Bad Actors، 10.18).

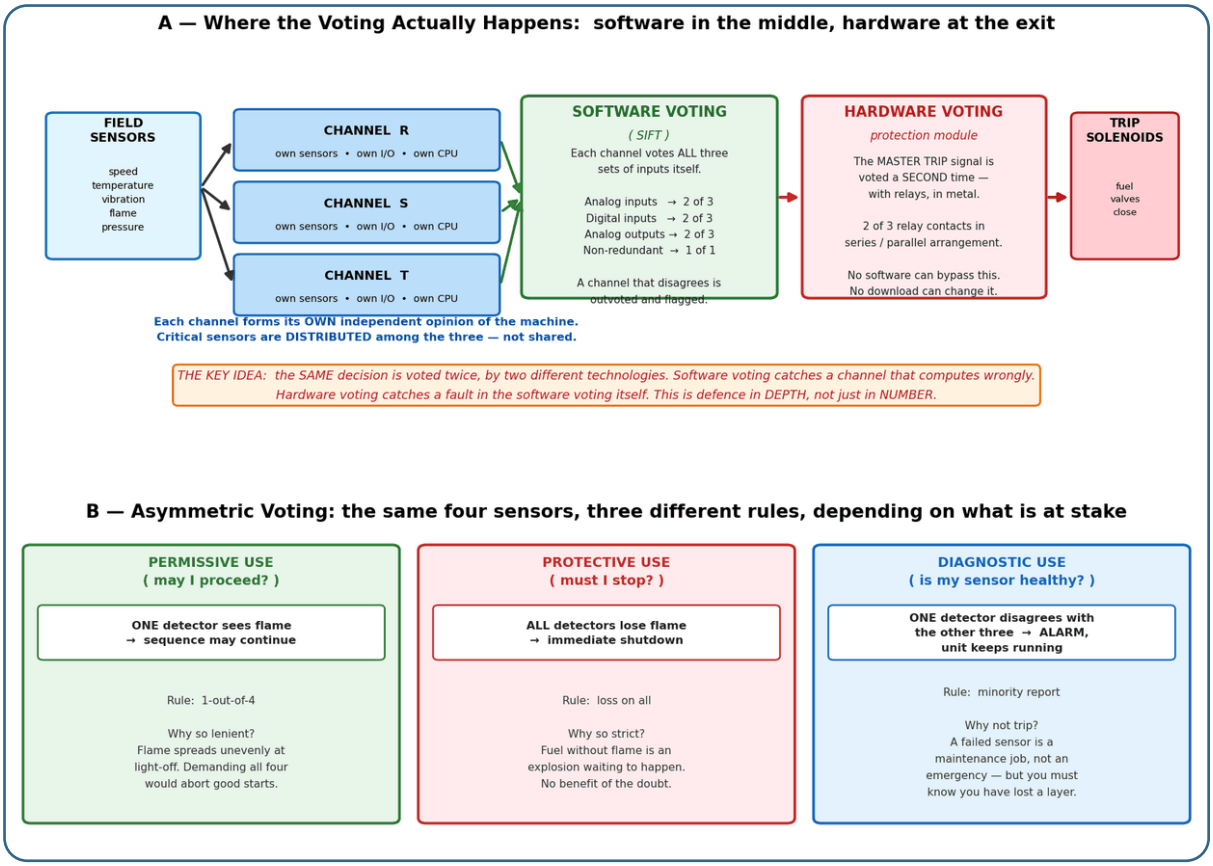
القاعدة: تحقيق قاطع يبدأ بتقرير الاستثناءات؛ ومشروع تحسين بيئة الإنذارات يبدأ بتقرير الملخص. واستخدام الخطأ منهما يعطي صورة مضللة تمامًا عن حالة الوحدة.

وشرط أساسي يسبق كل ما سبق: توحيد التوقيت. كل هذه التقارير تعتمد على الطوابع الزمنية. فإن لم تكن الشاشات والمتحكمات وأجهزة الحماية مضبوطة على مصدر وقت واحد (عبر بروتوكول توحيد وقت الشبكة)، فمقارنة الترتيب بينها **بلا معنى** — وتضيع الإجابة على السؤال الأهم في أي تحقيق: **أيهما أولًا؟** وهذا يعيدنا حرفيًا إلى ما قلناه في 18.5: أرخص إجراء وقائي، وأكثره إهمالًا.

12.15 التصويت عمليًا: أين يحدث بالبرمجيات وأين بالأسلاك؟

تحدثنا عن الردّية الثلاثية (TMR) في 9.1 كمفهوم، وعن وحدة الحماية المستقلة في 12.12 كمكوّن. وبقيت نقطة عملية دقيقة يغفلها كثير من المهندسين رغم أنها تفسّر سلوك النظام في لحظات حاسمة:

> التصويت ليس عملية واحدة تحدث في مكان واحد. إنه يحدث مرتين، بتقنيتين مختلفتين، لسببين مختلفين.



الشكل 12.10 — أعلى: بنية التصويت بنظام ثلاثي الردّية، من القنوات المستقلة إلى التصويت البرمجي ثم التصويت بالأسلاك. أسفل: التصويت غير المتماثل بقواعد مختلفة حسب ما هو على المحك.

الطبقة الأولى: التصويت البرمجي

كل قناة من القنوات الثلاث تملك **حسّاساتها الخاصة، وبطاقات إدخالها الخاصة، ومعالجها الخاص**. والنقطة الجوهرية أن **الحسّاسات الحرجة تُوزَّع بين القنوات الثلاث لا تُشارَك بينها** — فلكل قناة تقييمها المستقل تمامًا لحالة الآلة. أما الحسّاسات غير الحرجة فتُوصَّل مباشرة إلى قناة الاتصال، تفاديًا لإشغال قنوات التحكم بمعالجة لا تحتاجها.

ثم تتبادل القنوات بياناتها عبر شبكة داخلية، **وكل قناة تصوّت بنفسها على كل المدخلات الثلاث**. وهذا الأسلوب يُعرف باسم تحمّل الأعطال المنفَّذ برمجيًا **(SIFT — Software Implemented Fault Tolerance)**، ومعناه العملي أن التصويت لا يحتاج عتادًا مخصصًا: هو خوارزمية تعمل داخل كل معالج.

نوع الإشارة	قاعدة التصويت
مدخلات تناظرية حرجة	**2 من 3**
مدخلات منطقية حرجة	**2 من 3**
مخرجات تناظرية (أوامر الصمامات)	**2 من 3**
إشارات غير مكرّرة (عبر قناة الاتصال)	**1 من 1** — بلا تصويت، ولذلك لا تُستخدم في وظائف حرجة

والقناة التي تخالف الأغلبية تُستبعَد من التأثير على الخرج، ويُرفع عنها تشخيص. وهذا هو جوهر الفكرة: النظام لا يتعطّل عند فشل قناة، بل **يستمر بقناتين ويخبرك بما فقده** — وهذا ما يجعل الردّية الثلاثية مختلفة نوعيًا عن مجرد «نظام احتياطي».

الطبقة الثانية: التصويت بالعتاد

ثم يحدث شيء يستحق التأمل: **إشارة القطع الرئيسية تُصوَّت مرة ثانية — لكن بالمرحّلات، في المعدن، داخل وحدة الحماية.** منطق 2 من 3 يُنفَّذ هنا **بترتيب فيزيائي لتلامسات المرحّلات** (توالٍ وتوازٍ)، ومخرجه يتحكم بتغذية مرحّلات وملفات القطع مباشرة.

ولماذا التصويت مرتين؟ ولماذا لا يُكتفى بالبرمجي وهو أدق وأمرن؟

لأن التصويت البرمجي والتصويت العتادي **يحميان من نوعين مختلفين تمامًا من الفشل:**

- **التصويت البرمجي** يحمي من **قناة تحسب خطأً** — حسّاس منحرف، أو بطاقة معيبة، أو معالج مضطرب.
- **والتصويت العتادي** يحمي من **خلل في التصويت البرمجي نفسه** — عيب في الشيفرة، أو تحميل خاطئ، أو حالة لم يتوقعها المصمم، أو حتى تلاعب متعمّد.

والفرق العملي الحاسم: لا يمكن لأي برنامج، ولا لأي عملية تنزيل، ولا لأي خطأ في التهيئة **أن يعطّل تصويت المرحّلات** — لأنه ليس برنامجًا أصلًا. **وهذا دفاع في العمق لا دفاع في العدد.** وثلاث قنوات إلكترونية متطابقة، مهما بلغ عددها، تظل عرضة لفشل ذي سبب مشترك في التصميم أو البرمجية؛ أما مرحّل فولاذي فلا يشترك مع البرمجية في شيء.

وهذا نفس المنطق الذي رأيناه في نظام زيت القطع (7.9): تنوّع الطبيعة الفيزيائية أقوى من تكرار النوع الواحد.

التصويت غير المتماثل: نفس الحسّاس بثلاث قواعد مختلفة

وهنا نصل إلى نقطة تُظهر نضج تصميم هذه الأنظمة، وهي من أجمل ما يمكن أن يتعلّمه مهندس تحكم.

خذ كواشف اللهب مثالًا — وهي عادةً أربعة موزّعة على الغرف. **الحسّاسات نفسها تُستخدم بثلاث قواعد تصويت مختلفة تمامًا، بحسب السؤال المطروح:**

1) الاستخدام السماحي (هل أستمر؟) — قاعدة متساهلة. كشف واحد للهب يكفي للسماح لتسلسل البدء بالمتابعة. ولماذا التساهل؟ لأن اللهب عند الإشعال ينتشر تدريجيًا عبر أنابيب اللهب المتقاطعة، ولا يصل كل الغرف في اللحظة نفسها. **واشتراط رؤية كل الكواشف للهب سيجهض بدايات سليمة تمامًا.**

2) الاستخدام الحمائي (هل أتوقف؟) — قاعدة صارمة. فقد اللهب على الكواشف جميعًا يعني إيقافًا فوريًا. ولماذا هذه القاعدة تحديدًا؟ لأن أي كاشف ما زال يرى لهبًا يعني أن الاحتراق قائم فعلًا، فلا يُقطع إلا حين تُجمع كل الكواشف على غيابه — ومع ذلك يبقى القطع فوريًا بلا تدرّج، لأن الوقود بلا لهب انفجار ينتظر مصدر إشعال. **لا مجال هنا لأي «شك لصالح المتهم».**

3) الاستخدام التشخيصي (هل حسّاسي سليم؟) — قاعدة وسط. كاشف واحد يخالف الثلاثة الآخرين يُنتج إنذارًا، والوحدة تواصل العمل. ولماذا لا نقطع؟ لأن كاشفًا معطلًا هو **عمل صيانة لا حالة طوارئ**. لكن يجب أن يعرف المشغّل أنه **فقد طبقة من طبقات الحماية** وأن يعالجها في أول فرصة — وإلا تحوّل العطل إلى عطل مستتر (7.8).

> والدرس الذي يستحق أن يُعمَّم على كل تصميم منطق تقوم به:
>
> قاعدة التصويت ليست خاصية للحسّاس — إنها خاصية للسؤال المطروح عليه.
>
> نفس القياس بالضبط قد يُعامَل بتساهل حين يكون السؤال «هل أسمح؟»، وبصرامة حين يكون «هل أقطع؟»، وبطريقة ثالثة حين يكون «هل أثق بقياسي؟». ومن يصمّم منطقًا بقاعدة تصويت واحدة لكل الاستخدامات إما أن يجعل الوحدة تقطع بلا داعٍ، أو يجعلها لا تقطع حين يجب.
>
> وهذا المبدأ يمتد إلى ما هو أبعد من كواشف اللهب: قياس الاهتزاز مثلًا يُستخدم للإنذار، وللقطع، ولتشخيص الحسّاس نفسه — وقناة اهتزاز تقرأ صفرًا تمامًا تُرفَع عنها رسالة «عطل مُحوِّل» لا رسالة «لا اهتزاز». وهذه التفرقة وحدها أنقذت كثيرًا من التحقيقات من السير في الاتجاه الخاطئ.

مسألة عملية: الإمساك (Latching) وإعادة التعيين

نقطة أخيرة صغيرة لكنها تُربك كثيرًا من المهندسين الجدد: قرارات القطع تُمسَك **(Latched)**.

بمعنى أن الإشارة تبقى فعّالة حتى بعد زوال السبب، ولا تُمحى إلا بأمر إعادة تعيين رئيسي **(Master Reset)** يُصدره المشغّل عن قصد.

ولماذا؟ لسببين:

1. **منع إعادة التشغيل التلقائي بعد قطع.** لو لم تُمسك الإشارة، فإن اهتزازًا عابرًا تجاوز الحد لجزء من الثانية سيقطع الوحدة، ثم تختفي الإشارة، **فتبدو الوحدة جاهزة للتشغيل فورًا بينما لم يُفهم السبب بعد.**
2. **حفظ الدليل.** الإشارة الممسوكة تخبرك **أيّ حماية عملت**، حتى لو عادت القيمة إلى طبيعتها قبل أن تصل إلى الشاشة.

والنتيجة العملية: حين تجد وحدة «لا تقبل أمر البدء» بعد قطع، فالسبب غالبًا **ليس** أن الشرط ما زال قائمًا — بل أن **الإشارة الممسوكة لم تُمسح بعد**. وقبل أن تمسحها، اقرأ ماذا تقول: **هي آخر شاهد على ما حدث.**

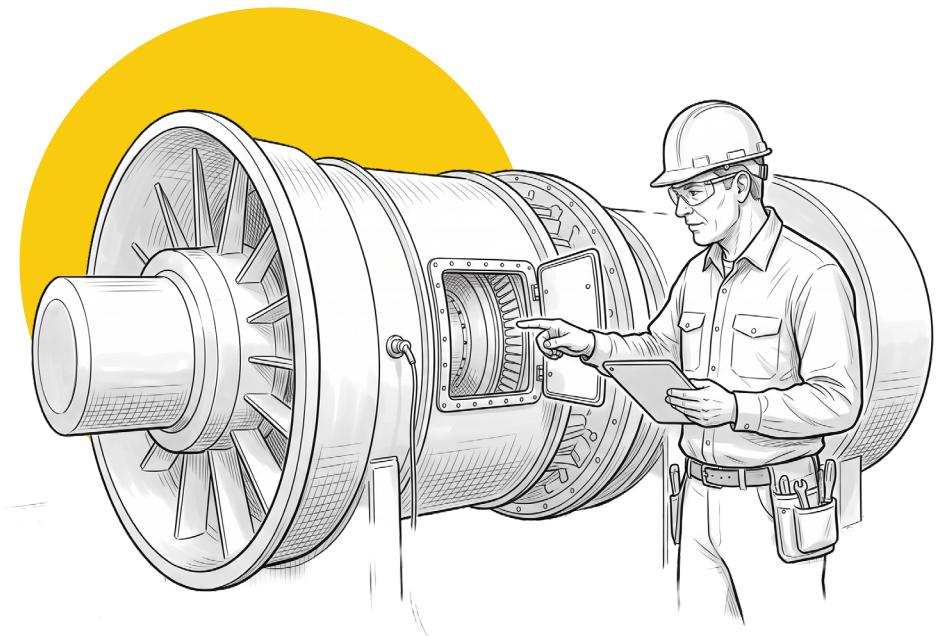
خلاصة الفصل

هذا الفصل هو أقرب ما في الكتاب إلى «فتح غطاء الخزانة»: بطاقات الإدخال والإخراج ومسار الإشارة داخلها، ولغات البرمجة الخمس ومتى تُستخدم كل واحدة، ومكتبة الكتل التي يُبنى منها كل منطق، والرفوف والأطراف وبيئة التنزيل، والإنذارات، والتصويت بالبرمجيات مقابل الأسلاك.

والخلاصة العملية في ثلاث جمل: المنطق الذي تراه على الشاشة ليس المنطق — بل تمثيل له؛ **والقيمة الهندسية التي يقرؤها المتحكم لا تصبح صحيحة لأن التدريج مكتوب، بل لأن التدريج صحيح**؛ وأي تعديل تُنزّله إلى الذاكرة العاملة وحدها يختفي عند إعادة التشغيل — فإن لم يُحفَظ ويُوثَّق، فهو تعديل لم يحدث. والفصل القادم ينتقل من البنية إلى الواقع: إحدى عشرة حالة ميدانية كاملة، لكل منها عرضٌ ومسار تشخيص ودرس مستفاد.

الفصل الثالث عشر:

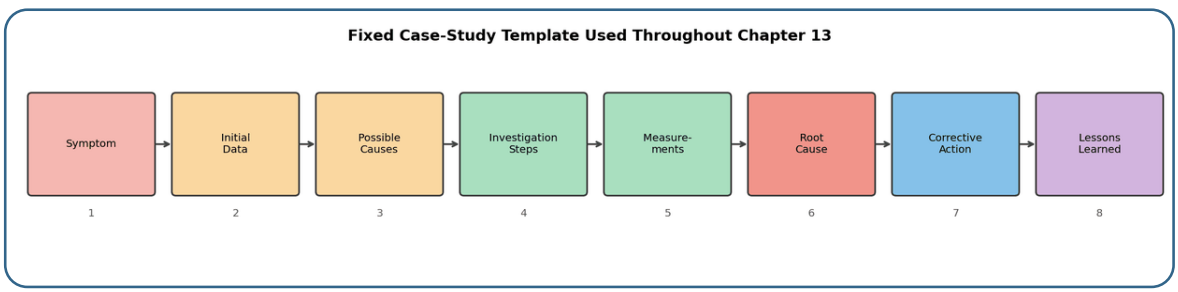
الحالات العملية والخبرة الميدانية



كل الفصول السابقة شرحت «كيف يُفترض أن تعمل الأمور» — من مبدأ التشغيل، مرورًا بالمكونات والأنظمة المساعدة، وصولًا إلى منطق التحكم والحماية والتشخيص المنظّم (الفصل العاشر). هذا الفصل مختلف بطبيعته: بدل شرح المفاهيم عمومًا، نمشي خطوة بخطوة عبر حالات كاملة — من العرض الأولي وحتى السبب الجذري والدرس المستفاد — بالتفاصيل والتردد ذاتها التي يواجهها أي مهندس تشغيل فعليًا في الميدان. هذا القسم بالذات هو الذي يفرّق كتابًا مبنيًا على خبرة عملية حقيقية عن أي مرجع نظري.

13.1 منهجية توثيق الحالات: قالب ثابت لكل حالة

كي تكون الفائدة قابلة للتطبيق المباشر، لا مجرد قصص متفرقة، تتبع كل حالة في هذا الفصل القالب الثابت نفسه من ثماني خطوات:



الشكل 13.1 — القالب الثابت لكل حالة عملية بهذا الفصل، من العرض الأولي وحتى الدرس المستفاد.

1. العرض **(Symptom):** ما لاحظه المشغّل أو نظام التحكم أولًا — بأدق وصف ممكن، دون تفسير مسبق.
2. البيانات الأولية **(Initial Data):** القراءات والسجلات المتاحة فورًا عند ملاحظة العرض — قبل أي تدخل تشخيصي فعلي.
3. الأسباب المحتملة **(Possible Causes):** قائمة الفرضيات مرتبة من الأبسط إلى الأكثر تعقيدًا (بالمنهجية نفسها في 10.1)، دون استبعاد أي منها مبكرًا.
4. خطوات التحقيق **(Investigation Steps):** الترتيب الفعلي الذي اتُّبع للتحقق من كل فرضية، عادة من الأسهل فحصًا إلى الأصعب.
5. القياسات **(Measurements):** الأرقام والقراءات الفعلية التي حسمت الأمر — هذه الخطوة تحديدًا هي التي تفرّق بين «تخمين مبني على خبرة» و«تشخيص مبني على دليل».

6. السبب الجذري **(Root Cause):** السبب الفعلي المؤكد بالقياسات، وليس أول عرض ظاهر (تذكير بالقاعدة الذهبية من 10.1: لا تستبدل مكوّنًا لمجرد أن إشارة تشير إليه، وأثبت السببية أولًا).

7. الإجراء التصحيحي **(Corrective Action):** ما نُفِّذ فعليًا لمعالجة السبب الجذري، لا مجرد إعادة التشغيل بعد إعادة التصفير.

8. الدرس المستفاد **(Lessons Learned):** ماذا نأخذ من هذه الحالة يُطبَّق مستقبلًا — تعديل إجراء، إضافة فحص دوري، أو مجرد تنبيه لنمط معيّن.

يتكرر هذا القالب بالترتيب نفسه في الحالات 1–8 أدناه؛ أما الحالات 9–11 فتُعرَض بأسلوب تحليلي موسّع يبدأ من العرض ثم مسار التشخيص فالدرس المستفاد، لأن قيمتها في المنهجية لا في السرد الزمني. وكل حالة مرتبطة بالأقسام النظرية المقابلة لها في الفصول السابقة — راجعها إن احتجت خلفية أعمق عن أي مفهوم يُذكر أثناء الحالة.

حالة 1: فشل حدوث الإشعال أثناء بدء التشغيل (Failure to Establish Flame)

العرض: أثناء تسلسل بدء التشغيل (راجع 9.3)، وصلت الوحدة إلى مرحلة الإشعال (Ignition & Light-off) وفُتح صمام الوقود بالكمية الأولية المحددة (FSRSU)، لكن كاشف اللهب (7.5) لم يعطِ إشارة تأكيد لهب خلال المدة الزمنية المسموحة — فأصدر النظام إنذار «فشل إشعال» (Failure to Light) وأوقف التسلسل تلقائيًا.

البيانات الأولية: يوضح سجل التسلسل أن كل السماحات (9.3) كانت متحققة، وأن دورة التطهير (Purge) اكتملت بنجاح، وأن السرعة وصلت إلى عتبة الإشعال المطلوبة. وأعطى صمام الوقود تأكيد فتح (Feedback)، لكن لا توجد أي إشارة لهب مسجّلة خلال نافذة المحاولة.

الأسباب المحتملة (من الأبسط للأكثر تعقيدًا):

- مشكلة في نظام الإشعال نفسه (Igniter) — كابل تالف، فجوة شرارة (Spark Gap) متآكلة، أو عدم وصول الطاقة/الجهد المطلوب.
- عدم وصول وقود فعلي إلى حاقنات الاحتراق رغم تأكيد فتح الصمام (انسداد جزئي، أو مشكلة في منظم الضغط).
- ضغط تفريغ الضاغط (Compressor Discharge Pressure — CDP) لم يصل للقيمة المطلوبة لظروف احتراق مناسبة.

- كاشف اللهب نفسه معطوب أو غير نظيف (لهب موجود فعليًا لكنه لا يُكتشف).
- سرعة مولّد الغاز (Gas Generator Speed) لم تصل فعليًا لعتبة الإشعال الدنيا المحددة من الشركة الصانعة رغم ما يبدو على الشاشة.
- خلل في منطق التسلسل نفسه في الـController (توقيت، Permissives، Timers غير محدّثة بشكل صحيح).

خطوات التحقيق: بالترتيب — أولًا التأكد من توفر الوقود ووصوله بالضغط والتدفق المطلوبين إلى مدخل التوربين (راجع 6.2). ثانيًا التحقق من وصول CDP إلى القيمة المطلوبة لضمان ظروف احتراق مناسبة (راجع 5.2). ثالثًا فحص نظام الإشعال والتأكد من عمل الـIgniter فعليًا ووصول الجهد والطاقة المطلوبين له. رابعًا التأكد من وصول سرعة مولّد الغاز فعليًا (لا على الشاشة فقط) إلى عتبة الإشعال الدنيا. خامسًا فحص فتح صمامات الوقود والحاقنات فعليًا (لا إشارة التأكيد الراجعة فقط). سادسًا التأكد من سلامة إشارة كاشف اللهب نفسها. وبالتوازي مع ذلك كله، مراجعة تسلسل البدء والسماحات والتشابكات والمؤقتات والإنذارات في الـController (12.10) للتأكد من أن المشكلة ليست في منطق التحكم نفسه.

القياسات: ضغط وتدفق الوقود عند نقطة القياس كانا ضمن المدى الطبيعي تمامًا. ووصل CDP إلى القيمة المتوقعة لظروف التشغيل نفسها. وسرعة مولّد الغاز مطابقة لعتبة الإشعال المحددة. لكن الفحص الفيزيائي المباشر لكابل الإشعال وفوهة الشمعة (Igniter Plug) كشف تآكلًا واضحًا في فجوة الشرارة (Spark Gap) أوسع بكثير من المدى المسموح في مواصفات الشركة الصانعة — نتيجة عدد كبير من دورات التشغيل التراكمية دون استبدال دوري.

السبب الجذري: فجوة شرارة الـIgniter اتسعت بفعل التآكل التراكمي الطبيعي حتى تجاوزت الحد الذي تستطيع عنده الطاقة المتاحة أن تنتج شرارة فعّالة بشكل موثوق — فالشرارة كانت تحدث أحيانًا بصورة ضعيفة/متقطعة (لا غيابًا كاملًا)، وهذا بالضبط سبب صعوبة اكتشافها بالقياسات الكهربائية العامة (فالجهد والطاقة كانا يبدوان طبيعيين في الفحص الأولي)، ولا تُكتشف إلا بالفحص الفيزيائي المباشر.

الإجراء التصحيحي: استبدال شمعة/فوهة الإشعال (Igniter Plug) بالكامل بقطعة جديدة مطابقة لمواصفات فجوة الشرارة الصحيحة، والتأكد من محاذاة صحيحة لموضعها بالنسبة لمنطقة الاحتراق. أُعيدت محاولة الإشعال بعد الاستبدال ونجحت من المحاولة الأولى.

الدرس المستفاد: يستحق فحص فجوة شرارة الـIgniter الفيزيائية (لا قراءة الجهد/الطاقة الكهربائية فقط) أن يكون بند صيانة وقائية دوري مستقل (يُربط بعدد ساعات التشغيل التراكمية أو عدد محاولات الإشعال، بفكرة EOH نفسها التي شرحناها في 8.4)، لا فحصًا تفاعليًا بعد فشل إشعال فعلي فقط — لأن التآكل التدريجي في الفجوة

غالبًا يعطي أعراضًا متقطعة (نجاح إشعال أحيانًا وفشل أحيانًا) قبل أن يصل إلى فشل كامل ومتكرر، وهذا النمط المتقطع بالذات مؤشر مبكر يستحق الانتباه بدل تجاهله كـ«حظ سيء» عابر.

حالة 2: انحباس الضاغط أثناء انتقالية سريعة (Compressor Surge)

العرض: أثناء انتقالية تشغيلية سريعة، سُمعت ضربة/صوت غير طبيعي مميّز من جهة الضاغط، ترافق مع تذبذب لحظي في قراءة CDP وانخفاض مؤقت في سرعة الدوران — عرض كلاسيكي لدورة انحباس واحدة أو أكثر (راجع 5.2 لفهم الظاهرة فيزيائيًا).

البيانات الأولية: كان توقيت الحدث أثناء انتقالية سريعة (لا في تشغيل مستقر بحمل ثابت). وأظهر سجل حركة صمامات النزف (Bleed Valves) وريش التوجيه المتغيرة (IGV/VSV، راجع 9.5) في اللحظة نفسها تأخرًا واضحًا في استجابة صمامات النزف عن الأمر الصادر لها من نظام التحكم.

الأسباب المحتملة: تأخر استجابة صمامات النزف/التفريغ عن الأمر الصادر (سواء لعطل ميكانيكي في الصمام نفسه، أو ضعف في ضغط هواء التحكم المغذّي للمشغّل، أو تأخر في منطق الكشف والأمر نفسه في الـ Controller) ← منطق تحكم IGV غير متزامن بشكل صحيح مع سرعة التغيّر الفعلية أثناء الانتقالية ← تلوث ضاغط شديد يقلّل هامش الانحباس الطبيعي أصلًا (راجع 8.5) ويجعل الوحدة أقرب إلى خط الانحباس حتى في التشغيل العادي.

خطوات التحقيق: مراجعة زمن استجابة صمامات النزف المسجّل فعليًا مقابل زمن الاستجابة المصمَّم له في مواصفات الوحدة. فحص ضغط هواء التحكم (Instrument Air) المغذي لمشغّلات الصمامات وقت الحدث بالذات (لا بعده). مراجعة اتجاه أداء الضاغط قبل الحدث (8.5) لاستبعاد أو تأكيد احتمال تلوث سابق قلّل هامش الانحباس أصلًا. وأخيرًا فحص (Borescope 8.4) لريش الضاغط بعد الحدث — حتى لو لم يظهر اهتزاز غير طبيعي فورًا — لتقييم أي ضرر تراكمي محتمل في الريش نتيجة موجة الصدمة العكسية أثناء الانحباس.

القياسات: كان زمن الاستجابة المسجّل لصمامات النزف أبطأ بشكل ملموس من الزمن المصمَّم له في مواصفات الوحدة، وتحديدًا خلال النافذة الزمنية نفسها التي وقع فيها الحدث. وكان ضغط هواء التحكم في مداه الطبيعي (استُبعد كسبب). ولم يُظهر اتجاه أداء الضاغط قبل الحدث تدهورًا يستدعي القلق (استُبعد تلوث الضاغط كسبب رئيسي). ولم يُظهر فحص Borescope بعد الحدث ضررًا واضحًا في ريش الضاغط.

السبب الجذري: تأخر استجابة صمامات النزف (Bleed Valves) عن الفتح بالتوقيت المطلوب أثناء الانتقالية السريعة — فبمجرد أن تأخرت استجابة الصمامات عن التغيّر السريع في حالة التشغيل، فقد الضاغط هامش الاستقرار ودخل في دورة انحباس واحدة قبل أن تعود الوحدة إلى الاستقرار.

الإجراء التصحيحي: مراجعة وضبط زمن استجابة مشغّلات صمامات النزف (فحص ميكانيكي للصمام نفسه، وتأكيد كفاية ضغط هواء التحكم في كل ظروف التشغيل، لا وقت الفحص الساكن فقط)، مع تحديث دوري لبرنامج فحص هذه الصمامات تحديدًا كبند صيانة وقائية مستقل نظرًا لحرجية دورها أثناء الانتقاليات السريعة تحديدًا.

الدرس المستفاد: هذا مثال مباشر ومهم على أهمية مزامنة زمن الاستجابة الفعلي لعناصر التحكم بالهواء (9.5) مع سرعة التغيّر الفعلية أثناء الانتقاليات الحرجة — **التصميم الصحيح لمنطق التحكم ليس كافيًا وحده**؛ إذ يجب أن يجاري زمن التنفيذ الفعلي للمشغّلات (Actuators) هذا المنطق فعليًا، لا نظريًا فقط. وفحص زمن استجابة الصمامات الحرجة يستحق أن يكون جزءًا من الفحص الدوري الروتيني، لا فحصًا تفاعليًا بعد حدث انحباس فعلي فقط.

حالة 3: عطل بطاقة اتصال بين TCS وDCS (Communication Card Failure)

العرض: فقدت شاشة DCS المركزية (راجع 11.1) فجأة كل الإشارات الواردة من نظام تحكم التوربين (TCS) — القيم توقفت عن التحديث وتجمّدت (Frozen) عند آخر قراءة قبل الانقطاع، دون أي إنذار قطع (Trip) فعلي من التوربين نفسه.

البيانات الأولية: استمر التوربين في العمل طبيعيًا محليًا (Local HMI في غرفة التحكم المحلية، راجع 9.1)، وكل مؤشراته المحلية طبيعية — المشكلة مقتصرة على وصول البيانات إلى DCS تحديدًا. ويوضح سجل الأحداث في الـDCS توقيت انقطاع مفاجئ ومتزامن لكل الإشارات دفعة واحدة، لا تدهورًا تدريجيًا أو فقدان إشارات منفردة.

الأسباب المحتملة: عطل في بطاقة الاتصال (Communication Card) نفسها في أحد الطرفين (TCS أو DCS). قطع فيزيائي في كابل الشبكة أو منفذ الاتصال. عطل في جهاز الشبكة الوسيط (Switch أو Gateway، راجع 11.8). إعادة تشغيل أو تحديث غير مخطط له في أحد النظامين. مشكلة إعداد شبكي (IP Conflict أو تغيّر إعداد دون تنسيق).

خطوات التحقيق: أولًا التأكد من أن التوربين نفسه سليم فعليًا (تم، عبر الشاشة المحلية) لعزل المشكلة كمشكلة اتصال بحتة وليست مشكلة تشغيلية حقيقية. ثانيًا فحص مؤشرات حالة بطاقة الاتصال في كل طرف (أضواء الحالة أو التشخيص الداخلي في الـController). ثالثًا فحص الاتصال الفيزيائي (الكابل، المنفذ) بصريًا. رابعًا مراجعة سجل أحداث الشبكة الوسيطة (Switch/Gateway) بحثًا عن أي حدث متزامن مع توقيت الانقطاع. خامسًا مراجعة سجل تغييرات الإعدادات (Change Log) لأي تحديث أو صيانة مجدولة تزامنت مع الحدث.

القياسات: كان التوربين محليًا طبيعيًا 100% في كل مؤشراته. وأظهرت بطاقة الاتصال في جانب TCS مؤشر حالة «خطأ» (Fault) واضحًا عند الفحص المباشر. والكابل والمنفذ الفيزيائي سليمان بصريًا. ولم يُظهر سجل الشبكة الوسيطة أي حدث في جانبها في التوقيت نفسه (استُبعدت كسبب). ولم يُظهر سجل التغييرات أي صيانة أو تحديث مجدول في التوقيت نفسه.

السبب الجذري: عطل داخلي فعلي في بطاقة الاتصال (Communication Card) في جانب TCS نفسه — عطل عتاد (Hardware) وليس مشكلة إعداد أو شبكة خارجية.

الإجراء التصحيحي: استبدال بطاقة الاتصال المعطوبة بأخرى مطابقة، وإعادة تحميل إعدادات الاتصال (إن لزم) من نسخة احتياطية موثّقة مسبقًا. بعد الاستبدال، عادت كل الإشارات إلى الـDCS فورًا دون أي تدخل إضافي في التوربين نفسه.

الدرس المستفاد: أهم درس هنا إجرائي لا تقني: **يجب أن تكون الخطوة الأولى دائمًا التأكد من سلامة التوربين محليًا قبل أي تشخيص لمشكلة الاتصال نفسها** — فدون هذا التأكيد المبكر يظل احتمال الخلط بين «مشكلة اتصال» و«مشكلة تشغيلية حقيقية غير معروضة» قائمًا، وقد يؤدي إلى قرارات خاطئة (كإيقاف الوحدة دون داعٍ فعلي). وثانيًا، اختصر وجود نسخة احتياطية موثّقة ومحدَّثة لإعدادات الاتصال (راجع 11.6) وقت الاستعادة بشكلٍ كبير بعد استبدال البطاقة.

حالة 4: قواطع كاذبة متكررة بدون سبب واضح (Recurring Nuisance Trips)

العرض: توقفت الوحدة عن العمل بقاطع مفاجئ ثلاث مرات خلال أسبوعين، وفي كل مرة سجل نظام التحكم سبب القطع كـ«ارتفاع اهتزاز» (High Vibration، راجع 7.4)، لكن الفحص الفيزيائي المباشر بعد كل حادثة لم يكشف أي دليل ملموس على مشكلة اهتزاز حقيقية في المحامل أو العمود.

البيانات الأولية: وقعت حالات القطع الثلاث في ظروف تشغيلية مختلفة تمامًا (سرعات وأحمال مختلفة)، ولا يوجد نمط زمني واضح (ليست في الساعة نفسها من اليوم ولا في ظرف تشغيل محدد). ويُظهر سجل الاتجاه (Trend) لقراءة الاهتزاز قبل كل قطع قفزة مفاجئة وحادة جدًا في القيمة (لا ارتفاعًا تدريجيًا) تتجاوز حد القطع لجزء من الثانية ثم تعود مباشرة إلى قيمتها الطبيعية.

الأسباب المحتملة: مشكلة اهتزاز ميكانيكية حقيقية لكنها متقطعة وصعبة الإثبات بالفحص البصري. عطل في حساس الاهتزاز نفسه أو في كابل توصيله (تشويش كهربائي، اتصال غير محكم). تداخل كهرومغناطيسي (EMI) على إشارة الحساس من مصدر خارجي. خطأ في المعايرة أو في منطق معالجة الإشارة في الـController (مثلًا حد قطع غير مناسب فعليًا لظروف التشغيل الطبيعية).

خطوات التحقيق: أولًا فحص الحساس وكابل التوصيل فيزيائيًا (اتصال، تأريض، حالة الكابل العامة) بحثًا عن أي علامة ضعف اتصال. ثانيًا مراجعة توقيت حالات القطع الثلاث بدقة عالية جدًا (على مستوى المللي ثانية إن أمكن) لمقارنتها بأي حدث آخر متزامن في الوحدة (تشغيل معدة كهربائية قريبة، تبديل مصدر تغذية، إلخ) قد يسبب تداخلًا كهرومغناطيسيًا لحظيًا. ثالثًا مراجعة نوع الحساس ومسار كابله الفيزيائي بحثًا عن قرب من مصادر تشويش معروفة (كابلات طاقة عالية، محركات كبيرة). رابعًا التأكد من سلامة التأريض (Grounding/Shielding) الخاص بكابل الحساس تحديدًا.

القياسات: الحساس وكابله سليمان ظاهريًا في الفحص البصري الأولي. لكن فحصًا أعمق للتأريض كشف أن درع الكابل (Cable Shield) غير موصول توصيلًا سليمًا عند الطرف المخصص لتأريضه — توصيل جزئي مرتخٍ لا انقطاع كامل، وهذا بالضبط سبب صعوبة اكتشافه في الفحص السريع الأول. وتزامن توقيت حالات القطع الثلاث (بفارق ثوانٍ قليلة) مع تشغيل معدة كهربائية كبيرة قريبة في كل مرة، وفق سجلات المنشأة العامة.

السبب الجذري: درع كابل حساس الاهتزاز غير مؤرَّض بشكل صحيح من أحد طرفيه، ما جعل الكابل عرضة لالتقاط تداخل كهرومغناطيسي لحظي من معدات كهربائية قريبة عند تشغيلها — فأنتج التداخل نبضة قصيرة جدًا في إشارة الاهتزاز تجاوزت حد القطع لحظيًا، رغم أن الاهتزاز الفعلي في المحمل كان طبيعيًا تمامًا طوال الوقت.

الإجراء التصحيحي: إعادة توصيل درع الكابل بشكل صحيح على طرف واحد محدد فقط (وفق معيار التأريض المتّبع في المنشأة، لتفادي حلقة تأريض Ground Loop إن وُصِّل من الطرفين — راجع 12.1 موضوع تهيئة الإشارة). وتُوبع الأداء عدة أسابيع بعد الإصلاح دون تكرار المشكلة.

الدرس المستفاد: القاطع «الكاذب» لا يعني بالضرورة أن السبب وهمي أو غير مهم — بل يعني أن **السبب الحقيقي ليس المكوّن الذي أشار إليه القاطع مباشرة**. والتمييز الدقيق بين ارتفاع مفاجئ حاد جدًا (Spike) وارتفاع تدريجي في قراءة الاهتزاز (راجع نمط «القواطع المتكررة والكاذبة» في 10.18) كان المفتاح لتوجيه التحقيق بعيدًا عن «مشكلة ميكانيكية في المحمل» ونحو «مشكلة في سلامة الإشارة نفسها» من البداية — وكان سيوفر وقت تشخيص كبيرًا لو أُخذت هذه الملاحظة بجدية من أول قطع بدل انتظار التكرار الثالث.

حالة 5: ارتفاع اهتزاز غير طبيعي بعد فحص كبير (Post-Overhaul Vibration Investigation)

العرض: بعد إعادة تشغيل الوحدة عقب فحص كبير (Major Inspection، راجع 8.4) شمل فك وتركيب عدة مكونات دوّارة، ظهرت قراءة اهتزاز أعلى من الطبيعي بشكل ملحوظ (لكنها لم تصل إلى حد الإنذار أو القطع) بمجرد الوصول إلى السرعة الكاملة — قراءة لم تكن موجودة قبل الفحص في ظروف التشغيل نفسها.

البيانات الأولية: توقيت ظهور المشكلة (مباشرة بعد إعادة التجميع، وليس بعد فترة تشغيل طويلة) يستبعد فورًا فرضيات التآكل التدريجي أو تلوث الضاغط، ويوجّه الشك مباشرة نحو شيء تغيّر أثناء الفحص نفسه. وأظهر توقيع الاهتزاز (Vibration Signature) مكوّنًا قويًا عند تردد 1X (مرة واحدة لكل دورة كاملة للعمود).

الأسباب المحتملة: عدم توازن (Unbalance) في مكوّن دوّار أُعيد تركيبه أو استُبدل أثناء الفحص. سوء محاذاة (Misalignment) بين الوحدات المتتالية بعد إعادة التجميع. ربط أو تثبيت غير محكم لمكوّن معيّن (شد براغي غير كافٍ). تلف طفيف في محمل أُعيد تركيبه دون ملاحظته أثناء التجميع.

خطوات التحقيق: بما أن توقيع الاهتزاز أظهر تردد 1X تحديدًا (لا 2X أو ترددًا أعلى)، راجع 8.4 لتحديد أي من «عدم التوازن» أو «سوء المحاذاة» أرجح — فعدم التوازن يعطي عادة اهتزازًا شعاعيًا (Radial) بتردد 1X يزداد بما يقارب مربع السرعة، بينما يعطي سوء المحاذاة عادة مكوّنًا محوريًا (Axial) ملحوظًا إضافة إلى الشعاعي. وكان تحليل اتجاه الاهتزاز (شعاعي مقابل محوري) عند مواقع المحامل المختلفة الخطوة الحاسمة التالية، تلاه فحص سجلات إعادة التجميع نفسها (أي مكوّن استُبدل، وهل أُجريت موازنة له بعد الاستبدال).

القياسات: كان الاهتزاز شعاعيًا في الغالب لا محوريًا (ما يستبعد سوء المحاذاة كسبب رئيسي). وأظهر سجل إعادة التجميع أن أحد المكونات الدوّارة استُبدل بقطعة جديدة أثناء الفحص. وأظهرت مراجعة سجل الموازنة لهذه القطعة الجديدة تحديدًا أنها لم تخضع لموازنة نهائية في موقع التركيب (Field Balancing) بعد التركيب — بل لموازنة مصنعية عامة قبل الشحن فقط.

السبب الجذري: عدم توازن طفيف في المكوّن الدوّار المستبدَل، ناتج عن الفارق الطبيعي (ولو الصغير) بين الموازنة المصنعية العامة وظروف التركيب الفعلية في هذه الوحدة بالذات — فالقطعة لم تخضع لموازنة نهائية في موقع التركيب رغم أنها استُبدلت بالكامل.

الإجراء التصحيحي: إجراء موازنة ميدانية (Field Balancing) للمكوّن المستبدَل في موقع التشغيل الفعلي، بإضافة أوزان موازنة صغيرة في المواضع المحددة من قياسات توقيع الاهتزاز. بعد الموازنة، عادت قراءة الاهتزاز لمستواها الطبيعي المرجعي.

الدرس المستفاد: أي مكوّن دوّار يُستبدل أثناء فحص كبير — حتى لو جاء من المصنّع «متوازنًا» أصلًا — يستحق موازنة ميدانية تأكيدية بعد التركيب كخطوة إجرائية ثابتة، لا خطوة اختيارية تُضاف فقط إن ظهرت مشكلة لاحقًا. وهذا يوفر وقت توقف إضافيًا (لإعادة فتح الوحدة لاحقًا لأجل الموازنة) إن أُدرجت الخطوة ضمن إجراءات إعادة التجميع القياسية من البداية.

حالة ٥: كشف غاز مرتفع داخل حجرة التوربين أثناء التشغيل (Turbine Enclosure High Gas Detection)

العرض: أثناء التشغيل الطبيعي على حمل ثابت، ظهر إنذار «غاز مرتفع» (High Gas) من أحد كواشف الغاز داخل حجرة التوربين (راجع 6.7). وكانت الوحدة تعمل بشكل طبيعي تمامًا — لا تغيّر في الحمل، ولا في حرارة العادم، ولا في الاهتزاز، ولا أي إنذار آخر مصاحب.

البيانات الأولية: كان الكاشف المُنذِر واحدًا فقط من مجموعة الكواشف الموزّعة داخل الحجرة، وبقيت باقي الكواشف عند قراءة صفر. ومراوح التهوية تعمل بشكل طبيعي، والضغط التفاضلي للحجرة ضمن المدى المعتاد. وحرارة الحجرة طبيعية. ولا أعمال صيانة أو فك تجميعات على نظام الوقود في الأيام السابقة.

الأسباب المحتملة (من الأبسط للأكثر تعقيدًا): عطل أو انحراف معايرة في الكاشف نفسه (قراءة كاذبة). تلوث أو انسداد في غطاء الكاشف. تسرّب حقيقي صغير من وصلة أو حشوة في نظام وقود الغاز داخل الحجرة (6.2). تسرّب من مصدر خارج الحجرة سُحب إلى الداخل عبر مسار التهوية. خلل في منطق التصويت أو في بطاقة الإدخال المرتبطة بالكاشف (12.1).

خطوات التحقيق: الترتيب المتّبع كان تصاعديًا بالخطورة والتكلفة، مع الاحتفاظ بمبدأ «الأمان أولًا — العرض يُعامَل كحقيقي حتى يُثبَت العكس»:

1. التحقق من صحة الكاشف نفسه **(Detector Health):** مراجعة حالة التشخيص الذاتي للكاشف، تاريخ آخر معايرة، وسجل قراءاته خلال الأيام السابقة بحثًا عن انحراف تدريجي (Drift) أو قفزات مفاجئة سابقة.
2. **التحقق من التهوية:** تأكيد أن مراوح التغذية والسحب تعمل فعليًا وأن معدل التدفق طبيعي — لأن ضعف التهوية وحده كفيل برفع تركيز أي تسرّب صغير جدًا كان سابقًا تحت عتبة الكشف.
3. **قراءة باقي الكواشف:** مقارنة قراءات كل الكواشف في الحجرة — كاشف واحد يقرأ بينما البقية صفر يرجّح مشكلة موضعية (تسرّب صغير قريب منه) أو مشكلة بالكاشف نفسه؛ ارتفاع تدريجي بعدة كواشف يرجّح تسرّبًا حقيقيًا يتوسّع.
4. **البحث عن مصدر التسرّب:** فحص وصلات وحشوات ومسارات الغاز في محيط الكاشف المُنذِر تحديدًا، باستخدام كاشف غاز محمول ومحلول كشف التسرّب — مع مراعاة أن التهوية تحرّك الغاز، فمصدر التسرّب قد يكون **أعلى مجرى الهواء** من الكاشف وليس عنده مباشرة.

5. **عـزل الوقـود إن لـزم، وقطـع الوحـدة إن لـزم:** إن تأكـد التسرّب أو ارتفعـت القـراءة لمسـتوى العتبـة العليـا، يُنفَّـذ منطـق العـزل والقطـع المصمَّـم فـي المنشـأة (6.7، 7.8).

القياسات: التشخيص الذاتي للكاشف لم يُظهر أي خطأ، ومعايرته كانت سارية. وبقيت قراءات باقي الكواشف صفرًا، لكن الكاشف المحمول أظهر قراءة صغيرة ومتكررة عند نقطة وصل محددة في مسار وقود الغاز داخل الحجرة، أعلى مجرى الهواء من موضع الكاشف الثابت — أي أن الكاشف الثابت كان يقرأ نتيجة صحيحة لتسرّب حقيقي، وليس قراءة كاذبة.

السبب الجذري: تسرّب صغير جدًا عند وصلة ميكانيكية في مسار وقود الغاز داخل الحجرة، نتج عن ارتخاء تدريجي في الشدّ بفعل الدورات الحرارية المتكررة (تسخين وتبريد مع كل بدء وإيقاف). وكان التسرّب أصغر من أن يُحدث أي تغيّر ملحوظ في أداء الوحدة أو في ضغط الوقود، لكنه كافٍ ليتراكم موضعيًا ويصل لعتبة الإنذار عند الكاشف الأقرب.

الإجراء التصحيحي: إيقاف مخطط للوحدة، عزل نظام وقود الغاز وتنفيسه، إعادة شدّ الوصلة وفق قيمة العزم المحددة (واستبدال الحشوة)، ثم اختبار إحكام **(Leak Test)** بضغط التشغيل قبل إعادة التشغيل. بعد إعادة التشغيل، تُوبعت قراءة الكاشف لعدة ساعات للتأكد من عودتها للصفر واستقرارها، مع التحقق من خلوّ الجو **(Gas-Free Verification)** داخل الحجرة قبل السماح بأي دخول للأفراد.

الدرس المستفاد: ثلاث نقاط عملية خرجت من هذه الحالة:

- **إنذار كاشف غاز واحد ليس «إنذارًا كاذبًا» حتى يُثبَت ذلك.** الخطأ الأسوأ الممكن هنا هو تجاهل الإنذار أو كتمه لمجرد أن باقي الكواشف صفر — كاشف واحد يقرأ يعني بالضبط أن هناك شيئًا قريبًا منه.
- **مسار الهواء يجب أن يدخل بالتحليل.** التسرّب لم يكن عند الكاشف، بل أعلى مجرى التهوية منه. البحث حصريًا «تحت الكاشف» كان سيضيّع وقتًا طويلًا.
- **الوصلات المعرّضة للدورات الحرارية تستحق فحص إحكام دوريًا** ضمن برنامج الصيانة الوقائية (8.2)، لا انتظارًا لإنذار غاز يكشفها. وهذه الحالة تحديدًا هي المثال الأوضح على الترابط بين التوربين، نظام الوقود، نظام الحريق والغاز، التهوية، منطق الإيقاف الطارئ، ونظام التحكم — كلها ظهرت في حدث واحد.

حالة 7: فشل متكرر بالتزامن مع الشبكة (Repeated Synchronisation Failure)

العرض: أثناء محاولة ربط الوحدة بالشبكة بعد الوصول للسرعة الكاملة، يرفض النظام إصدار أمر إغلاق قاطع المولد. الوحدة مستقرة تمامًا على السرعة الكاملة، ولا يوجد أي إنذار على التوربين نفسه — لا حرارة، ولا اهتزاز، ولا ضغط زيت. المحاولة تُعاد عدة مرات وتفشل بنفس الشكل.

البيانات الأولية: جهاز التزامن الآلي يُظهر أنه يعمل ويرسل أوامر ضبط، لكن أمر الإغلاق لا يصدر. وقراءتا تردد المولد وجهده تبدوان قريبتين من قيم الشبكة. ومقياس التزامن يدور ببطء ولا يستقر عند الساعة 12. ولا يوجد إنذار «فشل تزامن» صريح، بل مجرد عدم حدوث الإغلاق.

الأسباب المحتملة (من الأبسط للأكثر تعقيدًا): فارق تردد أكبر من النافذة المسموحة (18.1). فارق جهد خارج الحد المسموح — أي مشكلة في ضبط منظم الجهد AVR. عطل أو سوء ضبط في جهاز التزامن الآلي نفسه. مرحّل التحقق من التزامن (25) يمنع الإغلاق لسبب صحيح غير ظاهر. مشكلة في قياس أحد الجهدين المرجعيين (جهد الشبكة أو جهد المولد) الواصل لجهاز التزامن. عطل في دائرة أمر الإغلاق نفسها.

خطوات التحقيق: المنهج المتَّبع كان تطبيقًا مباشرًا لمنهجية سلسلة الإشارة (19.5) — تنصيف بدل مشي:

1. **الفصل بين «لم يُصدَر الأمر» و«صدر الأمر ولم يُنفَّذ»:** مراجعة سجل الأحداث للتأكد هل ظهر أمر الإغلاق أصلًا. النتيجة: **لم يظهر** — أي أن المشكلة قبل دائرة الإغلاق، لا بها.
2. **فحص الشروط الأربعة واحدًا واحدًا** بدل التعامل مع «التزامن» ككتلة واحدة: الجهد، التردد، فارق الطور، وتعاقب الأطوار.
3. **مقارنة قياسات جهاز التزامن بقياسات مستقلة** من نظام آخر في المحطة لنفس النقطتين — وهذه الخطوة هي التي غيّرت مسار التحقيق.
4. **مراجعة إعدادات النوافذ المسموحة** في جهاز التزامن وفي مرحّل التحقق: هل ضُيِّقت في وقت سابق ولم يُوثَّق ذلك؟

القياسات: أظهرت المقارنة أن **قراءة جهد المولد الواصلة لجهاز التزامن تحديدًا** تختلف بشكل ملموس عن القراءة الفعلية المقاسة من مصدر مستقل، بينما قراءة جهد الشبكة كانت مطابقة. أي أن الجهاز كان يرى فارق جهد بين المولد والشبكة **لا وجود له فعليًا**، فيرفض بشكل صحيح تمامًا إصدار أمر الإغلاق. وقاد تتبّع مسار تلك الإشارة إلى وصلة ضعيفة الشد في الدائرة الثانوية لمحوّل الجهد المغذّي لجهاز التزامن.

السبب الجذري: خلل في سلسلة قياس الجهد المرجعي للمولد (لا خلل في المولد ولا في جهاز التزامن ولا في التوربين). الحماية والمنطق عملا **بالشكل الصحيح تمامًا:** رفض الربط عند وجود فارق جهد ظاهر هو السلوك المطلوب — والمشكلة كانت أن المُدخَل نفسه كاذب.

الإجراء التصحيحي: إصلاح الوصلة وشدّها وفق المواصفة، ثم **التحقق من طرفي السلسلة** (19.2): مقارنة القراءة عند جهاز التزامن بالقراءة الفعلية عند المصدر، عند أكثر من نقطة تشغيل. بعدها تمّ التزامن من المحاولة الأولى.

الدرس المستفاد:

- **"الحماية تمنع الفعل" ليست عطلًا بالحماية.** أول رد فعل شائع في هذه الحالة هو الشك في جهاز التزامن أو التفكير في توسيع النوافذ المسموحة — وكلاهما كان سيؤدي إلى **ربط الوحدة على فارق جهد حقيقي** لو كان القياس صحيحًا، بنتائج ميكانيكية خطيرة (18.1).
- **افحص المُدخَل قبل أن تشك بالمنطق.** المنطق الذي «يرفض» هو غالبًا منطق يعمل — والسؤال الصحيح: على أي معلومة بنى رفضه؟
- **الفصل بين «لم يُصدَر الأمر» و«صدر ولم يُنفَّذ» يجب أن يكون الخطوة الأولى دائمًا** في أي تحقيق يخص أمرًا لم يحدث — فهو وحده يقسّم مساحة البحث إلى نصفين.

حالة 8: انزياح جماعي بقراءات حرارة العادم (Group Shift in Exhaust Thermocouple Readings)

العرض: أثناء تشغيل مستقر على حمل ثابت، ارتفع متوسط حرارة العادم بمقدار ملحوظ خلال فترة قصيرة، واقترب من حد الإنذار. ولم يصاحب ذلك أي تغيّر في الحمل، ولا في تدفق الوقود، ولا في ضغط تفريغ الضاغط، ولا في الاهتزاز.

البيانات الأولية: مراجعة القراءات الفردية أظهرت أن **جميع** ثرموكابلات العادم تقريبًا ارتفعت **بنفس المقدار وبنفس اللحظة**. وبقي فارق حرارة العادم (Spread، راجع 10.3) كما هو تمامًا — أي أن التوزيع النسبي بين الثرموكابلات لم يتغيّر إطلاقًا، وإنما انزاح المستوى كله معًا.

الأسباب المحتملة: تدهور فعلي في الأداء أو في الاحتراق (المتوقع أولًا). تغيّر في جودة الوقود (6.2). انسداد في فلاتر السحب رفع حرارة الدورة. خلل في تعويض الوصلة الباردة لبطاقة الإدخال (12.1). خطأ في إعداد التدريج بعد عمل سابق على النظام.

خطوات التحقيق: الملاحظة الحاسمة كانت **نمط الانزياح نفسه**، لا مقداره:

1. سؤال أول: هل تغيّر **Spread؟** لا. وهذا يستبعد بقوة أي مشكلة احتراق موضعية — فعطل حاقن أو ثرموكابل واحد يغيّر التوزيع، لا يرفع الجميع بالتساوي.
2. **هل ارتفع كل شيء آخر بما يتناسب؟** لا. لم يتغيّر تدفق الوقود ولا القدرة — وهذا لا يستقيم فيزيائيًا مع ارتفاع حقيقي بحرارة العادم عند نفس الحمل.
3. **هل تنتمي الثرموكابلات المرتفعة لنفس البطاقة أو نفس بلوك الأطراف؟** هذا السؤال — المستمد مباشرة من قاعدة «العنصر المشترك» (19.6) — قاد للإجابة.
4. **قياس حرارة بلوك الأطراف فعليًا** ومقارنتها بقراءة حسّاس تعويض الوصلة الباردة الخاصة به.

القياسات: الثرموكابلات المرتفعة كانت كلها على **نفس مجموعة الأطراف**، وقراءة حسّاس تعويض الوصلة الباردة لتلك المجموعة كانت أعلى بشكل واضح من الحرارة الفعلية المقاسة عند البلوك. أي أن النظام كان يعوّض بحرارة مرجعية أعلى من الحقيقية، فأضاف الفارق إلى كل قراءة على تلك المجموعة **بنفس المقدار** — وهو بالضبط النمط الملاحَظ.

السبب الجذري: خلل في حسّاس تعويض الوصلة الباردة (Cold Junction Compensation) لتلك المجموعة، تفاقم بوجود مصدر حرارة موضعي قرب الخزانة غيّر انتظام حرارة البلوك (12.1). ولم تكن هناك أي مشكلة في الاحتراق ولا في الأداء ولا في أي ثرموكابل داخل العادم.

الإجراء التصحيحي: استبدال حسّاس التعويض ومعالجة مصدر الحرارة الموضعي حول الخزانة، ثم التحقق من عودة القراءات لمستواها المرجعي عند نفس ظروف التشغيل — بمقارنة مباشرة مع قراءات مجموعة أخرى غير متأثرة.

الدرس المستفاد:

- **النمط أهم من القيمة.** ارتفاع **جماعي متساوٍ** يشير للوصلة الباردة أو للتدريج؛ وارتفاع **متفاوت** يشير للاحتراق. هذا التمييز وحده يختصر التحقيق من أيام إلى ساعة.

- **Spread** هو أداة التمييز الأقوى في مصفوفة الحرارة: ثباته أثناء ارتفاع المتوسط دليل قوي على أن المشكلة بالقياس لا بالعملية.
- **لا تسمح لقراءة مرتفعة وحدها بأن تقود لقرار تشغيلي** (خفض حمل، إيقاف، فتح الوحدة) قبل التحقق من اتساقها مع بقية القياسات: تدفق الوقود، القدرة، وضغط الضاغط. **القياس الذي لا يتسق مع الفيزياء المحيطة به يُشتبَه به هو أولًا.**

حالة 9: ارتفاع فارق حرارة العادم — من الثرموكابل إلى فوهة الوقود

هذه من أكثر الحالات التي واجهتها تكرارًا، وأكثرها تعليمًا — لأنها تختبر مبدأ الكتاب كله: **تحقّق من القياس أولًا، ثم حقّق في العملية.**

العرض: الوحدة تعمل بشكل مستقر، ويظهر إنذار فارق حرارة عادم مرتفع **(High Exhaust Temperature Spread)**. مراجعة القراءات الفردية تُظهر ثرموكابلًا واحدًا شاذًا بوضوح:

الثرموكابل	القراءة
T/C-1	545 °م
T/C-2	548 °م
T/C-3	547 °م
T/C-4	550 °م
T/C-5	**575 °م** ← أعلى بكثير
T/C-6	546 °م
T/C-7	549 °م
T/C-8	547 °م

القاعدة الأولى — لا تفترض أن المشكلة بالاحتراق: الخطوة الأولى ليست فتح الوحدة ولا اتهام غرفة احتراق، بل التأكد من أن **الثرموكابل نفسه سليم وأن القراءة التي يعطينا إياها صحيحة**. نراجع بالترتيب: حالة الثرموكابل وتشخيصه، التوصيلات، سلك التمديد (Extension Cable)، صندوق الوصل، خزانة التوزيع، قناة الإدخال (AI Channel)، المعايرة — ثم نقارن القراءة بجاراتها.

المسار الأول — القياس هو العطل: إن تبيّن أن الثرموكابل يعطي قراءة خاطئة، فهذه مشكلة قياس **(Instrumentation Problem)**، وتنتهي المعالجة بإصلاح أو استبدال الثرموكابل أو معالجة التوصيل أو القناة حسب السبب. ولا يُغلَق التحقيق إلا بعد التأكد من عودة الفارق لقيمته الطبيعية عند نفس ظروف التشغيل.

المسار الثاني — القراءة حقيقية: هنا فقط يبدأ التفكير بمنظومة الاحتراق. والسؤال الصحيح ليس «هل هناك عطل؟» بل: **لماذا هذه المنطقة بالذات حرارتها أعلى؟** فوجود منطقة أسخن من غيرها حول محيط العادم يعني أن الاحتراق **غير متجانس** — أي أن غرفة احتراق بعينها (أو نظام حقن الوقود المرتبط بها) تتصرف بشكل مختلف عن أخواتها. الاحتمالات:

انسداد جزئي في إحدى فوهات الوقود، أو عطل في الفوهة نفسها، أو تقييد في مسار الوقود المؤدي إليها، أو مشكلة في الحارق (Burner)، أو عدم انتظام في توزيع الوقود بين الغرف، أو ضعف في التذرير (Atomization) عند التشغيل بالوقود السائل، أو ترسبات وتلوث (Fouling / Deposits) في منطقة الفوهة والحارق، أو اختلال في توزيع الهواء مقابل الوقود.

لماذا تكون المشكلة أوضح عند التشغيل بالديزل؟

هذه نقطة من صميم الخبرة العملية وتستحق تأكيدًا. عند التشغيل بالوقود السائل، تصبح جودة الرش والتذرير وتوزيع الوقود **أكثر حساسية بكثير** منها مع الغاز — لأن الغاز يخرج من الفوهة جاهزًا للاختلاط، بينما يحتاج السائل أن يتفتّت أولًا إلى رذاذ دقيق جدًا قبل أن يحترق. فأي انسداد جزئي أو ترسبات في فوهة الوقود **يغيّر نمط الرش نفسه**، والنتيجة سلسلة متتابعة:

تذرير رديء / توزيع وقود غير منتظم ← احتراق غير متجانس ← قراءة شاذة موضعية (منخفضة عند نقص الوقود الواصل للغرفة، ومرتفعة عند تأخّر اكتمال الاحتراق مع سوء التذرير) ← فارق حرارة عادم مرتفع

وسبب إضافي خاص بالوقود السائل يستحق الذكر: نقص هواء التذرير **(Atomising Air)**. في منظومات الوقود السائل، يُستخدم هواء مضغوط لمساعدة الفوهة على تفتيت الوقود. فانخفاض ضغط هواء التذرير أو تدفقه — لعطل في ضاغط هواء التذرير، أو تسريب، أو انسداد — يُنتج **أعراض الفوهة المسدودة نفسها تمامًا**: رش رديء واحتراق غير متجانس. وهذا سبب متكرر يُغفَل كثيرًا عند التحقيق، لأن الفوهة نفسها قد تكون سليمة تمامًا.

نقطة مفهومية جوهرية: الفارق المرتفع **ليس المشكلة نفسها** — هو عَرَض **(Symptom)** يخبرنا أن توزيع الحرارة حول العادم غير طبيعي. المشكلة الحقيقية دائمًا أبعد بخطوة أو خطوتين.

مسار التشخيص المنظّم:

فارق حرارة عادم مرتفع ← افحص الثرموكابلات ← إن كانت معطلة: أصلح/استبدل | إن كانت سليمة: افحص الاحتراق ← افحص نظام الوقود ← (وقود سائل: الفوهة والحارق والتذرير وهواء التذرير | وقود غازي: الفوهة وتوزيع الوقود) ← فحص الاحتراق بالمنظار (16.3)

حالة أقوى: أكثر من ثرموكابل مرتفع معًا

لو كانت القراءات على هذا النحو بدلًا من السابق:

الثرموكابل	القراءة
T/C-1	545 °م
T/C-2	548 °م
T/C-3	**575 °م** ← مرتفع
T/C-4	**578 °م** ← مرتفع
T/C-5	547 °م
T/C-6	549 °م
T/C-7	546 °م
T/C-8	548 °م

الصورة تختلف جوهريًا. ارتفاع ثرموكابلين **متجاورين معًا** يرجّح بقوة وجود **منطقة ساخنة حقيقية**، لا عطل في حسّاس منفرد — فمن غير المرجّح أن يتعطل حسّاسان متجاوران في اللحظة نفسها وبالمقدار نفسه. وهنا نبدأ **ربط مواقع الثرموكابلات بترتيب غرف الاحتراق**، فإذا وجدنا أن الثرموكابلات المرتفعة تقع في منطقة مرتبطة بغرفة احتراق بعينها، أصبح لدينا **اتجاه تحقيق قوي ومحدد** بدل بحث عام.

ولهذا يستحق الفارق أن يُراقَب لا المتوسط وحده

مثال يوضح الفكرة بالأرقام: لو كان متوسط حرارة العادم 550 °م، وأعلى قراءة 580 °م، وأدنى قراءة 545 °م — فإن الفارق = 580 − 545 = **35 درجة**. والمتوسط وحده يبدو طبيعيًا تمامًا ولا يثير أي شك، بينما توجد فعليًا **بقعة ساخنة** في منطقة محددة.

الخلاصة: **المتوسط يخبرك عن مستوى الحرارة؛ والفارق يخبرك عن تجانس الاحتراق** — وهما معلومتان مختلفتان تمامًا، والثانية هي التي تكشف المشاكل مبكرًا.

الدرس المستفاد:

- **لا تبدأ بتغيير القطعة التي ظهر عليها الإنذار — ابدأ بإثبات أن الإنذار نفسه حقيقي.** هذه الجملة تختصر فلسفة التشخيص كاملة، وتنطبق على كل حالة في هذا الفصل.
- **نمط الارتفاع يحدد اتجاه التحقيق:** ثرموكابل واحد شاذ يتّهم سلسلة القياس؛ اثنان متجاوران يتّهمان الاحتراق؛ والجميع بالتساوي يتّهم الوصلة الباردة أو التدريج (حالة 8).
- **الوقود السائل يستحق شكًّا مضاعفًا** في أي مشكلة تجانس احتراق — والتذرير وهواء التذرير جزء أصيل من قائمة الفحص، لا ملحق بها.

حالة 10: فشل حدوث الاشتعال أثناء بدء التشغيل — منهجية بدل التخمين

العرض: أثناء تسلسل بدء التشغيل، تصل الوحدة لمرحلة إشعال الوقود، لكن لا يحدث تثبيت للهب (Flame Establishment)، فيُلغى البدء تلقائيًا.

القاعدة الحاكمة: لا يجوز أن يُفترض مباشرةً أن المشكلة في جهاز الإشعال (Igniter) أو في صمام الوقود. هذان أول ما يخطر بالبال — وغالبًا ليسا السبب. الاشتعال يحتاج **ثلاثة عناصر مجتمعة**: وقود بالكمية والضغط الصحيحين، هواء بالظروف الصحيحة، ومصدر إشعال فعّال — وأي منها قد يكون الغائب. ولذلك تُتّبع منهجية فحص منظّمة بالترتيب:

1. **توفّر الوقود ووصوله فعليًا:** هل الغاز متوفر ويصل للتوربين بالضغط والتدفق المطلوبين؟ (6.2)
2. **ظروف الهواء:** هل وصل ضغط تفريغ الضاغط (CDP) للقيمة المطلوبة التي تضمن ظروف احتراق مناسبة؟

3. **نظام الإشعال:** هل يعمل جهاز الإشعال فعليًا، وهل يصله الجهد والطاقة المطلوبان؟
4. **السرعة:** هل وصلت سرعة مولّد الغاز للحد الأدنى للإشعال (Minimum Ignition Speed) المحدد من المصنّع؟ — وهنا يظهر ارتباط مباشر بمستويات السرعة المشروحة في 9.9.
5. **صمامات الوقود:** هل فتحت بالشكل الصحيح فعليًا (لا أمرًا فقط — راجع تدريب 3 في الفصل 21)؟
6. **فوهات الوقود:** هل تسمح بمرور الوقود، أم أن انسدادًا يمنعه؟
7. **كاشف اللهب:** هل يعمل بصورة صحيحة؟ — فقد يكون اللهب موجودًا فعلًا والكاشف هو الذي لا يراه.
8. **منطق التحكم:** مراجعة تسلسل البدء والسماحات والتشابكات والمؤقتات والإنذارات في المتحكم.

وبهذا الترتيب يضيق نطاق المشكلة تدريجيًا حتى نحدد ما إذا كان السبب متعلقًا بالوقود، أو الهواء، أو الإشعال، أو السرعة، أو نظام التحكم والقياس — بدل استبدال قطع بالتتابع أملًا في التوفيق.

إضافة خاصة بالتشغيل بالوقود السائل: يُضاف سبب مهم لقائمة الاحتمالات — نقص هواء التذرير **(Atomising Air)**. فدون هواء تذرير كافٍ لا يتفتّت الوقود السائل بالشكل المطلوب، ويصعب تثبيت اللهب أصلًا حتى لو كان كل ما سبق سليمًا. وهذا مثال ممتاز على أن **قائمة الاحتمالات نفسها تتغيّر بتغيّر نوع الوقود** — ومن لا ينتبه لذلك يبحث في المكان الخطأ.

حالة 11: ارتفاع حرارة حجرة التوربين

العرض: أثناء التشغيل، ترتفع حرارة حجرة التوربين (Turbine Enclosure) عن معدلها الطبيعي.

الخطوة الأولى دائمًا: التأكد من أن **حسّاس الحرارة وقراءة نظام التحكم يعملان بصورة صحيحة ودقيقة**. فقد تكون الحجرة بحالة طبيعية تمامًا والقياس هو المنحرف — وهذه هي القاعدة نفسها التي بنينا عليها الحالتين السابقتين.

بعد التأكد من سلامة القياس، نبدأ التحقيق بالأسباب المحتملة:

- تسرّب غاز ساخن **(Hot Gas Leak)** من أجزاء التوربين أو من نظام العادم — وصلة تمدد، أو حشوة، أو وصلة غلاف متدهورة.

- تسرّب هواء مضغوط **(Compressed Air Leak)** من نظام الهواء المضغوط، سواء من منطقة التوربين أو من جهة الضاغط. ونقطة مهمة يغفلها كثيرون: **الهواء المضغوط المتسرب ساخن أصلًا** (راجع المثال 2 في 2.6 — يخرج من الضاغط عند مئات الدرجات)، فتسريبه داخل الحجرة يرفع حرارتها مباشرة.
- أداء نظام التهوية **(Ventilation System):** هل معدل تدفق الهواء مناسب؟ هل المراوح والمخمدات (Dampers) تعمل بشكل صحيح وباتجاه الدوران الصحيح؟ (6.7)
- الضغط التفاضلي للحجرة (ΔP): مؤشر بالغ الأهمية — يُقارن بقيمه الطبيعية المعروفة، وأي تغيّر غير طبيعي فيه قد يشير إلى مشكلة في تدفق الهواء، أو انسداد، أو خلل في نظام التهوية.
- نظام كشف الغاز **(Gas Detection):** للتأكد من عدم وجود تسرّب وقود مصاحب — فبعض التسريبات ترفع الحرارة وتُدخل غازًا معًا.

مفتاح التشخيص — اقرأ المؤشرات مجتمعة لا منفردة: بمقارنة **حرارة الحجرة** + **الضغط التفاضلي** + **تدفق هواء التهوية** + **كشف الغاز** + **معطيات تشغيل التوربين** معًا، يضيق نطاق المشكلة بسرعة. فحرارة مرتفعة مع ΔP طبيعي تشير إلى مصدر حرارة داخلي (تسريب)؛ وحرارة مرتفعة مع ΔP شاذ تشير إلى مشكلة تهوية. وهذه بالضبط قوة القراءة المتقاطعة التي تكررت عبر هذا الفصل كله.

القاعدة التي تلخص الحالات الثلاث الأخيرة:

> **تحقّق من القياس أولًا، ثم حقّق في العملية.**
> (Always verify the measurement first, then investigate the process.)

وبصياغة أوسع تصلح منهجًا ثابتًا لأي حالة في هذا الكتاب:

مؤشر غير طبيعي ← تحقّق من الجهاز ← افحص الاتجاهات الزمنية ← حدّد المصادر المحتملة ← افحص المعطيات المرتبطة ← اعزل السبب ← السبب الجذري ← الإجراء التصحيحي.

13.2 من مجتمعات المهندسين حول العالم: مشاكل متداولة ودروسها

الحالات الإحدى عشرة السابقة من خبرتي المباشرة. هذا القسم مختلف: جمعت فيه أنماط مشاكل **يتداولها مهندسون من كل أنحاء العالم** على المنتديات الهندسية المتخصصة — وأشهرها منتدى Control.com الذي يضم أرشيفًا ضخمًا من نقاشات أعطال التوربينات الغازية، ومثله .Eng-Tips أعدت صياغة كل مشكلة وتعميمها بالكامل (فلا نقل حرفيًا ولا ذكر مواقع أو أشخاص)، واخترت تحديدًا ما يتكرر عبر منشآت مختلفة — لأن تكرار نفس المشكلة عند أناس لا يعرفون بعضهم هو أقوى دليل على أنها نمط عام يستحق مكانًا في مرجع.

وقبل الحالات، ملاحظة تستحق التأمل: أغلب هذه النقاشات — حتى أفضلها — **تنتهي بلا توثيق للحل النهائي**. صاحب المشكلة يختفي بعد أن تنحل مشكلته، ولا يعود ليكتب "كان السبب كذا". خذها درسًا معاكسًا: عند إغلاق أي تحقيق عندك، وثّق السبب الجذري والحل — فالتوثيق الغائب هو بالضبط ما يجعل الجميع يعيدون نفس التحقيق من الصفر.

النمط الأول: قطع بفارق حرارة العادم أثناء تفريغ الحمل — والسبب بمنظومة الوقود لا بالاحتراق

المشكلة كما تُطرح عادة: وحدة كبيرة تعمل بنظام احتراق متعدد الصمامات، عند خفض الحمل أو أثناء الانتقال بين أوضاع الاحتراق (Combustion Mode Transfer)، يستمر الحمل في الهبوط أبعد من المطلوب، وتبدأ صمامات الوقود «تصطاد» (Hunting)، وتظهر هبوطات مفاجئة في قراءات ثرموكابلات متفرقة، فتقطع الوحدة بـ«اضطراب احتراق» و«فارق حرارة مرتفع» — ويتكرر السيناريو في كل محاولة.

خط التشخيص الذي يستقر عليه النقاش: الملاحظة المفتاحية أن الفوارق **طبيعية تمامًا أثناء التشغيل المستقر على الحمل** — أي أن المشكلة تعتمد على الحالة الانتقالية، وهذا وحده يبعد الشبهة عن تلف مكونات الاحتراق (الذي لا يعرف الفرق بين حمل ثابت وانتقالية) ويوجهها نحو **منظومة توصيل الوقود لحظة الانتقال**: استجابة صمامات التحكم ومواضعها، الصمامات المؤازرة (Servo Valves) وتلوث الزيت الهيدروليكي المشغّل لها، وحسّاسات ضغط الوقود البينية. والنصيحة التي يكررها الخبراء بلا استثناء: **ابدأ من سجل الإنذارات الكامل — التشغيلي والتشخيصي معًا — قبل أي فك أو استبدال**، فالسجل غالبًا يحمل الإجابة كاملة.

الربط بالكتاب: هذا تطبيق حرفي لدرسين عندنا: «متى تظهر المشكلة» معلومة تشخيصية بوزن «أين تظهر» (10.1)، وفارق الحرارة أداة تمييز بين مشكلة احتراق حقيقية ومشكلة قياس أو وقود (10.3، حالة 8).

النمط الثاني: تذبذب الحمل ومرجع الوقود (FSR Hunting)

المشكلة كما تُطرح عادة: وحدة تعمل بوقود سائل، الحمل يتأرجح بمدى عدة ميغاواط حول نقطة الضبط دون أي تدخل، ومرجع الوقود يتذبذب معه.

خط التشخيص الذي يستقر عليه النقاش: حلقة الوقود السائل سلسلة كاملة، وكل حلقة فيها مرشّحة: فلتر الصمام المؤازر المسدود (أشهر مسبّب منفرد — والحل استبداله ومعالجة نظافة الزيت الهيدروليكي لا الاكتفاء بالفلتر)، ثم حسّاسات السرعة المغناطيسية على مقسّم التدفق (Flow Divider) التي تقيس تدفق الوقود الفعلي: فجوتها الهوائية يجب أن تكون منتظمة ودقيقة، وتآكلها أو انحراف محاذاتها يعطي تغذية راجعة مضطربة فيطارد المتحكم قيمة كاذبة، وأخيرًا ثوابت ضبط حلقة الحمل نفسها (النطاق الميت والكسب) إن كان أحد قد عدّلها.

الربط بالكتاب: لاحظ الترتيب — ميكانيكا الحلقة قبل ثوابت الضبط. المجتمع الهندسي يكرر درسنا من 20.5: لا تعالج بالTuning مشكلة سببها عتاد — فضبط جديد فوق تغذية راجعة مضطربة يخفي العرض ولا يصلح شيئًا. وتذبذب القياس كسبب لمطاردة المتحكم هو منطق حزام التخميد نفسه في 12.11.

النمط الثالث: فقدان لهب بعد ساعة من التشغيل — والجواب في التهوية لا في كاشف اللهب

المشكلة كما تُطرح عادة: وحدة تقطع بـ«فقدان لهب» بعد ساعة إلى ساعة ونصف من كل بدء — ليس فورًا — مع ملاحظة ارتفاع غير طبيعي في حرارة حجرة التوربين يتجاوز المائة درجة. ودائرة كاشف اللهب تُفحص فتظهر سليمة، وتتكرر القصة في كل محاولة.

خط التشخيص الذي يستقر عليه النقاش: التأخير الزمني الثابت هو المفتاح — شيء ما **يتراكم** حتى يبلغ عتبة. النقاش ينصرف بسرعة عن كاشف اللهب نفسه إلى **بيئته**: مخمدات تهوية في وضع خاطئ، مروحة تدور بالاتجاه المعكوس بعد صيانة كهربائية (خطأ حقيقي متكرر أكثر مما يُتصور)، تسريب هواء ساخن من وصلات الغلاف إلى الحجرة — وكلها تنتهي إلى نتيجة واحدة: حرارة حجرة تتصاعد حتى تتدهور استجابة كواشف اللهب أو يضطرب الاحتراق نفسه، فتقطع الوحدة "بفقدان لهب" سببه الجذري تهوية.

الربط بالكتاب: هذا بالضبط ما بنينا عليه 6.7: الحجرة والتهوية والكواشف والحماية منظومة واحدة، والنظر لكل نظام على حدة يجعل العطل «غامضًا». والتأخير الثابت قبل العرض دليل تراكم — منطق حالة 6 نفسه عندنا.

النمط الرابع: تلامس أرضي بمنظومة التيار المستمر — والبحث داخل خزانة التحكم وحدها طريق مسدود

المشكلة كما تُطرح عادة: إنذار تلامس أرضي على منظومة 125 فولت مستمر، وجهدا القطبين نحو الأرض غير متساويين بوضوح. الفريق يفحص كل بطاقات نظام التحكم فيجدها سليمة، ويقف حائرًا.

خط التشخيص الذي يستقر عليه النقاش: الخطأ المفهومي الذي يصححه الخبراء أولًا: مراقب التأريض يراقب **دائرة البطارية كاملة بكل ما تغذيه** — لا خزانة التحكم وحدها. فالملف اللولبي في الحقل، وصندوق الوصل الذي دخلته رطوبة، ودائرة مضخة الزيت الطارئة، ولوحات حماية المولد، وحتى الإنارة الطارئة — كلها على نفس القضيب العائم، وأي منها مرشّح. والمنهجية المستقرة: **العزل التقسيمي** — فصل الدوائر الفرعية واحدة تلو الأخرى (بسحب فيوزاتها) مع مراقبة جهدي القطبين بعد كل فصل، مع الانتباه لاحتمال وجود **أكثر من تلامس أرضي في آن واحد** (يتحسن الجهد جزئيًا ولا يعود طبيعيًا). أما التلامسات التي لا تُعالج فتظل قنبلة موقوتة: التلامس **الثاني** على القطب المقابل يعني قصرًا قد يُفعّل أو يُعطّل دوائر قطع كاملة.

الربط بالكتاب: هذا هو تطبيق منهجية التنصيف (19.5) على دائرة كهربائية بدل حلقة قياس، وتأكيد مباشر لما قلناه في 6.8: إنذار التلامس الأرضي الأول ليس إنذارًا ثانويًا يؤجَّل — هو إعلان فقدان طبقة الأمان الوحيدة المتبقية.

خلاصة القسم: لاحظ أن الأنماط الأربعة — رغم اختلاف بلدانها ومنصاتها وأنواع وحداتها — تنحل كلها بنفس الأدوات التي بنيناها عبر هذا الكتاب: متى تظهر المشكلة، النمط قبل القيمة، البيئة قبل الجهاز، السجل قبل المفك، والتنصيف بدل المشي. المنصات تختلف؛ **منهجية التحقيق لا تعرف جنسية ولا مصنّعًا**.

13.3 أخطاء شائعة في تشخيص أعطال التوربينات

بمراجعة الحالات الإحدى عشرة أعلاه مجتمعةً، نلاحظ نمطًا متكررًا يستحق التوضيح صراحة — أخطاء تشخيصية شائعة تتكرر بغض النظر عن نوع العطل نفسه:

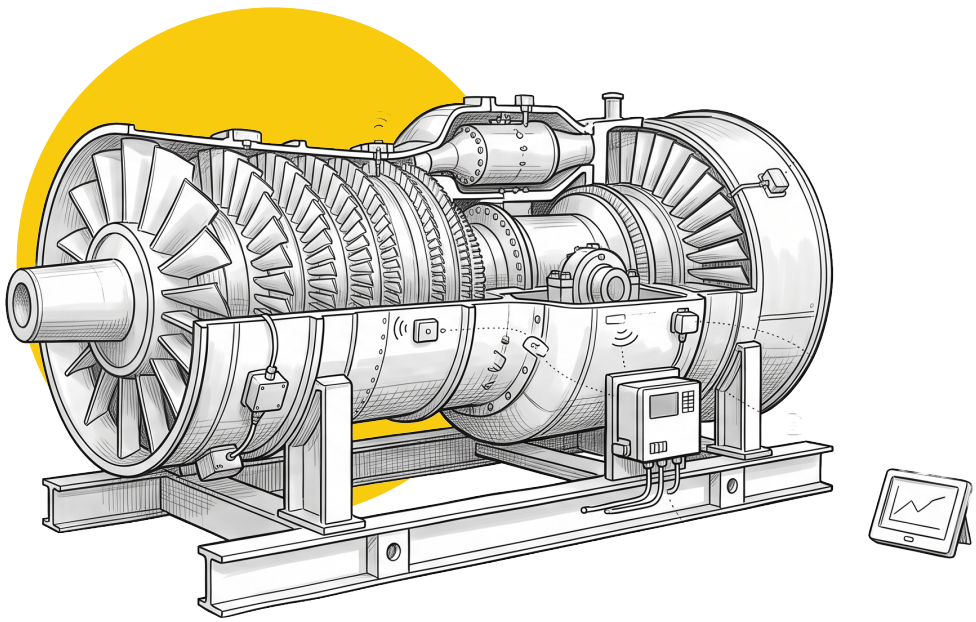
- **الانطلاق من الاستنتاج بدل الدليل:** استبدال مكوّن أو إعادة تصفير قاطع لمجرد أن أول إشارة تشير إليه، قبل إثبات السببية فعليًا بالقياسات (القاعدة الذهبية من 10.1 — تكررت أهميتها في كل حالة أعلاه تقريبًا).

- **الخلط بين «أين ظهرت المشكلة» و«أين سببها الفعلي»:** حالة 3 (عطل الاتصال) وحالة 4 (القاطع الكاذب) مثالان مباشران — المشكلة ظهرت في مكان (DCS، منطق القطع)، لكن سببها الفعلي في مكان مختلف تمامًا (بطاقة اتصال، تأريض كابل). وحالة 7 (فشل التزامن) تعيد نفس الدرس من زاوية كهربائية.
- **تجاهل الأنماط المتقطعة لصالح انتظار «الفشل الكامل»:** حالة 1 (فشل الإشعال) وحالة 4 (القاطع الكاذب) تُظهران أن الأعراض المتقطعة (نجاح أحيانًا وفشل أحيانًا) غالبًا مؤشر مبكر مهم يستحق تحقيقًا فوريًا، لا «حظًا سيئًا» يُنتظر تكراره.
- **عدم مراجعة «ماذا تغيّر مؤخرًا؟» كأول سؤال:** حالة 5 (اهتزاز بعد فحص كبير) توضح قيمة السؤال البسيط «ما الذي تغيّر قبل ظهور المشكلة مباشرة؟» كنقطة انطلاق تشخيصية توفر وقتًا كبيرًا، بدل البدء من قائمة الأسباب المحتملة الكاملة من الصفر في كل مرة.
- **الثقة المطلقة بالقياس قبل التحقق من اتساقه:** حالة 8 (الانزياح الجماعي بقراءات الحرارة) تُظهر أن القياس نفسه قد يكون هو العطل. **القياس الذي لا يتسق مع الفيزياء المحيطة به — تدفق الوقود، القدرة، الضغط — يُشتبَه به هو أولًا**، قبل أن يُبنى عليه أي قرار تشغيلي.
- **اعتبار «الحماية التي تمنع الفعل» عطلًا بالحماية:** حالة 7 مثال صريح — منطق يرفض السماح بفعل هو غالبًا منطق يعمل بالشكل الصحيح، والسؤال الصحيح ليس «كيف نتجاوزه؟» بل **"على أي معلومة بنى رفضه؟"**
- **النظر للقيمة بدل النمط:** حالة 6 (كشف الغاز) وحالة 8 (الحرارة) تُظهران أن **العلاقة بين القراءات** — كاشف واحد يقرأ بينما البقية صفر، أو ارتفاع الجميع بالتساوي مع ثبات الفارق — تحمل من المعلومة أكثر مما تحمله القيمة المطلقة لأي قراءة منفردة.
- **الاكتفاء بالإصلاح دون تحديث الإجراء الوقائي:** كل حالة أعلاه انتهت بدرس مستفاد يعدّل ممارسة مستقبلية (فحص دوري جديد، خطوة إجرائية إضافية) — وإصلاح العطل دون هذه الخطوة الأخيرة يعني احتمال تكرار المشكلة نفسها لاحقًا بشكل مختلف قليلًا.

هذه الأنماط، أكثر من أي تفصيل تقني منفرد، هي جوهر «منهجية التحقيق المنظّم» التي بدأنا بها الفصل العاشر (10.1) — والفصل الحالي يثبت عمليًا أنها تنطبق بالقوة نفسها بغض النظر عن نوع العطل: ميكانيكي، كهربائي، قياسي، أو حتى منطقي في منطق التحكم نفسه.

الفصل الرابع عشر:

التطورات الحديثة

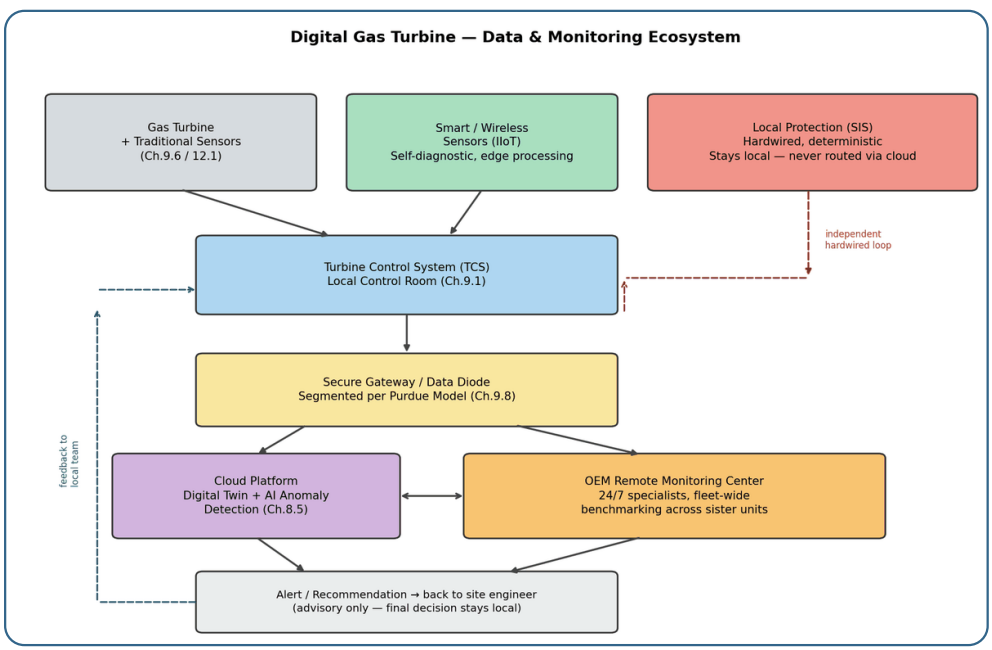


معظم هذا الكتاب شرحٌ لأساسيات ثابتة نسبيًا — مبدأ عمل التوربين الغازي، حمايته، صيانته، تحكمه — أشياء لم تتغيّر جوهريًا منذ عقود، ولا يُتوقع أن تتغيّر بسرعة. لكن الصناعة لا تقف ثابتة، وهناك طبقة تطورات حديثة تستحق فصلًا مستقلًا. بعضها ذكرناه مسبقًا في سياقه الطبيعي — التوأم الرقمي والصيانة التنبؤية (8.5)، والأمن السيبراني (9.8، 11.7) — وهذا الفصل لا يكررها، بل يبني عليها ويربطها بالصورة الأوسع: كيف تتكامل هذه الأدوات مع بعضها فعليًا في موقع حقيقي (14.1، 14.2)، وكيف تغيّرت الحسّاسات نفسها (14.3)، وكيف تتعامل الصناعة مع أنظمة التحكم القديمة التي ما زالت في الخدمة (14.4)، وأخيرًا نظرة سريعة على اتجاهات ناشئة في الوقود والتصنيع (14.5).

وحدٌّ لا بد من رسمه بين هذا الفصل والفصل الثالث والعشرين: موضوع هذا الفصل هو **البنية التحتية** — الحسّاسات والاتصال والمنصات وترقية العتاد القديم؛ أما **الذكاء الاصطناعي نفسه** — ما الذي يتعلّمه النموذج، وكيف يُختبر، وأين يقف من منظومة الحماية — فموضوع الفصل الثالث والعشرين كاملًا. وقراءة أحدهما دون الآخر تعطي نصف الصورة: هذا الفصل يشرح **ما الذي يجعل الذكاء الاصطناعي ممكنًا في موقع حقيقي**، وذاك يشرح **ماذا يفعل به**.

14.1 التوربين الغازي الرقمي (Digital Gas Turbine)

في 8.5 عرّفنا التوأم الرقمي (Digital Twin) كأداة تحليل تنبؤي: نسخة افتراضية للوحدة تُحاكي سلوكها. لكن «التوربين الغازي الرقمي» مصطلح أوسع تستخدمه الشركات المصنّعة ليصف المنظومة الكاملة التي يعيش بداخلها التوأم الرقمي، لا التوأم نفسه فقط:



الشكل 14.1 — منظومة التوربين الغازي الرقمي: تدفق البيانات من الموقع إلى السحابة ومركز المراقبة عن بعد، مع تأكيد استقلالية نظام الحماية المحلي.

كما يوضح الشكل، تتكون المنظومة من عدة طبقات مترابطة: كثافة حسّاسات أعلى بكثير من الأنظمة التقليدية (14.3)، وبث بيانات مستمر (وليس فقط عند الطلب) من الموقع إلى منصة سحابية، وتحليل يعمل على مستوى الوحدة الواحدة (التوأم الرقمي المحلي، 8.5 و23.4) وأيضًا على مستوى الأسطول الكامل (Fleet-Wide Learning) — وهذه إضافة مهمة على التوأم الرقمي وحده: فمقارنة سلوك وحدتك بآلاف الوحدات المماثلة حول العالم تكشف أنماط أعطال نادرة لم تكن لتظهر من بيانات وحدة واحدة فقط، مهما طالت مدة تشغيلها.

ونقطة حاسمة تُذكر هنا ولا تُكرَّر بعدها: هذه الطبقة الرقمية كلها — مهما بلغ تطورها — طبقة **استشارية** (Advisory) لا تلمس منطق الحماية إطلاقًا؛ فنظام الحماية (SIS، 7.8) يبقى في حلقة سلكية مستقلة محليًا وحتميًا، بلا أي مسار عبر السحابة. **ولو انقطع الاتصال بالكامل، استمر التوربين في حماية نفسه بالكفاءة نفسها.** وهذا الحدّ الفاصل — ولماذا هو غير قابل للتفاوض — موضوع 23.14، والبنية الطبقية التي تفصل IT عن OT في 9.8.

14.2 المراقبة عن بعد (Remote Monitoring)

من أوضح تطبيقات المنظومة الرقمية عمليًا: مراكز المراقبة عن بعد التابعة للشركة المصنّعة (OEM Remote Monitoring / Remote Operations Centers). وفكرتها: بث بيانات تشغيل الوحدة بشكل مستمر إلى مركز مركزي، يعمل بمناوبات على مدار الساعة، ويراقب عشرات أو مئات الوحدات المماثلة في مواقع مختلفة حول العالم في الوقت نفسه.

الفائدة العملية: وصول إلى تخصص عميق دون الحاجة إلى سفر مهندس متخصص لكل موقع — فإذا ظهر نمط غير مألوف في وحدة معيّنة، فالمتخصص في المركز البعيد غالبًا سبق أن رأى النمط نفسه في وحدة أخرى مماثلة في موقع مختلف، ويستطيع أن يوجّه فريق الموقع مباشرة نحو السبب المرجّح بدل البدء من الصفر. وهذا امتداد طبيعي لفكرة «التعلم من الأسطول الكامل» التي ذكرناها في 14.1.

التحديات العملية التي يجب الانتباه لها:

- **الأمن السيبراني أولًا:** أي اتصال خارجي من موقع حرج إلى الشبكة العامة أو إلى طرف ثالث يجب أن يمر عبر بوابة آمنة مصممة خصيصًا لهذا الغرض (Secure Gateway)، غالبًا بمبدأ «صمام بيانات» (Data Diode) الذي يسمح بخروج البيانات فقط ولا يسمح بأي أمر أو بيانات في الاتجاه المعاكس — وهو منطق التقسيم الطبقي نفسه في نموذج بردو الذي شرحناه في 9.8. ومركز المراقبة البعيد **يقترح ولا يتحكم أبدًا** — فأي إجراء فعلي (تعديل نقطة ضبط، إيقاف وحدة) يبقى قرار فريق الموقع.
- **الاعتمادية على الاتصال:** تحديات الردّية والاتصال نفسها التي شرحناها في 11.5 تنطبق هنا بدرجة أكبر (المسافة أطول، والمسار غالبًا يمر عبر شبكات عامة). وانقطاع الاتصال بمركز المراقبة البعيد **يجب** أن يكون حدثًا بلا تأثير عملي فوري على تشغيل الوحدة — مجرد فقدان لطبقة استشارية إضافية، وليس فقدانًا لأي وظيفة تحكم أو حماية.

- **من واقع الميدان:** أفضل استخدام رأيته لهذه الخدمة هو أن تكون طبقة «عين ثانية» تراجع البيانات نفسها التي يراها فريق الموقع، لا بديلًا عنهم. وأسوأ استخدام رأيته هو اعتماد فريق موقع على تنبيه من المركز البعيد كخطوة أولى بدل مراقبته الاستباقية الخاصة — فالتأخير الطبيعي في معالجة وتحليل البيانات عن بعد (حتى لو كان دقائق معدودة) قد يكون فارقًا مهمًا في حالات معينة.

14.3 الحسّاسات الذكية وإنترنت الأشياء الصناعي (Smart Sensors & Industrial IoT)

الحسّاسات التقليدية التي شرحناها في 9.6 و12.1 — سواء AI أو RTD أو Thermocouple — هي بشكل أساسي «أجهزة نقل بيانات صامتة»: تقيس قيمة فيزيائية وتحوّلها إلى إشارة كهربائية (تيار أو جهد)، وتُوصَّل سلكيًا نقطة لنقطة إلى بطاقة إدخال في الController، وهذا كل دورها. والتطور الحديث أضاف طبقة ذكاء عند الحسّاس نفسه:

- معالج داخلي **(Onboard Processing):** الحسّاس الذكي يحتوي معالجًا صغيرًا يستطيع إجراء تشخيص ذاتي — فيكتشف مثلًا انحرافه التدريجي عن المعايرة الأصلية (Drift)، أو عطلًا داخليًا في عنصر الاستشعار نفسه، ويبلغ عن هذا كإشارة تشخيصية منفصلة عن القراءة نفسها. وهذا يختلف جوهريًا عن أسلوب التكرار التقليدي (9.6) الذي يعتمد على مقارنة عدة حسّاسات مستقلة ببعضها لاكتشاف الشذوذ — أما الحسّاس الذكي فيستطيع أن يشتبه بنفسه.
- **اتصال لاسلكي:** يزيل الحاجة إلى سحب كابل مخصص لكل نقطة قياس جديدة — وهي فائدة عملية كبيرة جدًا، خصوصًا في مشاريع التحديث (Retrofit، 14.4) على وحدات قديمة، حيث سحب كابل جديد عبر مسارات موجودة أصلًا مكلف ومعقد لوجستيًا. وهذا يفتح الباب لإضافة نقاط مراقبة إضافية (اهتزاز في مواضع إضافية، حرارة أسطح إضافية) بتكلفة وتعقيد أقل بكثير من الأسلوب السلكي التقليدي.
- معالجة طرفية **(Edge Processing):** بدل إرسال كل قراءة خام باستمرار، يعالج الحسّاس جزءًا من البيانات محليًا — تحليل طيف اهتزاز أولي مثلًا — فيرسل الملخص أو التنبيه فقط، وهو ما يخفّف الحمل على الشبكة حين يكون النطاق الترددي محدودًا. أما الحوسبة الطرفية كطبقة معمارية قائمة بذاتها بين الحسّاس ونظام التحكم، وأين توضع النماذج التحليلية فيها، ففي 23.10.

تحذير عملي مهم: حتى الآن (وحتى وقت كتابة هذا الفصل)، تُستخدم الحسّاسات اللاسلكية والذكية بشكل أساسي لأغراض **المراقبة والتشخيص الاستشاري**، لا لوظائف الحماية الحرجة (SIS، 7.8). فالطبيعة اللاسلكية بحد ذاتها تُدخل عدم يقين في زمن الوصول (Latency) واحتمال تداخل أو انقطاع إشارة غير مقبول لوظيفة حماية يجب أن تكون حتمية (Deterministic) بزمن استجابة مضمون. لذلك تبقى القاطعات الحرجة (سرعة، حرارة، اهتزاز حرج) — على الأقل في التصاميم المعتمدة حاليًا — سلكية، مكرَّرة، وموصولة مباشرة بمعالجات TMR المستقلة (9.1) كما شرحنا في الفصول السابقة.

14.4 تحديث وترقية أنظمة التحكم القديمة (Controller Modernization)

جزء من التوربين الغازي طويل العمر جدًا ميكانيكيًا — فالوحدة نفسها يمكن أن تخدم 30 سنة أو أكثر بصيانة جيدة (8.4). لكن نظام التحكم الإلكتروني عمره الافتراضي أقصر بكثير، عادة 15 إلى 20 سنة، قبل أن يبدأ في مواجهة مشاكل حقيقية:

لماذا يصبح التحديث ضروريًا:

- **انتهاء الدعم من الشركة المصنّعة:** المنصات القديمة تصل إلى مرحلة يتوقف فيها الدعم الرسمي (End of Life)، فلا تعود هناك تحديثات ولا دعم فني رسمي لأي مشكلة تظهر.
- **ندرة قطع الغيار:** أهم نقطة عمليًا، وهي مرتبطة مباشرة بما شرحناه في 8.4 عن إدارة قطع الغيار — فالبطاقات الإلكترونية القديمة تصبح «قطع غيار حرجة» (Critical/Insurance Spares) بمعنى صارم جدًا: لا تُصنَّع من جديد، والمتوفر منها هو فقط ما تبقّى في السوق الثانوي أو في مخزون قديم، وسعرها يرتفع كلما قلّ التوفر.
- **مخاطر تقادم المكونات:** حتى لو كان النظام يعمل بلا مشاكل ظاهرة، فإن مكونات إلكترونية معينة (المكثفات خصوصًا) لها عمر افتراضي فيزيائي يتدهور بمرور الوقت بغض النظر عن الاستخدام، مما يرفع احتمال عطل مفاجئ كلما تقادم النظام.

أسلوب التحديث العملي: الفكرة الأساسية هي استبدال منظومة التحكم بالكامل (المعالجات، البطاقات، البرمجيات، وأحيانًا الـHMI) بمنصة حديثة، بينما تبقى الوحدة الميكانيكية (الضاغط، غرفة الاحتراق، التوربين نفسه) كما هي دون تغيير. ومن واقع الميدان، أهم التحديات العملية في مشروع كهذا:

- **مطابقة الإدخال/الإخراج بدقة:** يجب أن يستوعب النظام الجديد الإشارات الفعلية في الموقع عددًا ونوعًا (9.6، 12.1) — فأي نقطة قياس أو أمر تحكم موجود فعليًا في الوحدة يجب أن يجد له مكانًا مطابقًا في النظام الجديد، وأي إغفال يعني فقدان وظيفة كانت موجودة.
- **إعادة التحقق من كل منطق الحماية والتحكم من الصفر:** حتى لو كان المنطق الجديد مطابقًا وظيفيًا (السماحات نفسها، القواطع نفسها، تسلسل البدء نفسه)، فهو من الناحية الفنية برنامج جديد بالكامل مكتوب على منصة مختلفة — يستوجب إعادة اختبار قبول كامل قبل التشغيل الفعلي، بالصرامة نفسها التي تُشغَّل بها وحدة جديدة تمامًا.
- **تقليل مدة التوقف:** مشروع تحديث كامل يتطلب توقفًا مخططًا طويلًا نسبيًا، لذلك الأسلوب المعتاد هو التجهيز والاختبار المسبق قدر الإمكان خارج الموقع (Factory Acceptance Test — FAT) بحيث تكون خطوة «التبديل الفعلي» في الموقع (Cutover) أقصر ما يمكن.
- **إعادة تدريب المشغّلين:** واجهة التشغيل الجديدة (HMI، 9.1) غالبًا مختلفة تمامًا في المظهر والتنقل عن القديمة، حتى لو كان المنطق الداخلي مطابقًا وظيفيًا — وتدريب فريق التشغيل قبل التشغيل الفعلي خطوة لا يجوز التهاون بها.

الفائدة بعد التحديث: فضلًا عن حل مشكلة ندرة القطع، يفتح النظام الحديث عادة الباب لقدرات لم تكن متاحة أصلًا — تشخيص أدق، وإمكانية الربط بمنظومة المراقبة عن بعد (14.2) والتوأم الرقمي (8.5)، وأحيانًا تحسين دقة التحكم نفسه بفضل معالجات أسرع وخوارزميات أحدث.

14.5 اتجاهات ناشئة بالوقود والتصنيع

آخر نقطة في هذا الفصل نظرة سريعة على اتجاهين ناشئين، ما زالا قيد التطور النشط ولم يصلا بعد إلى مرحلة «الممارسة القياسية الراسخة» التي وصلت إليها بقية مواضيع هذا الكتاب — لكنهما يستحقان ذكرًا لأي مهندس يتابع مستقبل الصناعة:

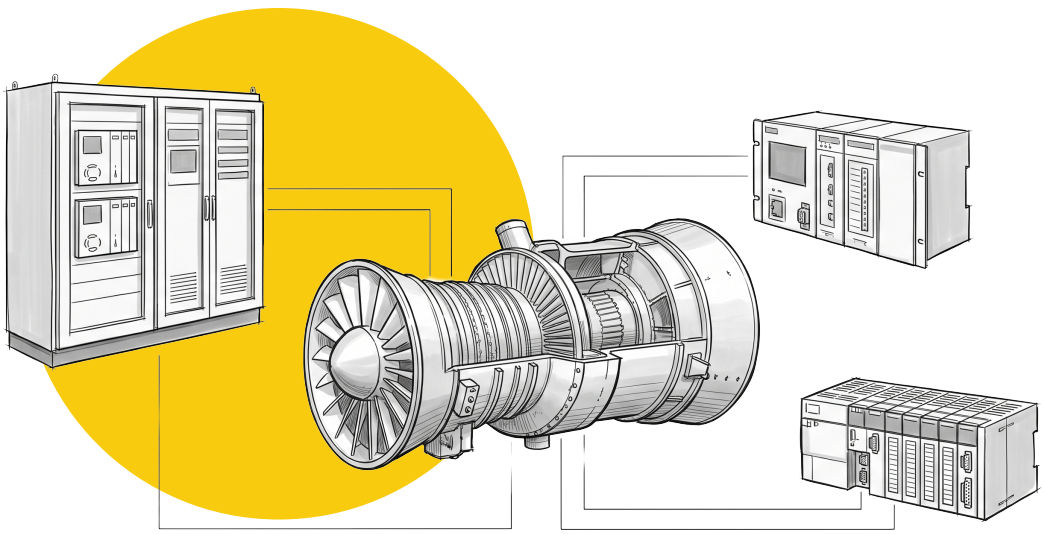
مرونة الوقود والهيدروجين **(Fuel Flexibility & Hydrogen-Ready Turbines):** توجه متزايد نحو خلط الهيدروجين مع الغاز الطبيعي — وأحيانًا الحرق الكامل به مستقبلًا — كمسار لخفض الانبعاثات الكربونية. وهندسيًا ليس هذا «تبديل وقود»: فسرعة لهب الهيدروجين ومدى قابليته للاشتعال يغيّران ديناميكية اللهب داخل الغرفة (5.3) ويرفعان خطر الاشتعال الخلفي (Flashback)، فتلزم غرفة احتراق وحاقنات مصممة لذلك ومنطق وقود ومراقبة لهب يناسبانه (9.2، 7.5). والملف كاملًا — بما فيه الأثر المعاكس على **NOx** والبُعد المناخي — في **22.11.**

التصنيع بالطباعة ثلاثية الأبعاد **(Additive Manufacturing):** بدأت بعض الشركات المصنّعة تستخدم تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية لتصنيع مكونات معقدة الشكل — وأبرز مثال عملي فوهات الوقود (5.3) التي تحتوي أحيانًا ممرات تبريد داخلية معقدة يصعب تصنيعها بالطرق التقليدية (التشكيل أو التفريز). والفائدة العملية الأوضح حاليًا هي تقليص مدة التصنيع لبعض قطع الغيار المتخصصة (رابطها المباشر بموضوع إدارة قطع الغيار، 8.4) — لكن هذه التقنية لم تصل بعد إلى مرحلة تصنيع المكونات الدوارة الرئيسية عالية الإجهاد (شفرات التوربين نفسها مثلًا) على نطاق واسع تجاريًا.

كلا الاتجاهين يمثلان مثالًا جيدًا على كيفية تطور هذه الصناعة عمليًا: لا بقفزة مفاجئة تُلغي كل الأساسيات التي شرحناها في هذا الكتاب، بل بطبقات تُضاف تدريجيًا فوق المبادئ الهندسية الأساسية نفسها — دورة برايتون (2.2)، والحماية متعددة الطبقات (7.1)، والصيانة المبنية على بيانات فعلية (8.5) — تبقى هي الأساس الثابت الذي يُبنى عليه أي تطور حديث، ومعرفتها الجيدة هي التي تمكّن أي مهندس من فهم أي تقنية جديدة تظهر مستقبلًا واستيعابها، بدل التعامل معها كصندوق أسود منفصل.

الفصل الخامس عشر:

مقارنة عملية بين أنظمة التحكم بالتوربين الغازي



في الفصل التاسع شرحنا مبادئ التحكم بشكل عام (منطق TMR، MVS، تكرار الحسّاسات)، وفي ملحق ج قدّمنا مقارنة سريعة جدًا بين بعض المنصات التجارية. وهذا الفصل يوسّع تلك المقارنة بشكل جوهري، مع تصحيح نقطة مهمة يجب توضيحها من البداية: المقارنة الأدق ليست بين ثلاث منصات «تحكم توربين»، بل بين نوعين مختلفين جوهريًا من الأنظمة.

15.1 لماذا هذه المقارنة تحديدًا؟

GE Speedtronic Mark VIe و**Woodward MicroNet Plus** كلاهما نظامان **موجَّهان بقوة** لتطبيقات التوربينات والمحركات الرئيسية (Prime Movers) — فتصميم الhardware والsoftware وفلسفة التحكم نفسها مبنية حول طبيعة هذه المعدات تحديدًا منذ البداية. أما **Allen-Bradley ControlLogix** (من Rockwell Automation) فهو **ليس** نظام تحكم توربين متخصصًا بحد ذاته — إنه منصة PLC/PAC (Programmable Logic/Automation Controller) عامة الغرض، تُستخدم في مجالات صناعية واسعة جدًا (تحكم بالعمليات، آلات، حزم معدات، أنظمة سلامة)، ويمكن استخدامها في تطبيق توربين **حسب التصميم** — لا لأن الجهاز نفسه «يعرف» كيف يتحكم بتوربين.

وهذا فرق جوهري يستحق تصحيحه صراحة، لأنه يغيّر كيف نقرأ أي مقارنة مواصفات بين الأنظمة الثلاثة: فمقارنة رقم في جدول (سرعة معالجة، عدد بطاقات I/O) دون فهم هذا الفرق تعطي انطباعًا مضلِّلًا بأن الأنظمة الثلاثة «بدائل متكافئة» للوظيفة نفسها — والحقيقة أعقد من ذلك.

15.2 جدول المقارنة الشامل

العنصر	GE Speedtronic Mark VIe	Woodward MicroNet Plus	Allen-Bradley ControlLogix
الشركة المصنّعة	GE Vernova	Woodward	Rockwell Automation
طبيعة النظام	Turbine Control System	Prime Mover Control System	PLC/PAC عام الغرض
الاستخدام الرئيسي	توربينات غازية/بخارية/ Aeroderivative	توربينات، ضواغط، محركات، توربينات مائية	تحكم بالعمليات، آلات، حزم معدات، مصانع
مصمَّم خصيصًا للتوربين؟	نعم	نعم	لا — إلا بتطبيق مخصص يُبنى فوقه
الردّية (Redundancy)	خيارات عالية الاعتمادية، ويدعم TMR	Simplex أو Redundant، بمعماريات I/O متعددة	حسب اختيار الـ controller والمعمارية
بنية الإدخال/الإخراج	Modular / Distributed	Modular، أنواع Analog/Digital/ متخصصة	Modular I/O
التحكم عالي السرعة	قوي جدًا، مبني للغرض	قوي جدًا ومخصص لتطبيقات Prime Mover	ممكن، لكنه يعتمد على الوحدات والتطبيق
تسلسل تشغيل التوربين	مدمج ضمن التطبيق الجاهز	مدمج ضمن التطبيق الجاهز	يُبرمَج بالكامل من قبل المستخدم/المكامل
التحكم بالوقود	مخصص للتوربين	مخصص للتوربين/المحرك الرئيسي	يحتاج تطويرًا كاملًا كتطبيق
منطق الحماية	بنية حماية توربين متكاملة	يدعم تطبيقات الحماية و Overspeed حسب التصميم	يحتاج تصميم حماية منفصل ومخصص
بيئة البرمجة	بيئة GE المتخصصة لتحكم التوربينات	GAP (أساسها Function Blocks / Ladder	Studio 5000 Logix Designer

العنصر	GE Speedtronic Mark VIe	Woodward MicroNet Plus	Allen-Bradley ControlLogix
Ladder Diagram	ليس الأسلوب الأساسي	متاح كخيار إضافي	الأسلوب الأساسي والأكثر شيوعًا
Function Block	مستخدم ضمن بيئة التحكم	الأساس المعتمد لGAP	متاح
Structured Text	حسب التطبيق داخل بيئة Mark VIe	حسب المنصة، ليس الأسلوب الأساسي	متاح ومدعوم بالكامل
التشخيص (Diagnostics)	متقدم ومتكامل مع فلسفة التوربين	قوي جدًا، خصوصًا لحلقات Prime Mover	قوي، خصوصًا على مستوى PLC/I/O
التكامل مع DCS	ممتاز	ممتاز	ممتاز
معرفة الشركة بالتوربين (OEM Knowledge)	نقطة قوة كبيرة جدًا لتوربينات GE تحديدًا	نقطة قوة كبيرة بتطبيقات Prime Mover عمومًا	تعتمد كليًا على خبرة المكامل/الOEM المستخدم
أفضل مجال استخدام	توربينات GE / محطات متكاملة	تحكم بتوربينات وضواغط متنوعة المصدر	تحكم صناعي عام / عمليات / حزم معدات

من واقع عملي: الجدول أعلاه يوضّح نقطة تستحق تأكيدًا: أغلب الفروقات الحقيقية بين Mark VIe وMicroNet Plus من جهة، وControlLogix من جهة ثانية، ليست في «القدرة التقنية البحتة» (سرعة معالج، عدد بطاقات) — بل في **كمية العمل الهندسي الجاهزة مسبقًا** ضمن فلسفة النظام نفسه. وهذه النقطة نفصّلها في الأقسام التالية.

15.3 GE Speedtronic Mark VIe — فلسفة «التوربين أولًا»

Mark VIe نظام تحكم متخصص بالمعدات الدوارة، مصمَّم ومُتحقَّق منه خصيصًا لتطبيقات التوربينات — بما فيها Aeroderivative وHeavy-Duty Gas Turbines — مع وظائف مدمجة ضمن فلسفة النظام نفسها: تسلسل التشغيل (Sequencing، راجع 9.3)، والتحكم بالوقود (9.2)، والحماية (الفصل السابع كاملًا)، والتزامن (Synchronization، ذكرناه ضمن 9.3)، والتشخيص. كما يدعم معماريات ردّية متقدمة، ومنها TMR (9.1) في بعض التطبيقات.

النقطة الجوهرية هنا: قوة Mark VIe ليست في الCPU أو بطاقات الإدخال/الإخراج بحد ذاتها فقط — بل في أن الـ hardware والـsoftware وفلسفة التحكم كلها **مصمَّمة حول التوربين تحديدًا** منذ البداية. فعندما تفتح تطبيق Mark VIe جاهزًا لوحدة GE، تجد أغلب منطق التحكم والحماية والتسلسل موجودًا مسبقًا كجزء من «قالب» التطبيق القياسي لطراز التوربين، والمهندس يضبط معاملات (Parameters) ويُعدّل تفاصيل محددة حسب الموقع، لا يبني كل شيء من الصفر.

15.4 Woodward MicroNet Plus وبيئة GAP

MicroNet Plus نظام تحكم مخصص لمحركات الدفع الرئيسية (Prime Movers) بمعنى أوسع من «توربين غازي» فقط — فتستخدم Woodward المنصة نفسها (بتوليفات مختلفة) لتوربينات غازية وبخارية، وضواغط، وتوربينات مائية، ومحركات ديزل وغاز. والنظام معياري (Modular)، ويمكن أن يكون Simplex أو Redundant حسب أهمية التطبيق، مع خيارات إدخال/إخراج متنوعة، ومعدلات تحديث تصل إلى نحو 5 ميلي ثانية في التطبيقات الحرجة زمنيًا.

بيئة **GAP:** خلافًا للانطباع الشائع، GAP ليست مجرد «برنامج رسم منطق» — إنها بيئة البرمجة الأساسية التي يُبنى بها تطبيق التحكم الكامل في MicroNet Plus، وتعتمد أساسًا على الكتل الوظيفية (Function Blocks، شرحناها في 12.4). وتوفّر Woodward أيضًا بيئة Ladder Logic (12.3) كخيار إضافي للمهندسين الذين يفضّلون هذا الأسلوب.

ميزتان عمليتان تستحقان وقفة خاصة من منظور الصيانة:

- التعديل الحي على البرنامج **(Online Program Changes):** في بعض التطبيقات ذات المعالجات المكرَّرة (Redundant CPUs)، يمكن تحميل تعديل على المعالج الاحتياطي (Backup CPU) والتحقق منه بشكل كامل **قبل** تحويل التحكم الفعلي إليه — وهذا يقلل بشكل كبير الحاجة إلى إيقاف الوحدة لمجرد تعديل بسيط في المنطق.

- المعاملات القابلة للضبط **(Tunables):** تسمح بتعديل بعض المعاملات التشغيلية دون الحاجة إلى تغيير برنامج التحكم نفسه (شبيهة بمفهوم Setpoints & Control Constants الذي شرحناه في 9.4، لكن بمستوى أعمق من التخصيص). ومن واقع عملي، هذه الميزة تتطلب انضباطًا إداريًا صارمًا — إذ يجب أن تُوثَّق وتُنسَخ احتياطيًا (Backup) بعناية، لأن تعديلًا غير موثَّق على Tunable معيّن قد يسبب سلوكًا مختلفًا في الموقع لاحقًا دون أثر واضح في سجل التغييرات إن لم نحافظ على انضباط التوثيق.

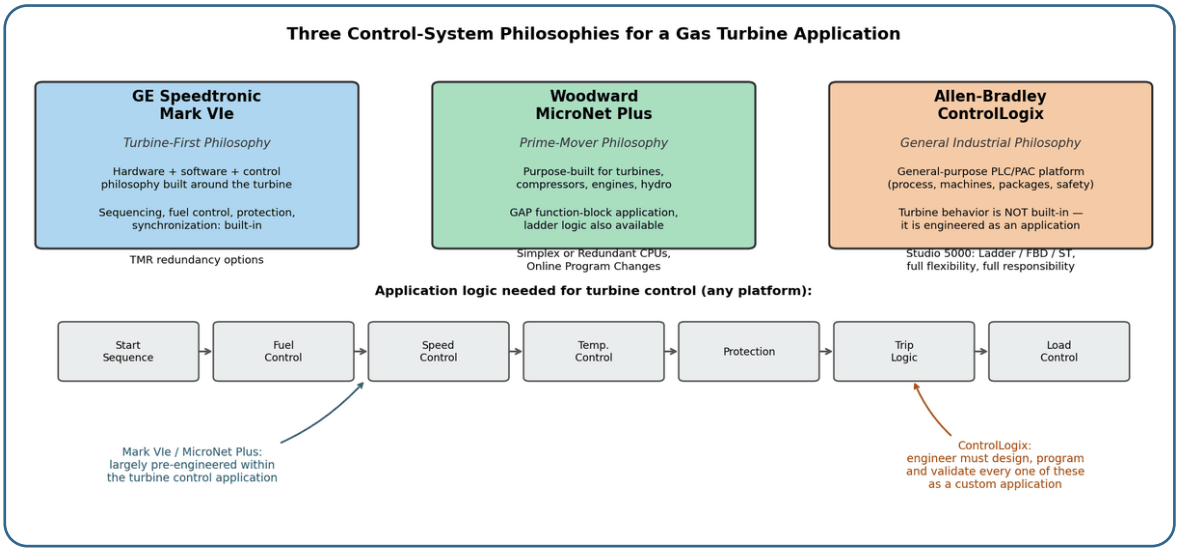
15.5 Allen-Bradley ControlLogix — منصة عامة تُبنى عليها تطبيقات التوربين

هنا يظهر بأوضح صوره الفرق الجوهري الذي أشرنا إليه في 15.1. فControlLogix (وCompactLogix، النسخة الأصغر) منصة PLC/PAC صناعية عامة الاستخدام — وليست Turbine Controller متخصصة مثل Mark VIe أو MicroNet Plus — لكنها قوية جدًا ومرنة، وتُستخدم في مجالات واسعة: تحكم بالعمليات، وتحكم تسلسلي، ومحركات كهربائية (Drives)، وحركة (Motion)، وحتى تطبيقات سلامة (Safety). وتُبرمَج عادة عبر بيئة Studio 5000 Logix Designer.

الميزة الكبرى: المرونة. يستطيع المهندس أن يبني تطبيق تحكم بتوربين غازي باستخدام Ladder وFunction Block وStructured Text وغيرها من الأساليب (فكل الأساليب التي شرحناها في الفصل الثاني عشر متاحة). لكن — وهذه النقطة الأهم في هذا الفصل كله — وظائف مثل:

تسلسل البدء ← التحكم بالوقود ← التحكم بالسرعة ← التحكم بالحرارة ← الحماية ← منطق القاطع ← التحكم بالحمل

يجب أن تُصمَّم وتُختبَر بالكامل **كتطبيق مستقل**، وليست ببساطة وظائف جاهزة لمجرد أن الجهاز «ControlLogix». وهذا يوضّحه بدقة الشكل التالي:



الشكل 15.1 — ثلاث فلسفات تحكم مختلفة لنفس تطبيق التوربين الغازي: توربين أولًا، محرك رئيسي أولًا، ومنصة صناعية عامة.

وهذا لا يعني أن ControlLogix «أضعف» — بالعكس، فالمرونة نفسها ميزة كبيرة في تطبيقات معيّنة (مثلًا عندما يكون التوربين جزءًا صغيرًا من منظومة أكبر بكثير يتحكم بها الPLC نفسه، أو عندما يفضّل المشغّل الاعتماد على منصة موحّدة في المصنع كله بدل منصات متعددة متخصصة). لكن الثمن مسؤولية أكبر بكثير على تصميم التطبيق والتحقق منه — إذ لا يوجد «قالب توربين جاهز» يضمن أن كل الحالات الحرجة (تسلسل خاطئ، سماحة منسية، حماية غير مكتملة) أُخذت بعين الاعتبار تلقائيًا، كما هو الحال في منصة متخصصة من الأساس.

15.6 لغات البرمجة عبر الأنظمة الثلاثة

في الفصل الثاني عشر شرحنا أساليب البرمجة الصناعية بشكل عام (LD، FBD، ST، IL، SFC). وكل نظام من الثلاثة يميل إلى أسلوب مختلف كافتراضي، رغم أن أغلبها يدعم أكثر من أسلوب فعليًا:

- **Mark VIe:** بيئة GE المتخصصة لتحكم التوربينات، تدمج مفاهيم قريبة من Function Block ضمن بيئة تحكم مخصصة أكثر من كونها «لغة برمجة عامة» بالمعنى التقليدي.
- **MicroNet Plus:** GAP كأساس (مبني على Function Blocks)، مع Ladder Logic كخيار بديل.
- **ControlLogix:** يدعم الأساليب الأربعة الرئيسية بشكل كامل ومتكافئ تقريبًا (Ladder هو الأكثر شيوعًا عمليًا، خصوصًا لأن أغلب فنيي الكهرباء الميدانيين يفهمونه بسرعة — وهي النقطة نفسها التي ذكرناها في 12.9).

الفرق العملي المهم: في منصة متخصصة (Mark VIe، MicroNet Plus)، أسلوب البرمجة «يخدم» فلسفة تحكم توربين جاهزة أصلًا. وفي منصة عامة (ControlLogix)، أسلوب البرمجة هو الأداة التي يبني بها المهندس فلسفة التحكم بالكامل من الصفر.

15.7 البنية والردّية عبر الأنظمة الثلاثة

راجعنا فكرة TMR (الردّية الثلاثية) بالتفصيل في 9.1 كمبدأ عام. وتطبيقها يختلف عمليًا بين الأنظمة الثلاثة:

- **Mark VIe:** يدعم TMR كخيار قياسي معروف ومتكامل ضمن عائلة المنتج، خصوصًا في تطبيقات الوحدات الحرجة كبيرة الحجم.
- **MicroNet Plus:** يقدّم تشكيلة من Simplex وحتى Redundant حسب الطراز والتطبيق، مع تركيز خاص على استمرارية التحكم في حلقة السرعة (الحاكم، 6.5) لأنها الوظيفة الأشد حرجًا زمنيًا لمحرك رئيسي.
- **ControlLogix:** الردّية تعتمد كليًا على اختيار الـcontroller والمعمارية التي يصممها المهندس أو المكامل — فالمنصة توفّر الأدوات (معالجات مكرَّرة، شبكات مكرَّرة)، لكن مستوى الردّية النهائي «قرار تصميم»، لا خاصية مدمجة تلقائيًا في كل تطبيق.

والملاحظة نفسها تنطبق على بنية الإدخال/الإخراج: الأنظمة الثلاثة تدعم بطاقات معيارية (Modular I/O)، لكن مدى توفر بطاقات متخصصة جاهزة لإشارات التوربين تحديدًا (مثل بطاقات Speed Pickup المتخصصة أو بطاقات LVDT المزدوجة التي شرحناها في 9.7) أعلى بكثير في المنصات المتخصصة (Mark VIe، MicroNet Plus) مقارنة بمنصة عامة تحتاج غالبًا إلى وحدات معالجة إشارة إضافية (Signal Conditioning خارجية، راجع 12.1) لتحقيق الدقة نفسها.

15.8 التكامل مع DCS والتشخيص

في الفصل الحادي عشر شرحنا التكامل بين نظام تحكم التوربين وDCS بشكل عام (بروتوكولات، فلسفة تحكم، ردّية اتصال). والأنظمة الثلاثة تدعم التكامل مع DCS بشكل جيد جدًا عمليًا — وهذه نقطة لا تُشكّل فارقًا حاسمًا بينها، لأن كلها تتعامل مع بروتوكولات الصناعة القياسية نفسها (OPC، Modbus، وغيرها حسب العصر والتطبيق).

والفرق الأوضح يظهر في طبيعة **التشخيص المدمج**: فMark VIe وMicroNet Plus يقدّمان تشخيصًا «يعرف» طبيعة التوربين — تنبيهات وسجلات مصممة حول أعراض وأعطال متوقعة لهذا النوع من المعدات تحديدًا (مثلًا تمييز تلقائي بين عطل حسّاس وعطل ميكانيكي فعلي بناءً على منطق مدمج مسبقًا). أما ControlLogix فيقدّم تشخيصًا قويًا جدًا لكن على مستوى الPLC والI/O نفسه (حالة البطاقة، حالة الشبكة، حالة المعالج) — وتفسير هذه البيانات في سياق «هل هذا عطل توربين حقيقي أم عطل نظام تحكم؟» يعتمد بشكل أكبر على منطق إضافي يبنيه المهندس ضمن التطبيق نفسه.

15.9 اختيار المنصة المناسبة: منظور ميداني

من واقع عملي، لا توجد إجابة واحدة مطلقة على سؤال «أي منصة أفضل؟» — فالإجابة تعتمد على طبيعة المشروع:

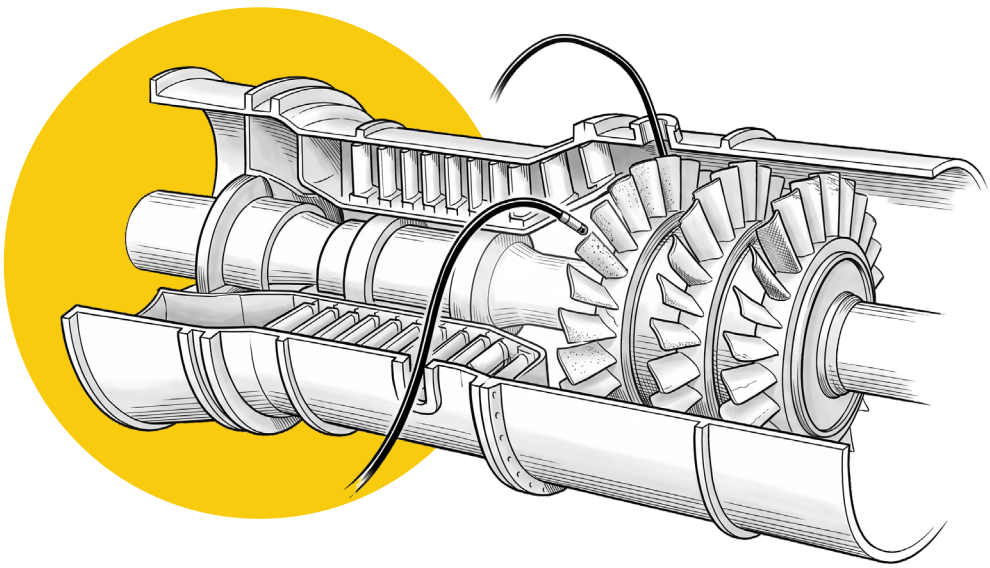
- إذا كان التطبيق توربينًا واحدًا أو أكثر ضمن محطة **GE** متكاملة: فMark VIe غالبًا الخيار الطبيعي، لأن التكامل مع باقي منظومة GE (المولد، الحماية الكهربائية، أنظمة المحطة الأخرى) مصمَّم أصلًا للعمل معًا بسلاسة أعلى.
- إذا كان التطبيق يشمل توربينات أو ضواغط أو محركات من مصادر مختلفة، أو تطبيقات **Prime Mover** متنوعة في الموقع نفسه: فMicroNet Plus يقدّم مرونة أعلى في توحيد منصة التحكم عبر معدات مختلفة المصدر، مع فلسفة «محرك رئيسي أولًا» التي ما زالت تفهم طبيعة هذه المعدات بعمق.
- **إذا كان التوربين جزءًا صغيرًا نسبيًا من منظومة تحكم أكبر بكثير (مصنع كامل بعمليات متعددة، والتوربين واحد من عشرات المعدات المتحكَّم بها بالمنصة نفسها):** فقد يكون ControlLogix الخيار الأنسب لتوحيد منصة التحكم في المصنع كله، بشرط توفر خبرة هندسية كافية لتصميم تطبيق تحكم توربين كامل من الصفر والتحقق منه — وهذا عبء هندسي حقيقي يجب أخذه بعين الاعتبار عند المقارنة، لا سعر الجهاز أو مرونته فقط.

ونقطة أخيرة تستحق التذكير: بغض النظر عن المنصة، كل المبادئ الهندسية التي شرحناها في هذا الكتاب — فلسفة الحماية متعددة الطبقات (7.1)، ومنطق MVS (9.1)، وتكرار الحسّاسات (9.6)، ومنهجية التشخيص المنظّم (10.1) — تبقى صحيحة وقابلة للتطبيق بغض النظر عن اسم الشركة المصنّعة على الجهاز. والمهندس الذي يتقن هذه المبادئ العامة يستطيع أن يتنقّل بين المنصات الثلاثة (أو أي منصة رابعة تظهر مستقبلًا) بسرعة أكبر بكثير ممن حفظ خطوات منصة واحدة فقط عن ظهر قلب — وهذا بالضبط جوهر الفلسفة التي بُني عليها هذا الكتاب بالكامل.

هذا الفصل مبني على مبادئ عامة وعلى وثائق ومقارنات منشورة من الشركات المصنّعة، لا على وثائق مشروع بعينه؛ والمرجع الحاسم عند أي قرار يبقى وثيقة المنصة المعتمدة في منشأتك.

الفصل السادس عشر:

آليات تلف مكونات المسار الساخن والفحص بالمنظار



في الفصل الخامس شرحنا مكونات التوربين الغازي وكيف صُمّمت (5.2–5.4)، وفي الفصل الثامن شرحنا برنامج الصيانة والفحوصات الكبرى (8.4). وهذا الفصل يملأ المساحة بينهما: **ماذا يحدث فعليًا للمعدن مع الوقت، وكيف نراه بأعيننا قبل أن يتحول إلى عطل؟**

وهذا الموضوع تحديدًا يستحق فصلًا مستقلًا لسبب عملي: عندما تُفتح وحدة لفحص كبير، أو عندما يُجرى فحص بالمنظار عبر منافذ الفحص والوحدة مغلقة، فإن ما يُكتب في تقرير الفحص هو **الأساس الوحيد** الذي تُبنى عليه قرارات بمئات آلاف الدولارات: هل نُشغّل، هل نُصلح، هل نستبدل، هل نُقصّر الفترة حتى الفحص القادم؟ ودقة هذا القرار تعتمد كليًا على أن يكون الفاحص قادرًا على **تسمية ما يراه بدقة** — لا على أن يكون «خبيرًا يعرف بالحدس».

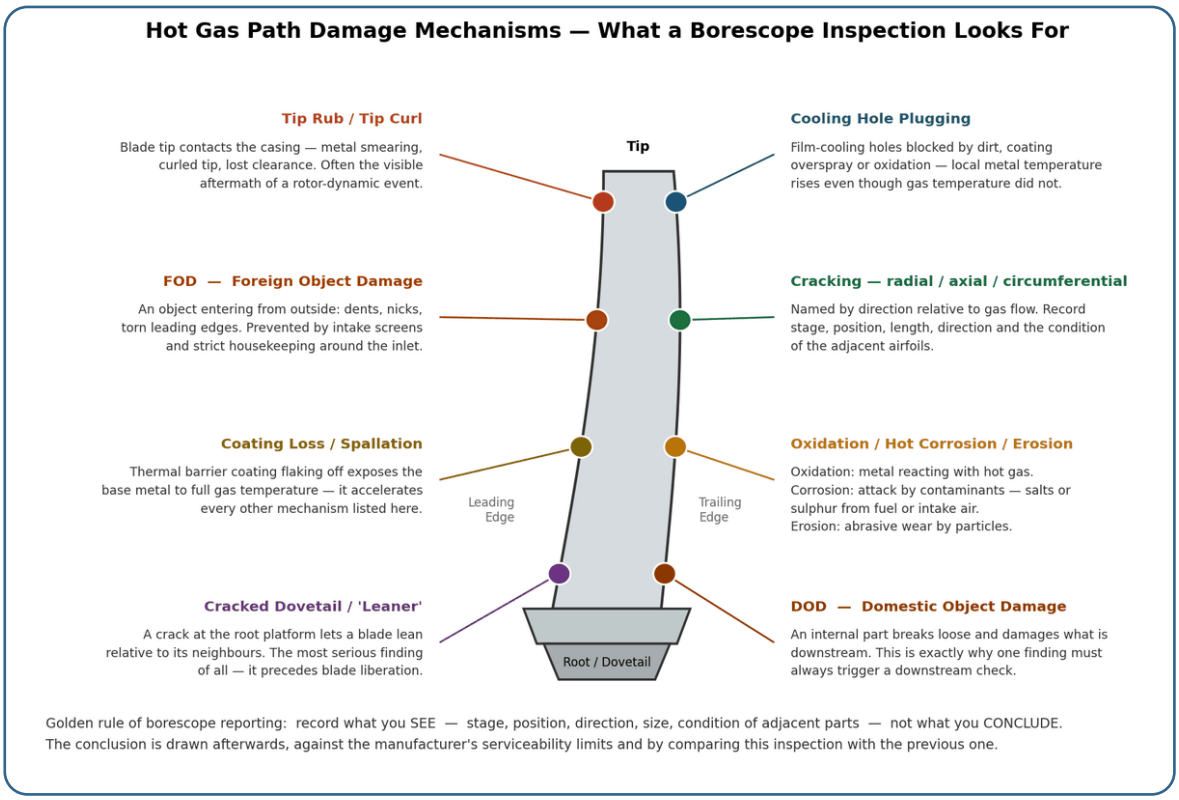
16.1 لماذا تتلف مكونات المسار الساخن أصلًا؟

مكونات المسار الساخن (Hot Gas Path — غرفة الاحتراق، الفوهات الثابتة، شفرات التوربين، الأغلفة المحيطة بها) تعمل تحت اجتماع ظروف قاسية بشكل استثنائي، ونادرًا ما تجتمع بهذا الشكل في أي معدة صناعية أخرى:

- **حرارة قريبة جدًا من حدود المادة** (5.4) — الحماية قائمة على التبريد والطلاء، وليس على هامش أمان حراري واسع.
- **إجهاد طرد مركزي هائل** على الشفرات الدوّارة، مستمر طوال التشغيل.
- **إجهاد حراري دوري** مع كل بدء وإيقاف: تسخين سريع ثم تبريد، مرة تلو الأخرى.
- **إجهاد اهتزازي عالي التردد** من مرور تيار الغاز على الشفرات (7.4).
- **بيئة كيميائية عدوانية**: أكسجين ساخن، وأي شوائب في الوقود أو في هواء السحب (كبريت، أملاح، غبار).

والنتيجة المنطقية: التلف هنا **ليس عطلًا مفاجئًا**، بل **عملية تراكمية بطيئة** لها مراحل مرئية. وهذه بالضبط الفرصة التي يستغلها الفحص الدوري: أن نرى المرحلة المبكرة، ونقرر بهدوء، بدل أن نُفاجأ بفشل مكوّن أثناء التشغيل.

16.2 آليات التلف الرئيسية



الشكل 16.1 — آليات التلف الرئيسية لمكونات المسار الساخن، وموضع ظهور كل منها على الشفرة، وما الذي يجب تسجيله عند رؤيتها.

أولًا: تلف الأجسام الغريبة (FOD — Foreign Object Damage)

جسم قادم **من خارج** المحرك دخل مع الهواء عبر السحب (5.6). وأشكاله: خدوش (Nicks)، وانبعاجات (Dents)، وتمزّق في الحافة الأمامية، وأحيانًا فقدان جزء من الشفرة.

وخط الدفاع الأول ضده ليس تقنيًا بل إجرائيًا: شبكات الحجب وسلامة الفلاتر من جهة، **وانضباط النظافة والجرد حول منطقة السحب** من جهة أخرى — فأي أداة أو قطعة تُترك داخل منطقة السحب بعد أي عمل صيانة هي FOD مؤجّل. ومن واقع الميدان، الجرد الصارم للأدوات قبل أي عمل داخل مسار الهواء وبعده هو أرخص إجراء وقائي في الكتاب كله، وأكثره إهمالًا.

ثانيًا: تلف الأجسام الداخلية (DOD — Domestic Object Damage)

قطعة **من داخل** المحرك نفسه انفصلت (صامولة تثبيت، جزء من طلاء، جزء من شفرة) وضربت ما بعدها. والفارق العملي بينه وبين FOD جوهري: DOD **دائمًا يعني وجود عطل أصلي أعلى المجرى** لم يُكتشف بعد.

والقاعدة الحديدية هنا: **أي أثر ضرب على مكوّن يستوجب فحص كل ما بعده في مسار الغاز، وفحص كل ما قبله بحثًا عن المصدر.** والاكتفاء بتوثيق الضربة نفسها خطأ متكرر.

ثالثًا: التشقق (Cracking)

أخطر الآليات وأكثرها استحقاقًا للدقة بالتوصيف. الشقوق تُسمّى **باتجاهها نسبةً لاتجاه جريان الغاز:**

- محوري **(Axial)**: موازٍ لاتجاه الجريان.
- شعاعي **(Radial)**: عمودي على اتجاه الجريان.
- محيطي **(Circumferential)**: يلتف حول محيط المحرك.

والاتجاه ليس تفصيلًا شكليًا — بل هو **دليل على نوع الحمل المسبِّب** (حراري، أو طرد مركزي، أو اهتزازي)، وبالتالي على سرعة نموه المتوقعة. والشقوق في المعدن الساخن غالبًا ضيقة وسطحية في المظهر، ويصعب رؤيتها إن كانت الإضاءة سيئة أو عدسة المنظار متدهورة — وهذا سبب مباشر للتوصية بفحص المنطقة على مستويات إضاءة متعددة قبل الحكم بخلوّها.

حالة خاصة تستحق إفرادًا: الشق في قاعدة الشفرة **(Cracked Dovetail)** — شق في منطقة تثبيت الشفرة بالعمود. وعلامته المرئية المميزة أن الشفرة تبدأ **بالميلان** (Leaning) نسبةً لجاراتها، وترتفع منصّتها قليلًا. وهذه أخطر ملاحظة يمكن أن تخرج من فحص بالمنظار على الإطلاق، لأنها تسبق **انفصال الشفرة** (Blade Liberation) — الحدث الذي يدمّر مسار الغاز بالكامل خلال ثوانٍ. واكتشاف «شفرة مائلة» يوجب تعليق التشغيل حتى تقييم الحالة، لا جدولتها للفحص القادم.

رابعًا: فقدان الطلاء (Coating Damage / Spallation)

الطلاء الحراري العازل (TBC، 5.4) يتقشّر أو يُفقد موضعيًا. وخطورته غير مباشرة لكنها متسارعة: فبمجرد انكشاف المعدن الأساسي، يتعرّض لحرارة الغاز كاملة، فتتسارع **كل** الآليات الأخرى في ذلك الموضع — أكسدة، وتشقق حراري، وزحف. لذلك يُعامَل فقدان الطلاء كـ«مضاعِف» لبقية الملاحظات، لا كملاحظة مستقلة.

خامسًا: الأكسدة والتآكل الساخن والتعرية (Oxidation / Hot Corrosion / Erosion)

ثلاث آليات تُخلط ببعضها كثيرًا رغم اختلاف أسبابها وعلاجها:

الآلية	السبب	المظهر النموذجي	ما الذي يقلّلها فعليًا
الأكسدة (Oxidation)	تفاعل المعدن مع الأكسجين عند حرارة عالية	طبقة سطحية متغيّرة اللون، خشونة متزايدة	خفض حرارة المعدن: طلاء سليم، تبريد فعّال
التآكل الساخن (Hot Corrosion)	ملوّثات — كبريت في الوقود، أملاح في هواء السحب	حفر موضعي (Pitting)، تآكل غير منتظم	جودة الوقود، وفلترة السحب (خاصة في المواقع الساحلية)
التعرية (Erosion)	جسيمات صلبة دقيقة تحك السطح باستمرار	ترقّق تدريجي منتظم، حواف حادة تصبح مستديرة	كفاءة فلترة السحب، والتنظيف الذاتي (5.6)

والفارق العملي المهم: الأكسدة مشكلة **حرارية** تُعالَج بالتصميم والتبريد؛ والتآكل الساخن مشكلة **كيميائية** تُعالَج بجودة الوقود والهواء؛ والتعرية مشكلة **ميكانيكية** تُعالَج بالفلترة. وتشخيص خاطئ هنا يعني إنفاقًا على الحل الخطأ لسنوات.

سادسًا: احتكاك رأس الشفرة (Tip Rub) والتفاف الرأس (Tip Curl)

فراغ رأس الشفرة (5.4) صغير أصلًا بشكل مقصود. وأي حدث يقلّله لحظيًا — انتقالية حرارية سريعة، أو اهتزاز مرتفع، أو انزياح للعمود — ينتج تلامسًا مباشرًا بين رأس الشفرة والغلاف. والمظهر: أثر دهس معدني، ورأس ملتوٍ، وفراغ أصبح أوسع بشكل دائم بعد الحدث (فاقد كفاءة مستمر).

النقطة التشخيصية: أثر الاحتكاك **دليل على حدث سابق**، وليس السبب نفسه. السؤال الصحيح بعد رؤيته: ما الذي حدث للوحدة سابقًا حتى لامس الرأس الغلاف؟ — راجع 10.4 و13.6.

سابعًا: انسداد ثقوب التبريد (Cooling Hole Plugging)

ثقوب التبريد الغشائي (5.4) دقيقة جدًا، وقابلة للانسداد بالغبار أو برذاذ طلاء أثناء الترميم أو بنواتج الأكسدة. وأثرها خبيث: **حرارة المعدن ترتفع موضعيًا رغم أن حرارة الغاز لم تتغيّر**، فلا يظهر أي شيء في قراءات التشغيل — ويظل السبب مخفيًا حتى الفحص البصري التالي. وهذه بالضبط حالة «لا شيء في البيانات، وكل شيء في المنظار».

ثامنًا: الزحف والكلال (Creep and Fatigue)

آليتان تراكميتان لا تظهران غالبًا كـ«صورة» واضحة في المنظار، لكنهما تفسّران لماذا للمكونات عمر محدد أصلًا:

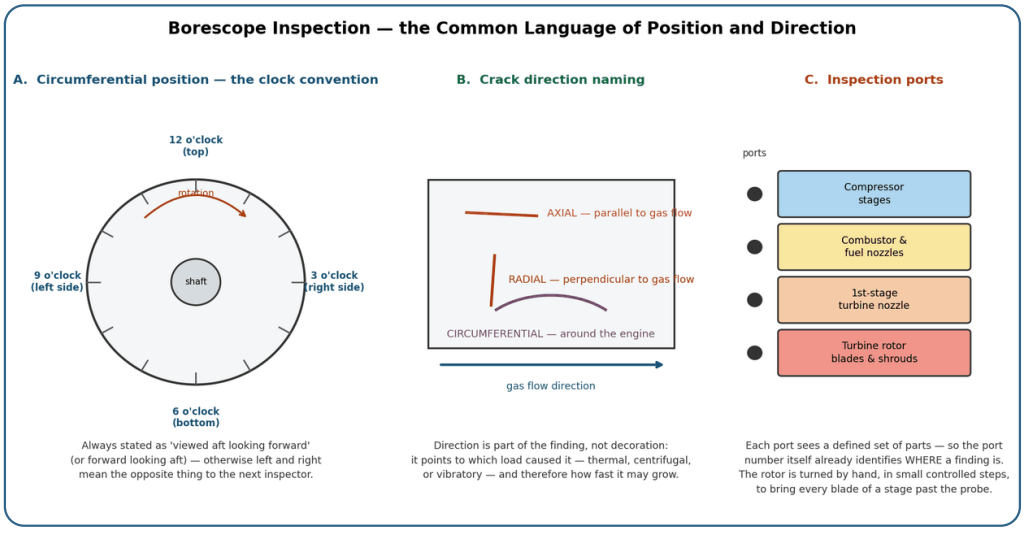
- الزحف **(Creep)**: استطالة بطيئة ودائمة في المعدن تحت حمل ثابت وحرارة عالية لفترة طويلة. وتُقاس في الفحوصات المفكوكة كتغيّر في أبعاد الشفرة، وهي السبب الجوهري لتحديد "عمر بالساعات" للمكوّن.
- الكلال **(Fatigue)**: تشقق ناتج عن تكرار الحمل، ونوعان: كلال منخفض الدورات **(LCF)** مرتبط بعدد **مرات البدء والإيقاف**، وكلال عالي الدورات **(HCF)** مرتبط بالاهتزاز عالي التردد أثناء التشغيل.

ومن هنا تحديدًا تأتي فكرة "العمر المكافئ" **(Equivalent Operating Hours)** التي تعتمدها جداول الصيانة (8.4): فمرة بدء واحدة تُحمّل المعدة إجهادًا يعادل عددًا من ساعات التشغيل المستقر. ولهذا فإن وحدة تعمل باستمرار (Base Load) تصل إلى فحصها الكبير بعدد ساعات مختلف تمامًا عن وحدة تُشغَّل وتُوقَف يوميًا (Peaking) — رغم تشابه ساعات التشغيل المسجّلة بالساعة على العدّاد.

16.3 الفحص بالمنظار (Borescope Inspection)

الفحص بالمنظار هو الأداة التي تجعل كل ما سبق **مرئيًا بدون فك المعدة**. ومبدؤه بسيط: منظار مرن أو صلب بكاميرا وإضاءة، يُدخَل عبر منافذ فحص مخصصة في الغلاف، فيُظهر داخل المسار الساخن مباشرة.

قيمته العملية الأكبر أنه **يحوّل الصيانة من «زمنية» إلى «قائمة على الحالة»** (راجع 8.1): بدل فتح الوحدة كل فترة ثابتة لنرى ما بداخلها، ننظر أولًا — ثم نقرر.



الشكل 16.2 — اللغة المشتركة للفحص بالمنظار: تحديد الموضع المحيطي بنظام الساعة، تسمية اتجاه الشق نسبةً لجريان الغاز، ومنافذ الفحص الموزعة على طول المحرك.

اللغة المشتركة أولًا — قبل أي شيء تقني

أهم ما يميّز فحصًا احترافيًا عن فحص هاوٍ ليس جودة المنظار، بل **دقة وصف الموضع**. الاصطلاحات المستقرة صناعيًا:

- **الموضع المحيطي بنظام الساعة**: 12 في الأعلى، 6 في الأسفل، 3 و9 على الجانبين. **بشرط حاسم**: تحديد اتجاه النظر صراحةً ("من الخلف باتجاه الأمام" أو العكس) — وإلا انقلب اليمين واليسار عند الفاحص التالي، وضاعت قابلية المقارنة بين فحصين.
- **الموضع المحوري**: رقم المرحلة (Stage) ورقم المنفذ المستخدم — والمنفذ نفسه يحدد مسبقًا أي أجزاء يمكن رؤيتها منه.
- **اتجاه الملاحظة**: محوري/شعاعي/محيطي كما شرحنا في 16.2.
- **الموضع على المكوّن**: حافة أمامية أم خلفية، جهة الضغط أم جهة السحب، عند الرأس أم المنتصف أم القاعدة.

إجراء الفحص عمليًا

1. **قبل البدء — راجع تاريخ المعدة.** أي مكوّن استُبدل؟ وأي ترميم أُجري؟ وهل هناك ملاحظة سابقة يجب متابعة تطوّرها تحديدًا؟ فالفحص بلا خلفية تاريخية يفقد نصف قيمته، لأن **معدّل التغيّر** أهم من الحالة اللحظية.
2. **تحديد المنافذ المطلوبة** حسب هدف الفحص (فحص دوري شامل، أم متابعة ملاحظة محددة، أم تحقيق بعد حدث).
3. **تدوير العمود يدويًا بخطوات صغيرة مضبوطة** لتمرير كل شفرة في المرحلة أمام المنظار. والتدوير السريع خطأ شائع: يفوّت الشقوق الدقيقة ويجعل الحكم على أي شفرة بعينها مستحيلًا لاحقًا.
4. **الفحص المنظّم لا العشوائي**: مسح المنطقة بترتيب ثابت متفق عليه، لا "تجوّل" بالمنظار. المسح غير المنظّم يعني مناطق لم تُرَ أصلًا، وأسوأ من ذلك: لا أحد يعلم أنها لم تُرَ.
5. **التوثيق أثناء الفحص لا بعده**: صور وفيديو لكل ملاحظة مع بياناتها كاملة لحظة رؤيتها.

قاعدة ذهبية في التقرير: سجّل ما رأيت، لا ما استنتجت. فعبارة «شق شعاعي بطول تقريبي كذا، على الحافة الأمامية لشفرة المرحلة الثانية، عند موضع الساعة 4، والشفرات المجاورة سليمة» — هذه ملاحظة قابلة للاستخدام والمقارنة. أما «الشفرة تحتاج استبدال» فليست ملاحظة، بل **قرار** يُتخذ لاحقًا بمقارنة الملاحظة مع حدود الصلاحية المعتمدة من المصنّع، ومع الفحص السابق.

16.4 من الملاحظة إلى القرار

بعد انتهاء الفحص، تمر كل ملاحظة عبر ثلاثة أسئلة بهذا الترتيب — والخلط في ترتيبها هو أكثر أخطاء هذه المرحلة شيوعًا:

1. هل تتجاوز حدود الصلاحية المعتمدة **(Serviceability Limits)؟** — وهذه حدود يحددها المصنّع لكل نوع ملاحظة، في كل موضع، وفي كل مرحلة. ولا تُستنبط بالخبرة الشخصية ولا تُقارَن بمعدة أخرى.
2. **ما معدّل تغيّرها منذ الفحص السابق؟** — شق ثابت الطول منذ فحصين حالة مختلفة تمامًا عن شق تضاعف طوله خلال نفس الفترة، حتى لو كان الطول الحالي متطابقًا. **المعدّل هو المعلومة، لا القيمة.**
3. **ما مسار تصعيد الخطورة؟** — هل هذه ملاحظة تنتهي عند نفسها (تعرية سطحية)، أم لها مسار معروف نحو فشل أكبر (شق قاعدة ← ميلان ← انفصال شفرة ← تدمير المسار)؟

ومخرج هذه المرحلة أحد أربعة قرارات: **تشغيل عادي**، أو **تشغيل مع تقصير الفترة حتى الفحص التالي ومتابعة محددة**، أو **إصلاح/ترميم في الفحص المجدول القادم**، أو **إيقاف واستبدال قبل استئناف التشغيل**.

16.5 اهتزاز الشفرات والإجهاد وتقدير العمر

في القسم 16.2 استعرضنا آليات التلف كما **تُرى** بالمنظار. وهذا القسم يشرح ما **لا يُرى**: القوى والاهتزازات التي تعمل داخل المعدن وتنتهي بالشقوق التي نراها لاحقًا. وهو يستحق مكانه لسبب رقمي صريح: **مشاكل الشفرات تمثّل نسبة معتبرة جدًا من أعطال التوربينات الغازية** — إذ تشير دراسات منشورة إلى أنها قد تصل إلى نحو 35–42% من الأعطال، وأن التكلفة الأكبر تتوزع بين الكلال عالي الدورات، والزحف، وفقدان تبريد الشفرات، والانحباس. أي أن **فهم هذا الموضوع وحده يغطي أكثر من ثلث ما قد يوقف وحدتك**.

التصنيف الأول: ثلاثة أنواع من الكلال — لا نوع واحد

في 16.2 ذكرنا الكلال بنوعيه بإيجاز؛ والتفصيل الصحيح ثلاثي:

النوع	مصدره	أين يظهر عادةً	ما الذي يستهلكه
الكلال منخفض الدورات **(LCF)**	دورات البدء والإيقاف	الأقراص (Disks)، وثقوب البراغي، ومناطق التركيز	**عدد مرات البدء**
الكلال عالي الدورات **(HCF)**	اهتزاز عالي التردد أثناء التشغيل	الشفرات والريش الثابتة	**زمن التشغيل عند حالة رنين**
الكلال الحراري-الميكانيكي **(TMF)**	إجهاد حراري من التسخين/التبريد السريع	مكونات المسار الساخن	**الانتقاليات الحادة، وخصوصًا القواطع**

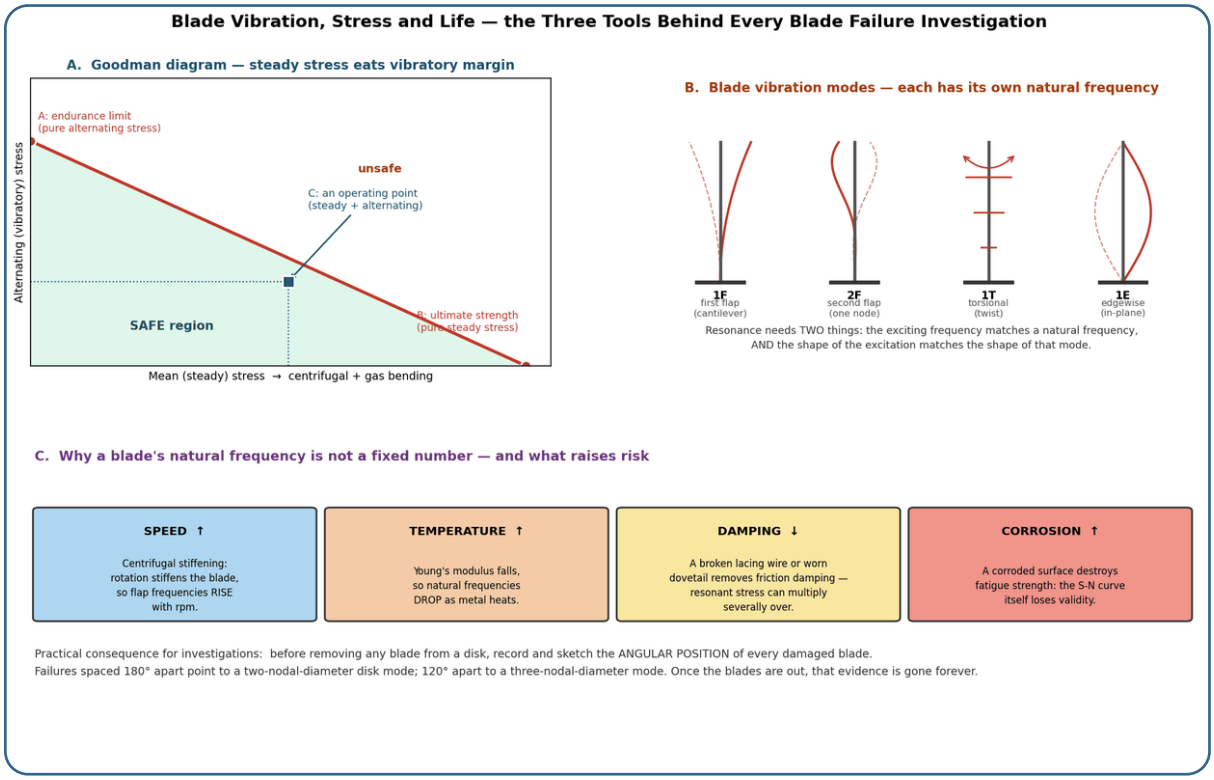
والتمييز بينها عملي لا أكاديمي: **LCF** يُعالَج بتقليل عدد مرات البدء غير الضرورية؛ وHCF يُعالَج بإبعاد الرنين وبالحفاظ على التخميد؛ وTMF يُعالَج بانضباط معدلات التسخين والتبريد وبتقليل القواطع.

وهنا رقم يستحق أن يُحفَظ: القاطع أثناء الحمل الكامل **(Full Load Trip)** قد يستهلك من عمر مكونات المسار الساخن ما يعادل مئات ساعات التشغيل — لأن التبريد المفاجئ للمعدن الساخن يُنتج إجهادًا حراريًا عنيفًا. وهذا هو التبرير الكمي الحقيقي لكل ما قلناه عن القواطع الكاذبة (10.18) **وعن أهمية الإيقاف المنظّم بدل القطع كلما أمكن** (9.3): الفارق ليس إزعاجًا تشغيليًا، بل عمرًا يُستهلك.

التصنيف الثاني: الاهتزاز القسري والرفرفة

- الاهتزاز القسري **(Forced Vibration):** ينشأ من مرور الشفرات الدوّارة عبر اضطرابات ثابتة — أعقاب الريش الثابتة (Nozzle/Stator Wakes)، دعامات المدخل، تشوه تدفق السحب. وهو **مرتبط بمضاعفات سرعة الدوران**، ولهذا يمكن التنبؤ به وتمثيله بمخطط كامبل (5.5).
- الرفرفة **(Flutter):** أندر وأصعب تنبؤًا — اهتزاز ذاتي الإثارة (Self-Excited) **لا يرتبط بمضاعف صحيح لسرعة الدوران**، يحدث في مناطق معينة من خريطة تشغيل الضاغط. وخطورته أنه يبدأ ببضع شفرات ثم يتسع ليشمل الصف كله.

الفارق التشخيصي المباشر: ارتفاع عند مضاعف صحيح للسرعة (1X، 2X، تردد مرور الشفرات) يشير إلى اهتزاز قسري؛ وارتفاع عند تردد **لا يرتبط بمضاعف صحيح** يوجّه الشك نحو الرفرفة أو عدم استقرار آخر — وهذه بالضبط قراءة المخطط الطيفي التي شرحناها في 7.4.



الشكل 16.3 — (أ) مخطط جودمان: الإجهاد الثابت يقضم هامش الإجهاد الاهتزازي المسموح. (ب) أنماط اهتزاز الشفرة الأساسية. (ج) ما الذي يغيّر التردد الطبيعي ويرفع الخطورة.

الأداة الأولى: مخطط كامبل (Campbell Diagram)

شرحناه في 5.5 لقطار العمود؛ وهو يُستخدم بالمنطق نفسه **للشفرة نفسها**: ترددات الشفرة الطبيعية أفقيًا، ومراتب الإثارة (سرعة الدوران ومضاعفاتها، وتردد مرور الريش الثابتة) كخطوط مائلة — وكل تقاطع بينهما احتمال رنين.

لكن انتبه إلى نقطة يخطئ فيها كثيرون: التقاطع في مخطط كامبل **لا يعني بالضرورة اهتزازًا خطيرًا**. فلحدوث ضرر فعلي يجب أن تجتمع ثلاثة: قوة إثارة كافية، وتخميد غير كافٍ لامتصاصها، وتوافق طوري وموداليّ بينهما.

الأداة الثانية: مخطط التداخل المتقدم (SAFE Diagram)

وهو يعالج تحديدًا نقص مخطط كامبل، بقاعدة أنيقة: **للرنين شرطان لا شرط واحد** —

1. **تطابق التردد:** تردد الإثارة يساوي التردد الطبيعي للشفرة.
2. **تطابق الشكل:** أن يكون **شكل** قوة الإثارة مطابقًا لشكل نمط الاهتزاز المعني.

فقوة إثارة بشكل لا يشبه شكل النمط لن تنقل إليه طاقة تُذكر مهما تطابق التردد — تمامًا كمن يدفع أرجوحة بالاتجاه الخطأ. وهذه الفكرة هي ما يفسّر لماذا لا تنتهي كل التقاطعات بأعطال.

الأداة الثالثة: مخطط جودمان (Goodman Diagram)

وهو الأداة التي تربط **الإجهاد الثابت** بـ**الإجهاد الاهتزازي المسموح**، وأثرها العملي عميق: المحور الأفقي يمثل الإجهاد الثابت (الطرد المركزي + انحناء الغاز)، والرأسي يمثل الإجهاد الاهتزازي، والخط الواصل بين حد الكلال والمقاومة القصوى يحدّ **منطقة التشغيل الآمن**.

الرسالة الجوهرية للمخطط: كلما ارتفع الإجهاد الثابت، **قلّ الإجهاد الاهتزازي الذي تحتمله الشفرة**. أي أن الشفرة العاملة عند حمل عالٍ وحرارة عالية تكون أضعف أمام مستوى الاهتزاز نفسه الذي تحتمله بسهولة عند حمل منخفض. ولهذا **لا يمكن الحكم على «مستوى اهتزاز مقبول» بمعزل عن حالة التشغيل**.

ولماذا التآكل خطر مضاعف؟ لأن السطح المتآكل أو المنقّر (Pitted) يُفقد منحنى الكلال **(S-N Curve)** صلاحيته أصلًا — فحد الكلال المستخدم في التصميم لم يعد ينطبق. وهذه هي الحلقة التي تربط 16.2 بهذا القسم: فالتآكل لا يضعف المعدن فحسب، بل **يُبطل الأساس الذي حُسبت عليه سلامته**.

التردد الطبيعي ليس رقمًا ثابتًا

نقطة يغفلها كثيرون: تردد الشفرة الطبيعي **يتغيّر أثناء التشغيل** بعاملين متعاكسين:

- **السرعة ترفعه:** الدوران يشدّ الشفرة فيزيد صلابتها (Centrifugal Stiffening) — فترتفع ترددات أنماط الانحناء مع الدورات.
- **الحرارة تخفضه:** ارتفاع الحرارة يقلل معامل المرونة (Young›s Modulus) — فتنخفض الترددات.

والنتيجة أن ترددات شفرات التوربين الساخنة تميل للانخفاض رغم ارتفاع السرعة — وهذا وحده يفسّر لماذا لا يكفي حساب الترددات على البارد.

التخميد: البطل الصامت

مقاومة الشفرة للرنين لا تعتمد على متانتها فقط، بل على قدرتها على **تبديد الطاقة**: احتكاك في قاعدة التثبيت (Dovetail)، وأسلاك الربط بين الشفرات (Lacing Wire)، والأغلفة الطرفية (Shrouds)، ومخمدات مخصصة في التصاميم الحديثة.

والنتيجة العملية مقلقة بحق: فقدان التخميد — لكسر سلك ربط، أو لاتساع فتحة تثبيته بفعل التآكل، أو لتآكل قاعدة الشفرة — **يمكن أن يضاعف الإجهاد الاهتزازي عدة أضعاف** بلا أي تغيّر في قوة الإثارة نفسها. ولهذا فإن ملاحظة «سلك ربط مكسور» أثناء الفحص بالمنظار (16.3) **ليست ملاحظة تجميلية** — بل هي إنذار بأن منظومة الحماية من الرنين تدهورت.

قاعدة تحقيق ذهبية: وثّق الموضع الزاوي قبل الفك

وهذه من أثمن القواعد العملية في هذا الفصل كله. فعند حدوث عطل في عدة شفرات، **يحمل الموضع الزاوي للشفرات المتضررة حول القرص التشخيص نفسه:**

- أعطال متباعدة بـ **180 درجة** ← نمط اهتزاز قرصي بقطرين عقديين (Two Nodal Diameter).
- أعطال متباعدة بـ **120 درجة** ← نمط بثلاثة أقطار عقدية.

ولهذا: يجب تسجيل ورسم الموضع الزاوي لكل شفرة متضررة قبل نزع أي شفرة من القرص. فبمجرد فك الشفرات يضيع هذا الدليل نهائيًا — ومعه الفرق بين «عطل شفرة» و«نمط اهتزاز قرصي كامل يهدد الصف كله». ومن واقع الميدان، هذا خطأ يتكرر تحت ضغط الوقت أثناء الفحوصات الكبرى، وثمنه تحقيق يبدأ ناقصًا ولا يكتمل أبدًا.

16.6 تلف الشفرات الناتج عن الوقود ومنظومة الاحتراق

هذا القسم يربط الفصل السادس عشر بالفصل السادس ربطًا مباشرًا: **جودة الوقود ليست موضوع أداء — هي موضوع سلامة معدن.**

أولًا: السوائل المنقولة مع الغاز (Liquid Carryover)

رغم كل المعالجة، ليس نادرًا أن يحمل الغاز الطبيعي قطرات هيدروكربونية سائلة. وأسبابها الشائعة: رغوة في أوعية الفصل، أو تدفق أو ضغط يتجاوز سعة الفاصل، أو سوء تشغيل فاصل طردي، أو **تقلبات سريعة في ضغط الغاز** (وهذه الأخيرة يغفلها كثيرون).

لماذا خطرة إلى هذا الحد؟ لأن السائل يحمل طاقة حرارية **بوحدة الحجم** أعلى بمراتب من الغاز — وقد تصل لأضعاف كثيرة. فوصول «دفقة» سائلة صغيرة يعني ارتفاعًا مفاجئًا وحادًا بالطاقة الداخلة، ويترتب عليه:

- **ارتفاع حاد وموضعي بحرارة الاحتراق** — أي بقعة ساخنة تُتلف الشفرات والبطانة.
- **تشوه شديد في نمط توزيع الحرارة**، فيقفز فارق حرارة العادم إلى قيم كبيرة (حالة 9 في الفصل 13).
- **زيادة مفاجئة في الضغط الخلفي** قد تدفع نقطة تشغيل الضاغط نحو خط الانحباس (5.2) — أي أن مشكلة وقود تتحول إلى مشكلة ضاغط.
- **اشتعال متأخر في مناطق غير مصممة للاحتراق** — خلف فوهة الوقود أو في مسار لاحق.

وهذا بالضبط سبب اشتراط درجة التحميص **(Superheat)** التي شرحناها في 6.2: فالغاز يجب أن يصل بهامش حراري كافٍ فوق نقطة الندى الهيدروكربونية — لا أن يكون «جافًا نظريًا» فقط. وأي حسّاس أو منظومة تسخين تعطّلت هنا تُصبح مشكلة معدن لا مشكلة قياس.

ثانيًا: تكوّك فوهات الوقود (Coking) واختلال توزيعها

فوهة الوقود تعمل عمليًا كفتحة قياس **(Metering Orifice)** — أي أن نسبة الضغط عبرها هي التي تحدد التدفق وتوزيعه. والترسبات الكربونية (Coke) على الفوهة، أو انسدادها بشوائب قادمة من فلاتر الوقود نفسها، تُنتج سلسلة خبيثة:

حاقن وقود مسدود جزئيًا ← يتحول تدفقه للحاقنات الأخرى ← ضغط أعلى بالحاقنات السليمة ← انزياح اللهب باتجاه المصب **(Downstream)** ← تلف البطانة والفوهة الثابتة **(Nozzle)** والشفرات

ونقطة تصميمية مهمة جدًا للصيانة: الفوهات لا تُستبدل فرادى بلا حساب — بل يُوصى **بموازنة تدفق مجموعة الفوهات ضمن هامش ضيق فيما بينها** (نسبة صغيرة جدًا)، لأن اختلال التوازن بينها **هو نفسه** مصدر عدم تجانس الاحتراق. أي أن فوهة جديدة ممتازة وسط فوهات قديمة قد تصنع مشكلة بدل أن تحلها.

ثالثًا: تذبذبات ضغط الاحتراق (Combustion Dynamics)

نسبة ضغط منخفضة عبر الفوهة تجعل منظومة الاحتراق **عرضة للتذبذبات الضغطية** التي تنتشر عكسيًا نحو الفوهة، فتُنتج تفاوتًا كبيرًا في تدفق الوقود وفي إطلاق الحرارة. وهذه التذبذبات ليست إزعاجًا صوتيًا — **بل هي قوة إثارة اهتزازية حقيقية** تصل إلى الشفرات، وترتبط مباشرة بكل ما شرحناه في 16.5 عن الكلال عالي الدورات. وهنا يظهر الخيط: **تذبذب احتراق ← إثارة اهتزازية ← كلال عالي الدورات ← كسر شفرة** — سلسلة كاملة تبدأ بمشكلة وقود وتنتهي بعطل ميكانيكي.

رابعًا: الحرائق والانفجارات الداخلية

خطر يستحق التسمية الصريحة، وله سيناريوهات معروفة:

- حقن وقود لا يشتعل كما هو مقصود، ثم اشتعال ذاتي **(Autoignition)** لاحق عند ملامسته سطحًا ساخنًا.
- **انطفاء لهب أثناء التشغيل** مع استمرار تدفق الوقود، ثم إعادة اشتعال عشوائية.
- **تحويل وقود غير منضبط** (سائل ← غاز) بتوقيت أو تطهير خاطئين.
- **تجمّع وقود سائل في أسفل غرفة الاحتراق بعد الإيقاف** لم يُصرَّف، ثم اشتعاله بغازات ساخنة عند البدء التالي.

وهنا تظهر أهمية زمن قطع الوقود: الأدبيات الهندسية تشدد على أن قطع الوقود عند القطع يجب أن يكون **سريعًا جدًا — بحدود أجزاء صغيرة من الثانية** — لأن كل ميلي ثانية إضافية تعني وقودًا إضافيًا يدخل معدة ساخنة بلا احتراق منضبط. وهذا يعطي معنى ماديًا ملموسًا لكل ما قلناه في 7.8 عن سرعة مسار القطع وعن صمامات الإيقاف سريعة الإغلاق.

نتيجة ثانوية مهمة للحريق داخل الحجرة: الحريق يشوّه الغلاف حراريًا، وتشوه الغلاف يعني احتكاك رؤوس الشفرات **(Tip Rub)** — أي أن حادث حريق قد يترك خلفه عطلًا ميكانيكيًا يظهر لاحقًا. ولهذا يجب أن يشمل الفحص بعد أي حريق فحصًا بالمنظار للخلوصات، لا الاكتفاء بمعالجة سبب الحريق.

خامسًا: مراقبة النمط لا الحد

خلاصة عملية تجمع هذا القسم كله: أفضل أداة إنذار مبكر لمشاكل الوقود والاحتراق هي **مراقبة نمط توزيع حرارة العادم وتغيّراته النوعية**، لا مجرد مقارنة القيم بالحدود المطلقة. فتغيّر في شكل التوزيع — دون تجاوز أي حد — هو غالبًا **أول** إشارة على فوهة تتكوّك أو توزيع وقود يختل. وهذه بالضبط الفكرة التي بنينا عليها حالة 9 وحالة 8 في الفصل الثالث عشر: **النمط قبل القيمة.**

16.7 قطع الغيار والترميم: عندما تصير الجودة مسألة سلامة

نقطة عملية تواجه كل منشأة تشغّل وحدات قديمة: قطع غيار المسار الساخن باهظة، والموردون من غير المصنّع الأصلي (Non-OEM) أرخص. والسؤال المشروع: هل هذا قرار سليم؟

الجواب الأمين: يمكن أن يكون سليمًا تمامًا — بشرط انضباط الجودة. فعدد من الموردين المستقلين يضاهي جودة الأصلي فعليًا. لكن المخاطر الحقيقية تكمن في تفاصيل قلّما يُنتبه لها:

- الترقيات غير المعروفة **(Silent Uprates):** الشفرة «المطابقة للأصل» قد تكون مطابقة **لتصميم قديم** — بينما المصنّع الأصلي أدخل تحسينات لاحقة (زيادة أحمال، تعديل تبريد، تصحيح مشكلة اهتزاز) لا يعلم بها المورّد المستقل. والنتيجة: قطعة «أصلية الشكل» لكنها تحمل عيبًا عولج قبل سنوات.
- **مواصفات الترميم غير المحددة بدقة:** عند ترميم الشفرات (Refurbishment) يجب أن تُحدَّد صراحةً إجراءات تحضير السطح، وإزالة الطلاء القديم، والمعالجات الحرارية، **واختبارات تدفق قنوات التبريد** للمكونات المبردة. فقناة تبريد مسدودة جزئيًا بعد الترميم تعني بقعة ساخنة لن يراها أحد حتى الفحص التالي (16.2).
- **تفاصيل التصنيع الخفية:** حالة موثقة في الأدبيات الهندسية تُظهر فشل ريش توجيه بالكلال، وتبيّن بالتحليل المعدني أن سبب الهشاشة كان **غياب التسخين المسبق والمعالجة الحرارية بعد اللحام** — وهو تفصيل تصنيعي لا يظهر في أي فحص بصري، وينتج معدنًا هشًا وإجهادات متبقية. والدرس الأعم من الحالة نفسها: **نادرًا ما يكون لعطل الشفرة سبب واحد**؛ فغالبًا هو **تركيبة** من عيب تصنيع + ظرف تشغيلي + تثبيت غير منضبط.

القاعدة العملية: عند شراء قطع غيار أو ترميم مكونات مسار ساخن، **اكتب مواصفة دقيقة ومعايير قبول واضحة، وتحقق منها عند الاستلام** — ولا تكتفِ بمطابقة الشكل والأبعاد. وأي تغيير في مصدر القطع أو في مواصفتها هو **تغيير يستوجب المرور بإدارة التغيير (8.6)**، لا شراءً روتينيًا.

16.8 خلاصة عملية: ما الذي يطيل عمر المسار الساخن فعليًا؟

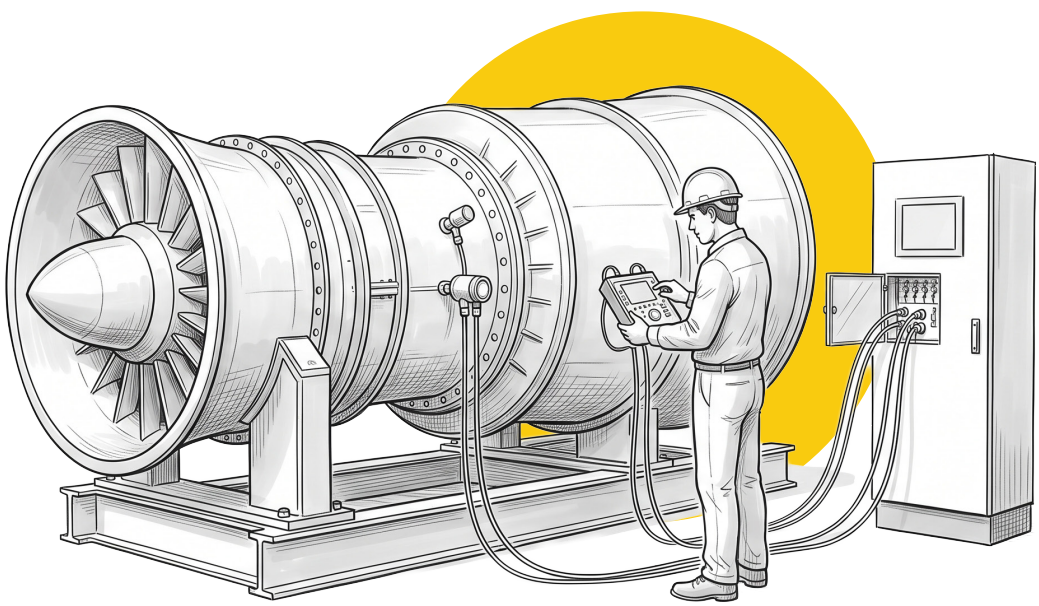
بعد استعراض كل الآليات، تتلخص الوقاية العملية في ست نقاط — كلها مرتبطة بفصول سابقة، وهذا مقصود:

- **نظافة هواء السحب** (5.6): تقلل التعرية والتآكل والتلوث معًا — وهي أعلى عائد وقائي مقابل التكلفة في أي توربين، خصوصًا في البيئات الصحراوية والساحلية.
- **جودة الوقود** (6.2، 16.6): محتوى الكبريت والشوائب هو المحرّك المباشر للتآكل الساخن، والسوائل المنقولة مع الغاز سبب مباشر للبقع الساخنة.
- **انضباط الانتقاليات** (9.3): كل بدء وإيقاف يستهلك من عمر الكلال منخفض الدورات، **وكل قاطع عند الحمل الكامل يكلف أضعافًا من ذلك** (16.5). تقليل القواطع الكاذبة ليس راحة تشغيلية — هو إطالة عمر مقاسة.
- **الالتزام بحدود الحرارة** (7.3، 9.9): التشغيل المستمر قرب الحد الأعلى يسرّع الزحف والأكسدة **بشكل غير خطي** — وتشير الأدبيات الهندسية إلى قاعدة تقريبية مدهشة: **ارتفاع قدره 15 درجة مئوية في حرارة معدن الشفرة قد يخفض عمر الزحف إلى النصف**. وهذا وحده يفسّر لماذا تُعامَل ثقوب التبريد المسدودة والطلاء المفقود بهذا القدر من الجدية (16.2).
- **حماية الضاغط من الانحباس** (5.2، 10.6): الانحباس من أكثر مسبّبات أعطال شفرات الضاغط — ويُشخّص خطأً كـFOD بكثرة، لأن الضرر الناتج عن ارتداد التدفق يشبه ضربة جسم غريب. ولهذا يجب أن يكون سؤال «هل مرّت الوحدة بانحباس؟» ضمن أول أسئلة أي تحقيق في عطل شفرة.
- **جدّية الفحص الدوري** نفسه (16.3): الفحص المنضبط الموثّق هو ما يحوّل كل النقاط السابقة من نوايا إلى نتائج قابلة للقياس.

وبهذا يكتمل الخط الذي بدأناه في الفصل الخامس (كيف صُمّم المكوّن)، ومررنا فيه في الفصل الثامن (كيف نصونه)، وننهيه هنا (كيف نرى حالته الحقيقية بأعيننا، ونفهم ما يجري داخل المعدن قبل أن يظهر لنا).

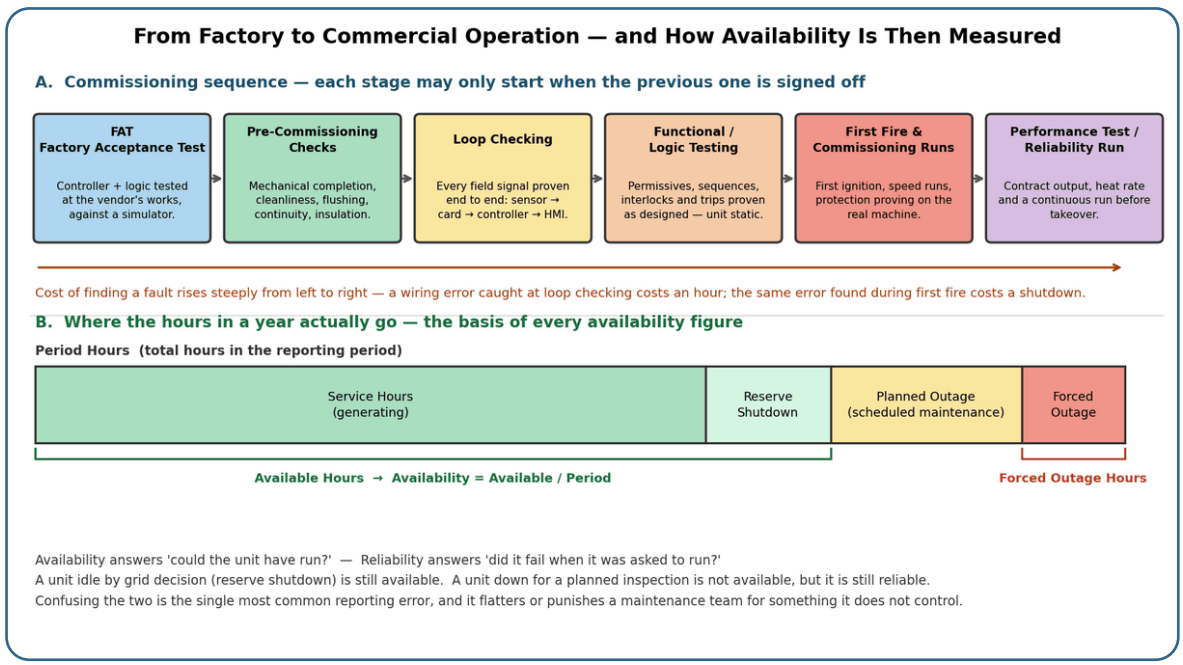
الفصل السابع عشر:

التشغيل التجريبي والاختبارات ومؤشرات الموثوقية



كل الفصول السابقة تعاملت مع توربين غازي **قائم ويعمل**. لكن بين وصول المعدة من المصنع وبين تسليمها للتشغيل التجاري توجد مرحلة كاملة يمر بها كل مهندس تحكم وتشغيل مرة على الأقل بحياته المهنية — وهي أيضًا المرحلة التي تُكتشف فيها معظم أخطاء التصميم والتركيب. وبعد التسليم، يبدأ سؤال آخر مختلف تمامًا: **كيف نقيس أن الوحدة «جيدة» فعلًا؟** هذا الفصل يغطي الاثنين.

17.1 تسلسل التشغيل التجريبي



الشكل 17.1 — أعلى: تسلسل مراحل التشغيل التجريبي وتصاعد كلفة اكتشاف الخطأ عبرها. أسفل: توزيع ساعات الفترة الزمنية وكيف تُشتق منه مؤشرات الإتاحية والموثوقية.

المبدأ الحاكم لكل هذا التسلسل بسيط وصارم: **لا تبدأ مرحلة قبل توقيع اعتماد المرحلة السابقة**. سبب هذه الصرامة اقتصادي بحت — كلفة اكتشاف الخطأ ترتفع بشكل حاد كلما تأخر اكتشافه. خطأ توصيل أسلاك يُكتشف أثناء فحص الحلقات يُصلَح خلال ساعة؛ نفس الخطأ لو ظهر أثناء أول إشعال يعني إيقافًا كاملًا، وتحقيقًا، وربما ضررًا فعليًا.

1. اختبار قبول المصنع (FAT — Factory Acceptance Test)

يُجرى بمقر المورّد قبل الشحن، على خزانة التحكم ومنطقها البرمجي — مع محاكي **(Simulator)** يمثّل التوربين والحقل بدل المعدة الحقيقية. يُختبر خلاله: تشغيل المعالجات والردّية والتبديل بينها، بطاقات الإدخال والإخراج، شاشات التشغيل (HMI)، ومنطق التسلسل والحمايات بمواقف متعددة (بدء طبيعي، فشل بدء، قواطع متنوعة).

القيمة الحقيقية للـ FAT أنه **الفرصة الأخيرة لتعديل جوهري بتكلفة معقولة**. أي ملاحظة تُكتشف هنا تُصلَح بالورشة؛ ونفسها بعد الشحن تعني عملًا بالموقع بظروف أصعب بكثير. ولهذا يستحق حضور مهندس من صاحب المعدة نفسها (لا الاكتفاء بتقرير المورّد) — راجع 14.4 حيث ذكرنا نفس المبدأ عند تحديث أنظمة التحكم القديمة.

2. الفحوصات التمهيدية (Pre-Commissioning)

بعد التركيب بالموقع، وقبل تشغيل أي شيء: اكتمال ميكانيكي، غسيل وتنظيف خطوط الزيت والوقود (Flushing)، فحوصات كهربائية (استمرارية، عزل، تأريض)، والتأكد من مطابقة التركيب للمخططات فعليًا — لا نظريًا.

3. فحص الحلقات (Loop Checking)

هذه أهم مرحلة على الإطلاق بالنسبة لمهندس التحكم، وأكثرها إرهاقًا: **كل إشارة حقلية تُثبَت من طرفها إلى طرفها**. لكل حلقة تُوثّق النتيجة توثيقًا رسميًا.

- مدخل تناظري **(AI)**: يُحقَن مصدر إشارة معلوم عند الحسّاس أو عند صندوق الوصل، ويُتحقَّق أن القيمة الظاهرة على شاشة التشغيل مطابقة — عند عدة نقاط بالمدى، لا نقطة واحدة، حتى يُكتشف أي خطأ بالتدريج (Scaling) أو بالإزاحة (Offset).
- مدخل رقمي **(DI)**: يُشغَّل التلامس الحقلي فعليًا، ويُتحقَّق من تغيّر الحالة بالمنطق — **مع تأكيد أن اتجاه المنطق صحيح** (مغلق يعني مغلق، لا العكس). انعكاس اتجاه تلامس واحد يظل مختبئًا حتى يحتاجه منطق حماية فعليًا.
- مخرج **(AO/DO)**: يُصدَر الأمر من نظام التحكم، ويُتحقَّق من استجابة المعدة النهائية بالحقل — لا من ظهور الأمر على الشاشة فقط.

الخطأ الأكثر تكرارًا هنا: **الاكتفاء بالتحقق من طرف واحد**. رؤية القيمة على الشاشة لا تُثبت أن الحسّاس المكتوب اسمه هو الحسّاس المتصل فعلًا — بل تُثبت فقط أن شيئًا ما متصل. وهذه بالضبط جذور حالات «الإشارة تشير لمكان والمشكلة بمكان آخر» التي رأيناها في الفصل الثالث عشر.

4. الاختبار الوظيفي ومنطق الحمايات (Functional / Logic Testing)

بالوحدة ساكنة، تُختبر السماحات، والتسلسلات، والتشابكات، وكل مسار قطع — مسارًا مسارًا، مع محاكاة سبب القطع والتأكد من وصول الأمر لصمامات الوقود فعليًا. وبشكل خاص: **يُختبر مسار الحماية الاحتياطية المستقلة** (راجع 7.8) بشكل منفصل تمامًا عن نظام التحكم الرئيسي — لأن الغرض كله من وجوده أن يعمل حين يفشل الرئيسي.

5. أول إشعال وتشغيلات التجريب (First Fire & Commissioning Runs)

أول إشعال فعلي، ثم رفع تدريجي للسرعة مع تثبيت عند مراحل محددة للتحقق من الاهتزاز والحرارات، ثم إثبات الحمايات على المعدة الحقيقية — وأهمها **اختبار السرعة الزائدة** (7.2) بالطريقة المعتمدة، سواء بالاختبار الفعلي أو بالحقن الإلكتروني للإشارة حسب تصميم المعدة.

6. اختبار الأداء وتشغيل الموثوقية (Performance Test & Reliability Run)

آخر مرحلة قبل التسليم: إثبات القدرة ومعدل الحرارة التعاقديين، ثم تشغيل متواصل لمدة متفق عليها بدون أعطال لإثبات الاستقرار.

إدارة فحص الحلقات: كيف يُوثَّق عمليًا؟

فحص الحلقات ليس نشاطًا فنيًا فقط، بل **نشاط إداري بنفس القدر** — لأن وحدة واحدة قد تحوي مئات الحلقات، والسؤال الحاكم طوال فترة التشغيل التجريبي ليس «هل الحلقة سليمة؟» بل: **كم حلقة أُنجزت، وكم بقي، وأي منها متوقفة ولماذا؟**

ولهذا تُدار العملية بسجل موحّد (Loop Check Register) لكل حلقة، وأهم حقوله:

الحقل	لماذا هو موجود
رقم الحلقة ووصفها	التعريف الوحيد الذي يُشار به للحلقة بكل المستندات
نوع الإشارة (AI / DI / AO / DO)	يحدد إجراء الفحص المطلوب أصلًا
مرجع المخطط (Loop Drawing)	من أين نعرف المسار الفعلي ونقاط الفحص

الحقل	لماذا هو موجود
موقع الجهاز ورقم الخزانة والبطاقة والقناة	يختصر زمن الوصول، ويكشف الحلقات المشتركة بعنصر واحد
القيم المطبَّقة والقيم المقروءة عند عدة نقاط بالمدى	إثبات صحة التدريج، لا مجرد "تظهر قراءة"
النتيجة: مقبول / مقبول بملاحظة / مرفوض	تصنيف واضح لا يحتمل التأويل
الملاحظة وسبب التعليق إن وُجد	ما الذي يمنع الإغلاق: جهاز لم يصل؟ عمل مدني غير مكتمل؟ خطأ توصيل؟
توقيع المنفّذ وتوقيع الشاهد والتاريخ	الفحص بلا شاهد وتاريخ لا يُعتدّ به تعاقديًا

ثلاث ممارسات تفرق كثيرًا من واقع العمل:

- **الفحص عند عدة نقاط بالمدى، لا نقطة واحدة.** حلقة تُفحص عند منتصف المدى فقط قد تخفي خطأ إزاحة أو خطأ تدريج تمامًا. الحد الأدنى المعقول: أدنى المدى، المنتصف، وأعلى المدى.
- **التمييز بين «مرفوض» و«معلّق».** الحلقة المرفوضة فيها خلل فني يجب إصلاحه؛ والحلقة المعلّقة سليمة لكن ينقصها شيء خارجي (جهاز لم يُركَّب بعد، تغذية غير متوفرة). خلطهما ببند واحد يخفي حجم العمل الفني الحقيقي المتبقي.
- **متابعة نسبة الإنجاز يوميًا لا أسبوعيًا.** لأن فحص الحلقات هو عادةً المسار الحرج **(Critical Path)** للتشغيل التجريبي كاملًا: لا اختبار وظيفي ولا أول إشعال قبل إغلاق حلقات الحماية على الأقل.

وأخيرًا نقطة تربط هذا القسم بالفصل التاسع عشر: عند تكرار عطل بمجموعة حلقات معًا، فإن أول ما يُراجَع بالسجل هو **العنصر المشترك بينها** — نفس البطاقة، نفس صندوق الوصل، أو نفس مصدر التغذية. سجل الحلقات المنظّم يجعل هذا الاستنتاج مسألة دقيقتين بدل يوم كامل بالحقل.

17.2 اختبار الأداء: لماذا لا يكفي أن "نقرأ الرقم"؟

نقطة يُساء فهمها كثيرًا حتى بين المهندسين ذوي الخبرة: **القدرة المقاسة يوم الاختبار لا تُقارَن مباشرة بالقدرة المتعاقد عليها.** السبب شرحناه في الفصل الثاني (2.4): قدرة التوربين الغازي وكفاءته تتغيّران مع حرارة الهواء المحيط، والضغط الجوي (أي الارتفاع عن سطح البحر)، والرطوبة، وفواقد الضغط عند السحب والعادم.

لذلك يمر اختبار الأداء بثلاث خطوات إلزامية:

1. **القياس بظروف مستقرة:** تُثبَّت الوحدة على حمل ثابت فترة كافية حتى تستقر كل الحرارات، وتُسجَّل القراءات خلال نافذة زمنية محددة. القياس أثناء انتقالية يُلغي الاختبار.
2. التصحيح للظروف المرجعية **(Correction):** تُطبَّق منحنيات تصحيح معتمدة من المصنّع لتحويل القراءة المقاسة إلى ما كانت ستكون عليه لو أُجري الاختبار عند الظروف المرجعية القياسية.
3. **المقارنة بالضمان:** الرقم **المصحَّح** — لا المقاس — هو الذي يُقارَن بالقيمة المتعاقد عليها.

النتيجة العملية: وحدة تُقاس قدرتها منخفضة بيوم صيفي حار قد تكون **مطابقة تمامًا** للضمان بعد التصحيح؛ ووحدة تُقاس قدرتها مرتفعة بليلة شتوية باردة قد تكون **أقل** من الضمان بعد التصحيح. من واقع الميدان، هذه النقطة سبب متكرر لخلافات تعاقدية كان يمكن تجنّبها لو فُهم مبدأ التصحيح من البداية.

وبنفس المنطق يُقاس معدل الحرارة **(Heat Rate)** — أي كمية الطاقة الحرارية المستهلكة من الوقود لكل وحدة طاقة كهربائية منتَجة. هو المقلوب العملي للكفاءة: كلما انخفض، كانت الوحدة أكفأ. وهو المؤشر الذي تُتابَع به صحة الوحدة على المدى الطويل (8.5)، لأنه — بخلاف القدرة — حساس لتدهور الأداء حتى قبل أن يظهر أي عرض تشغيلي.

17.3 مؤشرات الموثوقية والإتاحية

بعد التسليم، تُقاس صحة الوحدة بمؤشرات كمية موحّدة تسمح بمقارنة وحدة بأخرى، وسنة بسنة. والقاعدة الأساسية: **كل هذه المؤشرات نِسَب من مجموع ساعات الفترة الزمنية**، والفارق بينها هو **أي ساعات تُحتسب بالبسط**.

المؤشر	المعنى بجملة	يجيب على سؤال
الإتاحية (Availability)	الساعات التي كانت الوحدة فيها قادرة على العمل ÷ مجموع ساعات الفترة	هل كانت الوحدة **جاهزة** لو طُلبت؟
الموثوقية (Reliability)	نسبة عدم التعرّض لتوقف قسري خلال الفترة	هل **خذلتنا** حين طُلبت فعلًا؟
معدل التوقف القسري (Forced Outage Rate)	ساعات التوقف غير المخطط ÷ الساعات ذات الصلة	كم من الوقت ضاع **بلا تخطيط**؟

المؤشر	المعنى بجملة	يجيب على سؤال
متوسط الزمن بين الأعطال (MTBF)	متوسط فترة التشغيل بين عطلين	كم **تصمد** الوحدة بين المشاكل؟
متوسط زمن الإصلاح (MTTR)	متوسط المدة من وقوع العطل حتى عودة التشغيل	كم **نتأخر** بالإصلاح؟
عامل السعة (Capacity Factor)	الطاقة المنتَجة فعليًا ÷ الطاقة الممكنة نظريًا	كم **استُخدمت** الوحدة فعلًا؟

التمييز الذي يستحق ترسيخًا: الإتاحية ≠ الموثوقية.

- وحدة متوقفة بقرار من الشبكة لأن الطلب منخفض (Reserve Shutdown) هي وحدة **متاحة** — كانت ستعمل لو طُلبت.
- وحدة متوقفة لفحص كبير مخطط له هي وحدة **غير متاحة**، لكنها **موثوقة** تمامًا — لم تخذل أحدًا.
- وحدة قطعت فجأة أثناء التشغيل هي وحدة **غير متاحة وغير موثوقة** معًا.

الخلط بين المفهومين هو أكثر أخطاء التقارير شيوعًا، وأثره ليس شكليًا: هو يُحمّل فريق الصيانة مسؤولية قرارات تشغيلية لا يملكها، أو يخفي مشكلة موثوقية حقيقية خلف رقم إتاحية مريح.

عامل عملي ثالث يُنسى غالبًا: **MTTR** ليس مؤشرًا فنيًا فقط. جزء كبير من زمن الإصلاح ليس إصلاحًا، بل **انتظارًا** — انتظار قطعة غيار، أو تصريح عمل، أو فني متخصص. ولهذا يرتبط تحسين MTTR مباشرة بإدارة قطع الغيار (8.4) أكثر مما يرتبط بمهارة الإصلاح نفسها.

17.4 اقتصاديات دورة الحياة: ما الذي يكلّف فعلًا؟

القرار الهندسي الجيد بالتوربينات الغازية نادرًا ما يكون «الأرخص شراءً». التكلفة الحقيقية تتوزع على عمر المعدة كاملًا:

- **تكلفة الوقود** — وهي عادة الأكبر بفارق كبير على عمر الوحدة. ولهذا فارق صغير بمعدل الحرارة (17.2) يترجم إلى مبلغ ضخم تراكميًا: تدهور بسيط بالكفاءة، مستمر لسنوات، يكلّف أكثر بكثير من كلفة إصلاح سببه.

- **تكلفة الصيانة المجدولة** — قطع المسار الساخن (الفصل 16) هي البند الأثقل، وتوقيتها يُحسب بالعمر المكافئ لا بالساعات الخام.
- **تكلفة عمليات البدء** — كل بدء يستهلك من عمر الكلال (16.2). بالوحدات التي تُشغَّل وتُوقَف يوميًا لدعم الشبكة، هذا بند حقيقي وليس نظريًا، ويجب أن يدخل بحساب اقتصاد التشغيل.
- **تكلفة التوقف غير المخطط** — الإنتاج المفقود عادة أكبر بمراتب من كلفة القطعة التي تسببت بالتوقف. وهذا وحده هو المبرر الاقتصادي لكل ما بالفصلين الثامن والسادس عشر.

التدهور: قابل للاسترجاع وغير قابل للاسترجاع

تمييز عملي مهم عند تفسير أي انخفاض بالأداء (راجع 8.5 و10.17):

- تدهور قابل للاسترجاع **(Recoverable)**: سببه تلوث يمكن إزالته — أبرزه تلوث شفرات الضاغط. العلاج: الغسيل (بالخط أو خارج الخط)، ويعود الأداء تقريبًا لما كان عليه.
- تدهور غير قابل للاسترجاع **(Non-Recoverable)**: سببه تغيّر فيزيائي دائم — تعرية الشفرات، اتساع فراغات الرؤوس، تدهور الأختام. لا يعالجه الغسيل، بل يُستعاد جزء منه فقط بالفحص الكبير واستبدال المكونات.

القيمة العملية للتمييز: عند رؤية انخفاض بالأداء، السؤال الأول ليس «هل نغسل؟» بل **"أي نوع من التدهور هذا؟"** — لأن غسيلًا متكررًا لتدهور غير قابل للاسترجاع يستهلك وقتًا وماءً وتوقفًا بلا نتيجة، ويؤخّر التشخيص الصحيح.

17.5 من واقع الميدان: أكثر ما يتعثّر أثناء التشغيل التجريبي

خلاصة أنماط متكررة، تستحق أن تُراجَع مسبقًا لا أن تُكتشف لاحقًا:

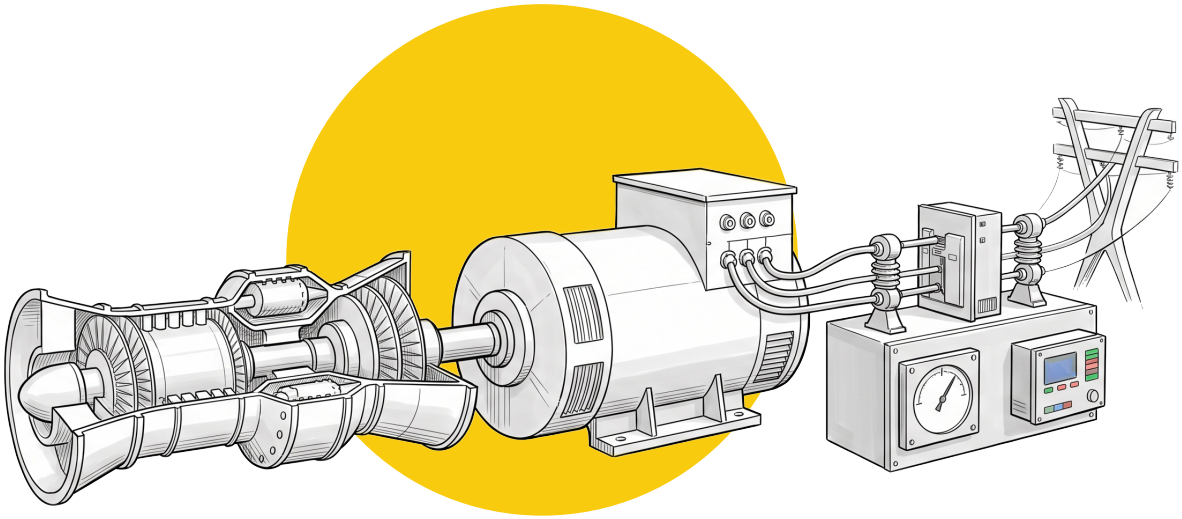
- **أخطاء توصيل وترقيم**: إشارة موصولة لمدخل غير المخصص لها، أو تلامس معكوس الاتجاه. تُكتشف بفحص حلقات منضبط من الطرفين — أو تظل مخبأة لسنوات حتى يحتاجها منطق حماية.
- إعدادات مدى وتدريج خاطئة **(Scaling)**: الحسّاس سليم والتوصيل سليم، لكن مدى القراءة المُعرَّف بالنظام لا يطابق مدى الجهاز الفعلي — فالقراءة "معقولة" لكنها خاطئة. سبب متكرر لإنذارات غير مفهومة بعد التشغيل.

- **قيم مؤقتة لم تُستبدل:** قيم افتراضية أو قيم اختبار أُدخلت أثناء التجريب ولم تُعَد لقيمها التصميمية بعد الانتهاء. لهذا تحديدًا يجب أن يُغلَق التشغيل التجريبي بمراجعة موثّقة لكل الثوابت القابلة للضبط (9.4، 12.11).
- **اختبارات حماية «مؤجَّلة» لضيق الوقت:** أخطر ما بالقائمة. مسار حماية لم يُختبر فعليًا هو مسار **غير موجود** حتى يُثبت العكس — والافتراض بأنه يعمل لأنه مكتوب بالمنطق هو نفس الافتراض الذي تنهار عنده الحوادث الكبرى.
- **توثيق غير محدَّث:** تعديلات نُفِّذت بالموقع ولم تُنقَل للمخططات النهائية (As-Built). أثرها لا يظهر يوم التسليم، بل بعد سنوات، عند أول تحقيق جدّي بعطل — حين يكتشف الفريق أن المخطط الذي يعتمد عليه لا يمثّل الواقع.

الخلاصة: التشغيل التجريبي ليس «إجراءً إداريًا قبل التسليم»، بل **آخر فرصة منظّمة لاكتشاف الأخطاء بهدوء**. كل ملاحظة تُغلق هنا هي حادث لن يقع لاحقًا، وكل ملاحظة تُؤجَّل هنا هي تحقيق سيُفتح لاحقًا تحت ضغط.

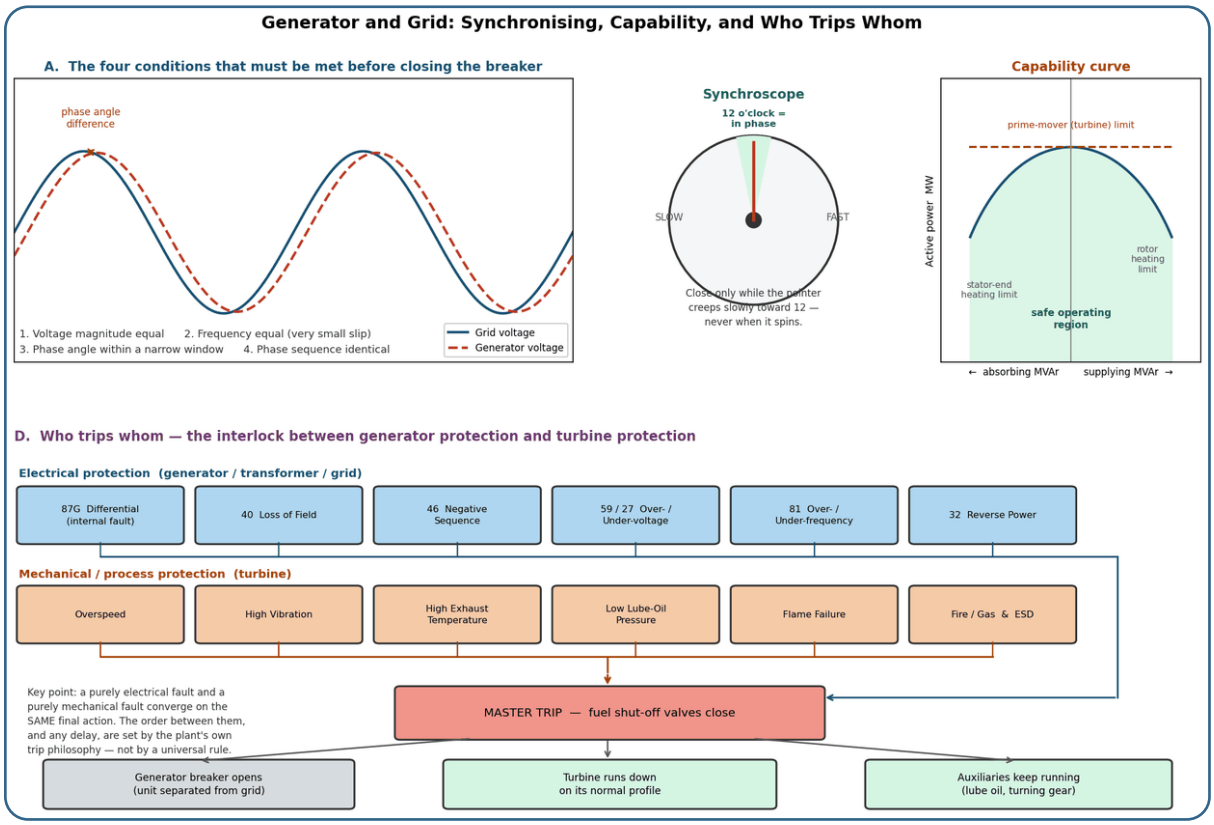
الفصل الثامن عشر:

المولد والشبكة — التزامن والحماية الكهربائية



في الفصل السادس (6.6) شرحنا المولد ونظام الإثارة كنظام مساعد، وفي الفصل التاسع شرحنا الحاكم ومنطق الدروب. لكن بالتطبيق الأشهر للتوربين الغازي — توليد الكهرباء (3.1) — يوجد جانب كامل يقف بين التوربين والشبكة، ويتسبب بجزء معتبر من قواطع الوحدات فعليًا، ومع ذلك يُترك عادةً لمهندس الكهرباء وحده: **التزامن مع الشبكة، وحمايات المولد**.

هذا الفصل مكتوب تحديدًا لمهندس التوربينات والتحكم — لا ليجعله مهندس حماية كهربائية، بل ليجعله قادرًا على **فهم ما حدث** حين يقرأ سجل حدث يقول «قاطع المولد فتح، ثم قطعت الوحدة»، وأن يعرف: أيهما السبب وأيهما النتيجة؟



الشكل 18.1 — أعلى: شروط التزامن الأربعة، مقياس التزامن، ومنحنى قدرة المولد. أسفل: كيف تلتقي الحمايات الكهربائية وحمايات التوربين عند نفس الإجراء النهائي.

18.1 التزامن مع الشبكة (Synchronization)

بعد أن تصل الوحدة للسرعة الكاملة (9.3)، تكون جاهزة للربط — لكن الربط ليس «إغلاق قاطع». إغلاق قاطع المولد على الشبكة بشروط خاطئة حدث **عنيف ميكانيكيًا** قبل أن يكون كهربائيًا: تنتقل صدمة عزم مفاجئة عبر القفلة والعمود، وقد تكفي لإتلاف المولد أو القفلة أو حتى قسم التوربين.

الشروط الأربعة الواجب تحققها قبل الإغلاق:

1. **تساوي مقدار الجهد** بين المولد والشبكة (ضمن هامش ضيق). الفارق هنا يعني تبادل قدرة رَدّية مفاجئة لحظة الإغلاق.
2. **تساوي التردد** — أو بدقة أكبر: فارق صغير جدًا ومضبوط الاتجاه (Slip). عمليًا يُفضَّل أن يكون تردد المولد **أعلى قليلًا** من الشبكة، حتى يأخذ المولد حملًا صغيرًا موجبًا فور الإغلاق بدل أن يُسحب كمحرك.
3. **فارق زاوية الطور ضمن نافذة ضيقة** — أي أن تكون الموجتان «متقاربتين» لحظة الإغلاق.
4. تطابق تعاقب الأطوار **(Phase Sequence)** — شرط يُتحقَّق منه مرة واحدة عند التركيب أو بعد أي عمل على الكابلات، لكنه إن اختلّ فالنتيجة كارثية فورًا.

الأدوات المستخدمة:

- مقياس التزامن **(Synchroscope)**: مؤشر دوّار يمثّل فارق الطور. وضع الساعة 12 يعني تطابق الطور. القاعدة الميدانية الكلاسيكية: **يُغلَق القاطع فقط والمؤشر يزحف ببطء باتجاه عقارب الساعة نحو 12 — لا حين يدور بسرعة.** دورانه السريع يعني فارق تردد كبيرًا؛ ودورانه بالاتجاه المعاكس يعني أن المولد أبطأ من الشبكة.
- جهاز التزامن الآلي **(Automatic Synchronizer)**: يتولى الأمر تلقائيًا — يرسل أوامر رفع/خفض للحاكم (لضبط التردد) ولمنظّم الجهد AVR (لضبط الجهد)، ثم يصدر أمر الإغلاق باللحظة الصحيحة، **مع تعويض مسبق لزمن إغلاق القاطع نفسه** (فالقاطع يحتاج زمنًا للإغلاق، فيُصدَر الأمر قبل نقطة التطابق بقدر هذا الزمن).
- مرحّل التحقق من التزامن **(Check Synchronizing Relay — 25)**: طبقة أمان مستقلة تمنع الإغلاق إن لم تتحقق الشروط فعليًا — سواء كان الأمر آليًا أو يدويًا. وهذه تطبيق مباشر لمبدأ الحماية المستقلة الذي شرحناه في 7.8.

حالة خاصة: الربط على قضيب ميت **(Dead Bus Closing)** — عند البدء الأسود (9.3)، لا توجد شبكة حية أصلًا لنتزامن معها، فتُغلق الوحدة على قضيب خالٍ من الجهد ثم تبني هي الجهد والتردد. المنطق هنا مختلف تمامًا، ويجب أن يمنع نظام التحكم الخلط بين الحالتين.

18.2 من يتحكم بماذا: القدرة الفعّالة مقابل الرَّدّية

نقطة مفهومية أساسية، والخلط فيها شائع جدًا بين المهندسين الجدد:

المتغيّر	من يتحكم به	كيف
القدرة الفعّالة (MW)	**الحاكم / نظام تحكم التوربين**	بزيادة أو خفض تدفق الوقود (9.2)
القدرة الرَّدّية (MVAr) والجهد	منظّم الجهد الآلي **AVR**	بزيادة أو خفض تيار الإثارة (6.6)

بعبارة أوضح: **الوقود يشتري ميغاواط، والإثارة تشتري ميغافار.** ومتى ما كانت الوحدة مربوطة بشبكة قوية، فإن زيادة الوقود **لا ترفع السرعة** — الشبكة هي التي تفرض التردد — بل ترفع **الحمل**. وهذا بالضبط جوهر منطق الدروب الذي شرحناه في 6.5.

منحنى القدرة **(Capability Curve)** بالشكل 18.1 يجمع القيدين معًا: المحور الرأسي MW والأفقي MVAr، والمنطقة الآمنة محاطة بثلاثة حدود مختلفة الطبيعة — حد **المحرّك الأولي** (أي أقصى ما يستطيع التوربين تقديمه، وهو حد ميكانيكي بحت)، وحد **تسخين العضو الدوّار** عند الإفراط بالإثارة، وحد **تسخين أطراف العضو الثابت** عند نقص الإثارة. القيمة العملية: عندما تُطلب من الوحدة قدرة رَدّية عالية، فإن قدرتها الفعّالة القصوى قد تنخفض — وهذا ليس عطلًا، بل حدًّا تصميميًا.

18.3 أهم حمايات المولد

تُعرَّف حمايات المولد صناعيًا بأرقام أجهزة قياسية (ANSI Device Numbers) تختصر التخاطب بين الفرق الفنية. أهمها لمهندس التوربينات:

الرقم	الحماية	ماذا تحمي منه	لماذا تهم مهندس التوربينات
87G	التفاضلية (Differential)	عطل داخلي بملفات المولد	أسرع حماية وأشدها — قطع فوري بلا تأخير
40	فقدان الإثارة (Loss of Field)	انهيار مجال الإثارة	المولد يبدأ سحب قدرة رَدّية من الشبكة ويسخن دوّاره بسرعة
32	القدرة العكسية (Reverse Power)	المولد صار **يستهلك** قدرة كمحرك	مؤشر مباشر على أن التوربين توقف عن التوليد — أي أن السبب غالبًا بجانب التوربين لا الكهرباء
46	التتابع السالب (Negative Sequence)	حمل غير متزن بين الأطوار	ينتج تيارات دوّامة تسخّن العضو الدوّار بشدة
59 / 27	جهد زائد / منخفض	خروج الجهد عن المدى	غالبًا مصدره AVR أو اضطراب بالشبكة
81	تردد زائد / منخفض	خروج تردد الشبكة عن المدى	مرتبط مباشرة بأحداث الشبكة وبفقدان الحمل (9.3)
24	نسبة الجهد للتردد (V/Hz)	إفراط بالإثارة عند تردد منخفض	يحمي حديد المولد والمحوّل من التشبّع المغناطيسي
64	تأريض العضو الثابت	تسرّب أرضي بالملفات	يكشف تدهور العزل مبكرًا
78	فقدان التزامن (Out of Step)	المولد فقد تزامنه مع الشبكة	حدث عنيف ميكانيكيًا يستوجب فصلًا سريعًا

الحماية رقم 32 تستحق وقفة خاصة لأنها الأكثر ارتباطًا بعالم التوربين: القدرة العكسية تعني أن الشبكة صارت تدير المولد **كمحرك**، وأن المولد صار يدير التوربين. النتيجة الخطرة ليست كهربائية بل ميكانيكية: شفرات التوربين تدور بلا تدفق غاز ساخن كافٍ لتبريدها بالشكل المصمَّم، فترتفع حرارة بعض الأجزاء بشكل غير طبيعي. ولهذا تُستخدم 32 غالبًا كجزء من **تسلسل الإيقاف المنظّم** (Sequential Trip): يُخفَّض الوقود أولًا، وعند اكتشاف القدرة العكسية يُفتح القاطع — ترتيب مقصود يمنع تسارع الوحدة عند فقدان الحمل المفاجئ.

18.4 الترابط: من يقطع من؟

هذا هو السؤال العملي الذي يواجه أي محقق بحدث. والجواب يعتمد على فلسفة القطع المعتمدة بالمنشأة، لكن الأنماط العامة ثلاثة:

- قطع الوحدة الكامل **(Unit Trip)**: أي قاطع — كهربائي أو ميكانيكي — يُنفَّذ فورًا وبالكامل: قطع الوقود وفتح القاطع الكهربائي معًا. الأبسط والأكثر أمانًا، لكنه يعرّض الوحدة لفقدان حمل مفاجئ (Load Rejection، 9.3) عند كل حدث.
- القطع المتسلسل **(Sequential Trip)**: يُخفَّض الوقود أولًا، ثم يُفتح القاطع عند تحقق شرط القدرة العكسية (32). ألطف ميكانيكيًا على المعدة، ويُستخدم بالقواطع غير الحرجة.
- **القطع المتزامن للحالات الحرجة**: بحالات مثل العطل الداخلي (87G) أو الحريق، لا مجال لأي تسلسل — كل شيء يُنفَّذ فورًا.

القاعدة التشخيصية العملية: عند قراءة سجل حدث، **ترتيب الطوابع الزمنية هو الدليل، لا نوع الإشارة**. لو ظهر قاطع كهربائي **قبل** انخفاض الوقود بأجزاء من الثانية، فالسبب كهربائي والتوربين استجاب. ولو انخفض الوقود أولًا ثم ظهرت القدرة العكسية ثم فُتح القاطع، فالسبب بجانب التوربين والتسلسل عمل كما صُمّم. الخلط بين الاثنين يوجّه التحقيق بالكامل نحو النظام الخطأ — وهو نفس الدرس المتكرر في الفصل الثالث عشر: **أين ظهرت المشكلة ≠ أين سببها**.

18.5 من واقع الميدان

- **دقة توحيد الوقت بين الأنظمة أهم مما تبدو.** إن لم يكن مرحّل الحماية الكهربائية ونظام تحكم التوربين والـ DCS مضبوطين على مصدر وقت موحّد، فمقارنة الطوابع الزمنية بينهم بلا معنى — وتضيع الإجابة على «أيهما أولًا؟» نهائيًا. وهذا أرخص إجراء ممكن، وأكثره إهمالًا.
- **اختبار مرحّل التحقق من التزامن (25) بشكل مستقل.** كثير من المواقع تختبر التزامن الآلي فقط، بافتراض أن مرحّل التحقق يعمل. وهو تحديدًا الطبقة التي يُعتمد عليها حين يفشل الآلي أو حين يُغلق أحدهم يدويًا.
- **إعادة التحقق من تعاقب الأطوار بعد أي عمل على الكابلات** — وليس الاكتفاء بالتحقق مرة واحدة عند التركيب الأصلي.
- قراءة **MVAr** جزء من صحة الوحدة، لا مجرد رقم للشبكة. انحراف تدريجي بالقدرة الرَّدّية عند نفس الحمل مؤشر مبكر على مشكلة بنظام الإثارة أو بضبط AVR، تمامًا كما أن انحراف معدل الحرارة مؤشر مبكر على تدهور الأداء (17.2).

- **لا تفترض أن «فتح القاطع» يعني عطلًا كهربائيًا.** بمرات كثيرة يكون فتح القاطع هو **النتيجة** الطبيعية لقاطع ميكانيكي عمل بالشكل الصحيح تمامًا.

18.6 الحاكم ومنظّم الجهد: من يتحكم بماذا — قبل القاطع وبعده

هذه من أهم النقاط المفهومية في تشغيل مجموعة توربين–مولد، وهي مصدر ارتباك دائم عند المهندسين الجدد، بل وعند بعض ذوي الخبرة. والسبب أن **نفس الفعل يعطي نتيجتين مختلفتين تمامًا حسب حالة القاطع** — وهذا ما يجعل حفظ قاعدة واحدة مستحيلًا، وفهم الآلية ضروريًا.

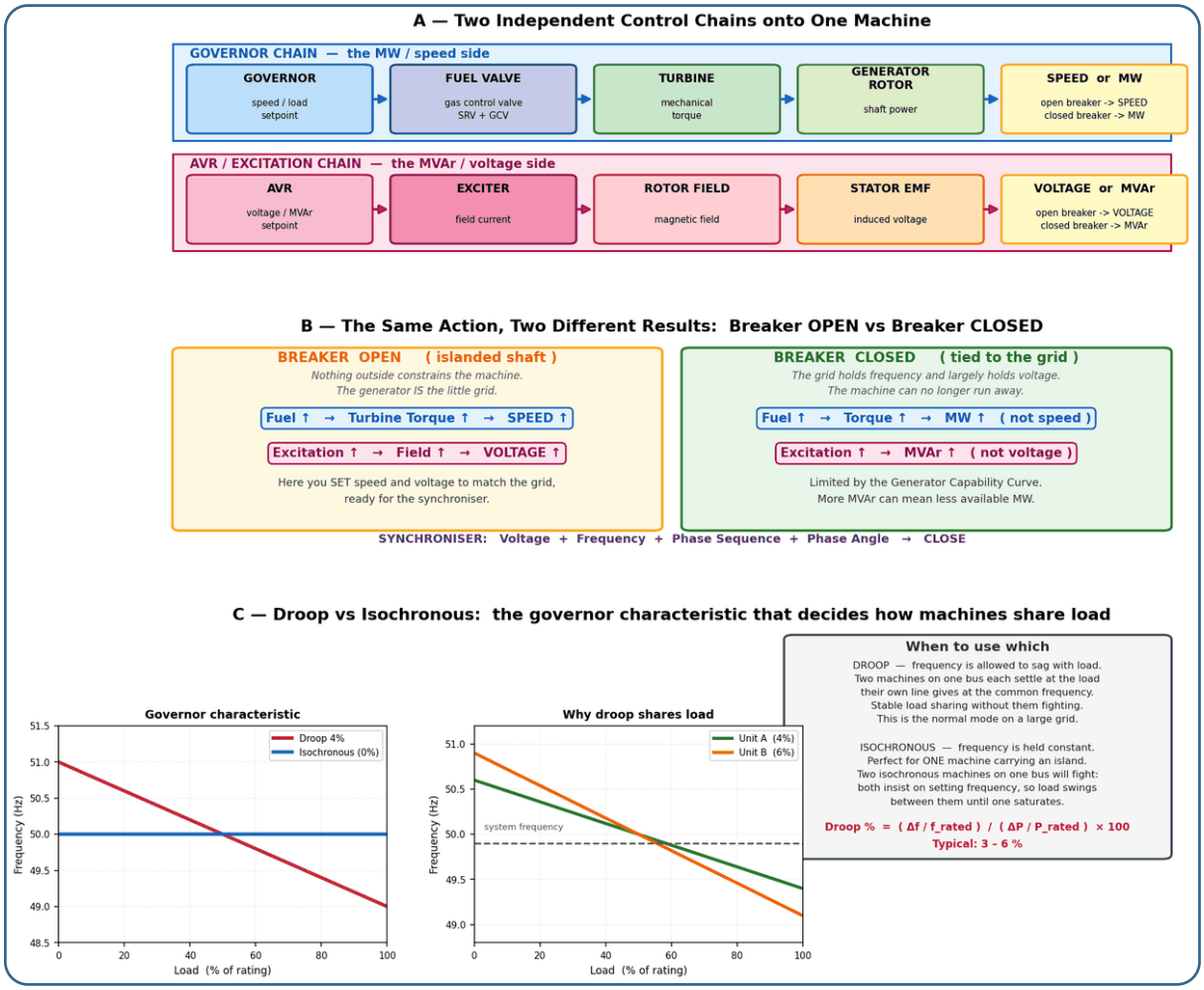
نبدأ من العلاقة الأساسية بين الآلتين:

> التوربين يعطي المولد عزمًا ميكانيكيًا **(Mechanical Torque)**، والمولد يحوّله إلى قدرة كهربائية **(Electrical Power)**.

وفوق هذه العلاقة تعمل منظومتا تحكم **مستقلتان تمامًا**، تتصلان بمكانين ماديين مختلفين من الآلة:

المنظومة	تتصل بـ	تتحكم بـ
الحاكم / تحكم الوقود (Governor / Fuel Control)	صمام الوقود على التوربين	العزم الميكانيكي
منظّم الجهد الآلي / نظام الإثارة (AVR / Excitation)	ملف الإثارة على عضو المولد الدوّار	المجال المغناطيسي

ولاحظ الفصل المادي التام بينهما: الحاكم لا يمسّ المولد إطلاقًا، ومنظّم الجهد لا يمسّ التوربين إطلاقًا. هما نظامان منفصلان يلتقيان فقط عند العمود المشترك وعند نقطة الربط بالشبكة. ومع ذلك يؤثر كل منهما على ما يقيسه الآخر — وهذا مصدر الالتباس كله.



الشكل 18.2 — الحاكم ومنظّم الجهد كسلسلتَي تحكم مستقلتين على آلة واحدة، والفرق بين حالة القاطع المفتوح والمغلق، ومقارنة الدروب بالأيزوكرونس وأثرهما على تقاسم الحمل.

الحالة الأولى: قاطع المولد مفتوح

المولد غير مرتبط بالشبكة. لا شيء خارجي يقيّد العمود، والمولد في هذه اللحظة هو «الشبكة الصغيرة» بذاته — هو من يحدد التردد والجهد وحده.

Fuel ↑ → Turbine Torque ↑ → SPEED ↑ (↑ وبالتالي التردد)

أي: **قاطع مفتوح + زيادة وقود ← ارتفاع السرعة/التردد.** ولا يوجد شيء يمنع هذا الارتفاع سوى الحاكم نفسه — ولهذا فإن حماية السرعة الزائدة (الفصل السابع) أشدّ ما تكون أهمية في هذه الحالة تحديدًا.

وبالتوازي:

Excitation ↑ → Magnetic Field ↑ → Generator Voltage ↑

أي: **قاطع مفتوح + زيادة إثارة ← ارتفاع جهد المولد.** لا يوجد حمل رَدّي يمتصّ الزيادة، فكل زيادة في المجال تظهر مباشرة كجهد على أطراف المولد.

والغرض من هذه الحالة عمليًا هو الاستعداد للتزامن: أنت تستخدم الحاكم لضبط السرعة/التردد على قيمة الشبكة، وتستخدم منظّم الجهد لضبط جهد المولد على جهد الشبكة، ثم تسلّم الأمر لجهاز التزامن.

الحالة الثانية: قاطع المولد مغلق

بعد الربط، تغيّر كل شيء. **الشبكة الآن — إن كانت قوية بما يكفي — تفرض التردد، وتفرض الجهد إلى حد بعيد.** والعمود مقيّد كهربائيًا بتردد الشبكة عبر العزم الكهرومغناطيسي، فلم يعد قادرًا على التسارع بحرية.

فماذا يحدث لنفس الفعلين؟

Fuel ↑ → Mechanical Torque ↑ → Active Power ↑ → MW ↑

الطاقة الإضافية التي ضخّتها بالوقود لم تعد تجد مخرجًا في صورة تسارع — فالشبكة تمنع التسارع — فتخرج حتمًا في صورة **قدرة فعّالة مصدَّرة إلى الشبكة**. أي: قاطع مغلق + زيادة وقود ← زيادة **MW**، لا زيادة سرعة.

وبالمثل:

Excitation ↑ → Reactive Power ↑ → MVAr ↑

المجال المغناطيسي الأقوى لم يعد يستطيع رفع الجهد بحرية — فالشبكة تحدّده — فيتحول أثره إلى **تصدير قدرة رَدّية**. أي: قاطع مغلق + زيادة إثارة ← زيادة **MVAr**، لا زيادة جهد (إلا بأثر محدود يعتمد على قوة الشبكة عند نقطة الربط).

مع مراعاة حدود المولد ومنحنى القدرة **(Capability Curve)** الذي شرحناه في 18.2: لا يمكنك زيادة القدرة الرَّدّية بلا حدود، فحد تسخين العضو الدوّار عند الإفراط بالإثارة، وحد تسخين أطراف العضو الثابت عند نقصها، يقيّدان النطاق. وكلما زدت MVAr، قد تنخفض MW القصوى المتاحة — وهذه ليست عطلًا بل حدّ تصميمي.

القاعدة المختصرة التي تُحفظ

	قاطع مفتوح	قاطع مغلق
الوقود / الحاكم	← السرعة (التردد)	← الميغاواط MW
الإثارة / **AVR**	← الجهد	← الميغافار MVAr

وبعبارة واحدة تختصر الفصل:

> **الوقود يشتري ميغاواط، والإثارة تشتري ميغافار — بعد إغلاق القاطع. وقبله، الوقود يشتري سرعة والإثارة تشتري جهدًا.**

شروط التزامن ودور كل منظومة فيها

فصّلنا الشروط الأربعة في 18.1، وهنا نربطها بمن يحققها:

الشرط	من يضبطه	الفكرة
تطابق التردد (Frequency Matching)	**الحاكم**	تردد المولد ≈ تردد الشبكة (50 Hz مع 50 Hz)
تطابق الجهد (Voltage Matching)	**AVR** / الإثارة	جهد المولد ≈ جهد الشبكة
تطابق تعاقب الأطوار (Phase Sequence)	التركيب والكابلات	R-Y-B ↔ R-Y-B — يُتحقَّق منه مرة، وإن اختلّ فالنتيجة كارثية
تطابق زاوية الطور (Phase Angle)	**جهاز التزامن**	الفارق قريب جدًا من الصفر لحظة الإغلاق

والتسلسل المنطقي الكامل:

Governor → Frequency

AVR → Voltage

Synchronizer → Frequency + Voltage + Phase Sequence + Phase Angle

↓

Synchronizing OK → Generator Breaker CLOSE

↓

Governor → MW AVR → MVAr

السبب الذي يجعل هذا التمييز عمليًا لا نظريًا: تخيّل مشغّلًا يرى التردد منخفضًا والوحدة مربوطة بشبكة كبيرة، فيرفع الوقود ظنًا منه أنه سيرفع التردد. النتيجة أنه رفع حمل وحدته فقط، وربما تجاوز حدًا حراريًا، بينما التردد لم يتحرك — لأن وحدته لا تمثل إلا جزءًا صغيرًا من الشبكة. وبالمقابل، فإن نفس الفعل على وحدة تغذّي شبكة معزولة صغيرة **سيرفع التردد فعلًا**. **الفعل واحد والنتيجة مختلفة، والفارق هو ما الذي تربطه بوحدتك.**

18.7 دروب أم أيزوكرونس؟ خاصية الحاكم التي تحدد سلوك الوحدة على الشبكة

بعد أن عرفنا أن الحاكم — والقاطع مغلق — يتحكم بالميغاواط، يبقى سؤال جوهري: **بأي قانون يقرر الحاكم كم ميغاواط يعطي؟** والجواب هو خاصية الحاكم (Governor Characteristic)، ولها وضعان أساسيان.

وضع الدروب (Droop Mode)

في هذا الوضع توجد **علاقة مقصودة ومصمَّمة بين السرعة/التردد وبين الحمل**: كلما زاد الحمل، انخفضت السرعة/التردد قليلًا.

Load ↑ → Speed / Frequency tends to ↓ → Governor increases Fuel

والنقطة الجوهرية: **التردد لا يعود بالضرورة إلى قيمته الأصلية بالكامل.** توجد نسبة دروب محددة مسبقًا تحكم مقدار الانخفاض المسموح، وتُعرَّف رياضيًا:

$$\text{Droop } \% = \frac{\Delta f / f_{rated}}{\Delta P / P_{rated}} \times 100$$

وبصياغة عملية: دروب 4% يعني أن تحميل الوحدة من الصفر إلى حملها الكامل يخفض التردد بنسبة 4% من قيمته الاسمية. أي في شبكة 50 هرتز: من 52 هرتز عند اللاحمل إلى 50 هرتز عند الحمل الكامل — وهو الخط الأحمر في الشكل أعلاه. والقيم النموذجية تقع بين 3% و6%.

ولماذا نتعمّد هذا «العيب» الظاهري؟ لأنه ليس عيبًا — إنه الآلية التي تتيح تقاسم الحمل **(Load Sharing)** بين عدة مولدات بشكل مستقر، وهذه هي أهم فائدة للدروب على الإطلاق.

والفكرة أنيقة: عندما تعمل عدة مولدات بالتوازي على قضيب واحد، فإن **التردد مشترك بينها جميعًا بحكم الربط الفيزيائي** — لا يمكن لوحدة أن تدور بتردد يختلف عن أخرى وهما مربوطتان. وكل وحدة لها خطّ دروب خاص. فعند تردد النظام الحالي، يقرأ كل حاكم موضعه على خطّه ويستقر عند الحمل الذي يقابل ذلك التردد على خطّه هو. والنتيجة: **توزيع مستقر وتلقائي للحمل، بلا اتصال بين الوحدات وبلا نظام مركزي.**

مثال بسيط لثلاث وحدات تتقاسم مئة ميغاواط:

Generator A → 50 MW

Generator B → 30 MW

Generator C → 20 MW

وإذا زاد الطلب على الشبكة، ينخفض التردد قليلًا، فتزيد **كل** الوحدات حملها تلقائيًا وبنسب متناسبة مع خطوطها — وهذا هو ما يُسمى الاستجابة الأولية للتردد **(Primary Frequency Response)**، وهي الخدمة التي تُلزَم بها محطات كثيرة تعاقديًا.

وضبط توزيع الحمل بين وحدتين متوازيتين يتم بطريقتين: إما بتغيير نسبة الدروب (خط أكثر انحدارًا يعني حصة أقل من أي زيادة حمل)، أو بإزاحة خط الدروب كاملًا لأعلى أو لأسفل عبر نقطة ضبط السرعة (/ Speed Setpoint Load Setpoint) — وهذا هو ما تفعله فعليًا حين «ترفع الحمل» على وحدة مربوطة بالشبكة.

وضع الأيزوكرونس (Isochronous Mode)

الهدف هنا مختلف تمامًا: **المحافظة على سرعة/تردد ثابت مهما تغيّر الحمل.**

Load ↑ → Speed tends to ↓ → Governor increases Fuel → Speed returns to Setpoint

أي أن الحاكم يعدّل الوقود باستمرار حتى يعيد السرعة إلى نقطة الضبط بالضبط، لا إلى قيمة قريبة منها. وبلغة الفصل العشرين: الأيزوكرونس هو دروب صفري، وهو ما يقابل وجود حدّ تكاملي **(Integral)** في المتحكم يزيل الخطأ المستقر تمامًا — بينما الدروب في جوهره تحكم تناسبي (Proportional) يترك خطأ مستقرًا مقصودًا. هذه ليست مصادفة اصطلاحية، بل هي حرفيًا نفس الرياضيات التي شرحناها في 20.3.

ومتى يُستخدم؟ حين تكون وحدة واحدة مسؤولة عن تحديد تردد شبكة معزولة (Islanded System) — منصة بحرية، أو حقل نائي، أو جزيرة، أو مصنع منفصل عن الشبكة الوطنية. هنا لا يوجد «تردد شبكة» تتبعه الوحدة؛ **الوحدة هي من يصنع التردد**، ولا بد أن تصنعه ثابتًا.

القاعدة الذهبية التي يجب ألا تُنسى: لا يمكن أن تعمل وحدتان في وضع الأيزوكرونس على قضيب واحد. فكل منهما ستصرّ على فرض التردد الذي تريده، وستقرأ أي انحراف طفيف على أنه خطأ يجب تصحيحه بالوقود. النتيجة أن الحمل يتأرجح بينهما بعنف: واحدة تزيد وقودها فتحمل أكثر، فتقرأ الأخرى أن التردد ارتفع فتخفض وقودها، وهكذا حتى تصل إحداهما إلى حملها الأقصى والأخرى إلى القدرة العكسية. وهذا خطأ تكوين شائع جدًا يظهر عند الفصل عن الشبكة **(Islanding)**، وينتهي بفقدان الوحدتين معًا.

والحل المعتمد في الشبكات المعزولة متعددة الوحدات هو أحد نهجين: **وحدة واحدة على أيزوكرونس والبقية على دروب** (وتُسمى الأولى Swing Machine وتمتص كل تغيرات الحمل)، أو كل الوحدات على دروب مع نظام تحكم أعلى **(Load Sharing Controller)** يوزّع الحمل ويصحّح التردد مركزيًا. والثاني أكثر مرونة وأمانًا.

مقارنة مباشرة

	Droop	Isochronous
التردد عند تغيّر الحمل	ينزاح قليلًا ويستقر	يعود لنقطة الضبط تمامًا
الطبيعة الرياضية	تناسبي — خطأ مستقر مقصود	تكاملي — بلا خطأ مستقر
الوحدات المتوازية	تعمل معًا بثبات — هذا غرضه	لا تعمل معًا — تتصارع
الاستخدام النموذجي	مربوطة بشبكة كبيرة أو بالتوازي	وحدة واحدة تغذّي شبكة معزولة
الفائدة الأساسية	**تقاسم الحمل**	**تثبيت التردد**
الانتقال بينهما	—	يحدث تلقائيًا عند الفصل عن الشبكة في بعض التصاميم

وملاحظة تشغيلية مهمة: كثير من الوحدات المصممة للعمل على شبكة كبيرة **وأيضًا** لقدرة العمل معزولة تحتوي على منطق انتقال تلقائي: تعمل على دروب وهي مربوطة، وتنتقل إلى أيزوكرونس فور كشف الفصل عن الشبكة (Islanding Detection). وهذا المنطق حسّاس جدًا: كشف خاطئ للفصل بينما الوحدة ما زالت مربوطة سيحوّلها إلى أيزوكرونس على شبكة كبيرة — فتحاول وحدة واحدة أن تفرض تردد شبكة بأكملها، والنتيجة أنها تذهب فورًا إلى حملها الأقصى أو إلى القدرة العكسية حسب اتجاه الانحراف. **وعند التحقيق في حدث تحميل مفاجئ غير مفسّر على وحدة، افحص هذا المنطق مبكرًا.**

18.8 الخريطة الكاملة: من الوقود إلى الشبكة

نختم هذا الفصل بخريطة واحدة تجمع كل ما سبق في تسلسل واحد يسهل استرجاعه أمام الوحدة:

Gas Turbine
↓
Governor / Fuel Control
↓
Mechanical Torque
↓
Generator
↓
Electrical Power

ثم القاعدتان الأساسيتان بعد الربط:

Fuel → MW
Excitation → MVAr

وقبل الربط:

Speed + Voltage + Phase → Synchronization → Breaker Close

وخاصية الحاكم:

Droop → Load Sharing
Isochronous → Frequency Control

وثلاث قواعد ميدانية أختم بها:

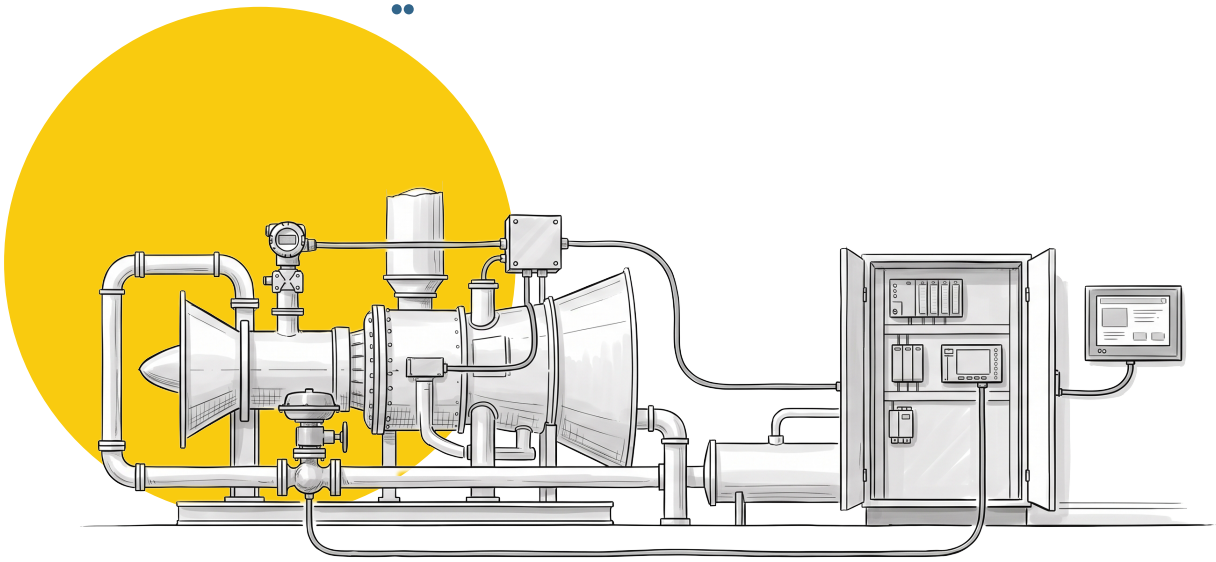
الأولى: إذا وجدت وحدة «لا ترفع حملها» رغم زيادة أمر الوقود، فاسأل أولًا: هل الوحدة على دروب أم أيزوكرونس؟ وهل نقطة ضبط الحمل هي التي تحدّها أم حدّ حراري أم حدّ انبعاثات؟ فالأعراض متطابقة والأسباب مختلفة كليًا.

الثانية: انحراف تدريجي في قراءة MVAr عند نفس الحمل ونفس ظروف الشبكة مؤشر مبكر على مشكلة في نظام الإثارة أو في ضبط AVR — تمامًا كما أن انحراف معدل الحرارة مؤشر على تدهور الأداء (17.2). راقب **MVAr** كمؤشر صحة، لا كرقم للشبكة فقط.

والثالثة، وهي الأهم: حين تقرأ سجل حدث لوحدة توليد، اسأل دائمًا: **ما حالة القاطع في تلك اللحظة؟** فالإجابة عن هذا السؤال وحدها تغيّر تفسير كل رقم آخر في السجل — السرعة، والجهد، والوقود، والحمل. من دونها تكون تقرأ الأرقام في فراغ.

الفصل التاسع عشر:

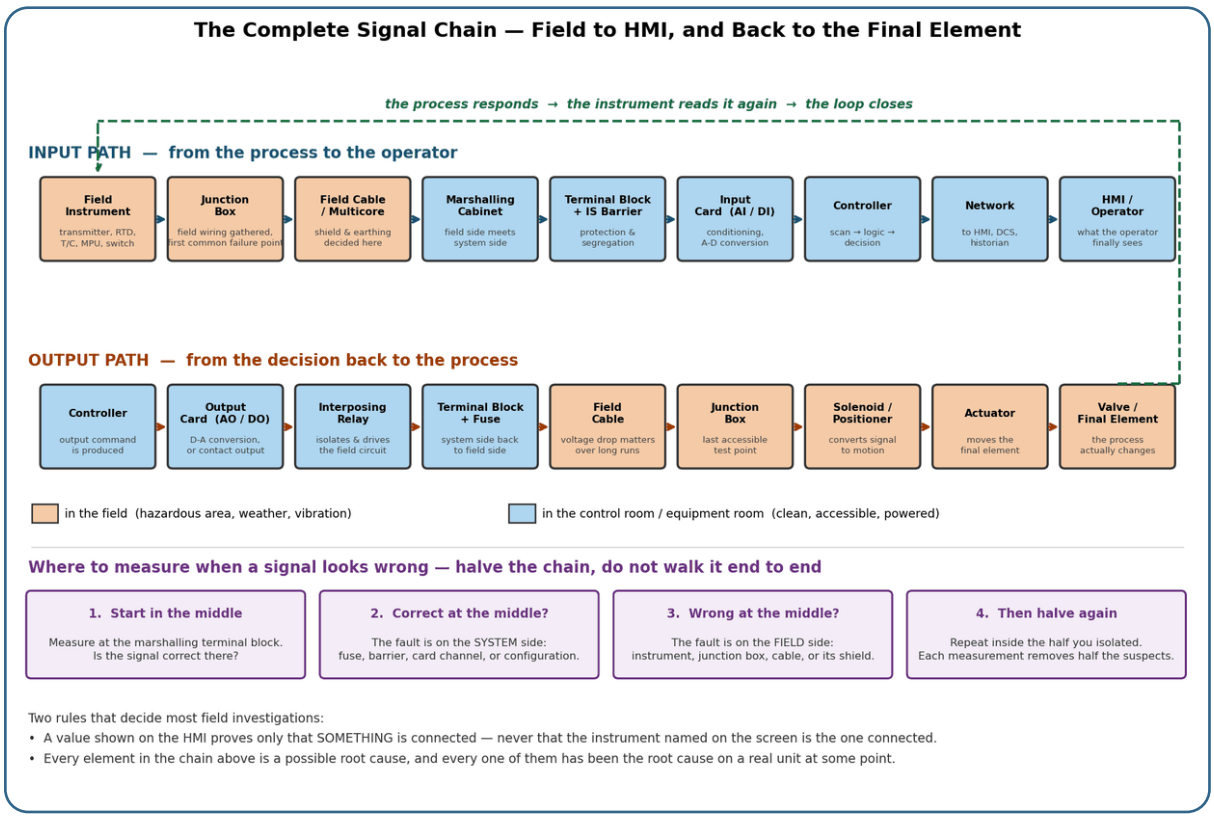
سلسلة الإشارة الكاملة — من الحقل إلى الشاشة والعودة إلى العنصر النهائي



في الفصل الثاني عشر شرحنا بطاقات الإدخال والإخراج ولغات البرمجة، وفي الفصل التاسع شرحنا منطق التحكم. لكن يبقى سؤال عملي هو الأهم يوميًا لمهندس التحكم والقياس بالموقع، ونادرًا ما يُشرح كوحدة واحدة متكاملة:

الإشارة تمر عبر كم عنصرًا فعليًا بين الحقل والشاشة؟ وأي منها يمكن أن يكون السبب؟

المهندس بالموقع لا يتعامل مع حسّاس منفرد — بل مع سلسلة إشارة **(Signal Chain)** كاملة، كل حلقة فيها قادرة وحدها على إفساد القراءة أو منع الأمر من الوصول. وهذا الفصل مخصص لهذه السلسلة: عنصرًا بعنصر، بالاتجاهين، ثم منهجية تشخيصها.



الشكل 19.1 — سلسلة الإشارة الكاملة بالاتجاهين، مع تمييز ما يقع بالحقل عمّا يقع بغرفة التحكم، ومنهجية «التنصيف» لتحديد موضع العطل.

19.1 لماذا نفكّر بـ"سلسلة" لا بـ"جهاز"؟

ثلاثة أسباب عملية بحتة:

أولًا: العطل غالبًا ليس بالجهاز. من واقع العمل الميداني، نسبة معتبرة جدًا من «أعطال الحسّاسات» تنتهي بعد التحقيق إلى وصلة غير محكمة بصندوق وصل، أو تدريع مؤرَّض من طرفين، أو فيوز مفتوح، أو قناة بطاقة إدخال تالفة — لا إلى الحسّاس نفسه. واستبدال الحسّاس بهذه الحالات يستهلك وقتًا وقطعة غيار، ثم تعود المشكلة.

ثانيًا: كل حلقة تنتمي لبيئة مختلفة. الجزء الحقلي يعيش بمنطقة خطرة، معرّض للحرارة والرطوبة والغبار والاهتزاز؛ والجزء داخل غرفة التحكم نظيف ومكيّف ويسهل الوصول إليه. هذا الاختلاف وحده يغيّر **احتمالية العطل** لكل عنصر، وبالتالي يغيّر ترتيب الفحص المنطقي.

ثالثًا: التوثيق يتبع السلسلة. مخططات الحلقات (Loop Drawings) وقوائم الكابلات وجداول الأطراف كلها مبنية على هذا التسلسل. من يفهم السلسلة يقرأ التوثيق بسرعة؛ ومن لا يفهمها يتوه بين المخططات.

19.2 مسار الدخل: من العملية إلى المشغّل

1. الجهاز الحقلي (Field Instrument)

نقطة البداية: ناقل ضغط أو تدفق أو مستوى، RTD أو ثرموكابل، حسّاس سرعة مغناطيسي (7.2)، مجس اهتزاز، مفتاح حدّي، أو مفتاح ضغط. النوع يحدد طبيعة الإشارة الخارجة (تناظرية، رقمية، تردد، جهد ميلي فولت).

نقطة عملية جوهرية: التصنيف بين "ناقل" **(Transmitter)** و"مفتاح" **(Switch)** ليس تفصيلًا. الناقل يعطي قيمة مستمرة تسمح بمتابعة الاتجاه قبل الوصول للحد؛ والمفتاح يعطي حالة فقط — تجاوز العتبة أو لم يتجاوزها — فلا يمنحك أي إنذار مبكر. ولهذا تُفضَّل النواقل بالقياسات الحرجة رغم كلفتها الأعلى.

2. صندوق الوصل (Junction Box)

نقطة تجميع أسلاك عدة أجهزة قريبة قبل ربطها بكابل واحد متعدد الأزواج (Multicore) نحو غرفة التحكم. وهي — من واقع الميدان — **من أكثر نقاط السلسلة تسبّبًا بالمشاكل**، لسبب بسيط: هي مكان يُفتح ويُغلق بشكل متكرر، بمنطقة معرّضة للرطوبة والغبار. أشهر ما يحدث فيها: طرف غير محكم الشد يتراخى مع الاهتزاز والدورات الحرارية، أو دخول رطوبة عبر مدخل كابل غير محكم، أو تأكسد أطراف.

3. الكابل الحقلي (Field Cable / Multicore)

هنا تُتخذ قرارات كهربائية دقيقة أثرها ضخم:

- التدريع **(Shielding)**: غلاف موصل حول الأزواج يحمي الإشارة من التداخل الكهرومغناطيسي.
- **التأريض من طرف واحد فقط** — قاعدة أساسية: تأريض التدريع من الطرفين ينشئ حلقة أرضية (Ground Loop) يمر فيها تيار، فيُدخل ضجيجًا بدل أن يمنعه. حالة «قواطع كاذبة متكررة» في الفصل الثالث عشر كانت مثالًا حيًّا على هذا بالذات.
- **الفصل بين مسارات الكابلات**: كابلات الإشارة الضعيفة لا تُمدّ بمحاذاة كابلات القدرة، لأن الأخيرة تولّد مجالات تحثّ ضجيجًا بالأولى.
- **مقاومة الكابل وطوله**: مهمة خصوصًا مع RTD (حيث تُضاف مقاومة الأسلاك للقراءة — ولهذا تُستخدم توصيلة ثلاثية أو رباعية الأسلاك) ومع مخرجات الجهد بالمسافات الطويلة.

4. خزانة التوزيع (Marshalling Cabinet)

المكان الذي يلتقي فيه «جانب الحقل» بـ«جانب النظام». هنا تُعاد أطراف الكابل متعدد الأزواج توزيعها لتتوافق مع ترتيب قنوات بطاقات الإدخال. وهي عمليًا **أفضل نقطة قياس بالسلسلة كلها**: في المنتصف، وسهلة الوصول، وآمنة كهربائيًا، ومؤشَّرة بوضوح على المخططات.

5. مجموعة الأطراف والحماية (Terminal Block + Fuse / IS Barrier / Relay)

- بلوك الأطراف **(Terminal Block)**: نقطة الوصل الفعلية، وغالبًا يحوي طرف فصل **(Disconnect Terminal)** يسمح بعزل الحلقة للاختبار بدون فك أسلاك — ميزة عملية ثمينة أثناء فحص الحلقات (17.1).
- الفيوز **(Fuse)**: يحمي بطاقة الإدخال من عطل قصر بالحقل. فيوز مفتوح يعطي بالضبط نفس عرض "حسّاس معطّل" — وهو من أوائل ما يجب فحصه، لا آخره.
- حاجز الأمان الذاتي **(IS Barrier / Galvanic Isolator)**: بالمناطق الخطرة (راجع 6.7)، يحدّ هذا الحاجز الطاقة الكهربائية الداخلة للحقل بحيث لا تكفي لإحداث شرارة مشتعلة حتى بحالة العطل. وهو عنصر يجب أن يُدرَج بالحسبان عند أي قياس، لأنه **يغيّر خصائص الدائرة** ولا يمكن تجاهله عند التشخيص.
- مرحّل **(Relay)**: يُستخدم للفصل الكهربائي بين دائرتين، أو لتكييف جهد التلامس الحقلي مع ما تقبله البطاقة.

6. بطاقة الإدخال (Input Card — AI / DI)

شرحناها بالتفصيل بـ 12.1: تهيئة الإشارة، الفلترة، والتحويل من تناظري لرقمي. النقطة الإضافية هنا: **العطل قد يكون بقناة واحدة فقط** من البطاقة، لا بالبطاقة كاملها — ومن أسرع الاختبارات العملية نقل الإشارة مؤقتًا لقناة احتياطية معروفة السلامة لحسم ما إذا كانت المشكلة بالقناة أم بما قبلها.

7. المتحكم (Controller)

يقرأ القيمة الرقمية، يطبّق التدريج (Scaling) لتحويلها لوحدة هندسية مفهومة، يمرّرها على منطق التحكم والحماية (الفصلان 9 و12)، ثم ينتج القرار. وهنا مصدر عطل من نوع مختلف تمامًا: **العطل قد يكون بالإعداد لا بالإشارة** — مدى تدريج خاطئ، أو وحدة قياس مختلفة، أو قيمة اختبار لم تُستبدل (17.5).

8. الشبكة (Network)

نقل القيمة للشاشات والDCS والمؤرشِف (الفصل الحادي عشر). العطل هنا لا يفسد القيمة عادةً، بل يفسد **وصولها** أو **حداثتها** — قيمة مجمّدة على الشاشة قد تبدو سليمة تمامًا وهي في الحقيقة قديمة.

9. شاشة التشغيل (HMI)

نهاية المسار — وما يراه المشغّل فعليًا. وهنا **القاعدة الأهم بهذا الفصل**: ظهور قيمة معقولة على الشاشة يثبت فقط أن **شيئًا ما** متصل ويعمل — لا يثبت أن الجهاز المكتوب اسمه على الشاشة هو الجهاز المتصل فعلًا، ولا أنه يقيس ما تظن أنه يقيسه. إثبات ذلك يتم مرة واحدة فقط: **بفحص حلقة من الطرفين** (17.1).

19.3 مسار الخرج: من القرار إلى العملية

1. **المتحكم** يُنتج الأمر — قيمة تناظرية (نسبة فتح مطلوبة) أو أمر رقمي (افتح/أغلق).

2. بطاقة الإخراج **(Output Card — AO / DO)**: تحوّل القيمة الرقمية لإشارة تناظرية، أو تُغلق تلامسًا. الفارق الجوهري: **مخرج تناظري يتحكم بالمقدار، ومخرج رقمي يتحكم بالحالة.**

3. المرحّل الوسيط **(Interposing Relay)**: عنصر يُغفَل كثيرًا رغم أهميته. وظيفته مزدوجة: **العزل** — بحيث لا يصل أي عطل بدائرة الحقل لبطاقة الإخراج الحساسة؛ و**رفع القدرة** — لأن مخرج البطاقة لا يستطيع وحده تشغيل ملف لولبي أو محرّك. وهو أيضًا الموضع الذي تُنفَّذ فيه غالبًا **منطق الحماية الاحتياطية المستقلة** المشروح بـ 7.8، حيث تُوضع تلامسات على التوالي بدائرة التغذية.

4. **مجموعة الأطراف والفيوز**: عودة من جانب النظام لجانب الحقل. وفيوز مفتوح هنا يعني أمرًا صحيحًا تمامًا لكنه **لا يصل** — وهذه حالة خطيرة، لأن نظام التحكم قد يعتقد أنه أصدر الأمر بينما لم يحدث شيء بالحقل.

5. **الكابل الحقلي**: في مسار الخرج يحدث هبوط الجهد **(Voltage Drop)** على طول الكابل عاملًا حقيقيًا، خصوصًا مع المسافات الطويلة والأحمال الاستقرائية (ملفات الملف اللولبي). ملف لولبي يعمل بشكل متقطع أو «يهمهم» دون أن يعمل بالكامل عرضٌ كلاسيكي لهبوط جهد.

6. **صندوق الوصل**: آخر نقطة قياس يسهل الوصول إليها قبل العنصر النهائي — نقطة ثمينة جدًا بالتشخيص.

7. الملف اللولبي أو الموضِّع **(Solenoid / Positioner)**: يحوّل الإشارة الكهربائية إلى فعل. الملف اللولبي يفتح أو يغلق مسار هواء/زيت تشغيل (منطق ثنائي)؛ والموضِّع يترجم إشارة تناظرية إلى ضغط تشغيل متناسب لتحقيق موضع مطلوب.

8. المشغّل **(Actuator)**: يحوّل الضغط أو الطاقة الكهربائية إلى حركة — والمصدر الشائع هنا هو الهواء المضغوط أو الزيت الهيدروليكي أو محرّك كهربائي.

9. العنصر النهائي **(Valve / Final Element)**: الصمام، أو ريش IGV (9.5)، أو صمام الوقود (6.2). وهنا فقط **تتغيّر العملية فعليًا**.

10. **إغلاق الحلقة**: العملية تستجيب، فيقرأ الجهاز الحقلي القيمة الجديدة، وتبدأ الدورة من جديد. هذا هو معنى "حلقة التحكم" حرفيًا.

تفصيلة أمان لا يجوز إغفالها: التغذية الراجعة للموضع. أمر الفتح لا يثبت الفتح. ولهذا تُرجَع للمتحكم إشارة موضع فعلية — من LVDT (9.7) أو مفتاح حدّي أو موضِّع ذكي. الفرق بين **الموضع المطلوب** و**الموضع الفعلي** هو أهم مؤشر تشخيصي بأي حلقة تحكم، وهو ما يميّز «أمرت ولم يستجب» عن «أمرت واستجاب» (راجع 10.12).

19.4 مفاهيم عرضية تسري على السلسلة كلها

فلسفة الفشل-الآمن (Fail-Safe) عبر السلسلة كاملة

كل عنصر يجب أن يكون له سلوك محدد ومقصود عند فقدان الإشارة أو الطاقة، لا سلوك عشوائي:

- **الحلقة التناظرية 4–20 مللي أمبير**: اختيار "الصفر الحي" (4 مللي أمبير كحد أدنى بدل صفر) مقصود تمامًا — فقراءة **صفر** لا تعني «قيمة صفر»، بل تعني **انقطاع الحلقة**. هذه واحدة من أذكى الأفكار بهندسة القياس، وهي تميّز العطل عن القيمة الفعلية تلقائيًا.
- **التلامس الحقلي**: يُفضَّل أن تكون الحالة السليمة هي **المغذّاة كهربائيًا**، فيصير انقطاع السلك مساويًا للحالة غير السليمة — أي أن العطل يقود لنتيجة آمنة (راجع كتلة NOT بـ 12.11).
- **العنصر النهائي**: صمامات الوقود مصمَّمة لتغلق بفقدان الإشارة أو الطاقة (6.2، 7.8).

التغذية: جهاز بسلكين أم بأربعة؟ الأجهزة المغذّاة من الحلقة نفسها (Two-Wire / Loop-Powered) تستمد طاقتها من نفس الزوج الذي تنقل عليه الإشارة — أبسط وأرخص كابليًا، لكن بقدرة محدودة. والأجهزة رباعية الأسلاك لها تغذية مستقلة — تسمح بوظائف أكثر لكنها تحتاج كابلًا إضافيًا. الفارق مهم عمليًا: عند قياس حلقة ثنائية الأسلاك، يجب معرفة أن مصدر التغذية جزء من الدائرة نفسها.

البروتوكول الرقمي فوق الإشارة التناظرية **(HART)**: كثير من النواقل الحديثة تُرسل بالتوازي مع إشارة 4–20 مللي أمبير التقليدية بيانات رقمية إضافية على نفس السلكين — حالة الجهاز، تشخيصه الذاتي، وقيم المعايرة. قيمته العملية أنه يسمح بقراءة **صحة الجهاز** لا قيمته فقط، وأحيانًا يسمح بضبط الجهاز من غرفة التحكم دون الذهاب للحقل.

التأريض يستحق تكرارًا لأنه سبب متكرر بشكل استثنائي: نقطة أرضي واحدة لكل حلقة، تدريع مؤرَّض من طرف واحد، وفصل أرضي الإشارة عن أرضي القدرة. أي إخلال بهذه الثلاثة يُنتج أعراضًا متقطعة يصعب تكرارها — وهي أصعب أنواع الأعطال تشخيصًا.

19.5 منهجية تشخيص السلسلة: التنصيف بدل المشي

الخطأ الشائع عند قراءة إشارة خاطئة هو البدء من الحقل والمشي على السلسلة عنصرًا بعنصر. الأسرع منهجيًا هو التنصيف **(Halving)**:

1. **ابدأ من المنتصف** — خزانة التوزيع. قِس الإشارة هناك.
2. **إذا كانت صحيحة عند المنتصف** ← العطل بجانب **النظام**: فيوز، حاجز، قناة بطاقة، أو إعداد تدريج بالمتحكم.
3. **إذا كانت خاطئة عند المنتصف** ← العطل بجانب **الحقل**: الجهاز نفسه، صندوق الوصل، الكابل، أو تدريعه.
4. **كرّر التنصيف داخل النصف المعزول** — كل قياس يستبعد نصف الاحتمالات المتبقية.

بسلسلة من تسعة عناصر، هذه المنهجية تصل للعنصر المسؤول بثلاثة أو أربعة قياسات، مقابل ما قد يصل لتسعة بالمشي المتسلسل — وبفارق أكبر بكثير بالوقت الفعلي، لأن الوصول لبعض العناصر الحقلية يتطلب تصريح عمل ومعدات وصول.

جدول عملي: العرض ← أول ثلاث نقاط فحص

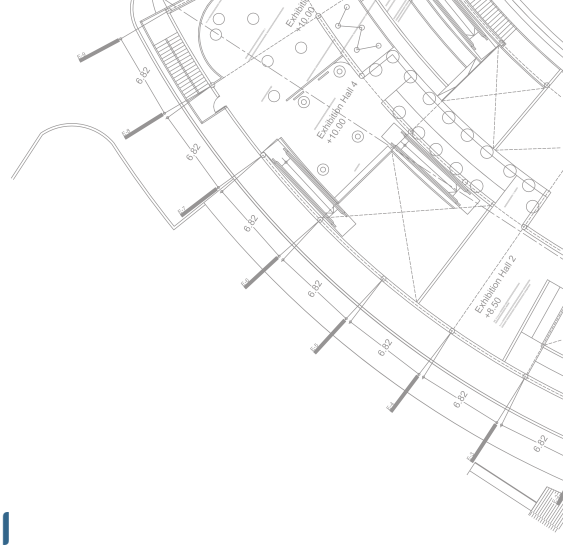
العرض على الشاشة	التفسير الأرجح	افحص أولًا
قراءة صفر تمامًا (تحت الحد الأدنى الحي)	انقطاع بالحلقة	فيوز، أطراف صندوق الوصل، استمرارية الكابل
قراءة عند الحد الأقصى ثابتة	قصر بالدائرة، أو عطل بالجهاز	أطراف الجهاز، رطوبة بصندوق الوصل
قراءة معقولة لكنها خاطئة	تدريج خاطئ أو معايرة منحرفة	إعداد المدى بالمتحكم، ثم معايرة الجهاز
قراءة تقفز أو تحمل ضجيجًا	مشكلة تدريع أو تأريض أو تداخل	تأريض التدريع، مسار الكابل قرب كابلات قدرة
قراءة مجمّدة لا تتغيّر	مشكلة اتصال أو تحديث لا مشكلة قياس	حالة الشبكة، طابع زمن آخر تحديث
أمرت بالفتح ولم يستجب	انقطاع بمسار الخرج	تلامس المرحّل الوسيط، الفيوز، ثم الملف اللولبي

العرض على الشاشة	التفسير الأرجح	افحص أولًا
العنصر يتحرك جزئيًا أو يتذبذب	نقص طاقة تشغيل أو مشكلة موضِّع	هبوط جهد بالكابل، ضغط هواء التشغيل، تغذية الموضع الراجعة

19.6 من واقع الميدان

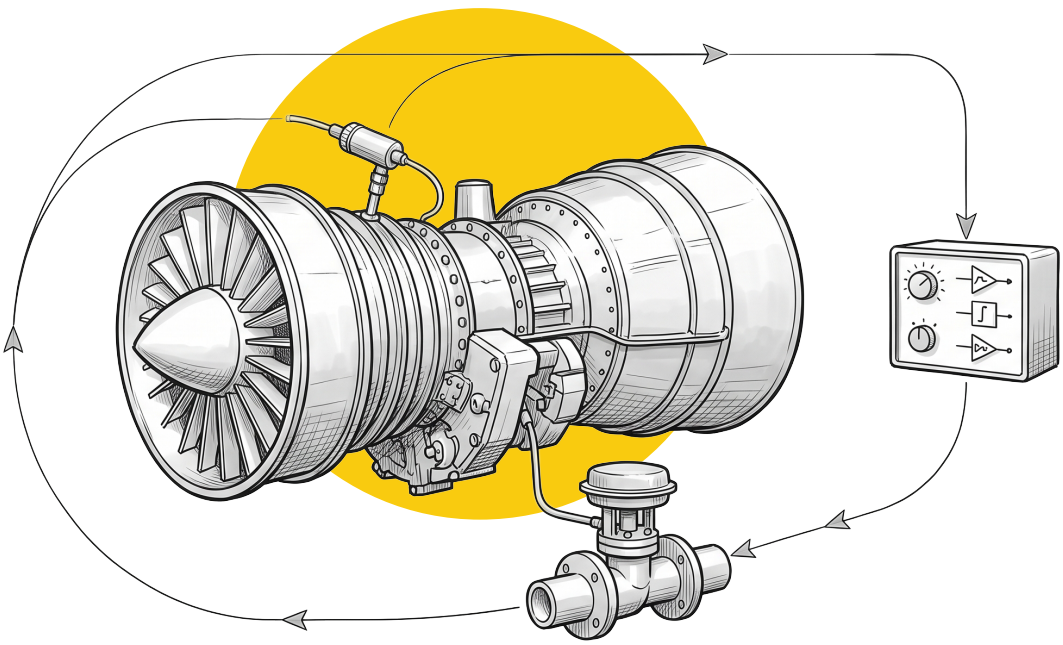
- مخطط الحلقة **(Loop Drawing)** قبل المفك. خمس دقائق بقراءة المخطط توفّر ساعات بالحقل — لأنها تُظهر مسبقًا أين الفيوز وأين الحاجز وأي قناة بأي بطاقة.
- **اشتباه الطرف غير المحكم يُختبر بالطرْق، لا بالنظر.** أعطال الشد المتراخي غالبًا متقطعة؛ ولمسة أو اهتزاز خفيف عند الطرف المشتبه به أثناء مراقبة القراءة كافيان أحيانًا لحسم الأمر خلال ثوانٍ.
- **صوّر داخل صندوق الوصل قبل أن تلمس شيئًا.** أبسط إجراء يمنع مشاكل ما بعد الإصلاح، ويسمح باستعادة الوضع الأصلي بدقة.
- **إشارتان تعطلان معًا = ابحث عن عنصر مشترك.** لا صدفة هنا: كابل مشترك، أو صندوق وصل مشترك، أو بطاقة واحدة، أو مصدر تغذية واحد. هذه ملاحظة تختصر التحقيق فورًا.
- **لا تُلغِ حماية لتُكمل تشخيصًا.** إن اضطررت لتجاوز (Bypass) إشارة حماية أثناء الفحص، فذلك إجراء موثّق ومحدود بزمن وله من يراقبه — لا قرار فردي أثناء العمل. القاعدة نفسها التي أنهينا بها الفصل السابع عشر: **مسار حماية معطَّل هو مسار غير موجود.**

بهذا يكتمل الجسر بين ما تراه على الشاشة وما يحدث فعليًا بالمعدة: من الجهاز الحقلي وحتى المشغّل، ثم من قرار المتحكم وحتى حركة الصمام. من يتقن قراءة هذه السلسلة يستطيع أن يشخّص أعطالًا تبدو غامضة تمامًا لمن ينظر إلى طرف واحد منها فقط.



الفصل العشرون:

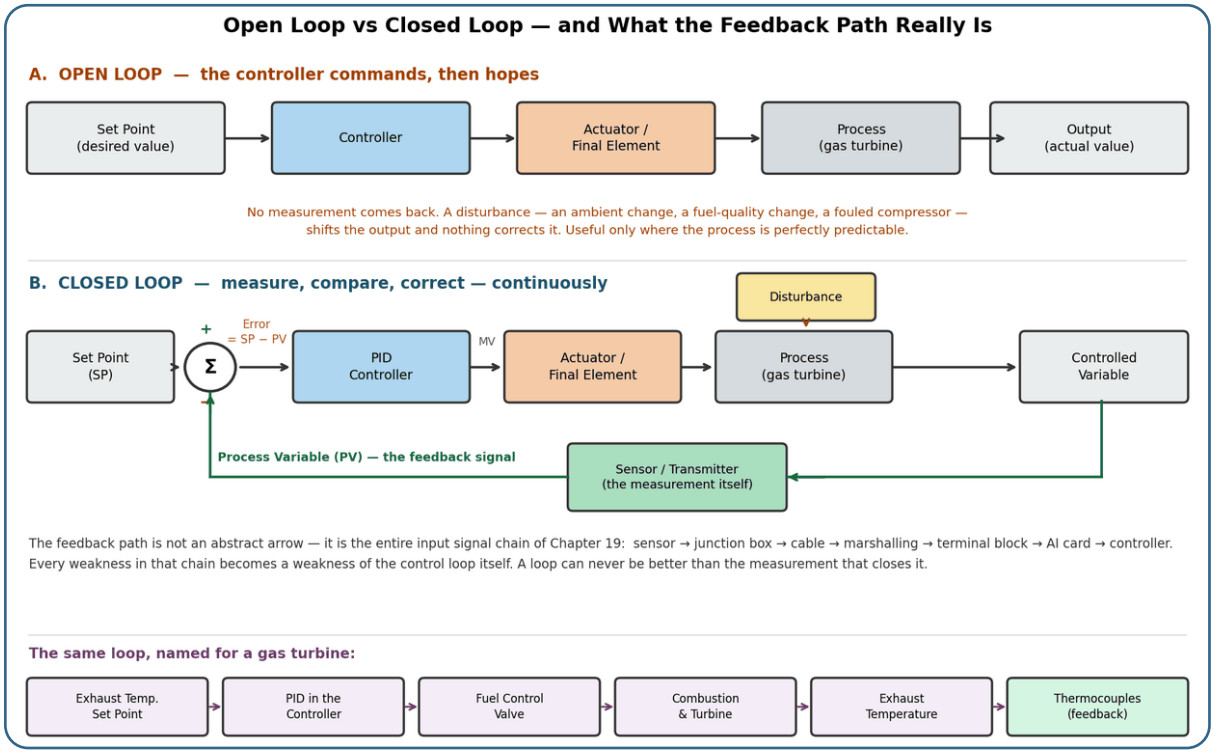
حلقات التحكم المغلقة، المتحكم DIP، الضبط والتحكم المتقدم



كل ما سبق بهذا الكتاب شرح **ما الذي يتحكم به** نظام التحكم: الوقود، الهواء، السرعة، الحرارة. هذا الفصل يشرح **كيف** يتحكم فعليًا — الخوارزمية نفسها التي تقف خلف كل حلقة تحكم بالتوربين الغازي، وكيف تُضبط، وما الذي يأتي بعدها.

وهو أيضًا الفصل الذي يربط عالَمين يُدرَّسان عادة منفصلين: القياس والأجهزة **(Instrumentation)** من جهة، وخوارزمية التحكم **(Control Algorithm)** من جهة أخرى. الرسالة الأساسية بهذا الفصل بسيطة وصريحة: **لا يمكن لأي حلقة تحكم أن تكون أفضل من القياس الذي يغلقها.**

20.1 النظام المغلق والتغذية الراجعة (Closed Loop and Feedback)



الشكل 20.1 — أعلى: النظام المفتوح (Open Loop). وسط: النظام المغلق (Closed Loop) بكامل عناصره — نقطة الضبط، الخطأ، المتحكم، العنصر النهائي، العملية، الاضطراب، ومسار التغذية الراجعة. أسفل: نفس الحلقة بأسماء التوربين الغازي.

النظام المفتوح **(Open Loop)** يُصدر أمرًا ثم ينتهي دوره. لا قياس يعود، ولا تصحيح. يصلح فقط حين تكون العملية متوقّعة تمامًا وثابتة الظروف — وهذا **لا ينطبق أبدًا** على توربين غازي: حرارة الجو تتغيّر، جودة الوقود تتغيّر، الضاغط يتلوّث تدريجيًا، والحمل يتغيّر لحظيًا.

النظام المغلق **(Closed Loop)** يضيف عنصرًا واحدًا يغيّر كل شيء: التغذية الراجعة **(Feedback)**. المنطق دائري ومستمر:

1. نقطة الضبط **(Set Point — SP)**: القيمة المطلوبة.
2. المتغيّر المقاس **(Process Variable — PV)**: القيمة الفعلية كما قرأها الجهاز.
3. الخطأ **(Error)**: $\text{Error} = \text{SP} - \text{PV}$.
4. المتحكم **(Controller)**: يحوّل الخطأ إلى أمر — يُسمّى المتغيّر المُتحكَّم به (Manipulated Variable — MV).
5. العنصر النهائي **(Final Element)**: ينفّذ الأمر (صمام الوقود مثلًا).
6. العملية **(Process)**: تستجيب.
7. **الحسّاس**: يقيس النتيجة، فتعود القيمة للمقارنة — وتُغلق الحلقة.

وهنا الربط الجوهري مع الفصل التاسع عشر: **مسار التغذية الراجعة ليس سهمًا نظريًا بالمخطط، بل هو سلسلة الإشارة كاملة** — حسّاس ← صندوق وصل ← كابل ← خزانة توزيع ← بلوك أطراف ← بطاقة إدخال ← متحكم. أي ضعف في تلك السلسلة (ضجيج، تأخير، تدريج خاطئ، طرف متراخٍ) يصبح **ضعفًا في حلقة التحكم نفسها**، ولو كانت خوارزمية المتحكم مثالية.

ملاحظة مفهومية تستحق التأكيد: الاضطراب **(Disturbance)** هو أي مؤثر خارجي على العملية لا يمر عبر المتحكم — تغيّر بحرارة الجو، تغيّر بجودة الوقود، أو تغيّر مفاجئ بالحمل. والغرض الحقيقي من التغذية الراجعة ليس فقط الوصول لنقطة الضبط، بل **الصمود أمام الاضطرابات** بعد الوصول إليها.

20.2 اختبار أداء نظام التحكم (Control Performance Test)

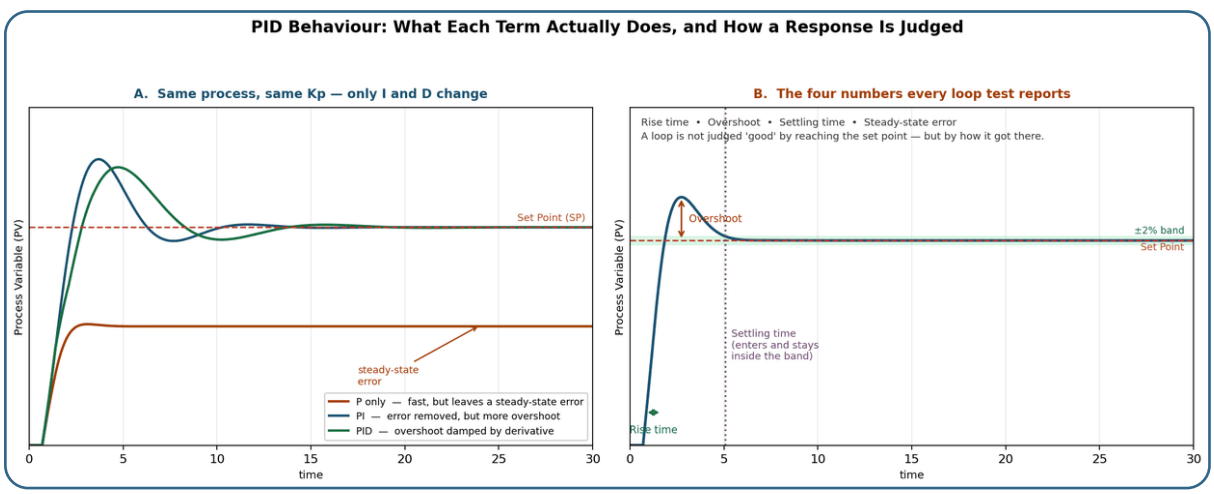
في الفصل السابع عشر تكلمنا عن اختبار أداء **التوربين** (قدرة، معدل حرارة). وهنا نتكلم عن شيء مختلف: اختبار أداء **نظام التحكم** نفسه.

الفكرة الجوهرية: **"وصل للقيمة المطلوبة" ليست نتيجة اختبار.** الاختبار الحقيقي يسأل: بأي سرعة وصل؟ بأي استقرار؟ بأي دقة؟ وبكم حركة للصمام؟

ما الذي يُختبر عمليًا بالتوربين الغازي؟

استقرار السرعة (Speed Stability)، استجابة الحمل (Load Response)، التحكم بضغط وقود الغاز (Fuel Gas Pressure Control)، التحكم بحرارة العادم (Exhaust Temperature Control)، التحكم بزاوية ريش التوجيه (IGV Control)، استجابة صمام الوقود (Fuel Valve Response)، التسارع والتباطؤ (Acceleration / Deceleration)، قبول الحمل (Load Acceptance)، رفض الحمل (Load Rejection)، واستجابة التردد (Frequency Response).

كيف تُقاس النتيجة؟ أربعة أرقام لا غير



الشكل 20.2 — يسار: نفس العملية ونفس Kp، والفرق فقط بوجود I وD. يمين: الأرقام الأربعة التي يُقاس بها أداء أي حلقة تحكم.

- زمن الصعود **(Rise Time)**: كم استغرقت لتقترب من الهدف.
- التجاوز **(Overshoot)**: كم تجاوزت الهدف قبل أن تعود.

- زمن الاستقرار **(Settling Time)**: متى دخلت نطاقًا ضيقًا حول الهدف **وبقيت فيه**.
- الخطأ المستقر **(Steady-State Error)**: كم بقي من فرق دائم بعد الاستقرار.

ويُضاف لها عمليًا مؤشران يُغفلان كثيرًا: التذبذب **(Oscillation)** — هل تتأرجح القيمة حول الهدف باستمرار؟ وحركة العنصر النهائي **(Valve Travel)** — هل يحقق الصمام هذا الأداء بحركة هادئة أم بحركة مستمرة تستهلك عمره؟ حلقة «ممتازة» على الورق لكنها تُبقي الصمام بحركة دائمة هي حلقة سيئة عمليًا.

مثال عملي: تغيير الحمل من 50% إلى 70%

لا يكفي أن نقول إن الوحدة وصلت لـ70%. الاختبار الصحيح يتتبّع السلسلة كاملة:

طلب الحمل ← المتحكم ← صمام الوقود ← تدفق الوقود ← عزم التوربين ← حمل المولد

ثم يقارن ثلاثة منحنيات على نفس المحور الزمني: نقطة الضبط **(SP)** مع القيمة المقاسة **(PV)** مع خرج المتحكم **(Controller Output)**. وهذه المقارنة الثلاثية هي أقوى أداة تشخيص بالتحكم على الإطلاق:

- لو تحرّك خرج المتحكم بشكل صحيح ولم تستجب القيمة المقاسة ← المشكلة **بعد** المتحكم: الصمام، المشغّل، أو مسار الخرج (الفصل 19).
- لو لم يتحرّك خرج المتحكم أصلًا ← المشكلة **بالمتحكم أو بإعداداته** أو بقيد يمنعه (حد أقصى، منطق تدخّل).
- لو تحرّك الاثنان لكن بتذبذب مستمر ← المشكلة بالضبط **(Tuning)**.

20.3 المتحكم PID: ماذا يفعل كل حدّ فعليًا؟

الخوارزمية الأشهر صناعيًا، وثلاثة حدود لا أكثر، كل واحد ينظر للخطأ من زاوية زمنية مختلفة:

الحدّ	ينظر إلى	يجيب على سؤال
P — التناسبي (Proportional)	الخطأ **الآن**	كم نحن بعيدون؟
I — التكاملي (Integral)	تراكم الخطأ **في الماضي**	كم بقينا بعيدين، ولكم من الوقت؟
D — التفاضلي (Derivative)	سرعة تغيّر الخطأ (**المستقبل** القريب)	إلى أين نتجه، وبأي سرعة؟

التحكم التناسبي (P)

يستجيب للخطأ الحالي بشكل مباشر: كلما زاد الخطأ، زاد الأمر. مثال: نقطة الضبط 500 درجة، والقيمة الفعلية 490 ← خطأ 10 درجات ← أمر متناسب معه.

كسب التناسب (Proportional Gain — Kp) هو معامل هذا التناسب. زيادته تجعل الاستجابة أسرع وأقوى، لكن تجاوز الحد ينتج: تجاوزًا **(Overshoot)**، ثم تذبذبًا **(Oscillation)**، ثم عدم استقرار **(Instability)**، وحركة مفرطة لصمام التحكم.

العيب الجوهري لـ P وحده: يترك خطأً مستقرًا **(Steady-State Error)** لا يزول. السبب منطقي: لكي يُنتج المتحكم أمرًا غير صفري، يجب أن يبقى هناك خطأ. فإذا اختفى الخطأ اختفى الأمر — فيستقر النظام عند نقطة فيها خطأ صغير دائم. وهذا واضح تمامًا بالمنحنى البرتقالي بالشكل 20.2.

التحكم التكاملي (I)

يجمع الخطأ عبر الزمن، فما دام هناك خطأ — ولو صغيرًا — يستمر التكامل بالتراكم ويستمر الأمر بالزيادة حتى يزول الخطأ. مثال: نقطة الضبط 500 والقيمة استقرت عند 495 ← خطأ ثابت 5 درجات، لا يزيله P وحده، بينما I يواصل التصحيح حتى يقارب الصفر.

الثمن: التكامل **يضيف تأخيرًا** بطبيعته، فالإفراط فيه ينتج تجاوزًا، تذبذبًا، وبطء تعافٍ — بالإضافة لمشكلة أخطر نفردها بالقسم التالي.

التحكم التفاضلي (D)

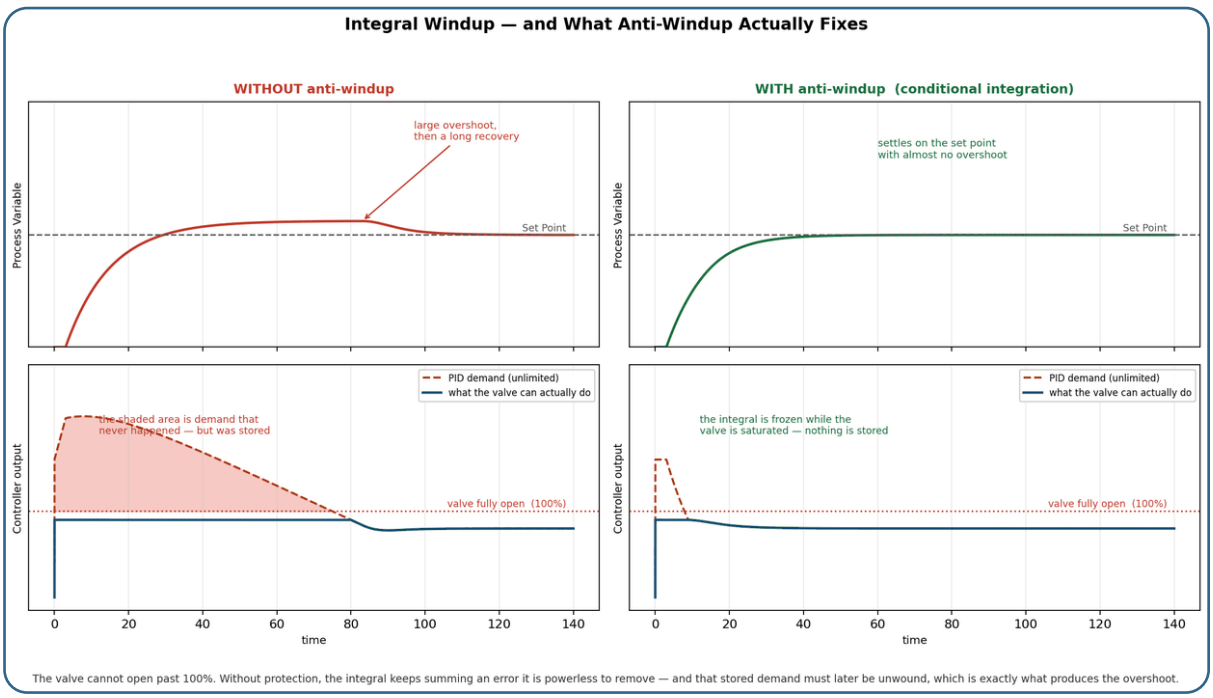
لا ينظر لحجم الخطأ بل **لسرعة تغيّره**، فيعطي المتحكم قدرة على «التوقّع»: إذا كان الخطأ يتقلّص بسرعة كبيرة، يبدأ D بكبح الأمر مبكرًا قبل حدوث التجاوز. فوائده: تقليل التجاوز، تحسين التخميد (Damping)، وتحسين الاستجابة الانتقالية.

لكن له مشكلة حقيقية جدًا بالتطبيق الصناعي: **الحساسية الشديدة للضجيج (Noise)**. المشتقة تضخّم أي تغيّر سريع، وإشارات الحرارة والضغط والاهتزاز بالتوربين الغازي تحمل ضجيجًا حقيقيًا (راجع 19.4). النتيجة: خرج متحكم يقفز مع كل ومضة ضجيج، وصمام يهتز بلا داعٍ.

الحل العملي المعتمد صناعيًا: ترشيح المشتقة **(Derivative Filtering)** — لا تُستخدم مشتقة مثالية للإشارة أبدًا، بل مشتقة مرشّحة. وبكثير من حلقات التوربين الغازي — خصوصًا حلقات الحرارة — يُترك حدّ D **صفرًا تمامًا** ويُستخدم PI فقط، وهذا قرار هندسي صحيح لا تقصير.

20.4 مشكلة التشبّع التكاملي (Integral Windup)

هذه من أهم النقاط العملية بالتحكم الصناعي، وتستحق شرحًا مستقلًا لأنها تفسّر سلوكًا محيّرًا يواجهه المهندسون فعليًا.



الشكل 20.3 — يسار: بدون معالجة التشبّع — طلب مستحيل يتراكم، ثم تجاوز كبير وتعافٍ بطيء. يمين: مع المعالجة — التكامل يُجمَّد أثناء التشبّع فلا يتراكم شيء.

السيناريو: افترض أن المتحكم PID حسب أن المطلوب فتح صمام الوقود بنسبة **120%**، بينما الصمام لا يستطيع تجاوز **100%**. الصمام مفتوح بالكامل ويعمل بأقصى طاقته — لكن الخطأ ما زال موجودًا لأن العملية بطيئة.

ماذا يفعل الحدّ التكاملي؟ **يواصل التجميع.** يجمع خطأ لا يملك أي قدرة على إزالته، لأن العنصر النهائي وصل حدّه أصلًا. فيتضخم مخزون التكامل بشكل هائل.

النتيجة عندما تبدأ العملية بالاستجابة: القيمة تصل لنقطة الضبط، لكن مخزون التكامل الضخم ما زال يأمر بفتح كامل — فيبقى الصمام مفتوحًا رغم زوال الحاجة، وتستمر القيمة بالارتفاع. ولا يبدأ الصمام بالإغلاق إلا بعد أن "يتفكّك" المخزون المتراكم. الأثر النهائي: **تجاوز كبير ← تذبذب ← تعافٍ بطيء جدًا** — وهو بالضبط ما يظهر يسار الشكل 20.3.

العلاج: تقنيات مكافحة التشبّع (Anti-Windup)

- تقييد التكامل **(Integral Clamping)**: وضع حد أعلى وأدنى لمخزون التكامل نفسه.
- التكامل المشروط **(Conditional Integration)**: تجميد التكامل تمامًا طالما كان الخرج مشبعًا — وهو المطبَّق بالشكل أعلاه.
- الحساب العكسي **(Back Calculation)**: تعديل مخزون التكامل بمقدار الفرق بين الخرج المحسوب والخرج المنفَّذ فعليًا، فيبقى التكامل "واعيًا" بحدود العنصر النهائي.

متى يحدث هذا بالتوربين الغازي عمليًا؟ كلما اصطدمت حلقة تحكم بحدّ: أثناء التسارع عند حدّ الوقود الأقصى، عند تدخّل حلقة الحرارة وتحديدها للوقود (9.1)، أو عند وصول صمام لنهاية مشواره. أي أن التشبّع ليس حالة نادرة بل **حالة تشغيل طبيعية متكررة** — ولهذا معالجته ليست ترفًا.

20.5 ضبط المتحكم (PID Tuning)

اختيار Kp وKi وKd بحيث تكون الحلقة **سريعة، مستقرة، دقيقة، قليلة التجاوز، وقليلة التذبذب** — هذه مهمة مهندس التحكم الأساسية.

لكن قبل أي طريقة، تحذير جوهري يجب أن يُقال صراحة:

> **التوربين الغازي ليس مختبرًا.** لا يجوز رفع الكسب حتى يبدأ النظام بالتذبذب «لنرى ماذا يحدث». أي تذبذب مقصود هنا يحدث على معدة تعمل بحرارة عالية جدًا، وأحمال ميكانيكية هائلة، ومنطق حماية جاهز للقطع. الضبط على معدة حيّة يتم بخطوات صغيرة، بحضور شخص يراقب القيم الحرجة، وبإمكانية الرجوع الفوري للإعدادات السابقة الموثّقة.

قيود يجب أخذها بالحسبان قبل أي ضبط:

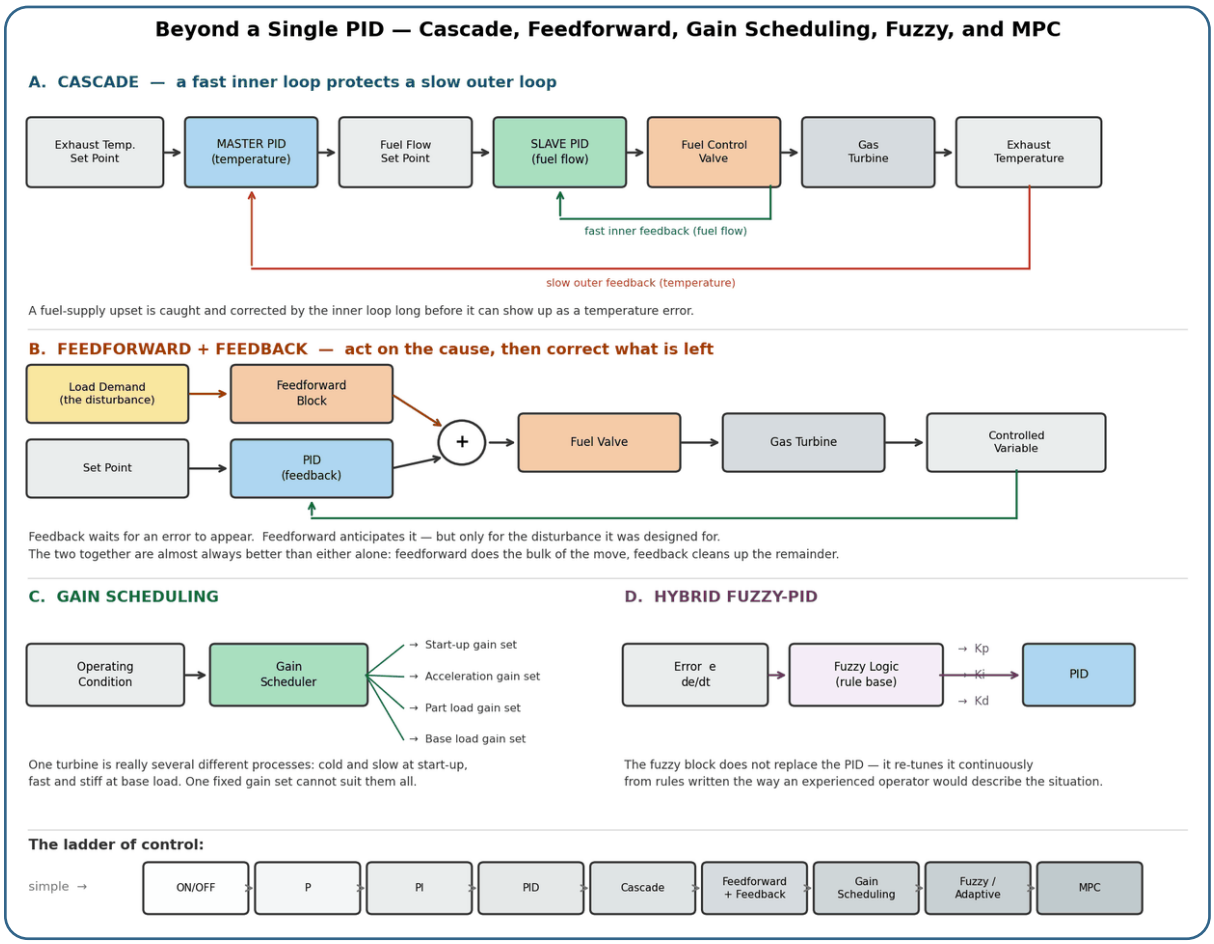
ديناميكا نظام الوقود (Fuel System Dynamics)، سرعة استجابة الصمام (Valve Response)، ديناميكا الاحتراق (Combustion Dynamics)، حدود الحرارة (7.3)، حدود الضاغط ومنطقة الانحباس (5.2)، حدود التسارع (9.3)، الإجهاد الميكانيكي، منطق الحماية، وضع التشغيل الحالي، وحدود الوقود الدنيا والعليا.

طرق الضبط

- الضبط اليدوي **(Manual Tuning)**: البدء بـ P فقط ورفعه تدريجيًا حتى استجابة مقبولة بدون تذبذب، ثم إضافة I لإزالة الخطأ المستقر، ثم D بحذر لتخميد التجاوز — إن كانت الإشارة نظيفة بما يكفي. الأبسط والأكثر استخدامًا فعليًا بالمواقع.
- زيغلر–نيكولز **(Ziegler–Nichols)**: طريقة كلاسيكية تعتمد إيجاد الكسب الحرج **(Ultimate Gain)** والدور الحرج **(Ultimate Period)** عند بداية التذبذب المستدام (Sustained Oscillation)، ثم تطبيق قواعد جاهزة. **ملاحظة مهمة جدًا**: النسخة التقليدية منها تعطي ضبطًا **عدوانيًا** (Aggressive) نسبيًا، مقبولًا بتطبيقات كثيرة لكنه غير مناسب لتطبيقات حرجة كالتوربين الغازي — وهي أصلًا تتطلب دفع النظام للتذبذب، وهذا ما حذّرنا منه أعلاه.
- **طرق أخرى**: كوهين–كون (Cohen–Coon)، الضبط المبني على النموذج الداخلي (IMC)، ضبط لامدا (Lambda Tuning) المعروف بأنه محافظ وهادئ ومناسب للحلقات الحساسة، الضبط الذاتي بالمرحّل (Relay Auto-Tuning)، الضبط المبني على النموذج (Model-Based)، والضبط التكيّفي (Adaptive Tuning).

قاعدة ميدانية تختصر الكثير: الحلقة المضبوطة جيدًا ليست الأسرع، بل **الأهدأ التي تحقق المطلوب**. حلقة تصل بثانيتين مع تجاوز وتذبذب أسوأ عمليًا من حلقة تصل بأربع ثوانٍ بهدوء تام — لأن الأولى تستهلك عمر الصمام، وتربك الحلقات المجاورة، وتقترب من حدود الحماية بلا داعٍ.

20.6 ما بعد PID: التحكم المتقدم



الشكل 20.4 — البنى المتقدمة: التحكم المتتالي (Cascade)، التغذية الأمامية مع الراجعة، جدولة الكسب، والهجين الضبابي-PID — وسلّم تطور أنظمة التحكم أسفل الشكل.

التحكم المتتالي (Cascade Control)

حلقتان متداخلتان: حلقة رئيسية (Master) بطيئة تتحكم بالمتغيّر الذي نهتم به فعلًا، وحلقة داخلية (Slave) سريعة تتحكم بمتغيّر وسيط. مثال بالتوربين الغازي:

نقطة ضبط الحرارة ← PID رئيسي ← نقطة ضبط تدفق الوقود ← PID تابع ← صمام

الوقود ← التوربين ← حرارة العادم

الفائدة الحقيقية: أي اضطراب بمنظومة الوقود نفسها (تغيّر ضغط الإمداد، تغيّر خصائص الصمام) تلتقطه الحلقة الداخلية السريعة **وتصححه قبل أن يظهر أثره على الحرارة أصلًا**. أي أن الحلقة الداخلية تعمل كدرع يحمي الحلقة الخارجية البطيئة.

شرط أساسي للنجاح: الحلقة الداخلية يجب أن تكون **أسرع بوضوح** من الخارجية. لو تقاربت سرعتاهما، تتنازعان وتصير النتيجة أسوأ من حلقة واحدة.

التحكم بالتغذية الأمامية (Feedforward Control)

التغذية الراجعة تنتظر ظهور الخطأ ثم تصحح — وهذا يعني أن الخطأ **يجب أن يحدث أولًا**. أما التغذية الأمامية فتقيس **الاضطراب نفسه** وتتصرف استباقيًا قبل أن يتحول لخطأ.

مثال: عند زيادة طلب الحمل، يستطيع النظام أن يزيد الوقود **فورًا** بناءً على الطلب المعلوم، بدل انتظار انخفاض السرعة أو تغيّر الحرارة ثم التصحيح.

- التغذية الراجعة **(Feedback)**: تصحح الخطأ **بعد** ظهوره — لكنها تعالج أي اضطراب مهما كان مصدره.
- التغذية الأمامية **(Feedforward)**: تتصرف **قبل** ظهوره — لكنها تعالج فقط الاضطراب الذي صُمّمت له تحديدًا، ولا ترى شيئًا آخر.

ولهذا أفضل التطبيقات **تجمع الاثنين**: الأمامية تنفّذ الحركة الكبرى فورًا، والراجعة تنظّف ما تبقّى وتغطّي كل ما لم تتوقعه الأمامية.

جدولة الكسب (Gain Scheduling)

نقطة مهمة جدًا بالتوربينات الغازية تحديدًا: التوربين **ليس عملية واحدة**، بل عدة عمليات مختلفة السلوك حسب الحالة — بدء التشغيل، التسارع، التزامن، الحمل المنخفض، الحمل الجزئي، الحمل الأساسي، ثم اختلاف السلوك بين جو حار وجو بارد.

مجموعة واحدة من معاملات PID لا يمكن أن تكون مثالية لكل هذه الحالات. الحل: **مجموعات معاملات متعددة تُختار تلقائيًا حسب حالة التشغيل**:

حالة التشغيل ← جدولة الكسب ← (سرعة منخفضة: مجموعة 1 / متوسطة: مجموعة 2 / عالية: مجموعة 3 / حمل أساسي: مجموعة 4)

وهذه تحديدًا إحدى النقاط التي تجعل نظام تحكم متخصص بالتوربينات (الفصل 15) أسهل بكثير من بناء التطبيق من الصفر على منصة عامة — لأن هذه الجدولة تكون مُهيَّأة مسبقًا.

التحكم الضبابي (Fuzzy Logic Control)

بـ PID نتعامل مع الخطأ رقميًا بحتًا. أما المنطق الضبابي فيصف الحالة بلغة أقرب لتفكير المشغّل الخبير: **منخفض جدًا، منخفض، طبيعي، مرتفع، مرتفع جدًا.**

فتصير القاعدة على شكل: إذا كان خطأ الحرارة مرتفعًا، والحرارة ترتفع بسرعة، فخفّض طلب الوقود بشكل كبير.

وتتكون المنظومة الضبابية من أربع مراحل بين الدخل والخرج: الدخل ← التضبيب **(Fuzzification)** ← قاعدة القواعد الضبابية **(Fuzzy Rule Base)** ← محرك الاستدلال **(Inference Engine)** ← إزالة التضبيب **(Defuzzification)** ← خرج المتحكم. ومفاهيمها الأساسية: دوال الانتماء (Membership Functions)، المتغيّرات اللغوية (Linguistic Variables)، والقواعد الضبابية.

الهجين الضبابي-PID (Hybrid Fuzzy-PID)

وهنا الاستخدام الأذكى عمليًا: لا نُلغي **PID**، بل نستخدم المنطق الضبابي **لضبط معاملاته ديناميكيًا:**

الخطأ ومعدل تغيّره ← منطق ضبابي ← (Kp، Ki، Kd) ← PID ← العملية

فيصير النظام قادرًا على تغيير معاملاته حسب ظروف التشغيل — وهي جدولة كسب لكن بقرار مستمر وسلس بدل مجموعات محددة مسبقًا.

التحكم التنبؤي المبني على النموذج (Model Predictive Control — MPC)

المستوى الأكثر تقدمًا. المتحكم هنا لا ينظر للخطأ الحالي فقط، بل يستخدم **نموذجًا للعملية** للتنبؤ بسلوكها المستقبلي ثم يختار الحركة الأمثل:

القياسات الحالية ← نموذج العملية ← التنبؤ بالسلوك المستقبلي ← تحسين (Optimization) ← إجراء التحكم ← العملية

ويظهر تفوّقه تحديدًا عندما يكون لدينا: مداخل ومخارج متعددة **(MIMO)**، قيود صريحة **(Constraints)**، تداخل بين الحلقات **(Interaction)**، زمن ميت **(Dead Time)**، وسلوك غير خطي.

وبالتوربين الغازي، تطبيقه ليس مسألة رياضية مجردة بل ملموس تمامًا: تنسيق تدفق الوقود + زاوية **IGV** + حرارة العادم + نقطة تشغيل الضاغط + الحمل معًا كمنظومة واحدة، بدل حلقات منفصلة يفوز أشدّها تقييدًا (منطق MVS بـ 9.1).

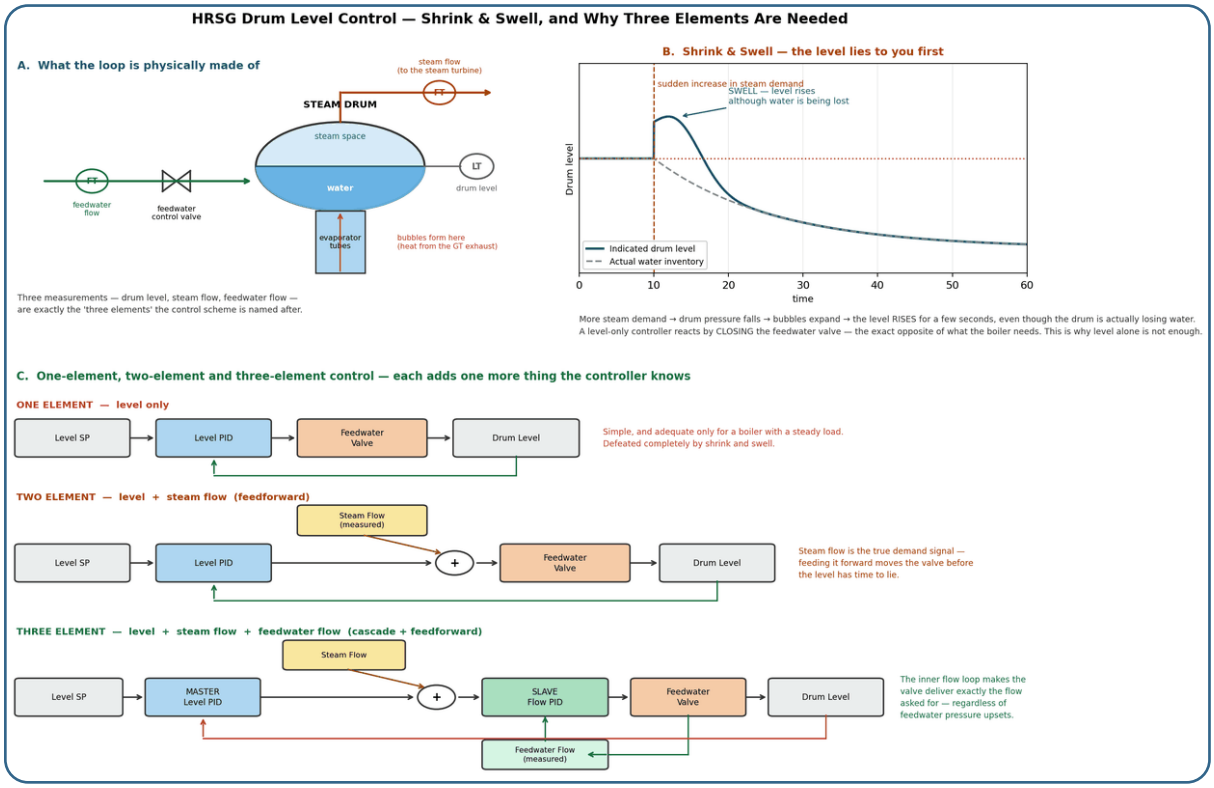
سلّم التحكم

تطور أنظمة التحكم يمكن تلخيصه بسلّم: تشغيل/إيقاف ← **PID** ← **PI** ← **P** ← متتالي ← أمامي + راجع ← جدولة كسب ← ضبابي / تكيّفي ← تنبؤي بالنموذج ← تحكم متقدم وتحسين.

والفكرة الأساسية التي يجب أن تصل: التحكم المتقدم لا يعوّض قياسًا سيئًا، ولا يعوّض حلقة تحكم مصمَّمة خطأ، ولا يعوّض **PID** سيئ الضبط — بل يُبنى فوقها. أي مشروع تحكم متقدم يبدأ من قياس رديء ينتهي بنتيجة رديئة، مهما بلغت أناقة الخوارزمية.

20.7 تطبيق متكامل: التحكم بمستوى الطبلة في مرجل استرداد الحرارة (HRSG Drum Level Control)

هذا القسم يستحق مكانه هنا لسببين: أولًا لأنه **أوضح مثال صناعي على اجتماع التحكم المتتالي والتغذية الأمامية في حلقة واحدة**، وثانيًا لأنه يخص مباشرة محطات الدورة المركّبة (3.1) التي يرتبط بها التوربين الغازي عبر مرجل استرداد الحرارة (HRSG).



الشكل 20.5 — أعلى يسار: الترتيب الفيزيائي (طبلة، صمام ماء التغذية، قياس تدفق البخار، قياس المستوى). أعلى يمين: ظاهرة الانتفاخ. أسفل: التحكم أحادي العنصر مقابل ثنائي العناصر مقابل ثلاثي العناصر.

ما هي الطبلة (Drum)؟

وعاء أسطواني يمثّل **السطح البيني بين الماء والبخار** — يدخل إليه ماء التغذية (Feedwater) ويخرج منه البخار (Steam). وهي القلب الفعلي لوحدة توليد البخار.

لماذا يهمنا مستوى الماء فيها إلى هذا الحد؟

- **التشغيل تحت المستوى المنخفض** يعني انكشاف الأنابيب والمجمّعات وتعرّضها لحرارة غازات العادم بدون تبريد مائي كافٍ — أي **ارتفاع حرارة يؤدي لتلف الأنابيب**.
- **التشغيل فوق المستوى المرتفع** يعني جرف الماء مع البخار **(Carryover)**، فتنتقل قطرات ماء وأملاح للمكوّنات التالية — تلوّث أنابيب التسخين الفائق (Superheater)، وضرر مباشر بريش التوربين البخاري.

أي أن المستوى ليس متغيّرًا «تشغيليًا مريحًا»، بل **متغيّر سلامة بحدّين حرجين على الجانبين**.

المشكلة الجوهرية: ظاهرة الانكماش والانتفاخ (Shrink and Swell)

هذه الظاهرة هي سبب وجود كل هذا التعقيد بالتحكم، وهي مثال ممتاز على ما يسمّى بالاستجابة العكسية (Inverse Response): **القياس يتحرك أولًا بالاتجاه المعاكس للحقيقة.**

الانتفاخ **(Swell)** — عند **زيادة مفاجئة بطلب البخار**: يقل الضغط داخل الطبلة، فتتمدد فقاعات البخار الموجودة داخل الماء ويزداد حجمها، فيرتفع مستوى السطح الظاهر — **رغم أن كمية الماء الفعلية داخل المرجل تنقص** في تلك اللحظة بالذات.

الانكماش **(Shrink)** — عند **انخفاض مفاجئ بطلب البخار** أو عند ضخّ ماء تغذية بارد: يحدث العكس تمامًا، فينخفض المستوى الظاهر رغم أن كمية الماء تزداد.

النتيجة الكارثية على تحكم يعتمد المستوى وحده: عند زيادة طلب البخار (أي عندما يحتاج المرجل ماءً **أكثر**)، يرى المتحكم مستوى **مرتفعًا**، فيأمر **بإغلاق** صمام ماء التغذية — أي عكس المطلوب تمامًا، وفي أسوأ لحظة ممكنة. وهذا وحده يفسّر لماذا لا يُقبل التحكم أحادي العنصر إلا بمراجل صغيرة ثابتة الحمل.

نقطة إضافية مهمة: شدّة هذه الظاهرة **تعتمد على ترتيب أنابيب توليد البخار وتصميم المرجل نفسه** — فهي ليست ثابتة بين وحدة وأخرى، ولا يمكن افتراض سلوك موحّد.

الحل المتدرّج: من عنصر إلى ثلاثة

التحكم أحادي العنصر **(One-Element Control)** — يستخدم **المستوى فقط**. بسيط، ويكفي فقط لمرجل صغير ذي حمل مستقر جدًا. ويُهزَم تمامًا أمام الانكماش والانتفاخ، كما شرحنا.

التحكم ثنائي العناصر **(Two-Element Control)** — يضيف **قياس تدفق البخار** كتغذية أمامية. المنطق سليم تمامًا: تدفق البخار الخارج هو **إشارة الطلب الحقيقية** — كمية الماء المطلوب إدخالها يجب أن تساوي كمية البخار الخارج (توازن كتلي). فبدل انتظار تحرّك المستوى الكاذب، يحرّك المتحكم صمام ماء التغذية فورًا بمجرد تغيّر تدفق البخار، والمستوى يبقى للتصحيح البطيء طويل المدى.

التحكم ثلاثي العناصر **(Three-Element Control)** — يضيف **قياس تدفق ماء التغذية** كحلقة داخلية (Cascade). وهنا تكتمل الصورة:

- **العنصر الأول — المستوى:** الحلقة الرئيسية (Master)، تحدد الاتجاه العام وتصحح أي انحراف تراكمي.
- **العنصر الثاني — تدفق البخار:** تغذية أمامية، تحرّك الصمام استباقيًا وفق الطلب الفعلي.

- **العنصر الثالث — تدفق ماء التغذية:** حلقة داخلية سريعة (Slave)، تضمن أن الصمام **يوصل فعلًا** التدفق المطلوب منه.

ولماذا الحلقة الداخلية ضرورية؟ لأن فتحة الصمام **ليست** تدفقًا. تغيّر ضغط ماء التغذية (تشغيل مضخة أخرى، تغيّر بالشبكة) يغيّر التدفق الفعلي عند نفس الفتحة تمامًا. الحلقة الداخلية تلتقط هذا الفارق وتصححه فورًا — قبل أن يظهر أثره على المستوى.

وبهذا يكون التحكم ثلاثي العناصر تطبيقًا حرفيًا لما شرحناه في 20.6: **تغذية أمامية (تدفق البخار) + تحكم متتالي (حلقة تدفق داخلية) + تغذية راجعة (المستوى)** — الثلاثة معًا بحلقة واحدة.

ولهذا يُوصى به تحديدًا للمراجل ذات مدى تغيّر حمل واسع — وهو بالضبط حال مرجل استرداد الحرارة خلف توربين غازي: حمل التوربين يتغيّر، فتتغيّر كمية وحرارة غازات العادم، فيتغيّر معدل توليد البخار باستمرار.

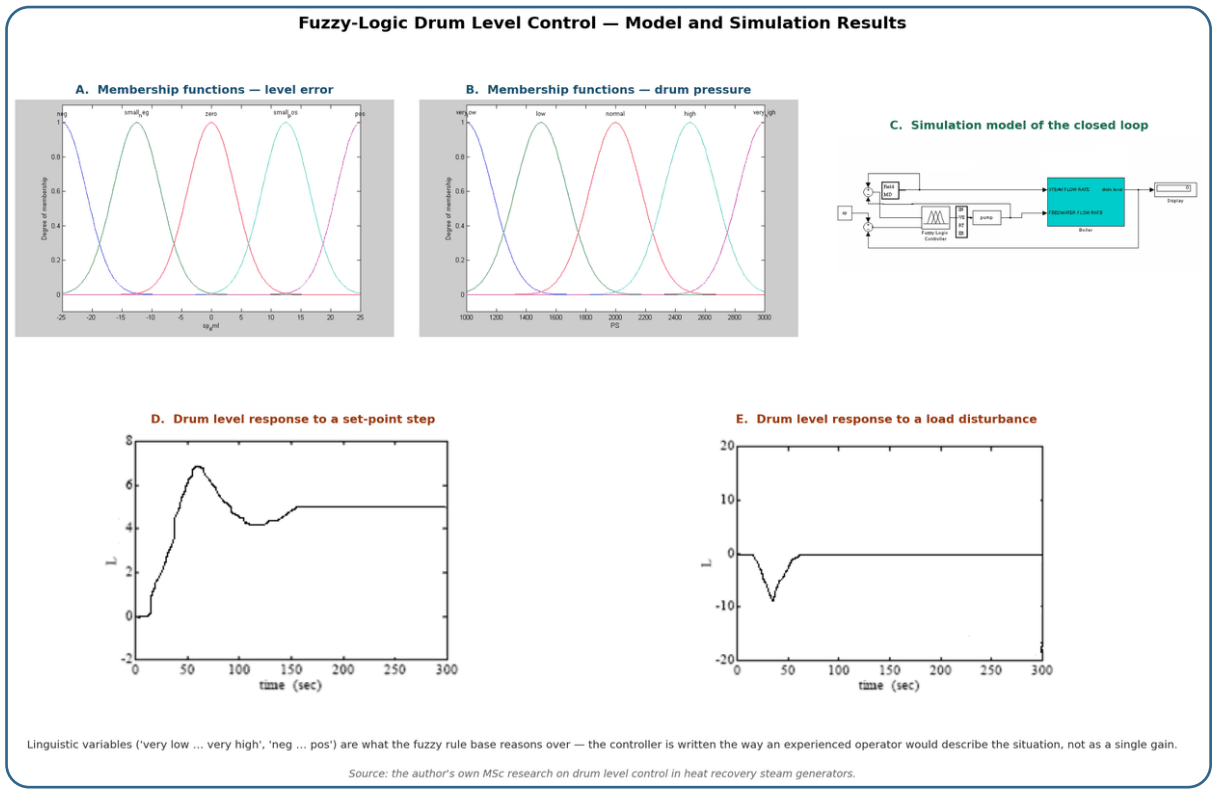
نقاط عملية من واقع التشغيل

- **قياس المستوى نفسه يحتاج تصحيحًا للضغط والحرارة:** الطريقة الشائعة تعتمد الضغط التفاضلي، وكثافة الماء والبخار تتغيّران بشدة مع ضغط الطبلة. لذلك القراءة غير المصحَّحة تكون خاطئة بشكل منهجي عند ضغوط مختلفة — وهذه مصدر متكرر لسوء فهم أثناء بدء التشغيل حيث يتغيّر الضغط من الجو حتى ضغط التشغيل.
- **الانتقال بين أوضاع التحكم:** كثير من المحطات تعمل بتحكم أحادي العنصر عند الأحمال المنخفضة جدًا (حيث قياس التدفق غير موثوق عند تدفقات صغيرة)، ثم تنتقل تلقائيًا للثلاثي عند تجاوز حدّ معيّن. الانتقال يجب أن يكون سلسًا **(Bumpless)** — بنفس مبدأ التحويل بين الوقودين (6.2) — وإلا صار الانتقال نفسه اضطرابًا.
- **حماية المستوى مستقلة عن التحكم به:** قواطع المستوى المنخفض جدًا والمرتفع جدًا يجب أن تكون على قياسات مستقلة عن قياس التحكم، بنفس مبدأ استقلال الحماية عن التحكم المشروح بـ 7.8 — لأن عطل جهاز القياس الذي يتحكم هو نفسه الذي يفترض أن يحمي يعني ضياع الطبقتين معًا.
- **ثلاثة قياسات تعني ثلاث سلاسل إشارة** (الفصل 19): وأي منها قد يعطل. ومن أكثر ما يُربك المشغّلين حالة تعطّل **قياس تدفق البخار** وحده — فيفقد النظام تغذيته الأمامية ويعود عمليًا لسلوك أقرب للثنائي أو الأحادي، فيبدو «أبطأ وأسوأ» فجأة بدون سبب ظاهر. لذلك يستحق كل من القياسات الثلاثة إشارة صحة (Health) صريحة على شاشة التشغيل، لا مجرد قيمة.

ملاحظة المؤلف: هذا القسم استندت فيه إلى عملي البحثي في رسالة الماجستير الخاصة بي حول التحكم بمستوى الطبلة في مراجل استرداد الحرارة، وقد حرصت على تقديمه هنا بصياغة عملية موجّهة لمهندس الموقع، لا بصياغة أكاديمية — لأن الهدف من هذا الكتاب أن يكون مرجعًا يُستخدم في الميدان.

تطبيق التحكم الضبابي على مستوى الطبلة: نموذج ونتائج محاكاة

بعد أن استعرضنا التحكم ثلاثي العناصر بصورته الكلاسيكية، يستحق أن نغلق هذا الفصل بمثال يجمع كل خيوطه معًا: تطبيق المنطق الضبابي **(Fuzzy Logic)** — الذي شرحناه في 20.6 — على نفس المشكلة تحديدًا.



الشكل 20.6 — من نتائج بحث المؤلف: (أ) و(ب) دوال الانتماء للمتغيّرات اللغوية، (ج) نموذج المحاكاة للحلقة المغلقة، (د) استجابة المستوى لتغيّر نقطة الضبط، (هـ) استجابة المستوى لاضطراب بالحمل.

لماذا يُطرح المنطق الضبابي على هذه المشكلة بالذات؟

لأن مستوى الطبلة يجمع كل الخصائص التي يتعثّر عندها متحكم PID تقليدي بمعاملات ثابتة: **استجابة عكسية** (الانكماش والانتفاخ)، و**سلوك غير خطي** يتغيّر بشدة مع الحمل والضغط، و**تفاعل بين متغيّرات متعددة** (مستوى، ضغط، تدفق بخار، تدفق ماء تغذية). هذه بالضبط الحالات التي تجعل مجموعة معاملات واحدة غير كافية.

كيف يُصاغ المتحكم؟

بدل رقم واحد للخطأ، تُقسَّم كل إشارة دخل إلى متغيّرات لغوية **(Linguistic Variables)** لها دوال انتماء **(Membership Functions)** متداخلة — كما يظهر بالجزأين (أ) و(ب) من الشكل: خطأ المستوى يوصَف بـ«سالب، سالب صغير، صفر، موجب صغير، موجب»، وضغط الطبلة يوصَف بـ«منخفض جدًا، منخفض، طبيعي، مرتفع، مرتفع جدًا». ثم تُكتب قاعدة القواعد بصياغة قريبة من وصف المشغّل الخبير للموقف، لا بمعادلة واحدة.

النقطة الجوهرية بهذا التداخل: **لا توجد حدود حادة**. قيمة معيّنة قد تنتمي جزئيًا لـ"منخفض" وجزئيًا لـ"طبيعي" في آنٍ واحد، فيكون خرج المتحكم انتقالًا سلسًا لا قفزة عند حدّ — وهذه بالضبط الميزة التي تجعله مناسبًا للأنظمة غير الخطية.

ماذا تُظهر نتائج المحاكاة؟

الجزء (د) يُظهر **استجابة تغيّر نقطة الضبط**: المستوى يصعد للقيمة الجديدة مع تجاوز محدود ثم يستقر. والجزء (هـ) يُظهر ما هو أهم عمليًا: **استجابة اضطراب الحمل** — انخفاض مؤقت بالمستوى عند تغيّر الطلب، ثم عودة للقيمة المطلوبة. وهذا التمييز بين الاختبارين مهم ويُغفَل كثيرًا: **حلقة قد تبدو ممتازة عند اختبار تغيّر نقطة الضبط، وتكون ضعيفة تمامًا أمام الاضطرابات** — والاضطرابات هي ما يواجهه التوربين فعليًا طوال اليوم، بينما تغيّرات نقطة الضبط نادرة نسبيًا.

وماذا نأخذ من هذا عمليًا؟

- **الاختبار الحقيقي لأي حلقة هو اختبار الاضطراب، لا اختبار نقطة الضبط.** ومعيار الحكم فيه: كم بلغ الانحراف الأقصى، وكم استغرق للعودة.
- **المتحكم المتقدم يُبنى فوق قياس سليم، لا بدلًا عنه** — النقطة نفسها التي ختمنا بها 20.6: نفس هذه النتائج تصبح بلا قيمة لو كان قياس المستوى غير مصحَّح للضغط، أو كان قياس تدفق البخار معطلًا.

- **قابلية الفهم لها قيمة تشغيلية.** ميزة الصياغة الضبابية أن قواعدها **مقروءة** لمن يشغّل المعدة: «إذا كان الخطأ كبيرًا موجبًا والضغط منخفضًا، فافتح صمام التغذية بشكل كبير» جملة يفهمها المشغّل ويستطيع مناقشتها ومراجعتها — بخلاف ثلاثة معاملات رقمية لا تقول شيئًا عن سبب سلوك المعدة.

خلاصة الفصل

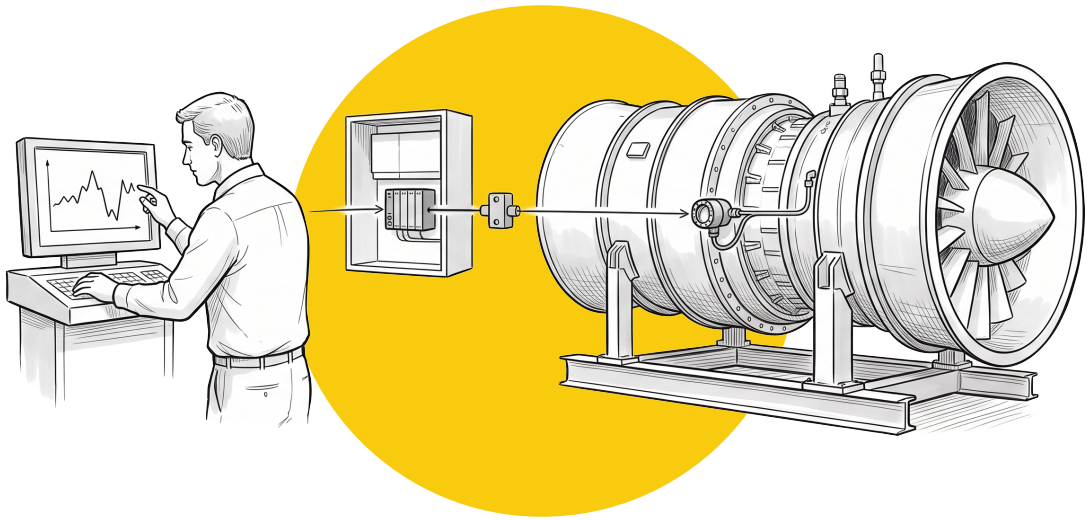
بدأنا هذا الفصل من أبسط فكرة في التحكم — حلقة مغلقة تقارن قيمة بقيمة — وانتهينا عند منظومة تحكم بمستوى طبلة مرجل استرداد الحرارة بثلاثة عناصر ومنطق ضبابي. وبين الطرفين ثلاث رسائل تستحق أن تبقى بعد إغلاق الكتاب:

- **PID** ليس صندوقًا أسود. لكل حدّ فيه سلوك يمكن رؤيته على الترند وتفسيره: التناسبي يستجيب للحاضر، والتكاملي يصفّي الخطأ الدائم، والتفاضلي يخمّد التغيّر السريع. ومن يرى هذه الآثار على المنحنى لا يحتاج إلى تخمين أي معامل يضبط.
- **الضبط ليس بحثًا عن أرقام مثالية، بل عن سلوك مقبول** في نطاق التشغيل الفعلي — والمعيار العملي هو استجابة الحلقة للاضطراب، لا لتغيير نقطة الضبط.
- **وأي تحكم متقدم — متتالي، تغذية أمامية، جدولة كسب، ضبابي، أو تنبؤي بالنموذج — يُبنى فوق قياس سليم لا بدلًا منه.** فحلقة متقدمة تعمل على قياس منحرف تعطي خطأً أسرع فقط.

والفصل القادم ينقل هذه المفاهيم من النظرية إلى الطاولة: خمسة عشر تدريبًا تشخيصيًا في التحكم والقياس، من العَرَض إلى السبب الجذري.

الفصل الحادي والعشرون:

تدريبات تشخيصية في التحكم والقياس — من العرض إلى السبب الجذري



هذا الفصل مختلف عن كل ما سبقه بطريقة مقصودة. الفصل العاشر أعطاك **المؤشرات**، والفصل الثالث عشر أعطاك **حالات كاملة موثّقة من البداية للنهاية**، والفصلان التاسع عشر والعشرون أعطياك **الأدوات** — سلسلة الإشارة وحلقة التحكم. هذا الفصل يجمعها كلها في شكل تدريبات تشخيصية قصيرة **(Troubleshooting Drills)**: خمس عشرة حالة من النوع الذي يواجهه مهندس التحكم والقياس فعليًا، كل واحدة تبدأ من عرضٍ على الشاشة وتنتهي بمنهج وصول للسبب الجذري.

الفكرة التي يجب أن تحكم قراءة هذا الفصل كله: **الفرق بين مهندس يغيّر القطع ومهندس يشخّص هو أن الثاني يطرح السؤال الصحيح قبل أن يمدّ يده** — وهذا فرق كبير جدًا.

21.1 المنهجية الموحدة: عشر خطوات لأي مشكلة

قبل الحالات، هذه هي المنهجية الثابتة التي تنطبق عليها جميعًا — وعلى أي مشكلة لم تُذكر هنا:

1. حدّد العرض بدقة **(Define the Symptom)**: ما الذي حدث بالضبط؟ متى؟ بأي ظرف تشغيلي؟ «الوحدة فيها مشكلة» ليست عرضًا؛ «قراءة T/C-5 قفزت 240 درجة فوق جاراتها خلال ثانيتين أثناء حمل ثابت» عرضٌ يمكن العمل عليه.
2. افحص شاشة التشغيل **(Check HMI)**: الإنذارات النشطة، إنذارات التشخيص الذاتي (Diagnostic Alarms)، والاتجاهات (Trends) — لا القيم اللحظية وحدها.
3. افحص سجل تسلسل الأحداث **(Check SOE)**: ابحث عن **أول** حدث وقع (First-Out)، لا آخر إنذار ظهر — فالإنذار الأخير غالبًا نتيجة، والأول هو الدليل (7.7).
4. قارن الإشارات المتكررة **(Compare Redundant Signals)**: هل تتفق الحسّاسات المتجاورة والقنوات المتوازية؟ الانحراف الفردي يتهم القناة؛ والانحراف الجماعي يتهم العملية أو عنصرًا مشتركًا (حالة 8 في الفصل 13).
5. تتبّع الإشارة **(Follow the Signal)**: الحسّاس ← صندوق الوصل ← خزانة التوزيع ← بطاقة الإدخال ← المتحكم ← الشاشة — وبالتنصيف لا بالمشي (19.5).
6. افحص منطق التحكم **(Check the Control Logic)**: هل اتخذ المتحكم القرار الصحيح **بناءً على المدخلات التي رآها**؟ (تذكّر حالة 7 في الفصل 13: منطق يرفض قد يكون منطقًا يعمل).
7. افحص العنصر النهائي **(Check the Final Element)**: هل نُفّذ الأمر فعليًا بالحقل؟ قارن الأمر بالتغذية الراجعة للموضع.

8. افحص العملية **(Check the Process):** هل استجابت الفيزياء بما يتسق مع بقية القياسات؟

9. حدد السبب الجذري **(Find Root Cause):** عتاد؟ برمجيات وإعدادات؟ قياس؟ عملية؟ ميكانيكا؟ — وسمِّه بدقة، لا بعبارة عامة.

10. تحقّق **(Verify):** بعد الإصلاح، أعد الاختبار وأثبت أن العرض زال **ولنفس الظرف الذي ظهر فيه** — ثم وثّق (13.14: التوثيق الغائب يجعل الجميع يعيدون نفس التحقيق).

21.2 التدريبات الخمسة عشر

التدريب 1 — ارتفاع مفاجئ بحرارة العادم (High Exhaust Temperature)

العرض: الوحدة تعمل طبيعيًا، ثم يظهر إنذار حرارة عادم مرتفعة وترتفع القراءة بشكل غير طبيعي.

السؤال الحاكم قبل أي شيء: هل الحرارة مرتفعة **فعلًا**، أم أن **القياس** هو الخاطئ؟ الاحتمالات تتوزع على المسارين معًا: حرارة حقيقية مرتفعة، ثرموكابل تالف، مشكلة توصيل، قناة بطاقة إدخال، خطأ تدريج، مشكلة صمام وقود، مشكلة احتراق، أو خلل بمنطق التحكم.

مسار التشخيص: قارن — لا تستنتج: الثرموكابلات الفردية مع بعضها، المتوسط، الفارق (Spread)، اتجاه القراءة على الشاشة، وأي قياس متكرر إن وُجد. **ارتفاع الجميع معًا** يرجّح مشكلة حقيقية (أو وصلة باردة مشتركة — راجع حالة 8 في الفصل 13 للتمييز بينهما)، بينما **ارتفاع واحد فقط** والبقية طبيعية يوجّه الشك فورًا لسلسلة القياس: الحسّاس، سلك التمديد، الأطراف، القناة — فتتبعها: **T/C ← JB ← Marshalling ← Terminal ← AI Card** (19.2 ← **Controller ← HMI**).

الدرس: أول قرار بأي إنذار قياس هو الفصل بين العملية والقياس — وكل ما بعده يُبنى عليه (10.2).

التدريب 2 — ثرموكابل واحد يقرأ قيمة شاذة

العرض: ست قراءات عادم: خمس منها بين 648 و652 درجة، والسادسة (T/C-5) تقرأ 890.

مسار التشخيص: لا نعلن «حرارة زائدة» — نسأل: هل T/C-5 حقيقي؟ الجيران المتقاربون جدًا حوله دليل قوي على أن الشذوذ بالقناة لا باللهب، لأن الغازات أمام الثرموكابلات المتجاورة متمازجة ولا تقفز 240 درجة عند نقطة واحدة دون أن يتأثر جيرانها إطلاقًا (10.3). نفحص بالترتيب: حالة الحسّاس وتشخيصه الذاتي، أطرافه، سلك التمديد، صندوق الوصل، خزانة التوزيع، قناة البطاقة (بما فيها اختبار النقل المؤقت لقناة احتياطية — 19.2)، ثم المعايرة والتدريج.

الدرس المزدوج: القراءة الشاذة المنفردة تُختبر قبل أن تُصدَّق؛ **لكن لا تُهمَل** — لأن الفارق (Spread) نفسه أداة حماية وتشخيص، وثرموكابل معطّل يفسد حسابه ويخفي مشكلة احتراق حقيقية قادمة.

التدريب 3 — أمر الصمام 70% وموضعه الفعلي 35%

العرض: على الشاشة: أمر صمام الوقود (Command) عند 70%، والتغذية الراجعة للموضع (Position Feedback) عند 35%.

مسار التشخيص: هذه من أهم حالات مهندس التحكم لأنها تكشف **الحلقة المغلقة الداخلية للعنصر النهائي نفسه**: **I/P ← AO Card ← Controller** أو **Controller ← AI ← LVDT ← Fuel Valve ← Servo**. الفارق بين الأمر والموضع له مرشّحان كبيران: **الصمام لم يتحرك فعلًا** (مشكلة I/P أو صمام مؤازر، ضغط هيدروليكي منخفض، التصاق ميكانيكي، مشغّل) أو **تحرك والقياس كاذب** (LVDT، توصيله، قناته، معايرته — 9.7). الحسم يبدأ بسؤال فيزيائي بسيط: هل تتسق بقية القياسات (تدفق الوقود، الحمل، حرارة العادم) مع 70% أم مع 35%؟ أدلة صيانة المصنّعين تنص صراحة على فحص حرية حركة الصمام، والتغذية الراجعة، وانحياز الصفر للمؤازر (Null Bias)، والعلاقة بين مرجع الوقود والتدفق الفعلي.

الدرس: أمر التحكم ليس واقعًا؛ والتغذية الراجعة ليست واقعًا أيضًا — **اتساق العملية هو الحكم بينهما** (10.12، 19.3).

التدريب 4 — إشارة سرعة مضطربة

العرض: السرعة الفعلية مستقرة عند 3600 دورة/دقيقة، لكن الشاشة تقفز بسرعة: 3598، 3605، 3587، 3612، 3590…

مسار التشخيص: اضطراب بهذا الشكل والوحدة مستقرة فعليًا (الحمل ثابت، لا اهتزاز) يتهم سلسلة القياس قبل الميكانيكا: تدهور الحسّاس المغناطيسي (MPU) أو فجوته الهوائية، كابل متضرر، طرف متراخٍ، ضجيج كهربائي وتدريع/تأريض (19.4)، أو قناة بطاقة السرعة. نتتبع: العجلة المسننة ← **MPU** ← الكابل ← **Marshalling JB** ← بطاقة السرعة ← المتحكم ← الشاشة، ومقارنة قنوات السرعة المتعددة ببعضها (الخطوة 4 بالمنهجية) تحسم نصف الاحتمالات فورًا.

الدرس: هذه فرصة لترسيخ التمييز الذي بنيناه في 7.2: **قياس السرعة** للتحكم، و**حماية السرعة الزائدة** بمسارها المستقل، و**Keyphasor** كمرجع طور — ثلاث وظائف مختلفة، وأعطالها لا تختلط.

التدريب 5 — قاطع سرعة زائدة كاذب (False Overspeed Trip)

العرض: الوحدة عند السرعة الطبيعية، وفجأة: قاطع سرعة زائدة إلكتروني — والمشغّل متأكد أن السرعة الحقيقية لم تتجاوز الحد.

مسار التشخيص: بأنظمة الحماية الحديثة تعمل السرعة الزائدة بتصويت (مثل 2oo3 — راجع 7.8) لتقليل أثر القناة المنفردة المعيبة. أول خطوة: سجل تسلسل الأحداث — ماذا قرأت القنوات الثلاث لحظة القطع؟ لو كانت اثنتان عند ~3600 والثالثة عند 4700، صارت الثالثة متهمة. **لكن لا نتوقف هنا** — قناة تقرأ 4700 كاذبًا لها سبب جذري يجب إيجاده وإلا عادت: فجوة الحسّاس، الكابل والتدريع، الموصلات، القناة، التغذية، تهيئة الإشارة، وتشخيصات المتحكم. والسؤال الأعمق: إن كان التصويت 2oo3، فكيف قطعت قناة واحدة؟ الجواب قد يكشف أن قناة ثانية كانت معطّلة أصلًا (عطل مستتر — 7.8) فصار النظام فعليًا 1oo2 دون علم أحد.

الدرس: القاطع الكاذب لا يُعالَج بإعادة التصفير — يُعالَج بمعرفة لماذا كذبت القناة، ولماذا سمح التصويت لكذبها بالمرور.

التدريب 6 — تذبذب صمام الوقود (Fuel Valve Oscillation)

العرض: موضع الصمام يتأرجح باستمرار: 48، 52، 47، 54، 46، 55% — والحمل يتذبذب معه.

مسار التشخيص: أداة الحسم هنا هي المقارنة الثلاثية على اتجاه زمني واحد: **SP** وPV وخرج المتحكم (20.2). خرج مستقر وصمام يتذبذب ← مشكلة بالعنصر النهائي (التصاق Stiction، تغذية راجعة مضطربة، عدم استقرار هيدروليكي، تذبذب ضغط وقود). خرج يتذبذب مع الخطأ بنمط منتظم ← عدم استقرار حلقة (كسب مرتفع، تكامل عدواني — 20.5). والالتصاق تحديدًا له بصمة مميزة: PV يرسم «درجات سلم» لأن الصمام يقفز دفعات بدل أن ينساب.

الدرس: هذا هو الجسر العملي بين فصل PID وفصل الأعطال — الاتجاه الزمني الثلاثي يفرز «اضبط الحلقة» عن «أصلح الصمام» قبل فك أي شيء.

التدريب 7 — مطاردة الحمل (Load Hunting)

العرض: الوحدة على الشبكة، والحمل يتغير باستمرار: 50 ← 55 ← 49 ← 56 ← 48 ميغاواط، بلا سبب ظاهر من العملية.

مسار التشخيص: نرسم الحلقة كاملة ونفحصها عنصرًا عنصرًا: طلب الحمل ← متحكم الحمل ← أمر الوقود ← صمام الوقود ← التوربين ← المولد ← تغذية **MW** الراجعة ← المتحكم. نتحقق من: مصدر طلب الحمل نفسه (هل هو المتذبذب؟ — محلي أم بعيد من DCS، 9.4)، تردد الشبكة (تذبذب التردد مع الدروب يحرّك الحمل شرعيًا — 6.5)، أمر الوقود وموضع الصمام (تدريب 6)، قياس MW الراجع، ثم ضبط الحلقة. النمط الثاني في القسم 13.13 يذكّرنا أن السبب قد يكون ميكانيكيًا بمنبع القياس (مقسّم تدفق) — لكن كثيرًا ما يتضح أن السبب **ضبط متحكم لا مشكلة توربين**.

الدرس: بحلقة تمر عبر ستة أنظمة، ترتيب الفحص من الأرخص للأغلى — والاتجاهات الزمنية أرخص أدواتك جميعًا.

التدريب 8 — الوحدة تقطع بعد الصيانة

العرض: الوحدة كانت تعمل قبل التوقف؛ بعد الصيانة تفشل بالبدء أو تقطع أثناءه.

مسار التشخيص: لا نفترض عطلًا بالتوربين — نسأل السؤال الذهبي: **ما الذي تغيّر؟** ثم نراجع منهجيًا كل ما مسّته أيدي الفريق: التوصيلات وأرقام الأطراف، الأجهزة المستبدلة ومعايرتها وقطبيتها، تهيئة I/O، أي تنزيل منطق أو برمجيات (Logic Download)، القفازات (Jumpers) والفيوزات والمرحّلات، التغذيات، وتغذيات مواضع الصمامات. ومصادر التشخيص المرجعية تعتبر معرفة **نوع التوقف السابق** — صيانة مجدولة أم قسري أم تنزيل برمجيات — من أول المعلومات المطلوبة بأي تحقيق.

الدرس: هذا هو المبرر العملي الكامل لإدارة التغيير والتوثيق (8.6) ولمراجعة الثوابت بعد أي عمل (17.5) — وكل حالة من هذا النوع تُغلق بسرعة تتناسب طرديًا مع جودة توثيق ما جرى بالتوقف.

التدريب 9 — الوحدة لا تبدأ: سماحة مفقودة (Start Permissive Missing)

العرض: أمر البدء صادر، ولا يحدث شيء — لا تدوير ولا إشعال.

مسار التشخيص: بدل استبدال محوّل الإشعال مباشرة، نفحص **سلسلة السماحات** (9.3) بندًا بندًا كما يعرضها المنطق: ضغط زيت التزييت، حالة التدوير البطيء، ضغط الوقود، الضغط الهيدروليكي، التهوية، موضع IGV، صمامات الإيقاف، تصفير القواطع السابقة، جاهزية نظام اللهب، وغياب أي قاطع نشط. شاشات التشغيل الجيدة تعرض قائمة السماحات مع حالة كل بند — وإن لم تعرضها وحدتك فهذا بحد ذاته تحسين يستحق الطلب. غالبًا يكون السبب **بندًا واحدًا ناقصًا** — وأحيانًا يكون البند نفسه صحيحًا في منعه (حسّاس يقرأ حالة حقيقية غير جاهزة).

الدرس: المنطق الذي يمنع البدء يؤدي عمله — والمهارة هي قراءة **أي شرط بالضبط** هو المانع، ثم التحقيق في ذلك الشرط لا في أمر البدء.

التدريب 10 — قطع أثناء التحويل بين الوقودين (Fuel Transfer)

العرض: وحدة ثنائية الوقود تبدأ تحويلًا من السائل إلى الغاز، وأثناءه يهبط الحمل ثم تقطع الوحدة.

مسار التشخيص: التحويل نقلٌ متزامن (Bumpless Transfer — 6.2): وقود يتناقص وآخر يتزايد بحيث يبقى المجموع ثابتًا. أي اختلال بالتزامن له وجهان: **تأخر فتح صمام الغاز** ← ينخفض السائل قبل توفر الغاز الكافي ← هبوط حمل وسرعة وربما فقدان لهب؛ أو **تبكير/تسارع فتح الغاز** ← قفزة حمل وحرق زائد (Over-Firing). نحلل التسلسل خطوة خطوة من سجل الأحداث والاتجاهات: أمر التحويل ← سماحاته ← فتح صمام الغاز فعليًا (تدريب 3!) ← تدفق الغاز ← تناقص السائل ← الحمل ← السرعة — ونحدد أي خطوة خرجت عن التوقيت.

الدرس: منطق التسلسل (Sequence Logic) لا يقل أهمية عن حلقات PID — والانتقاليات هي بيئة الأعطال الأولى (10.1: «متى» بوزن «أين»).

التدريب 11 — الشاشة تعرض قيمة خاطئة

العرض: الضغط الحقيقي 80 بار (مؤكد بقياس محلي)، والشاشة تعرض 8 بار.

مسار التشخيص: لا نغيّر الناقل — نفصل السلسلة إلى طبقتين: **الإشارة الخام والترجمة الهندسية**. نقيس تيار الحلقة فعليًا: لو كان 4–20 مللي أمبير صحيحًا ومتناسبًا مع 80 بار، فالعتاد كله بريء والمشكلة تدريج **(Scaling)**: الجهاز مضبوط مثلًا على مدى 0–100 بار بينما التهيئة بالنظام تقول 0–10 بار — فتظهر القيمة مقسومة على عشرة تمامًا. القسمة النظيفة بعامل عشرة بصمة كلاسيكية لخطأ مدى، كما أن القيمة "المعقولة لكن الخاطئة" بصمة انحراف معايرة (19.5 — جدول العرض/الفحص).

الدرس: المشكلة قد تكون **بالإعداد لا بالعتاد** — وهذا بالضبط ما يجعل مراجعة التهيئة الموثّقة جزءًا من فحص الحلقات (17.1) لا ترفًا.

التدريب 12 — خرج المتحكم صحيح والمشغّل لا يتحرك

العرض: أمر المخرج الرقمي (DO) فعّال على الشاشة، والملف اللولبي بالحقل لا يعمل.

مسار التشخيص: نتتبع مسار الخرج (19.3): **Controller ← DO Card ← Fuse ← Terminal ← Interposing Relay ← JB ← Solenoid** — ونقيس **فعليًا ونسجّل الأرقام** عند كل نقطة: الجهد عند مخرج البطاقة، بعد الفيوز، عند الطرف، على ملف المرحّل، عبر تلامسه، عند الملف اللولبي، ثم مقاومة ملف اللولب نفسه. أفضل ممارسات

التشخيص تشدد على تسجيل **القيم المقاسة** لا عبارة «تم فحص الجهد» — لأن «24.1 فولت عند الطرف و0.3 فولت عند اللولب» تحسم موضع الانقطاع فورًا، بينما «الجهد سليم» لا تحسم شيئًا ولا تنفع من يأتي بعدك.

الدرس: بمسار الخرج، الأمر الظاهر على الشاشة يثبت فقط أن المتحكم **قرر** — أما أن القرار **وصل**، فلا يثبته إلا مقياس بالحقل.

التدريب 13 — فقدان الاتصال بين المتحكم وبطاقات I/O

العرض: مجموعة إشارات تتجمد معًا، إنذار اتصال I/O، قيم متقطعة غير موثوقة، وربما إجراء حمائي تلقائي.

مسار التشخيص: التجمّد الجماعي المتزامن بصمة اتصال لا قياس (حالة 3 في الفصل 13): نفحص تشخيصات البطاقة والمتحكم، تحميل الشبكة وعدّادات أخطائها، حالة الردّية (وهل فشل التبديل بين المسارين؟)، التغذيات، الكابلات والموصلات، والمبدّلات (Switches). والسؤال الحمائي الأهم: **ما سلوك النظام المصمَّم عند فقدان الاتصال** — تجميد آخر قيمة أم قيمة آمنة أم قطع؟ (11.5) — لأن فهم هذا السلوك يفسّر ما فعلته الوحدة أثناء الحدث.

الدرس: بنية النظام وشبكته (الفصل 11) ليست «موضوع IT» — هي جزء من سلامة الوحدة، وفقدان الاتصال حدث تشغيلي له فلسفة استجابة يجب أن تكون معلومة مسبقًا لا مكتشفة أثناء الحدث.

التدريب 14 — الحماية الاحتياطية تقطع والمتحكم الرئيسي «سليم»

العرض: قطعت الوحدة عبر الحماية الاحتياطية المستقلة، بينما المتحكم الرئيسي لا يعرض أي مشكلة.

مسار التشخيص: نتذكر البنية (7.8): بعض الحسّاسات تغذي مسارين — **الحسّاس** ← **المتحكم الرئيسي والحسّاس** ← **الحماية المستقلة** ← **مسار سلكي** ← **قطع**. القطع من المسار المستقل مع "سلامة" الرئيسي له ثلاثة تفسيرات يجب الفصل بينها بسجل الأحداث والقيم المسجلة بالمسارين: حدث حقيقي سريع رآه المسار المستقل (الأسرع بطبيعته) قبل أن يلحقه الرئيسي؛ أو مشكلة بقناة المسار المستقل نفسه (فيُحقَّق فيها كتدريب 5)؛ أو — الأخطر — **الرئيسي لا يرى الحدث أصلًا** لعطل بقناته هو، فيبدو «سليمًا» وهو الأعمى.

الدرس: «المتحكم الرئيسي سليم» تعني أنه لا يشكو — لا أنه على حق. استقلال الحماية وُجد بالضبط لهذا اليوم، وقطعُها ليس تعارضًا يُحَل بتغليب الرئيسي، بل حدث يُحقَّق فيه بجدية كاملة.

التدريب 15 — إنذار على الشاشة والوحدة لا تقطع

العرض: مشغّل جديد يسأل بقلق: ظهر إنذار حرارة مرتفعة والوحدة مستمرة — هل الحماية معطلة؟

مسار التشخيص: الجواب في سلّم التصعيد (7.7): القيمة الواحدة قد يكون لها إنذار **(Alarm)** يستدعي انتباهًا وتصرف مشغّل، ثم إنذار حرج **(High-High)** يستدعي إجراء تحكم تلقائيًا، ثم حد قطع **(Trip)**. ليس كل إنذار يقطع — وهذا تصميم مقصود يمنح فرصة تصحيح قبل الخسارة. لكن السؤال يظل مشروعًا ويستحق تحقيقًا مصغرًا: هل القيمة فعلًا تحت حد القطع؟ وهل حد القطع نفسه سليم لم يُعدَّل (8.6)؟

الدرس: يجب أن يفهم كل مهندس ومشغّل **فلسفة القطع** بمنشأته لا أسماء الإنذارات فقط — أي إنذار يعني «راقب»، وأيها يعني «تصرّف الآن»، وأيها إنذار أخير قبل قطع وشيك.

21.3 مصفوفة التشخيص السريع

خلاصة الفصل بجدول واحد يصلح للطباعة والتعليق بغرفة التحكم — وهو يكمّل ملحق ب (الذي يغطي الأعراض الميكانيكية والتشغيلية) بأعراض التحكم والقياس:

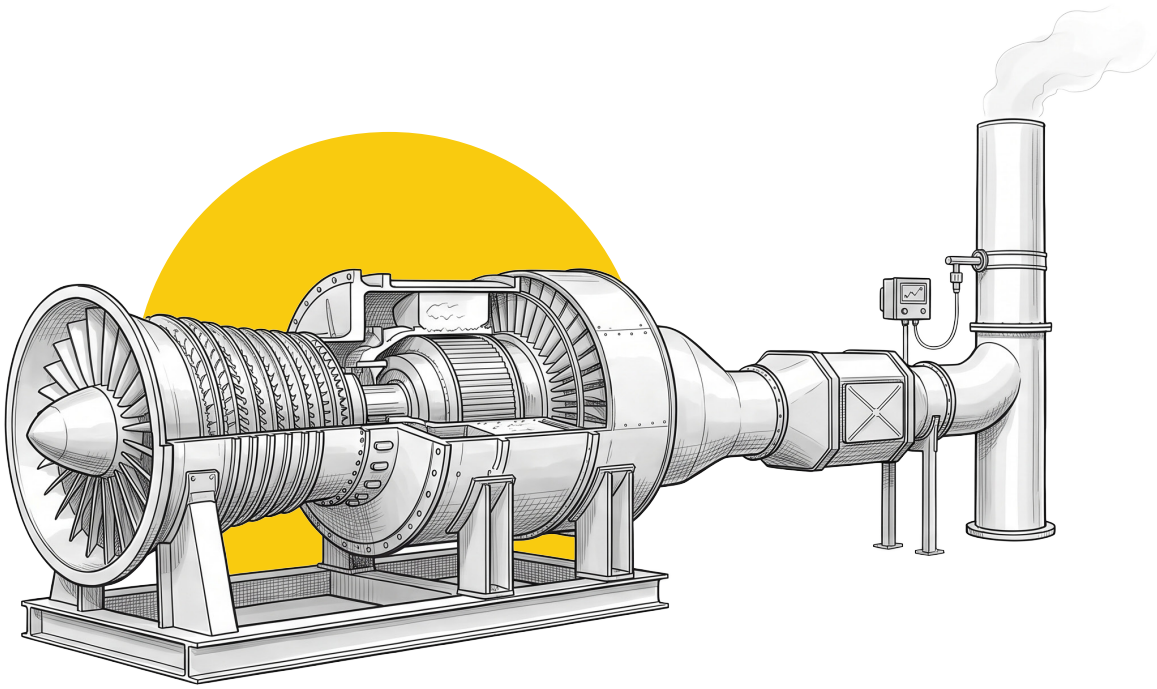
العرض (Symptom)	الأسباب المرجحة	الفحص الأول	الفحص التالي	الحل الشائع
حرارة عادم مرتفعة	حرارة حقيقية / قياس خاطئ	قارن الثرموكابلات معًا والفارق	التوصيلات وقناة AI	معالجة السبب الحقيقي أو إصلاح القياس
ثرموكابل واحد شاذ	حسّاس / كابل / قناة	قارن بالجيران	فحص حلقة كامل	استبدال/إصلاح عنصر السلسلة
أمر صمام مرتفع وموضع منخفض	مشغّل / I/P / LVDT	اتساق العملية مع أيهما؟	الهيدروليك ثم التغذية الراجعة	إصلاح المشغّل أو حلقة الموضع
سرعة مضطربة على الشاشة	MPU / ضجيج / كابل	قارن قنوات السرعة	شكل الإشارة والفجوة	إصلاح الحسّاس/الكابل/التدريع
قاطع سرعة زائدة كاذب	قناة معيبة	قراءات 2oo3 لحظة القطع	توصيلات وتشخيص القناة	إصلاح القناة + تحقيق التصويت
تذبذب صمام/حمل	ضبط PID / التصاق / تغذية راجعة	اتجاه SP وPV والخرج معًا	اختبار خطوة صغير	إعادة ضبط أو إصلاح الصمام
مطاردة حمل على الشبكة	طلب / تردد / ضبط	مصدر طلب الحمل واتجاهه الزمني	الصمام وقياس MW	تصحيح المصدر أو الضبط
قطع بعد صيانة	تغيير غير موثّق	"ما الذي تغيّر؟"	كل ما مُسّ بالتوقف	تصحيح التغيير + توثيقه
لا بدء — سماحة مفقودة	شرط واحد غير محقق	قائمة السماحات بالشاشة	حالة الشرط بالحقل	معالجة الشرط لا تجاوزه
قطع أثناء تحويل وقود	اختلال تزامن الصمامين	اتجاهات التحويل بالسجل	حركة صمام الغاز الفعلية	تصحيح تسلسل/صمام التحويل
قيمة شاشة خاطئة	تدريج / تهيئة	قياس التيار الخام فعليًا	إعدادات المدى بالنظام	تصحيح التهيئة الموثّق

العرض (Symptom)	الأسباب المرجحة	الفحص الأول	الفحص التالي	الحل الشائع
DO فعّال واللولب لا يعمل	فيوز / مرحّل / توصيل	قياس الجهد نقطة نقطة	تتبّع مسار الخرج	إصلاح موضع الانقطاع المقاس
فقدان اتصال I/O	شبكة / بطاقة / تغذية	تشخيصات البطاقة والمتحكم	مسار الشبكة والردّية	إصلاح/استبدال + مراجعة سلوك الفشل
قطع من الحماية المستقلة	حدث حقيقي / قناة / عمى الرئيسي	سجل الأحداث بالمسارين	قيم الحسّاسات لحظة القطع	حسب التفسير المثبت — لا تغليب تلقائي
إنذار بلا قطع	سلّم تصعيد طبيعي	موضع القيمة من الحدود	سلامة حدود القطع	فهم فلسفة القطع + تصرف المشغّل

كلمة أخيرة بهذا الفصل: لاحظ أن كل تدريب أعلاه انتهى بإحالة لفصل سابق — وهذا مقصود. لا يوجد بهذا الفصل شيء «جديد»: هو تمرين على استخدام ما بُني عبر الكتاب كله، بنفس الطريقة التي ستستخدمه بها أمام وحدة حقيقية. اقرأه مرة للفهم، ثم عد إليه عند كل مشكلة — ومع الوقت ستجد أنك لم تعد تحتاجه، لأن المنهجية صارت طريقة تفكيرك.

الفصل الثاني والعشرون:

الانبعاثات وحماية البيئة — تطور تقني بأربعة عقود



22.1 لماذا يعني هذا الفصل مهندس التحكم تحديدًا؟

قد يبدو للوهلة الأولى أن الانبعاثات موضوع بيئي يخص قسم البيئة والسلامة، لا مهندس التوربينات. الواقع عكس ذلك تمامًا. في التوربين الحديث، **الحد البيئي أصبح قيدًا تشغيليًا مباشرًا على منظومة التحكم**، بنفس مستوى حرارة العادم وسرعة الدوران.

فكّر بالأمر عمليًا: عندما تكون الوحدة على وضع Dry Low NOx، فإن الذي يحدد **متى** ينتقل التوربين من وضع احتراق إلى آخر، و**كم** نسبة الوقود التي تذهب لكل صف حاقنات، و**أين** تقف ريش IGV، ليس أداءً حراريًا بحتًا — بل موازنة بين أربعة أهداف متعارضة في آنٍ واحد: قدرة مطلوبة، وكفاءة، وثبات لهب، وانبعاثات ضمن الحد. وكلها تُنفَّذ بمنطق داخل نفس المتحكم الذي درسناه في الفصل الثاني عشر، وتُقاس بحسّاسات مرّت عبر نفس سلسلة الإشارة التي فصّلناها في الفصل التاسع عشر.

بل إن كثيرًا من المشاكل التي يظنها المشغّل «مشكلة انبعاثات» هي في جوهرها مشكلة تحكم: محلل NOx يقرأ خطأً، أو تقسيم وقود انزاح، أو صمام تحكم فقد خطّيته، أو تركيبة الغاز تغيّرت فاختل الخليط المُعدّ مسبقًا. ولهذا السبب وضعنا هذا الفصل هنا، بعد فصول التحكم لا قبلها.

والزاوية الثانية التي تجعل هذا الفصل مهمًا: التسلسل التاريخي نفسه يعلّمك المنطق الهندسي. فتطور تقنيات خفض الانبعاثات لم يكن قفزات عشوائية، بل سلسلة منطقية من الأسئلة، كل سؤال وُلد من قصور إجابة سابقة. ومن يفهم هذا التسلسل يفهم لماذا وحدته مصممة بالطريقة التي هي عليها، لا مجرد كيف تعمل.

22.2 ما الذي يخرج من المدخنة فعلًا؟

قبل الحديث عن العلاج، لا بد من تشخيص دقيق. العادم الخارج من توربين غازي يعمل على غاز طبيعي نظيف يتكون في معظمه من نيتروجين وأكسجين فائض وبخار ماء وثاني أكسيد كربون — وهذه ليست ملوّثات بالمعنى التنظيمي (باستثناء CO_2 من زاوية المناخ). الملوّثات المُنظَّمة هي نسبة ضئيلة جدًا، لكنها هي التي تحدد إن كانت وحدتك ستحصل على رخصة تشغيل أم لا.

الملوّث	المصدر داخل التوربين	يزداد عندما	الوحدة المعتادة
NOx (NO + NO_2)	تفاعل النيتروجين والأكسجين عند حرارة اللهب العالية	ترتفع درجة حرارة اللهب، ويطول زمن المكوث	ppmvd @ 15% O_2
CO	احتراق غير مكتمل	يبرد اللهب أكثر من اللازم، أو يقصر زمن المكوث، أو عند الأحمال المنخفضة والبدء	ppmvd @ 15% O_2
UHC / VOC	هيدروكربونات لم تحترق	نفس أسباب CO، وأشدّ عند البدء البارد	ppmvd @ 15% O_2
SOx	كبريت موجود **في الوقود** أصلًا	يزيد محتوى الكبريت بالوقود	ppmvd @ 15% O_2 (أو kg/h حسب اللائحة)
PM (جسيمات)	رماد ومواد غير محترقة، وأملاح من حقن الماء	مع الوقود السائل والثقيل	mg/Nm^3
CO_2	ناتج حتمي لأي احتراق كربوني	يزيد استهلاك الوقود لكل ميغاواط	kg/MWh

ثلاثة مسارات لتكوّن NOx — وواحد فقط منها يهمك حقًا

الفهم الدقيق لآلية تكوّن NOx هو المفتاح لكل ما يأتي بعده:

1) Thermal NOx (آلية **Zeldovich**). نيتروجين الهواء نفسه يتفكك ويتحد بالأكسجين عند درجات الحرارة العالية جدًا. وهذه الآلية أُسّية **(exponential)** بدرجة حرارة اللهب، لا خطية. أي أن ارتفاع مئة درجة في منطقة اللهب قد يضاعف NOx عدة مرات. وهذه هي الآلية المهيمنة في التوربينات الغازية العاملة على غاز طبيعي — أكثر من 90% من NOx تأتي من هنا.

2) Prompt NOx. يتكوّن سريعًا في الجبهة الأمامية للهب عبر تفاعلات جذور هيدروكربونية. مساهمته صغيرة نسبيًا في التوربينات الغازية.

3) Fuel NOx. من النيتروجين المرتبط كيميائيًا في الوقود نفسه. مهمل مع الغاز الطبيعي، لكنه يصبح معتبرًا مع بعض أنواع الوقود السائل الثقيل والغازات الاصطناعية.

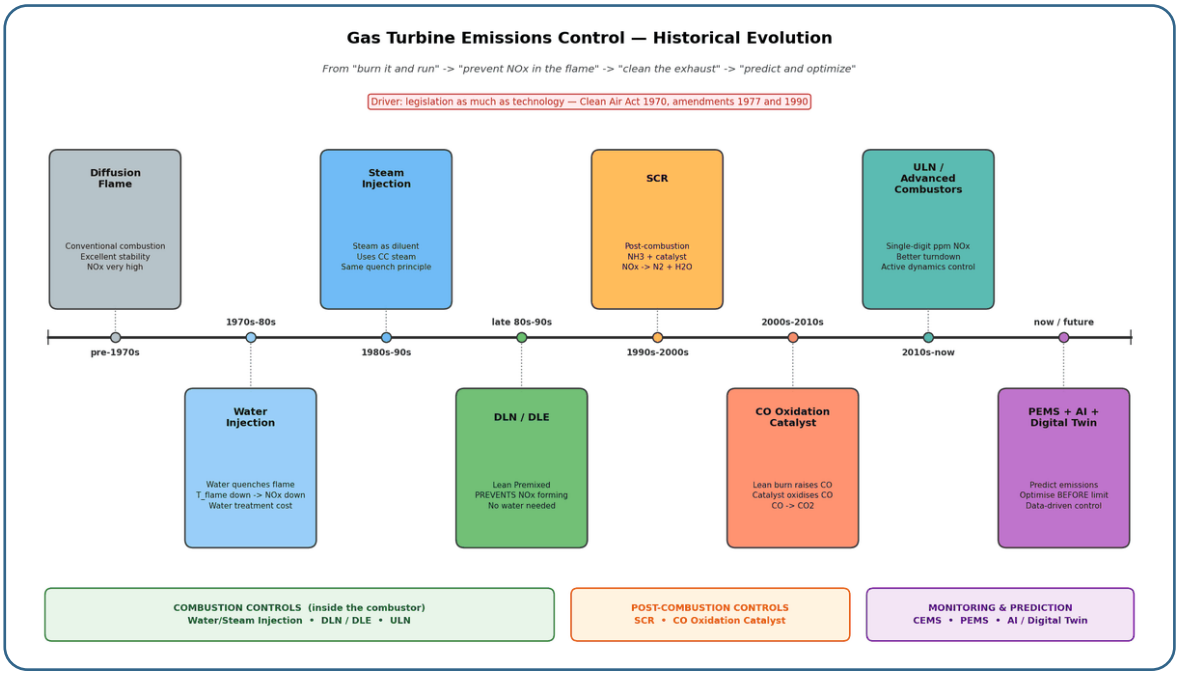
والخلاصة العملية التي تُبنى عليها كل التقنيات التالية: إذا كان NOx في توربينك أُسّيًا بدرجة حرارة اللهب، فإن كل حيلة هندسية ستدور حول شيء واحد: **خفّض درجة حرارة اللهب — بأي وسيلة**. إما بتخفيفه بمائع بارد (ماء أو بخار)، أو بجعل الخليط فقيرًا فيبرد ذاتيًا. هذا هو محور القصة كلها.

فخّ يقع فيه كثيرون: خفض حرارة اللهب لا يمكن الاستمرار به إلى ما لا نهاية. إذا برد اللهب أكثر من حدّ معيّن لن يكتمل الاحتراق، فيبدأ **CO** في الارتفاع بشدة، وقد يقترب اللهب من الانطفاء **(Lean Blow-Out)**. أي أن NOx وCO يتحركان في اتجاهين متعاكسين. وهذه هي المفاضلة الأساسية التي تحكم تصميم كل غرف الاحتراق الحديثة.

22.3 الخريطة التاريخية الكاملة

قبل الدخول في التفاصيل، هذه هي الرحلة كاملة بنظرة واحدة. لاحظ أن السؤال الهندسي نفسه يتغيّر في كل مرحلة، وهذا التغيّر في السؤال هو جوهر التطور:

الفترة	التقنية	السؤال الهندسي الذي أجابت عنه
قبل السبعينيات	**Diffusion Flame**	كيف أُشعل الوقود بثبات مطلق تحت كل الظروف؟
السبعينيات–الثمانينيات	**Water Injection**	كيف أبرّد اللهب بأرخص مائع متاح؟
الثمانينيات–التسعينيات	**Steam Injection**	كيف أبرّد اللهب دون تكلفة معالجة مياه إضافية بمحطة دورة مركبة؟
أواخر الثمانينيات–التسعينيات	**DLN / DLE**	كيف أمنع تكوّن NOx من الأساس بدل تبريده بعد التكوّن؟
التسعينيات–2000s	**SCR**	ماذا أفعل بالـNOx المتبقي بعد أن فعلت كل ما أستطيع داخل الغرفة؟
2000s–2010s	**CO Oxidation Catalyst**	إذا كان الاحتراق الفقير يرفع CO، كيف أعالجه؟
2010s–الآن	**ULN / Advanced Combustors**	كيف أصل لأرقام أحادية الخانة مع الحفاظ على الثبات ومدى التشغيل؟
الآن والمستقبل	**PEMS + AI + Digital Twin**	كيف أتوقّع تجاوز الحد قبل حدوثه وأتصرف استباقيًا؟



الشكل 22.1 — التسلسل التاريخي لتقنيات خفض الانبعاثات على مسارَين: التحكم داخل غرفة الاحتراق والمعالجة بعد الاحتراق، وصولًا إلى طبقة المراقبة والتنبؤ.

ملاحظة تصنيفية مهمة: وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) تصنّف هذه التقنيات في مجموعتين واضحتين: **Combustion Controls** (حقن الماء والبخار، وDLN) و**Post-Combustion Controls** (SCR بشكل أساسي). وهذا التصنيف ليس أكاديميًا فقط — إنه يحدد من يملك المشكلة في محطتك: التقنيات الأولى مسؤولية فريق التوربين ومهندس التحكم، والثانية غالبًا مسؤولية فريق مستقل بمعداته وكيماوياته وصيانته الخاصة.

والنقطة التي لا يذكرها كثير من الكتب التقنية: هذا التطور لم تقده التكنولوجيا وحدها، بل التشريع. في الولايات المتحدة تأسس الهيكل الأساسي لقانون الهواء النظيف (Clean Air Act) عام 1970، ثم جاءت تعديلات مفصلية عامي 1977 و1990. وكل تشديد في الحدود كان يخلق سوقًا لتقنية جديدة، فتستثمر الشركات المصنّعة، فتنضج التقنية، فيتشجع المشرّع على تشديد أكبر. دورة مغلقة بين التنظيم والابتكار استمرت أربعة عقود، وهي التي أوصلتنا من مئات الأجزاء بالمليون إلى آحادها.

22.4 المرحلة الأولى: Diffusion Flame — الثبات مقابل NOx

التوربينات القديمة استخدمت غرفة احتراق ذات لهب انتشاري **(Diffusion Flame)**. المبدأ بسيط ومباشر:

Fuel ─┐
──▶ Diffusion Flame ──▶ Combustion ──▶ Hot Gas
Air ──┘

الوقود والهواء يدخلان **منفصلين**، ويختلطان أثناء الاحتراق نفسه — أي عند سطح اللهب. وهذا التصميم يمتلك ميزة واحدة عظيمة جعلته يسود لعقود: **ثبات اللهب الممتاز**. لأن الخلط يحدث تدريجيًا، فإنه دائمًا توجد منطقة ما داخل اللهب تكون فيها النسبة قريبة من النسبة القياسية المثالية (stoichiometric)، ومن ثمّ يبقى اللهب مشتعلًا مهما تغيّر الحمل أو الظروف الجوية أو نوع الوقود. ولهذا فإن التوربينات ذات اللهب الانتشاري تتحمّل تغيرات واسعة في نوعية الوقود، وتشتغل على وقود سائل بسهولة، ونادرًا ما تعاني من انطفاء اللهب.

لكن هذه الميزة نفسها هي المشكلة. فوجود منطقة قريبة من النسبة القياسية يعني **درجة حرارة لهب قريبة من أقصى ما يمكن** — وهي في الغاز الطبيعي تتجاوز ألفي درجة مئوية محليًا. ومع آلية Zeldovich الأُسّية، النتيجة الحتمية: **NOx** مرتفع جدًا، بمستويات تُقاس بالمئات من أجزاء المليون.

ولم تكن هذه مشكلة تُذكر قبل السبعينيات، ببساطة لأن أحدًا لم يكن يقيسها. ثم تغيّر ذلك: تبيّن أن NOx ليس مجرد «دخان»، بل يشارك في تفاعلات ضوئية كيميائية في الجو تنتج الأوزون الأرضي والضباب الدخاني **(smog)**، ويؤثر على جودة الهواء والصحة التنفسية. وحين تحوّل هذا الفهم إلى تشريع، صارت المشكلة مشكلة مهندسي التوربينات.

22.5 الحل الأول: حقن الماء (Water Injection)

الاستجابة الأولى كانت مباشرة وبديهية: إذا كانت المشكلة حرارة اللهب، فبرّد اللهب.

Water Injection ──▶ حرارة تُمتَص كحرارة كامنة للتبخر
──▶ Flame Temperature ↓ ──▶ Thermal NOx ↓

يُحقَن ماء منزوع المعادن (demineralized) مباشرة في منطقة الاحتراق. يتبخر الماء، وامتصاصه للحرارة الكامنة للتبخر يخفض درجة الحرارة المحلية للهب بشكل ملموس، فينهار معدل تكوّن NOx أُسّيًا. والنتيجة العملية: هبوط من مستويات المئات إلى مستويات تتراوح تقريبًا بين 25 و42 جزءًا بالمليون في التطبيقات النموذجية.

وكانت التقنية فعالة وسريعة الانتشار، لكنها حملت ثمنًا كبيرًا لا يزال يُدرَّس كمثال على أن الحل الهندسي دائمًا مقايضة:

- **استهلاك مياه ضخم.** نسبة الماء إلى الوقود قد تقارب الواحد وزنًا أو تتجاوزه، وهذا يعني آلاف الأطنان شهريًا في وحدة كبيرة — وهو قيد قاتل في المواقع الصحراوية والحقول النائية التي يعمل فيها كثير من قرّاء هذا الكتاب.
- **محطة معالجة مياه كاملة.** الماء يجب أن يكون منزوع المعادن بمواصفات صارمة، وإلا فإن الأملاح ستترسب في غرفة الاحتراق وعلى ريش المرحلة الأولى. أي أنك اشتريت مشكلة بيئية بحلّ يحتاج بنية تحتية بحد ذاته.
- احتمال التآكل **(corrosion)** في مسار الغاز الساخن نتيجة زيادة بخار الماء.
- **تأثير على العمر والأداء.** الصدمة الحرارية والإجهاد على أجزاء المسار الساخن، وزيادة الحاجة للصيانة.
- **تعقيد إضافي في نظام التحكم:** مضخات، صمامات تحكم بالتدفق، حلقة تحكم بنسبة الماء/الوقود، حمايات لفقد الماء أثناء التشغيل.
- تأثير على ديناميكيات الاحتراق **(combustion dynamics)** وعلى CO عند بعض نقاط التشغيل.

ملاحظة أداء مهمة قد تفاجئ البعض: حقن الماء أو البخار **يزيد** القدرة الخارجة من التوربين، لأنه يزيد الكتلة المارّة عبر مراحل التوسع. لكنه في الوقت نفسه **يخفض الكفاءة الحرارية**، لأن طاقة تبخير الماء تخرج من المدخنة ولا تُسترد. أي أنك تكسب ميغاواطات وتدفع ثمنها وقودًا — وهذه مقايضة ينبغي أن تكون واضحة في ذهن مشغّل الوحدة، لا أن يكتشفها من فاتورة الوقود.

22.6 حقن البخار (Steam Injection)

المبدأ الفيزيائي نفسه، بمائع مختلف:

Steam —▶ Dilution —▶ Flame Temperature ↓ —▶ NOx ↓

والميزة المنطقية الواضحة: **في محطة دورة مركبة، البخار متوفر أصلًا.** لديك مرجل استرداد حرارة ينتج بخارًا، فلماذا تبني منظومة معالجة مياه منفصلة لحقن الماء بينما يمكنك سحب جزء من البخار المتاح؟

وقد تطورت هذه الفكرة إلى دورات كاملة قائمة عليها، مثل دورة **Cheng** ودورات **STIG (Steam Injected Gas Turbine)**، حيث لا يُحقن البخار لخفض NOx فحسب، بل لزيادة القدرة والكفاءة معًا.

لكن يبقى القيد الجوهري نفسه الذي يجمع الماء والبخار: أنت لا تمنع تكوّن **NOx**، بل تكافح تكوّنه بإضافة مائع خارجي. وهذا يعني استهلاكًا مستمرًا، ومنظومة إضافية يجب صيانتها، وأداءً يتدهور فور تعطّل تلك المنظومة. ومهندس ميداني اضطر يومًا لخفض حمل وحدة لأن مضخة حقن الماء تعطّلت يفهم هذا القيد جيدًا.

وهنا بدأ السؤال الذي غيّر الصناعة.

22.7 الثورة الحقيقية: DLN / DLE والاحتراق الفقير المُعدّ مسبقًا

بدل السؤال القديم:

> «كيف أتعامل مع NOx بعد أن يتكوّن؟»

أصبح السؤال:

> "كيف أمنع تكوّن **NOx** من الأساس؟»

وهذا التحوّل في صياغة السؤال هو أهم لحظة في تاريخ انبعاثات التوربينات الغازية. الإجابة كانت:

- **DLN** — Dry Low NOx (المصطلح الشائع عند GE)
- **DLE** — Dry Low Emissions (المصطلح الشائع عند Siemens وSolar وغيرهما)

وكلمة **Dry** هنا ليست زخرفة لغوية — إنها بيت القصيد: **"جاف" أي بلا ماء وبلا بخار**. لا مائع مُخفِّف على الإطلاق. الخفض يأتي من هندسة الاحتراق نفسه.

الفكرة: Lean Premixed Combustion

بدل خلط الوقود والهواء عند اللهب (كما في Diffusion)، **نخلطهما مسبقًا وبعناية قبل الاحتراق**، وبنسبة فقيرة **(lean)** — أي هواء أكثر بكثير مما يلزم للاحتراق الكامل.

النتيجة: لا توجد داخل اللهب أي منطقة غنية بالوقود وعالية الحرارة. اللهب كله عند درجة حرارة واحدة منخفضة نسبيًا وموزّعة بانتظام.

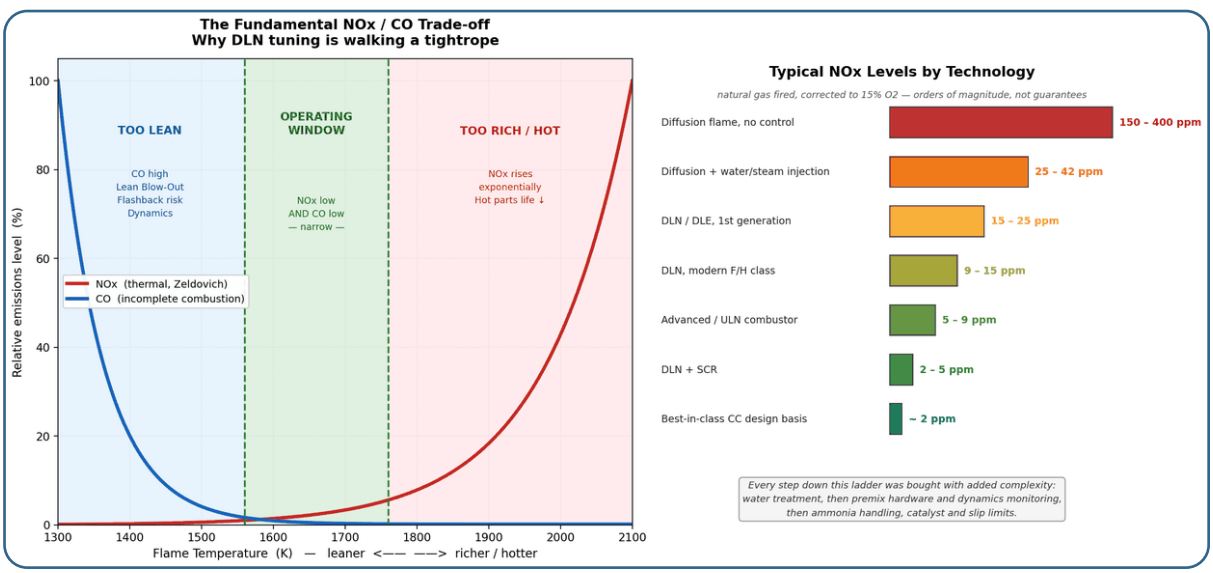
Fuel + Air —▶ Premixing —▶ Lean Mixture —▶ Flame

T_flame ↓ —▶ Thermal NOx ↓↓↓

وهكذا صار ممكنًا الوصول إلى مستويات NOx تُقاس بعشرات ثم بآحاد الأجزاء بالمليون، **دون قطرة ماء واحدة**. وقد جاء DLN تحديدًا كاستجابة للحاجة إلى خفض الانبعاثات بلا اعتماد على تخفيف بالماء أو البخار، بعد أن كانت أنظمة الحقن هي السائدة.

الثمن: نافذة تشغيل ضيقة ومنظومة تحكم أعقد بكثير

وهنا بدأت المتاعب التي يعرفها كل مهندس تحكم عمل على وحدة .DLN أنت الآن تشغّل الاحتراق **قريبًا جدًا من حافة الانطفاء عمدًا**. وكلما زدت الفقر (leanness) لخفض NOx أكثر، اقتربت من الحافة أكثر:



الشكل 22.2 — المفاضلة بين NOx وCO كدالة لحرارة اللهب، ونافذة التشغيل الضيقة لاحتراق DLN، مع سلّم مستويات NOx النموذجية عبر الأجيال التقنية المتعاقبة.

المشاكل التي تظهر عند الاقتراب من الحافة الفقيرة:

الظاهرة	ما يحدث فيزيائيًا	العَرَض في غرفة التحكم
Lean Blow-Out (LBO)	الخليط فقير جدًا فينطفئ اللهب	فقد لهب وقطع فوري
Combustion Dynamics	تذبذبات ضغط صوتية داخل الغرفة تتفاعل مع تحرير الحرارة	قراءات مقاييس الديناميكيات ترتفع، وقد تكسر الأجزاء خلال دقائق
Flashback	اللهب يرتد إلى داخل منطقة الخلط المسبق ويحترق فيها	ارتفاع حرارة موضعي، تلف حاقنات، فارق حرارة عادم
Autoignition	الخليط يشتعل ذاتيًا داخل ممر الخلط قبل بلوغه اللهب	مشابه لـFlashback في نتائجه
CO_2	لم يكتمل الاحتراق لبرودة اللهب	تجاوز حد CO رغم أن NOx ممتاز

ولهذا لا يكفي في وحدة DLN أن "تفتح صمام الوقود". أصبح لديك:

- أوضاع احتراق متعددة **(Combustion Modes)** تنتقل الوحدة بينها مع الحمل: احتراق منتشر عند البدء والأحمال الدنيا (حيث الثبات أولوية والانبعاثات ثانوية)، ثم انتقال تدريجي إلى الخلط المسبق الكامل عند الأحمال العالية (حيث الانبعاثات أولوية).
- تقسيم الوقود **(Fuel Splits)** — نسب دقيقة تُوزَّع بين صفوف الحاقنات المختلفة، تُجدوَل مقابل الحمل ودرجة الحرارة المحيطة وحرارة العادم المرجعية.
- جدولة **IGV** تعمل بتناغم مع التقسيم لضبط نسبة الهواء إلى الوقود عند كل حمل.
- **مراقبة ديناميكيات الاحتراق** بحسّاسات ضغط ديناميكية داخل الغرف، مع حمايات تُخفّض الحمل أو تقطع عند تجاوز نطاق تردد معيّن.
- مراقبة فارق حرارة العادم **(Spread)** بوصفه المؤشر غير المباشر الأول على أن غرفة ما خرجت عن السلوك المتوقع.

ملاحظة ميدانية: لحظات الانتقال بين أوضاع الاحتراق (Mode Transfer) هي من أكثر لحظات تشغيل وحدة DLN حساسية. الوحدة تعيد توزيع الوقود بين صفوف الحاقنات وهي تحت حمل، وأي عدم اتساق — صمام بطيء، حسّاس حرارة منحرف، تركيبة وقود متغيرة — يظهر هنا أولًا. وإذا رأيت وحدة تقطع دائمًا "عند حمل معيّن تقريبًا"، فأول ما يجب فحصه هو ما إذا كان ذلك الحمل يوافق نقطة انتقال وضع احتراق. راجع الفصل الثالث عشر لمنهجية التشخيص، والفصل التاسع لمنطق التحكم بالوقود.

أثر تركيبة الوقود: Wobbe Index

نقطة تُغفَل كثيرًا وهي حاسمة في تشغيل DLN: الخلط المسبق مُعاير على **محتوى طاقي محدد للوقود**. فإذا تغيّرت تركيبة الغاز — وهو أمر شائع في حقول النفط والغاز حيث يأتي الغاز من مصادر متعددة أو من فصل مصاحب — تغيّر مؤشر **Wobbe** (وهو مقياس للطاقة المارة عبر فتحة عند ضغط معيّن)، فتغيّرت فعليًا نسبة الوقود إلى الهواء عند نفس فتحة الصمام.

> النتيجة العملية: نفس أمر التحكم يعطيك اليوم خليطًا أفقر أو أغنى من الأمس. ولهذا تُلزِم مواصفات وحدات DLN بنطاق ضيق لـWobbe، وتُجهَّز بعض الوحدات بقياس مباشر لتركيبة الغاز أو لكثافته يُغذّي منطق التحكم لتعويض التغيّر لحظيًا. وإذا كنت تعمل في حقل يتغيّر فيه الغاز موسميًا، فهذا الموضوع سيكون مصدر نصف مشاكلك.

22.8 ما بعد الاحتراق: الاختزال الحفزي الانتقائي (SCR)

مع تشديد الحدود أكثر — خاصة في المناطق ذات جودة هواء متدهورة — لم يعد التحكم داخل غرفة الاحتراق وحده كافيًا. فجاءت الطبقة الثانية:

SCR — Selective Catalytic Reduction

وهنا نحن لا نمنع NOx، بل نعالج الـNOx الموجود فعلًا في العادم:

$$\text{Exhaust Gas} + NH_3 \longrightarrow \text{Catalyst} \longrightarrow N_2 + H_2O$$

أي تحويل أكاسيد النيتروجين إلى نيتروجين وماء — وكلاهما مكوّن طبيعي للهواء. وكلمة **Selective** تعني أن الأمونيا تتفاعل انتقائيًا مع NOx لا مع الأكسجين الفائض الوفير في العادم، وهذا هو دور المحفّز.

نقاط تشغيلية حاسمة يجب أن يعرفها مهندس المحطة:

- **نافذة درجة الحرارة.** المحفّز لا يعمل إلا ضمن نطاق حراري محدد (تقريبًا 290–400 °م لمحفزات التيتانيوم/الفاناديوم الشائعة). أبرد من ذلك: التفاعل لا يكتمل وتتكوّن أملاح كبريتات الأمونيوم التي تسدّ المحفّز. أسخن من ذلك: المحفّز يتدهور حراريًا بشكل دائم. ولهذا لا يوضع **SCR** في المدخنة، بل داخل مرجل استرداد الحرارة عند المرحلة التي تكون فيها درجة الحرارة ضمن النافذة. وهذه واحدة من أجمل نقاط التكامل الهندسي في محطة دورة مركبة.
- انزلاق الأمونيا **(Ammonia Slip).** إذا حقنت أمونيا أكثر مما يلزم، فالفائض يخرج من المدخنة — وهو بذاته انبعاث مُنظَّم وله حد مسموح. فأنت بين حدّين: قليل جدًا يعني NOx مرتفع، وكثير جدًا يعني انزلاق أمونيا. **وهذه بحد ذاتها حلقة تحكم كاملة**، غالبًا بتغذية أمامية من الحمل وحرارة العادم مع تصحيح راجع من محلل NOx.
- **شكل الأمونيا.** إما أمونيا لامائية (anhydrous) وهي أكثر فاعلية وأخطر تخزينًا بكثير، أو محلول أمونيا مائي (aqueous) أوسط الخيارات، أو **يوريا** تُحلّل حراريًا إلى أمونيا في الموقع — وهي الأكثر أمانًا من ناحية المناولة، ولهذا انتشرت في المواقع القريبة من التجمعات السكانية.
- **تسمّم المحفّز وتدهوره.** الكبريت والزرنيخ والسيليكون والقلويات تسمّم المحفّز، والحرارة الزائدة تُلبّده. للمحفّز عمر محدود، ويُختبر دوريًا بأخذ عينات، ويُستبدَل على طبقات.
- **فقد الضغط.** المحفّز يضيف مقاومة في مسار العادم، وأي فقد ضغط خلفي هو خصم مباشر من قدرة التوربين وكفاءته. وانسداده التدريجي يظهر كارتفاع بطيء في الضغط الخلفي.

والنتيجة المركّبة: الجمع بين تحكم داخل الغرفة (DLN أو حقن ماء/بخار) وSCR يمكن أن يبلغ مستويات منخفضة جدًا؛ وفي بعض تطبيقات الدورة المركبة تصل قيم التصميم إلى ما يقارب **2 ppm**. وهذا رقم كان يُعدّ خياليًا قبل ثلاثين عامًا.

22.9 ولم يعد NOx وحده المشكلة: محفّز أكسدة CO

هنا تظهر مفارقة جميلة تختصر منطق هذا الفصل كله. عندما دفعنا الاحتراق نحو الفقر الشديد لخفض NOx، ارتفع **CO** — لأن الاحتراق لم يعد يكتمل عند تلك الحرارة المنخفضة. أي أن حلّ المشكلة الأولى خلق المشكلة الثانية.

فجاء الحل الموازي:

CO Oxidation Catalyst

$CO + ½\ O_2 \longrightarrow CO_2$ (على محفّز، غالبًا بلاتيني)

ولا يحتاج هذا المحفّز إلى أي مادة كيميائية مُحقَنة — فالأكسجين الفائض موجود بوفرة في عادم التوربين (نحو 15%). كل ما يفعله المحفّز هو خفض طاقة التنشيط اللازمة، فيتم التفاعل عند درجة حرارة العادم المتاحة. وهو يعالج أيضًا الهيدروكربونات غير المحترقة **(UHC/VOC)** بنفس الآلية.

وبهذا صارت منظومة الانبعاثات الحديثة نظامًا متكاملًا من ثلاث طبقات لا مجرد تعديل على غرفة احتراق:

Combustor (DLN) ◄— منع تكوّن NOx من الأساس

▼

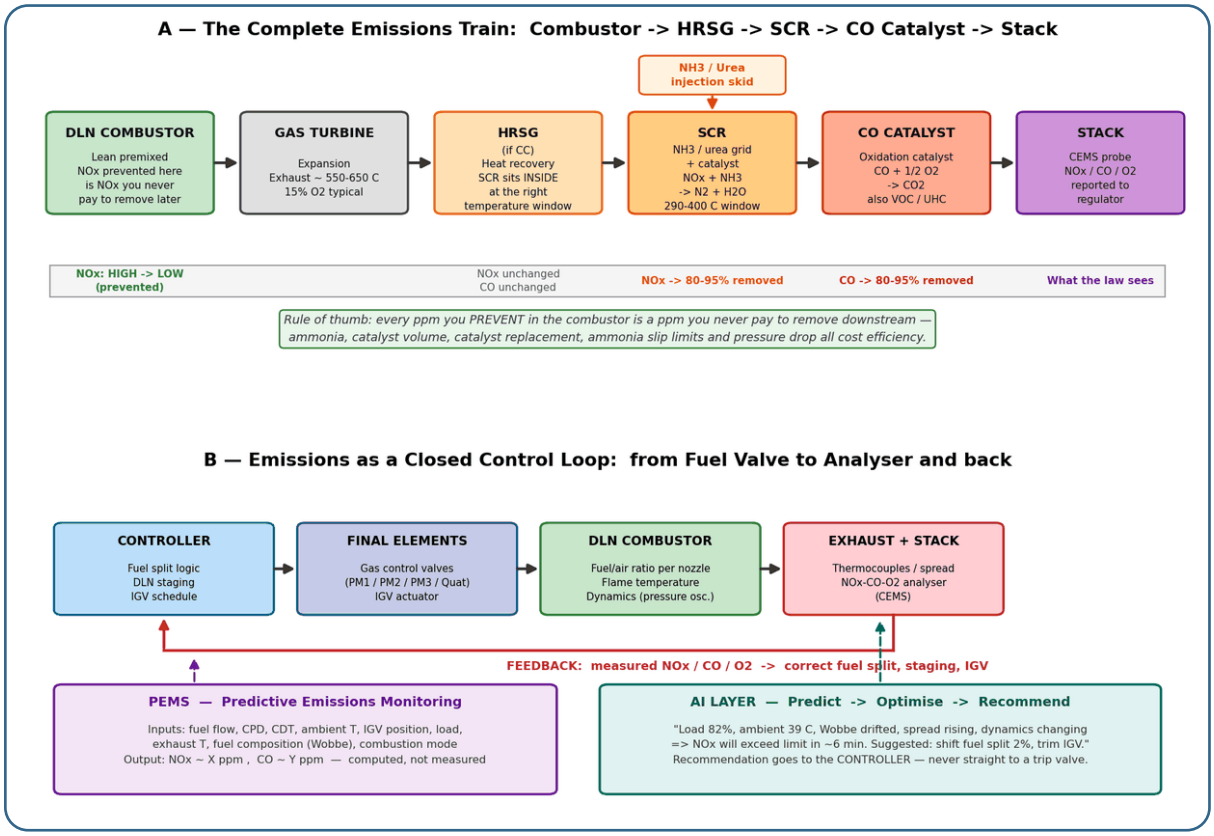
SCR ◄— إزالة NOx المتبقي

▼

CO Catalyst ◄— إزالة CO والهيدروكربونات

▼

Stack + CEMS ◄— الجهة المنظِّمة ما تراه



الشكل 22.3 — أعلى: منظومة الانبعاثات من غرفة احتراق DLN عبر مرجل استرداد الحرارة وSCR ومحفّز CO حتى المدخنة. أسفل: الانبعاثات كحلقة تحكم مغلقة.

قاعدة اقتصادية تستحق أن تُحفظ: كل جزء بالمليون تمنع تكوّنه داخل غرفة الاحتراق هو جزء لا تدفع ثمن إزالته لاحقًا — لا أمونيا، ولا حجم محفّز، ولا استبدال محفّز، ولا فقد ضغط، ولا حدّ انزلاق أمونيا يقيّدك. ولهذا يبقى الاستثمار في جودة الاحتراق نفسه أوفر دائمًا من الاستثمار في معالجة ما بعده. هذه القاعدة تنطبق على تصميم محطة جديدة كما تنطبق على قرار تحديث وحدة قائمة.

22.10 ماذا عن SOx والجسيمات؟ دور نوعية الوقود

هنا يجب التفريق بوضوح، لأن الخلط شائع.

SOx لا يأتي من التصميم — بل يأتي من الوقود. الكبريت لا يتولّد في غرفة الاحتراق؛ هو موجود في الوقود قبل دخوله، وكل ذرة كبريت تدخل ستخرج على شكل SO_2 أو SO_3 تقريبًا. **ولذلك لا يوجد «تصميم غرفة احتراق منخفض الكبريت».** الحل الوحيد الفعّال هو نوعية الوقود نفسها. وEPA تشير إلى أن التحكم في SO_2 في هذا القطاع يعتمد بدرجة كبيرة على استخدام غاز طبيعي منخفض الكبريت ووقود مقطّر **(distillate)**.

وهذا يجعل **مواصفة الوقود جزءًا أصيلًا من الاستراتيجية البيئية للمحطة**، لا مجرد بند شراء. ومهندس التوربينات الذي يوقّع على قبول شحنة وقود يوقّع فعليًا على أداء بيئي.

والجسيمات **(PM)** بالمثل: في توربين يعمل على غاز طبيعي نظيف تكون شبه مهملة. أما مع الوقود السائل — وخصوصًا الثقيل — فتظهر بوضوح، ومعها الرماد والمعادن التي تسبب مشاكل أخرى تمامًا في مسار الغاز الساخن (التآكل الساخن، الترسبات على الريش) كما فصّلنا في الفصل السادس عشر. وحقن الماء بمعالجة غير كافية يمكن أن يساهم في الجسيمات بأملاح متطايرة.

والخلاصة العملية: إذا كنت تشغّل على غاز طبيعي نظيف فمعركتك مع NOx وCO فقط. وإذا انتقلت إلى وقود سائل ولو مؤقتًا (كوقود احتياطي مثلًا)، فأنت تدخل معركة مختلفة تمامًا، وحدودك البيئية غالبًا مختلفة، وساعات التشغيل على الوقود الاحتياطي عادةً مقيّدة برخصة المحطة. هذا قيد تشغيلي حقيقي يجب أن يعرفه المشغّل قبل أن يقرر التحويل.

22.11 الدورة المركبة والهيدروجين: البُعد المناخي

كل ما سبق يعالج **ملوّثات الهواء المحلية**. أما CO_2 فقصة مختلفة نوعيًا، لأنه ليس ملوّثًا يمكن ترشيحه — إنه الناتج الحتمي لاحتراق أي وقود كربوني. ولا يوجد «محفّز» يزيله كما نزيل NOx.

ولذلك السؤال بشأن CO_2 ليس «كيف أزيله؟» بل:

> **"كيف أنتج نفس عدد الميغاواطات بوقود أقل؟"**

وهنا تصبح **الكفاءة نفسها تقنية بيئية**. وهذا يفسّر لماذا نعتبر الدورة المركبة **(CCGT)** جزءًا من منظومة حماية البيئة لا مجرد تحسين اقتصادي:

Gas Turbine Exhaust ⟶ HRSG ⟶ Steam ⟶ Steam Turbine ⟶ MW إضافية بلا وقود إضافي

الانتقال من دورة بسيطة بكفاءة تقارب 35% إلى دورة مركبة تتجاوز 60% في أحدث الوحدات يعني تقريبًا **خفض الوقود لكل ميغاواط·ساعة بنحو 40%**، ومن ثمّ خفض CO_2 لكل ميغاواط·ساعة بنفس النسبة تقريبًا. هذا أثر بيئي هائل لم يتطلب أي معدة معالجة انبعاثات على الإطلاق.

وينبغي التمييز بوضوح بين المسارين: SCR يعالج NOx ولا يمسّ CO_2 إطلاقًا؛ ورفع الكفاءة يخفض شدّة CO_2 ولا يخفض تركيز NOx في العادم. مساران مستقلان لهدفين مختلفين، وكثيرًا ما يُخلط بينهما في النقاش العام.

الاتجاهات الجارية حاليًا

- حرق الهيدروجين والخلط معه **(Hydrogen Co-firing)**. معظم الشركات المصنّعة الكبرى تطرح اليوم وحدات قادرة على حرق نسب متزايدة من الهيدروجين مع الغاز الطبيعي، مع مسار معلن نحو حرق هيدروجين كامل. والتحدي الهندسي حقيقي وليس تسويقيًا: الهيدروجين له **سرعة لهب أعلى بكثير** من الميثان، وهذا يزيد خطر **Flashback** في غرف الخلط المسبق بشدة، ويغيّر ديناميكيات الاحتراق كليًا، ويرفع حرارة اللهب فيرفع NOx — أي أن حل مشكلة CO_2 بالهيدروجين يعيد فتح ملف NOx من جديد. وهذا يقتضي حاقنات ومسارات خلط بتصميم مختلف. كما أن الهيدروجين يغيّر كل حسابات مؤشر Wobbe وأنظمة كشف التسرب وفلسفة التهوية بالحجرة (راجع 6.7).
- احتجاز الكربون **(Post-Combustion Carbon Capture)**. غسل CO_2 من العادم بمذيبات أمينية بعد الاحتراق. تقنية ناضجة كيميائيًا لكنها مكلفة طاقيًا، لأن تجديد المذيب يستهلك بخارًا كان سيولّد كهرباء — أي أنك تدفع من كفاءة المحطة.
- **التشغيل المرن كخدمة بيئية.** مع انتشار الطاقات المتجددة المتقطّعة، صار دور التوربين الغازي كثيرًا هو **موازنة الشبكة**: يبدأ بسرعة ويغيّر حمله بسرعة ليغطي انقطاع الشمس والرياح. ومن هذه الزاوية، فإن قدرة التوربين على البدء السريع والتحميل السريع هي ما **يمكّن** دخول المتجددات إلى الشبكة أصلًا. لكن هذا يفرض تحديًا بيئيًا معاكسًا: **الانبعاثات أثناء البدء والأحمال المنخفضة مرتفعة** (لأن الوحدة تعمل عندها بأوضاع احتراق غير مُحسَّنة للانبعاثات)، وكثرة البدء تعني كثرة هذه الفترات. ولهذا صار خفض انبعاثات البدء وتحسين الحد الأدنى للتحميل البيئي **(Minimum Emissions Compliant Load)** هدفًا تصميميًا معلنًا في الوحدات الحديثة.

22.12 القياس المستمر: CEMS

لم يعد كافيًا أن تمتلك غرفة احتراق جيدة و.SCR **القياس نفسه صار جزءًا من منظومة الالتزام البيئي**، بل هو الجزء الذي تراه الجهة المنظِّمة.

CEMS — Continuous Emissions Monitoring System

منظومة قياس مستمر تُركَّب على المدخنة، تقيس عادةً:

المقاس	لماذا يُقاس
NOx	الملوّث المُنظَّم الرئيسي
CO	ملوّث مُنظَّم ومؤشر على اكتمال الاحتراق
O_2	ليس ملوّثًا — لكنه **ضروري لتصحيح القراءات**
CO_2	للإبلاغ عن الكربون وحساب التدفق
SO_2 وغيرها	حسب الوقود والتطبيق واللوائح

لماذا نقيس الأكسجين؟ نقطة يخطئ فيها كثيرون

هذه من أكثر النقاط التي يُساء فهمها في هذا المجال. إذا قست NOx بجزء بالمليون فقط، يمكنك أن تخفض الرقم **دون أن تخفض أي انبعاث فعلي** — ببساطة عبر تخفيف العادم بهواء إضافي. عندها تقلّ ppm لأن الكمية نفسها موزّعة على حجم أكبر، بينما الكتلة الخارجة إلى الجو لم تتغيّر.

ولهذا تُصحَّح كل القراءات إلى **مرجع قياسي، هو 15% أكسجين** في حالة التوربينات الغازية. فتُكتب الحدود دائمًا بصيغة:

ppmvd @ 15% O_2

أي: أجزاء بالمليون، حجمًا، على أساس جاف (dry، بعد إزالة بخار الماء)، مصحّحة إلى 15% أكسجين. وأي رقم انبعاثات لا يذكر مرجعه هو رقم بلا معنى — وهذه واحدة من أكثر النقاط التي يجب أن ينتبه لها المهندس عند مقارنة عروض المصنّعين أو قراءة تقارير الأداء.

تحديات **CEMS** عمليًا: خط أخذ عينة مُسخَّن يجب ألا يتكثّف فيه شيء، ومعايرة يومية بغازات مرجعية، ونسبة توفّر بيانات (data availability) ملزِمة قانونًا في كثير من اللوائح — أي أن **تعطّل المحلل نفسه قد يُعدّ مخالفة**، حتى لو كان التوربين يعمل نظيفًا تمامًا. وهذه نقطة يفاجأ بها كثير من المهندسين أول مرة: أنت لا تُلزَم بأن تكون نظيفًا فحسب، بل بأن **تُثبت** ذلك باستمرار.

22.13 التنبؤ بدل القياس: PEMS

الخطوة التالية كانت ذكية: بدل الاعتماد على محلل فيزيائي مكلف وحسّاس ويحتاج صيانة مستمرة، لماذا لا **نحسب** الانبعاثات من متغيرات التشغيل التي نقيسها أصلًا؟

PEMS — Predictive Emissions Monitoring System

الفكرة أن الانبعاثات ليست عشوائية — هي دالة حتمية إلى حد بعيد في حالة التشغيل. فإذا عرفت الحالة، أمكنك التنبؤ بالانبعاثات. والمدخلات النموذجية:

- تدفق الوقود (Fuel Flow)
- ضغط مخرج الضاغط (Compressor Discharge Pressure)
- حرارة مخرج الضاغط (Compressor Discharge Temperature)
- درجة الحرارة المحيطة والرطوبة والضغط الجوي
- موضع ريش IGV
- الحمل (MW)
- حرارة العادم وفارقها (Spread)
- تركيبة الوقود (Wobbe Index)
- وضع الاحتراق وتقسيمات الوقود

ومن هذه البيانات يُخرج النموذج تقديرًا لحظيًا:

$NOx \approx X\ ppm \qquad CO \approx Y\ ppm$

والقيمة العملية لPEMS ليست في توفير ثمن المحلل فقط — بل في ثلاثة أمور أهم:

1. **نظام احتياطي معتمد.** كثير من اللوائح تقبل PEMS كبديل مؤقت عند تعطّل CEMS، مما يحمي نسبة توفّر البيانات ويمنع تحوّل عطل محلل إلى مخالفة.
2. **تشخيص المحلل نفسه.** إذا انحرف قياس CEMS عن تنبؤ PEMS انحرافًا كبيرًا بينما كل متغيرات التشغيل ثابتة، فالاحتمال الأرجح أن **المحلل** هو المشكلة لا التوربين. وهذا تطبيق حرفي للمبدأ الذي كررناه عبر الكتاب: تحقّق من القياس أولًا، ثم حقّق في العملية.
3. **الاستجابة الفورية.** المحلل الفيزيائي فيه زمن تأخير حقيقي — زمن سحب العينة عبر الخط، وزمن استجابة الخلية. أما PEMS فيتنبأ لحظيًا. وهذا الفارق الزمني هو بالضبط ما يفتح الباب للخطوة التالية.

22.14 المرحلة الحالية: من المراقبة إلى التنبؤ والتحسين بالذكاء الاصطناعي

هنا نصل إلى ما أراه أهم تحوّل جارٍ الآن في هذا المجال، وهو تحوّل يخصّ مهندس التحكم والأتمتة أكثر من أي أحد آخر.

الذكاء الاصطناعي في سياق الانبعاثات لن يكون «جهازًا يقيس NOx». سيكون شيئًا مختلفًا نوعيًا:

AI Emissions Optimization — التنبؤ بالانبعاثات وتحسين التشغيل قبل حدوث المشكلة.

تخيّل السيناريو التالي، وهو ليس خياليًا:

> النظام يلاحظ أن الحمل عند 82%، ودرجة الحرارة المحيطة ارتفعت إلى 39 °م، ومؤشر Wobbe للوقود تغيّر عن قيمته المعتادة، وفارق حرارة العادم بدأ يتسع تدريجيًا، وديناميكيات الاحتراق بدأت تنزاح في نطاق تردد معيّن.
>
> فيستنتج النموذج — من آلاف الساعات التشغيلية التي تعلّم منها — أن **NOx** سيتجه للارتفاع خلال

الدقائق القادمة، قبل أن يظهر ذلك على أي محلل.

ثم يعطي نظام التحكم توصية محددة: تعديل طفيف في تقسيم الوقود، أو تصحيح في جدولة IGV، أو تقديم/تأخير نقطة انتقال وضع الاحتراق.

والهدف من هذا التعديل ليس خفض NOx وحده — بل إيجاد النقطة التي تحقق في آنٍ واحد:

- NOx ضمن الحد
- CO ضمن الحد
- ثبات احتراق مقبول (ديناميكيات ضمن النطاق)
- أفضل كفاءة ممكنة عند هذا الحمل

وهي مسألة تحسين متعدد الأهداف (multi-objective optimization) بأربعة قيود متعارضة — وهذا بالضبط نوع المسائل التي تتفوق فيها نماذج التعلّم الآلي على الجداول الثابتة المُبرمَجة مسبقًا. فالجدول المُبرمَج يمثّل حالة الوحدة يوم المعايرة؛ أما النموذج المتعلّم فيمكنه أن يتتبّع تدهور الضاغط، واتساخ الفلاتر، وتغيّر الوقود، وتقادم الحاقنات.

وهذا هو التحوّل الجوهري:

من: Emission Monitoring (اقرأ ← تجاوزت الحد ← تصرّف)

إلى: Emission Prediction (توقّع أنك ستتجاوز)

إلى: Emission Optimization (عدّل الآن حتى لا تتجاوز أصلًا)

التوربين لم يعد ينتظر أن يتجاوز NOx الحد المسموح ثم يتدخل؛ النظام يتنبأ بأن الانبعاثات تتجه للارتفاع، ويعدّل التشغيل قبل الوصول إلى الحد. وهذا انتقال من ردّ الفعل إلى الاستباق — وهو موضوع الفصل التالي بأكمله.

تحذير ضروري قبل الانتقال: كل ما ورد في هذه الفقرة يقع في نطاق **التحسين والمراقبة**، لا في نطاق الحماية. توصية الذكاء الاصطناعي تذهب إلى منظومة التحكم التي تقرر وتنفّذ ضمن حدود مبرمجة ومحققة — ولا تذهب أبدًا إلى صمام قطع أو منطق حماية. هذا التمييز جوهري وسنفصّله في الفصل الثالث والعشرين.

22.15 من الميدان: مشاكل شائعة في منظومة الانبعاثات

بنفس منهج الفصل الثالث عشر، هذه أعراض متكررة في وحدات DLN وأنظمة الانبعاثات، بترتيب الاحتمال:

العَرَض	الأسباب المرجحة	الفحص الأول	ملاحظة تشخيصية
NOx مرتفع فجأة والحمل ثابت	تركيبة وقود تغيّرت / انحراف تقسيم وقود / حسّاس حرارة محيط منحرف	قارن تنبؤ PEMS بقراءة CEMS	إن اتفقا فالمشكلة حقيقية، وإن اختلفا فالمحلل مشتبه به أولًا
CO مرتفع عند الأحمال المنخفضة	سلوك طبيعي للاحتراق الفقير، أو حدّ تحميل بيئي غير محترم	راجع منحنى CO مقابل الحمل التصميمي	كثيرًا ما يكون العلاج تشغيليًا لا صيانيًا: عدم النزول تحت الحد الأدنى البيئي
قطع متكرر عند حمل بعينه	نقطة انتقال وضع احتراق	حدد ما إذا كان الحمل يوافق نقطة انتقال	افحص اتساق صمامات التقسيم وسرعة استجابتها
ديناميكيات احتراق مرتفعة	خليط عند حافة الفقر / حاقن مسدود أو متآكل / تغيّر وقود	تتبّع النطاق الترددي مقابل الحمل والمحيط	لا تؤجل — الديناميكيات تكسر الأجزاء خلال دقائق لا أيام
فارق حرارة عادم متسع مع انبعاثات مرتفعة	حاقن أو مسار وقود غير متجانس	راجع نمط الفارق حول المحيط (راجع 13.10)	النمط الزاوي يدل على غرفة/حاقن بعينه
انزلاق أمونيا مرتفع	حقن زائد / محفّز متدهور / توزيع غير متجانس	راجع نسبة الحقن مقابل NOx الداخل	محفّز متدهور يحتاج حقنًا أكبر لنفس النتيجة — وهذا مؤشر عمره
كفاءة SCR تتدهور تدريجيًا	تسمّم أو تلبّد المحفّز	اختبار عينة محفّز	تتبّع الضغط الخلفي أيضًا — الانسداد يرافق التدهور غالبًا
ضغط خلفي متزايد بالمدخنة	انسداد محفّز / ترسبات أملاح أمونيوم	قارن بمنحنى الضغط الأساسي المسجّل عند التسليم	خصم مباشر من القدرة والكفاءة
CEMS يقرأ صفرًا أو ثابتًا	خط عينة مسدود / مضخة عينة / معايرة	تحقّق من تدفق العينة أولًا	قراءة "ثابتة تمامًا" مؤشر شبه مؤكد على قياس ميت لا على عملية مستقرة
انبعاثات بدء مرتفعة	سلوك متأصل بالبدء	راجع زمن البقاء في الأوضاع الانتقالية	تحسين تسلسل البدء يقلّل مدة التعرض

والمبدأ الذي يحكم هذا الجدول كله هو المبدأ نفسه الذي بُني عليه الكتاب: تحقّق من القياس أولًا، ثم حقّق في العملية. فأكثر من نصف «مشاكل الانبعاثات» التي استُدعي لها المهندسون كانت مشاكل محلل أو خط عينة أو معايرة، لا مشاكل احتراق.

22.16 خلاصة الفصل

رحلة أربعة عقود يمكن اختصارها في سلسلة واحدة، وكل سهم فيها يمثّل سؤالًا هندسيًا وُلد من قصور سابقه:

Diffusion Flame → مرتفع NOx، ثبات ممتاز

↓

Water Injection → خفض حرارة اللهب بالماء

↓

Steam Injection → خفض حرارة اللهب بالبخار المتاح

↓

DLN / DLE → منع تكوّن NOx من الأساس

↓

SCR → معالجة NOx المتبقي في العادم

↓

CO Catalyst → معالجة CO الناتج عن الفقر الشديد

↓

Combined Cycle → وقود أقل لكل ميغاواط ⇒ CO_2 أقل

↓

CEMS / PEMS → قياس وتنبؤ مستمران

↓

AI + Advanced Control → Predict → Optimize → Control

وثلاث أفكار أرجو أن تبقى بعد إغلاق هذا الفصل:

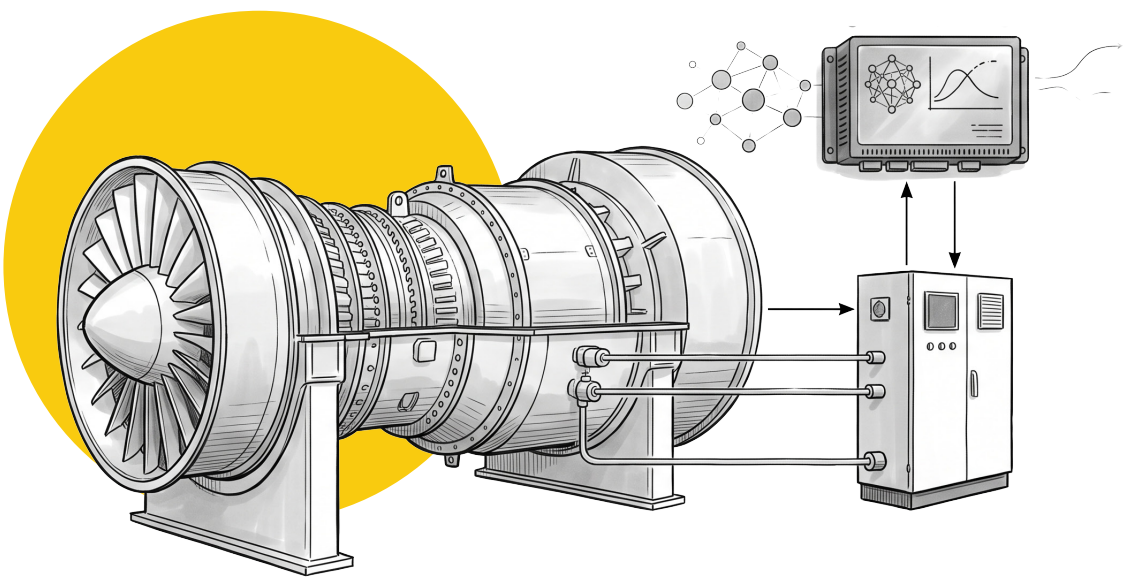
الأولى: كل تقنية في هذه السلسلة لم تُلغِ ما قبلها، بل أضافت إليها طبقة. فوحدة حديثة تجمع اليوم DLN وSCR ومحفّز CO وCEMS معًا — والمعرفة بها كلها ضرورية لمن يشغّلها.

الثانية: كل خطوة نحو انبعاثات أقل اشتُريت بتعقيد أكبر في منظومة التحكم. الاحتراق الانتشاري لم يكن يحتاج إلى تقسيمات وقود ولا مراقبة ديناميكيات ولا أوضاع احتراق متعددة. أما وحدة DLN حديثة فمنظومة تحكمها في الاحتراق وحدها أعقد من منظومة تحكم توربين كامل قبل ثلاثين عامًا. **وهذا التعقيد هو مجال عمل مهندس التحكم، وهو ما يجعل هذا الفصل جزءًا من هذا الكتاب لا ملحقًا فيه.**

والثالثة: الحد البيئي اليوم ليس رقمًا في تقرير سنوي — إنه قيد لحظي يعمل داخل منطق المتحكم، جنبًا إلى جنب مع حدّ السرعة وحدّ الحرارة. ومن يفهم هذا يفهم لماذا صار «ضبط الاحتراق» مهنة قائمة بذاتها.

الفصل الثالث والعشرون:

الذكاء الاصطناعي ومستقبل التحكم بالتوربينات الغازية



23.1 هل بدأ هذا فعلًا، أم أنه حديث مستقبلي؟

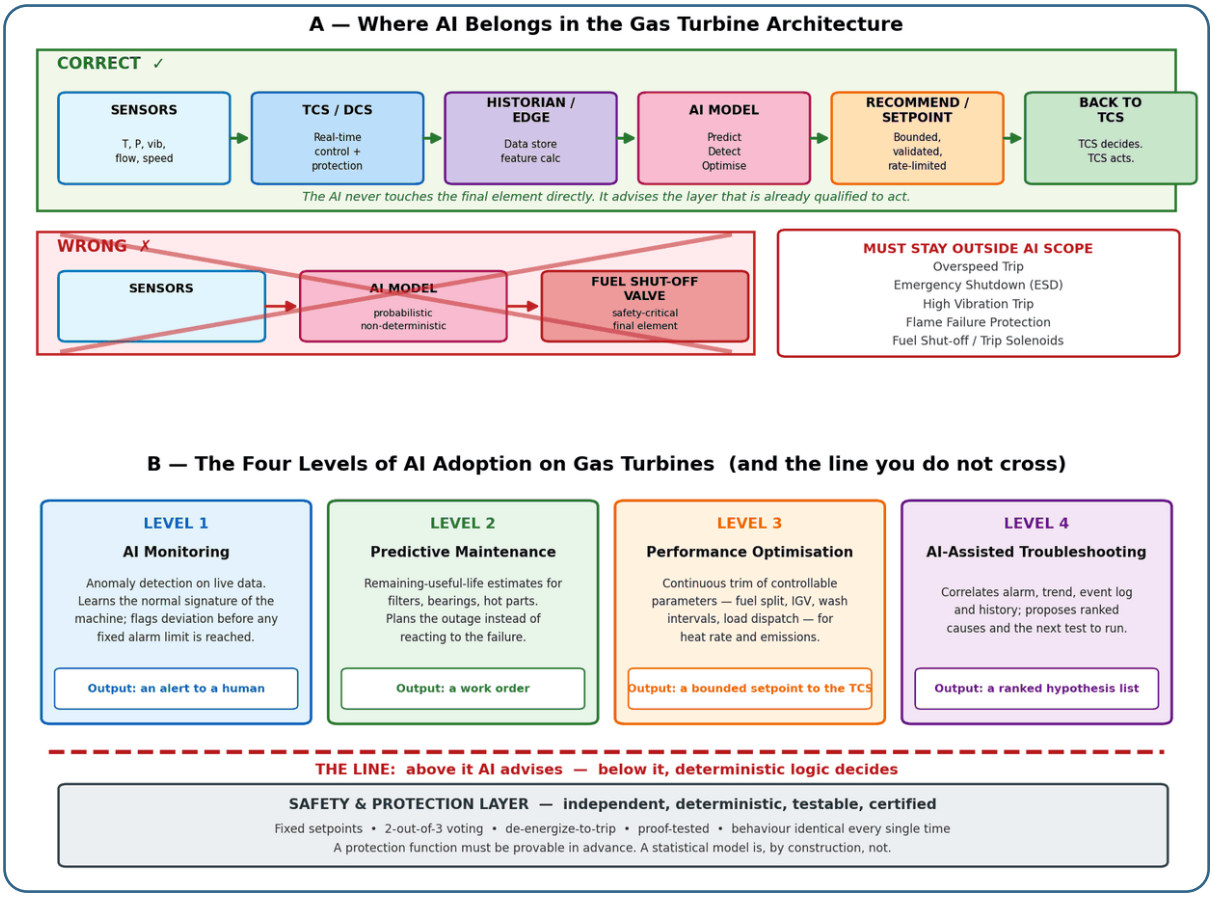
نعم، بدأ فعلًا — وليس مجرد فكرة مستقبلية. هناك اليوم وحدات عاملة في العالم يعمل عليها الذكاء الاصطناعي بشكل يومي: يراقب، ويتنبأ، ويقترح تعديلات على التشغيل. ولم يعد السؤال «هل سيدخل الذكاء الاصطناعي إلى محطات التوربينات؟» بل «إلى أي عمق دخل، وأين يجب أن يتوقف؟»

وهذا السؤال الثاني هو الأهم، ولهذا نبدأ به الفصل قبل أي شيء آخر.

التمييز الذي يجب أن يحكم كل ما يأتي بعده هو التمييز بين:

المجال	ما يفعله الذكاء الاصطناعي	مقبول اليوم؟
المراقبة (Monitoring)	يلاحظ الشذوذ، ينبّه الإنسان	نعم، وبثقة
الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance)	يقدّر العمر المتبقي، يخطط للعمرة	نعم، وبثقة
تحسين الأداء (Optimization)	يقترح نقاط تشغيل أفضل ضمن حدود آمنة	نعم، بضوابط
التشخيص (Troubleshooting)	يرتّب الأسباب المحتملة، يقترح الفحص التالي	نعم، كأداة مساعدة
التحكم الحرج والحماية (Safety & Protection)	يقرر القطع، يغلق صمام الوقود	**لا**

الخط الفاصل ليس تحفّظًا مؤقتًا سيزول مع نضوج التقنية. إنه فرق بنيوي في طبيعة النظامين: **منظومة الحماية يجب أن تكون قابلة للإثبات مسبقًا، ونموذج الذكاء الاصطناعي — بحكم بنائه — احتمالي**. سنعود لهذه النقطة بالتفصيل في 23.14، لكنها يجب أن تكون حاضرة وأنت تقرأ كل سطر في هذا الفصل.



الشكل 23.1 — أعلى: موقع الذكاء الاصطناعي الصحيح بمعمارية التوربين — المسار السليم يمرّ عبر نظام التحكم دائمًا. أسفل: مستويات التبنّي الأربعة والخط الذي لا يُتجاوَز.

المعمارية الصحيحة

هذه هي السلسلة السليمة:

Sensors → TCS / DCS → Historian / Edge Computer → AI Model
→ Optimization Recommendation / Setpoint → TCS → Final Element

و**Historian** هنا هو **مخزّن البيانات التاريخية**: قاعدة بيانات زمنية تحفظ قراءات التشغيل لحظةً بلحظة، ومنها يتعلّم النموذج ويُعاد تدريبه (23.10).

وهذه هي السلسلة المرفوضة:

Sensors → AI → Fuel Shutoff Valve ✗

الفرق ليس تفصيلًا معماريًا. في المسار الأول، **نظام التحكم يبقى هو صاحب القرار والفعل**؛ الذكاء الاصطناعي طرف يقدّم اقتراحًا، ونظام التحكم يقبله أو يرفضه ضمن حدود مبرمجة ومحققة ومختبرة. وفي المسار الثاني، نضع قرارًا لا رجعة فيه في يد نموذج لا يمكن إثبات سلوكه في كل الحالات مسبقًا.

والوظائف التي يجب أن تبقى خارج نطاق الذكاء الاصطناعي بالكامل، ضمن معمارية حماية مستقلة ومحددة التصميم:

- Overspeed Trip
- Emergency Shutdown (ESD)
- High Vibration Trip
- Flame Failure Protection
- Fuel Shutoff / Trip Solenoids

23.2 الذكاء الاصطناعي مقابل التحكم التقليدي: ليسا بديلين

من أكثر الأخطاء شيوعًا في هذا النقاش تصوّر أن الذكاء الاصطناعي «بديل متطور» لPID والمنطق التقليدي. هذا فهم خاطئ يقود إلى قرارات هندسية سيئة.

	التحكم التقليدي (PID، منطق، تسلسلات)	الذكاء الاصطناعي / تعلّم الآلة
الأساس	نموذج فيزيائي أو معادلة مصمَّمة	أنماط مستخلَصة من بيانات
السلوك	حتمي — نفس الدخل يعطي نفس الخرج دائمًا	احتمالي — يعطي الأرجح لا المؤكد
الشفافية	يمكن تتبّع كل قرار خطوة بخطوة	صندوق أسود جزئيًا أو كليًا
الاختبار	يمكن إثبات السلوك في كل الحالات الحدية	يمكن اختباره على بيانات، لا إثباته لكل حالة
مقياس الزمن	ميلي ثانية إلى ثوانٍ	ثوانٍ إلى ساعات إلى أيام
يقوى في	الحلقة المغلقة السريعة، الحماية، التسلسل	التعرّف على أنماط في بيانات كثيرة ومتعددة الأبعاد
يضعف في	التعامل مع تفاعلات معقدة غير مُنمذَجة	ضمان السلوك في حالة لم يرها من قبل

النتيجة العملية: ليسا متنافسين — بل طبقتان متكاملتان. الذكاء الاصطناعي يعمل على مقياس زمني أبطأ وأوسع نطاقًا (دقائق وساعات وأيام، وعشرات المتغيرات معًا)، ويرسل نتيجته إلى طبقة التحكم التي تعمل على مقياس الميلي ثانية وتتحمل مسؤولية الفعل.

وهذه بنية مألوفة لك أصلًا: إنها نفس فلسفة التحكم المتتالي **(Cascade)** التي درسناها في 20.6 — حلقة خارجية بطيئة وذكية تحدد نقطة الضبط، وحلقة داخلية سريعة وموثوقة تنفّذها. الذكاء الاصطناعي هو ببساطة **حلقة خارجية جديدة، أعلى مستوى وأوسع نظرة**، فوق كل ما بنيناه في الفصول السابقة. من يفهم Cascade يفهم موقع الذكاء الاصطناعي فورًا.

23.3 تعلّم الآلة: ما الذي يناسب التوربين فعلًا؟

ليس كل ما يُسمّى ذكاءً اصطناعيًا مناسبًا لتطبيقات التوربينات. هذه الأنواع الثلاثة الرئيسية وما يقابلها من استخدامات:

1) التعلّم المُوجَّه **(Supervised Learning)**. تُعطي النموذج أمثلة مصحوبة بالإجابة الصحيحة: هذه البيانات التشغيلية أنتجت هذا المستوى من NOx، وهذه أدت إلى ذلك العطل. فيتعلّم العلاقة.

- الاستخدام النموذجي: PEMS (توقّع NOx وCO)، توقّع الأداء المتوقع، تقدير القدرة المتاحة عند ظروف محيطة معينة، تصنيف نوع عطل من بصمته.
- المتطلَّب: بيانات تاريخية موسومة — وهذا هو القيد الأصعب عمليًا، فبيانات الأعطال نادرة بطبيعتها (وهذه نعمة تشغيلية ونقمة على تدريب النماذج).

2) التعلّم غير المُوجَّه **(Unsupervised Learning)**. لا تعطي النموذج إجابات، بل بيانات فقط، فيتعلّم بنفسه ما هو «الوضع الطبيعي» لهذه الوحدة، ثم يشير إلى ما يخرج عنه.

- الاستخدام النموذجي: كشف الشذوذ **(Anomaly Detection)** — وهو أنجح تطبيق للذكاء الاصطناعي في التوربينات حتى اليوم، لسبب بسيط: لا يحتاج بيانات أعطال. يكفيه أن يرى الوحدة وهي سليمة.
- الميزة الحاسمة: يلتقط «شيء ما تغيّر» **قبل** أن يتجاوز أي متغيّر منفرد حدّ إنذاره. وهذا بالضبط ما لا يستطيعه نظام الإنذارات التقليدي.

3) التعلّم المعزَّز **(Reinforcement Learning)**. يتعلّم النموذج بالتجربة والخطأ عبر مكافأة وعقوبة.

- الوضع الحالي: واعد نظريًا في التحسين، لكن استخدامه على وحدة حقيقية محدود جدًا لسبب بديهي — **"التجربة والخطأ" على توربين بقيمة عشرات الملايين ليس خيارًا**. يُستخدم عمليًا على **توأم رقمي** (محاكاة) ثم تُنقل السياسة المُتعلَّمة إلى الوحدة الحقيقية ضمن حدود ضيقة ومحروسة.

نقطة يجب أن يفهمها كل من يقيّم عرضًا لنظام ذكاء اصطناعي: جودة النموذج تساوي جودة البيانات، لا أكثر. وبيانات التوربينات في كثير من المحطات تعاني من مشاكل حقيقية: طوابع زمنية غير متزامنة بين الأنظمة (راجع 12.14)، وقيم مفقودة عند انقطاعات الاتصال، وحسّاسات منحرفة لم تُعايَر، وأحداث مهمة غير موثّقة في السجلات، وتغييرات صيانة لم تُسجَّل. **نموذج مدرَّب على بيانات فيها حسّاس منحرف سيتعلّم الانحراف باعتباره الوضع الطبيعي.** ولذلك فإن أول خطوة في أي مشروع ذكاء اصطناعي ناجح ليست اختيار الخوارزمية — بل تنظيف البيانات وضمان جودتها.

23.4 التوأم الرقمي (Digital Twin)

التوأم الرقمي نموذج حيّ للوحدة يعمل بالتوازي مع الآلة الحقيقية، ويتغذى بنفس البيانات لحظيًا، فيحسب ما **ينبغي** أن يكون عليه سلوك الوحدة الآن.

والقيمة كلها في المقارنة:

الفارق = السلوك الفعلي − السلوك المتوقّع من التوأم

- إن كان الفارق صفرًا تقريبًا: الوحدة سليمة وتتصرف كما ينبغي.
- إن اتسع الفارق تدريجيًا: هناك تدهور — اتساخ ضاغط، تآكل حاقن، تسرّب داخلي، انسداد فلاتر، تدهور محفّز.
- إن قفز الفارق فجأة: تغيّر شيء مفاجئ — أو أن حسّاسًا يكذب.

وثلاثة مستويات للتوأم الرقمي تختلف كثيرًا في التكلفة والقدرة:

المستوى	الأساس	يجيب عن
فيزيائي (Physics-based)	معادلات ديناميكا حرارية وموائع	"ما الأداء المتوقع عند هذه الظروف؟"
قائم على البيانات (Data-driven)	نموذج مُدرَّب على تاريخ هذه الوحدة	"كيف تتصرف هذه الوحدة تحديدًا عادةً؟"
هجين (Hybrid)	فيزياء + تعلّم آلي لتصحيح الفوارق	الأفضل عمليًا: فيزياء تضمن المعقولية، وبيانات تلتقط خصوصية الوحدة

واستخدامات التوأم الرقمي أوسع من المراقبة:

- **تدريب نماذج التعلّم المعزَّز** بأمان قبل الاقتراب من الوحدة الحقيقية.
- **اختبار سيناريوهات «ماذا لو»**: ماذا لو زدت الحمل 10%؟ ماذا لو أجّلت غسيل الضاغط أسبوعين؟ ماذا لو انخفضت حرارة الجو 10 درجات؟
- **اختبار تعديلات المنطق** قبل تنزيلها فعليًا (وهذا امتداد منطقي لاختبار FAT الذي وصفناه في الفصل السابع عشر).
- **تشخيص الحسّاسات**: إذا قال التوأم إن ضغط مخرج الضاغط يجب أن يكون كذا، والقراءة تقول غير ذلك بينما كل المتغيرات الأخرى متسقة مع التوأم — فالمرجّح أن الحسّاس هو المشكلة.

23.5 المراقبة الذكية للحالة وكشف الشذوذ

هذا هو المجال الذي يقدّم فيه الذكاء الاصطناعي قيمة واضحة ومثبتة اليوم، ويستحق أن نفهم بدقة **لماذا** يتفوق على ما لدينا.

ما تفعله منظومة الإنذارات التقليدية: تراقب كل متغيّر **على حدة** مقابل حدّ ثابت. حرارة المحمل تجاوزت 95 °م ← إنذار. الاهتزاز تجاوز 7.1 mm/s ← إنذار.

وهذا يعمل جيدًا، لكن فيه ثغرتان بنيويتان:

الثغرة الأولى — الحد الثابت متأخر بطبيعته. حين تصل حرارة المحمل إلى 95 °م، التدهور بدأ قبل ذلك بكثير. الحد صُمم ليحمي، لا ليتنبأ.

الثغرة الثانية، وهي الأخطر — العلاقات بين المتغيرات لا تُراقَب إطلاقًا. ولنوضحها بمثال ملموس:

> حرارة المحمل 78 °م — طبيعية تمامًا، بعيدة عن أي حد. ضغط الزيت 3.1 bar — طبيعي. الحمل 65% — طبيعي. حرارة الجو 31 °م — طبيعية.
>
> **لا إنذار واحد. كل شيء أخضر.**
>
> لكن النموذج الذي رأى هذه الوحدة تعمل ثلاث سنوات يعرف شيئًا لا يعرفه أي حدّ ثابت: أن هذه الوحدة **عند هذا الحمل وهذه الحرارة المحيطة وهذا الضغط تحديدًا** كانت حرارة محملها دائمًا 71–73 °م. أما 78 فهي انحراف حقيقي بمقياس تاريخ الوحدة نفسها.

هذا هو الفرق الجوهري: **الحد الثابت يقارنك بجدول ثابت، ونموذج الشذوذ يقارنك بنفسك.**

ما الذي يمكن أن يلتقطه كشف الشذوذ مبكرًا؟

- تدهور تدريجي في أداء الضاغط قبل ظهوره في أرقام الأداء الإجمالية.
- بداية اختلال محاذاة أو خلل توازن قبل تجاوز حد الاهتزاز.
- تسرب داخلي في صمام لا يظهر إلا كتغيّر طفيف في العلاقة بين الأمر والموضع والعملية.
- تدهور حسّاس يبدأ بضجيج أو انحراف طفيف قبل أن يفشل تمامًا.
- انسداد تدريجي في فلتر الهواء يُقرأ من العلاقة بين فقد الضغط والتدفق.
- بداية اختلال في توزيع الوقود يظهر كتغيّر في نمط فارق حرارة العادم قبل تجاوز حده.

التحدي الحقيقي في هذه التقنية ليس تقنيًا — إنه إداري: الإنذارات الكاذبة. نموذج شديد الحساسية يولّد تنبيهات كثيرة، فيتجاهلها المشغّلون بعد أسبوعين، فيصبح النظام كله عديم القيمة — بل ضارًا، لأنه يضيف ضجيجًا إلى بيئة مثقلة بالإنذارات أصلًا. **وهذه بالضبط نفس مشكلة «فيضان الإنذارات» التي عالجناها في 12.14، بلباس جديد.** والعلاج نفسه: كل تنبيه يجب أن يكون قابلًا للتصرّف (actionable)، وأن يقول للمشغّل ما الذي يفعله الآن، لا أن يقول "شيء ما غريب".

23.6 الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance)

تطوّر فلسفة الصيانة في هذه الصناعة يمكن اختصاره في أربع مراحل:

النهج	المبدأ	الثمن
تصحيحية (Corrective)	نصلح بعد العطل	توقف غير مخطط، أضرار تابعة
وقائية (Preventive)	نصلح حسب الساعات أو الأيام	نستبدل أجزاءً سليمة، ونفاجأ بأعطال قبل موعدها
حسب الحالة (Condition-Based)	نصلح حين تشير المؤشرات	يحتاج مؤشرات جيدة وقراءة صحيحة لها
تنبؤية (Predictive)	نصلح **قبل** أن تشير المؤشرات، بناءً على توقّع	يحتاج بيانات وتاريخًا ونماذج موثوقة

والذكاء الاصطناعي هو ما يجعل المرحلة الرابعة ممكنة عمليًا. فبدل «استبدل الفلتر كل 4000 ساعة»، يصبح السؤال: **"كم تبقّى لهذا الفلتر تحديدًا، بالنظر إلى جودة الهواء الفعلية في هذا الموقع، ونمط التحميل الفعلي لهذه الوحدة، وموسم الغبار الحالي؟"**

وهذا يغيّر معادلة التخطيط جذريًا:

- تخطيط قطع الغيار قبل الحاجة بأسابيع بدل الطلب الطارئ.
- تجميع أعمال متعددة في نافذة توقف واحدة بدل توقفات متفرقة.
- تجنّب استبدال أجزاء ما زال فيها عمر مفيد حقيقي.
- والأهم: **تحويل التوقف غير المخطط إلى توقف مخطط** — وهذا وحده يبرر المشروع اقتصاديًا في معظم الحالات.

والتطبيقات الأنضج اليوم: تقدير العمر المتبقي لفلاتر الهواء، وتتبّع تدهور أداء الضاغط وتحديد التوقيت الأمثل للغسيل بالماء (متى تعوّض تكلفة التوقف بمكسب الأداء؟)، وتقدير استهلاك عمر أجزاء المسار الساخن بناءً على التاريخ الحراري وعدد البدايات الفعلي لا الاسمي (راجع 8.2)، ومراقبة تدهور الزيت (راجع 8.7)، والتنبؤ بأعطال المحامل من تحليل بصمة الاهتزاز.

23.7 التحسين: احتراق، وقود، وأداء

1) تحسين الاحتراق **(Combustion Optimization)**. تحدثنا في 22.14 عن الفكرة: نموذج يتنبأ بـNOx وCO والديناميكيات من حالة التشغيل، ويبحث عن نقطة التشغيل التي تحقق كل القيود معًا. والقيمة تظهر خصوصًا في الحالات التي لا يغطيها الجدول الثابت جيدًا: تغيّر تركيبة الوقود، وأحوال جوية متطرفة، وتدهور تدريجي في الحاقنات، والتشغيل عند أحمال جزئية.

2) تحسين الوقود **(Fuel Optimization)**. في محطة متعددة الوحدات، السؤال ليس «كيف أشغّل هذه الوحدة بأفضل كفاءة؟» بل **"كيف أوزّع الحمل المطلوب على الوحدات المتاحة بأقل استهلاك وقود إجمالي؟"** — وهي مسألة تحسين حقيقية، لأن كل وحدة لها منحنى كفاءة مختلف عند كل حمل، وحالة تدهور مختلفة، وقيود انبعاثات مختلفة، وربما وقود مختلف. والتوزيع الأمثل ليس بديهيًا: أحيانًا تشغيل وحدتين عند 70% أوفر من ثلاث عند 47%، وأحيانًا العكس تمامًا. وفرق نصف بالمئة في الكفاءة على مستوى محطة كبيرة يعني ملايين سنويًا.

3) تحسين الأداء **(Performance Optimization)**. يشمل توقيت غسيل الضاغط الأمثل، وإدارة تبريد هواء المدخل حسب الظروف والأسعار (راجع 25.8 و25.9)، وتقليل زمن البدء مع البقاء ضمن حدود الإجهاد الحراري، وتحسين سلوك الوحدة أثناء تغيّر الحمل.

قاعدة تصميمية جوهرية لأي حلقة تحسين بالذكاء الاصطناعي: التوصية يجب أن تكون محدودة النطاق **(bounded)** ومحدودة المعدّل **(rate-limited)**. أي أن النظام لا يستطيع أن يطلب تغييرًا يتجاوز نسبة صغيرة محددة من القيمة الحالية، ولا أن يغيّر أسرع من معدل معيّن، ولا أن يخرج عن نطاق مطلق مبرمج في نظام التحكم. **ونظام التحكم — لا الذكاء الاصطناعي — هو من يفرض هذه الحدود.** فحتى لو أخطأ النموذج تمامًا أو تعرّض لبيانات مضللة، يبقى أثره محصورًا في نطاق آمن مصمَّم سلفًا. هذا مبدأ «الفشل الآمن» نفسه الذي بنينا عليه الفصل التاسع عشر، مطبَّقًا على طبقة جديدة.

23.8 التشخيص المُعان بالذكاء الاصطناعي

هذا التطبيق قريب جدًا من روح الفصل الثالث عشر والفصل الحادي والعشرين من هذا الكتاب.

المشكلة التي يحلّها: عند حدث قطع، تجد أمامك سجل إنذارات فيه عشرات الأسطر خلال ثوانٍ، واتجاهات زمنية لعشرات المتغيرات، وسجل أحداث، وتاريخ صيانة، وربما وحدة شقيقة تصرّفت بشكل مختلف. وترتيب هذا كله يدويًا يستغرق ساعات — والوحدة متوقفة.

ما يفعله النظام الذكي: يربط بين هذه المصادر، ويقارن البصمة الحالية بأحداث سابقة مشابهة (في هذه الوحدة وفي أسطول الوحدات المماثلة إن توفر)، ويخرج بـ:

- ترتيب الأسباب المحتملة حسب الاحتمال، مع الأدلة الداعمة لكل احتمال.
- **الفحص التالي الأعلى قيمة تشخيصية** — أي الفحص الذي يفرّق بين أعلى احتمالين، وهو بالضبط منطق «التنصيف» الذي شرحناه في 19.5.
- الإشارة إلى ما هو غير معتاد في هذا الحدث مقارنة بالأحداث المشابهة.

وهنا يجب أن نكون دقيقين وصادقين: هذا **لا يستبدل** المهندس، ولسبب جوهري. النظام يرى البيانات المسجّلة فقط. لا يرى الصوت الغريب الذي سمعته قرب الحجرة، ولا الرائحة، ولا أن أعمالًا جرت أمس ولم تُوثَّق، ولا التسرب الصغير الذي رأيته بعينك. **والمهندس الميداني يملك قناة معلومات كاملة لا يملكها النموذج.**

الاستخدام الصحيح إذن: النظام يعطيك **قائمة مرتّبة تبدأ منها**، ويوفّر عليك ساعات الغربلة الأولية، وتبقى أنت من يقرر ويتحقق ويثبت. وهذا بالضبط ما تفعله مصفوفة التشخيص في 21.3 — فقط بشكل أسرع وأوسع نطاقًا.

23.9 الضبط الذاتي (Autonomous Tuning)

هذه هي أكثر النقاط تقدّمًا في التطبيق العملي اليوم، وتستحق دقة في الوصف لأنها بالضبط عند الحدود.

الفكرة أن يقوم النظام بضبط بارامترات التشغيل **باستمرار وتلقائيًا** بدل حملة ضبط دورية يجريها فريق متخصص كل عدة أشهر. والمنطق وراءها وجيه: الوحدة تتغيّر كل يوم — يتّسخ الضاغط، وتتقادم الحاقنات، ويتغيّر الوقود، وتتبدّل الظروف الجوية — بينما الضبط ثابت من حملة إلى أخرى. فبين حملتين، الوحدة تعمل بضبط يزداد ابتعادًا عن الأمثل.

وكيف يُطبَّق هذا عمليًا بشكل مقبول؟ الوصف الذي تطرحه جهات صناعية كبرى (مثل GE Vernova) لهذا النوع من الأنظمة دقيق ويستحق التأمل: يوصف بأنه تحكم إشرافي من المستوى الثاني **(Level 2 Supervisory Control)**، يرسل تعديلات إلى نظام التحكم بمعدل يقارب **كل ثانيتين**، مع التأكيد الصريح على أن **برمجة الحماية الحرجة للسلامة تبقى خارج نطاق الذكاء الاصطناعي**.

ولنفكّك هذا الوصف لأنه يلخّص المعمارية كلها:

- **"إشرافي" (Supervisory):** لا يتحكم مباشرة — يعدّل نقاط ضبط لطبقة التحكم التي تنفّذ.
- **"المستوى الثاني" (Level 2):** طبقة فوق التحكم الأساسي، وهي التسمية الكلاسيكية للتحكم الإشرافي في هرمية الأتمتة الصناعية.
- **"كل ثانيتين":** إيقاع بطيء نسبيًا وواعٍ — لا يتدخل في ديناميكيات الحلقة السريعة التي تعمل بالميلي ثانية، بل يزيح نقاط الضبط ببطء.
- **"الحماية خارج النطاق":** الخط الأحمر معلن صراحة في التصميم نفسه، لا كتحفّظ لاحق.

والقيمة المتحققة: كفاءة أفضل باستمرار بدل التدهور بين الحملات، وانبعاثات أقرب للحد الأمثل، وتقليل الحاجة لحملات ضبط ميدانية مكلفة، وقدرة على استيعاب تغيّر الوقود تلقائيًا.

والاحتياطات الواجبة: حدود صارمة على مدى التعديل ومعدّله، ومراقبة مستمرة لأداء النظام نفسه (من يراقب المراقب؟)، وإمكانية تعطيله فورًا والعودة إلى الضبط الثابت المعروف، وسجل كامل لكل تعديل أجراه — **فمن دون هذا السجل، ستفقد قدرتك على الإجابة عن أهم سؤال تشخيصي في هذا الكتاب: «ما الذي تغيّر؟»**

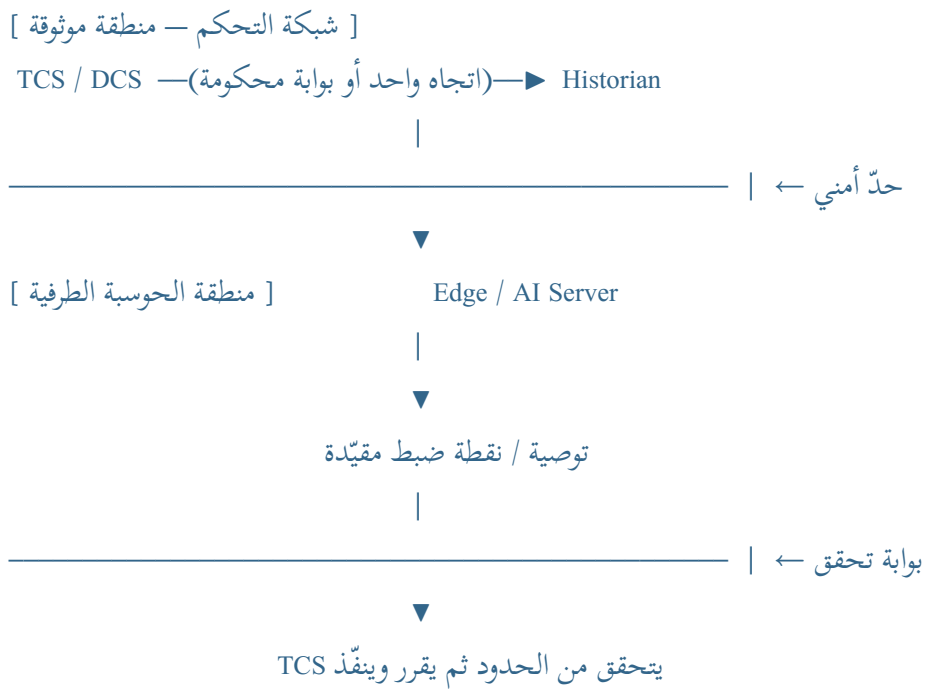
23.10 الحوسبة الطرفية (Edge AI) والتكامل مع TCS/DCS

لماذا **Edge** وليس السحابة؟ المعالجة السحابية جذابة (قدرة حسابية غير محدودة، تحديث مركزي للنماذج)، لكنها تصطدم بأربعة قيود حقيقية في بيئة المحطة:

1. زمن الوصول **(Latency)**. الرحلة إلى السحابة وإيابًا تستغرق زمنًا غير مقبول لأي تطبيق قريب من التحكم.
2. **الاتصال.** كثير من المواقع — وخصوصًا المنصات البحرية والحقول النائية التي فصّلناها في 3.4 — لا تملك اتصالًا موثوقًا أو ذا سعة كافية.
3. **الأمن.** كل مسار خارج من شبكة التحكم إلى الإنترنت سطح هجوم إضافي.
4. **ملكية البيانات.** كثير من المشغّلين لا يقبلون خروج بيانات تشغيلية تفصيلية خارج حدود الموقع.

الحل العملي المعتمد اليوم: حوسبة طرفية. حاسوب مخصص داخل المحطة (خارج شبكة التحكم الحرجة) يستقبل البيانات ويشغّل النموذج محليًا ويصدر النتائج فورًا. والسحابة — إن وُجدت — تُستخدم لتدريب النماذج وتحليل الأسطول، لا للتشغيل اللحظي.

التكامل مع نظام التحكم — النموذج المعماري السليم:



والمبادئ الحاكمة:

- **البيانات تخرج بحرية نسبية، والأوامر تدخل بصعوبة شديدة.** مسار الخروج واسع (بيانات كثيرة للتحليل)، ومسار الدخول ضيق جدًا ومحكوم (قيم قليلة، محدودة النطاق، مُتحقَّق منها).
- **نظام التحكم يتحقق دائمًا** من أن أي قيمة واردة ضمن المدى المسموح وبمعدل تغيّر مقبول، ويتجاهلها إن لم تكن كذلك — ويُنذر.
- **سلوك محدد عند فقد الذكاء الاصطناعي.** إذا توقف الحاسوب الطرفي أو انقطع الاتصال، يجب أن يعود نظام التحكم تلقائيًا إلى الضبط الثابت المعروف ويستمر التشغيل بشكل طبيعي. **إذا كانت الوحدة لا تستطيع العمل بدون الذكاء الاصطناعي، فقد أخطأت في التصميم** — أنت جعلت نظام تحسين اختياريًا مكوّنًا حرجًا.

وطبقة العتاد التي تجعل هذا كله ممكنًا — الحسّاسات الذكية وقدرتها على التشخيص الذاتي، والاتصال اللاسلكي، ومنصات المراقبة عن بعد، وترقية أنظمة التحكم القديمة لتستوعبها — عرضناها في الفصل الرابع عشر (14.1 إلى 14.4). فذاك الفصل يبني الأرضية، وهذا الفصل يقف عليها.

23.11 الأمن السيبراني في عصر الذكاء الاصطناعي

تحدثنا عن أمن أنظمة التشغيل (OT Cybersecurity) في 9.8 و11.7. ويضيف الذكاء الاصطناعي أسطح هجوم جديدة نوعيًا تستحق الذكر:

- **مسارات بيانات جديدة.** كل قناة أنشأتها لتغذية النموذج هي قناة يمكن استغلالها. والقناة التي تعيد التوصيات هي الأخطر بطبيعتها.
- تسميم البيانات **(Data Poisoning).** إن أمكن لمهاجم أن يحقن بيانات مضللة في مرحلة التدريب، فسيتعلّم النموذج سلوكًا خاطئًا — وسيبدو النظام سليمًا تمامًا حتى اللحظة التي يُستغل فيها ذلك الخلل.
- الهجمات الخصومية **(Adversarial Inputs).** مدخلات مصممة خصيصًا لدفع النموذج إلى استنتاج خاطئ.
- **سلسلة التوريد.** النماذج والمكتبات ونماذج التعلّم المُدرَّبة مسبقًا تأتي من أطراف خارجية، وقد تحمل ثغرات.
- **الوصول عن بُعد.** كثير من حلول الذكاء الاصطناعي تأتي مع اتصال دعم من المورّد — وهذا مسار يجب التحكم به بصرامة، لا مجرد الثقة بالمورّد.

والحماية الجوهرية تبقى معمارية لا برمجية: ما دام الذكاء الاصطناعي **لا يستطيع** أن يصل إلى وظائف الحماية، وما دامت توصياته **محدودة النطاق ومُتحقَّقًا منها في نظام التحكم**، فإن أسوأ ما يمكن أن يفعله مهاجم نجح في اختراق طبقة الذكاء الاصطناعي هو دفع الوحدة نحو تشغيل دون الأمثل — لا إلى حالة خطرة. **الفصل المعماري هو خط الدفاع الأخير الذي لا يعتمد على كشف الاختراق أصلًا.** وهذه ليست حجة ضد الأمن السيبراني، بل حجة لبناء المعمارية بحيث تبقى آمنة حتى لو فشل الأمن السيبراني.

23.12 الإنسان داخل الحلقة (Human-in-the-Loop)

هذا المبدأ يُذكر كثيرًا ويُفهم قليلًا. لا يعني «أن يكون هناك إنسان في الغرفة»، بل يعني تصميمًا محددًا: **القرارات ذات الأثر الكبير تمرّ عبر موافقة بشرية واعية، لا عبر ضغط زر آلي.**

ثلاثة مستويات للأتمتة، ولكل منها موضعه الصحيح:

المستوى	الوصف	مناسب لـ
Advisory	النظام يقترح، الإنسان يقرر وينفّذ	التغييرات الكبيرة، الحالات النادرة، بداية أي مشروع
Supervised Autonomy	النظام ينفّذ ضمن حدود، الإنسان يراقب ويستطيع التدخل	التحسين المستمر، الضبط الذاتي
Full Autonomy	النظام ينفّذ بلا تدخل	لا يُستخدم اليوم في التوربينات لأي وظيفة مؤثرة

والشرط الذي يجعل «الإنسان في الحلقة» حقيقيًا لا شكليًا: أن يكون الإنسان قادرًا فعلًا على فهم القرار وتقييمه. ولذلك فإن قابلية التفسير **(Explainability)** ليست ترفًا أكاديميًا — هي شرط تشغيلي. نظام يقول «خفّض الحمل 3%» بلا سبب سيُتجاهل بعد أسبوع. أما نظام يقول: «خفّض الحمل 3% لأن فارق حرارة العادم اتسع 40% خلال ساعتين، ونمط الاتساع يشبه ما سبق حالة انسداد حاقن في هذه الوحدة» — فهذا نظام يُوثق به ويُستخدم، لأنه يعطي المهندس ما يستطيع أن يتحقق منه.

خطر يجب الانتباه له: تآكل الخبرة **(Skill Erosion)**. إذا اعتمد المشغّلون على النظام سنوات، فقد تضمر قدرتهم على التشخيص اليدوي — فيأتي اليوم الذي يفشل فيه النظام، أو يواجه حالة لم يرها قط، فلا يجد أحدًا قادرًا على التصرف. **ولهذا يبقى التدريب على الأساسيات — الأساسيات التي بُني عليها هذا الكتاب كله — ضروريًا مهما تقدّمت الأدوات.** الأداة الذكية تضاعف قدرة المهندس الكفء، ولا تصنع مهندسًا من غير كفء.

23.13 حدود الذكاء الاصطناعي: ما لا يستطيع فعله

الصدق في هذا الموضع أنفع من الحماس، وهذه الحدود حقيقية وليست مؤقتة:

1) **لا يستطيع التعامل مع ما لم يره.** النموذج مُدرَّب على تاريخ الوحدة. وأخطر الأعطال هي بطبيعتها **نادرة** — وبالتالي ممثَّلة تمثيلًا ضعيفًا أو معدومة في بيانات التدريب. وهذه مفارقة قاسية: **الحالات التي تحتاج فيها المساعدة أكثر هي بالضبط الحالات التي يكون فيها النموذج أضعف.**

2) **لا يفهم السببية، بل الارتباط.** إذا حدث أن كل أعطال محمل في هذه الوحدة صادفت شهر أغسطس، قد يربط النموذج بين الشهر والعطل — بينما السبب الحقيقي هو حرارة الجو. والنماذج تلتقط ارتباطات زائفة بسهولة، ولا تميّز السبب من المصادفة.

3) **لا يرى إلا ما هو مقيس.** لا يسمع الصوت الغريب، ولا يشمّ رائحة الاحتراق، ولا يلمس الاهتزاز، ولا يعرف بالأعمال غير الموثّقة. **والمهندس الميداني يملك قنوات إدراك كاملة خارج نطاق أي نموذج.**

4) **يتدهور بصمت.** إذا تغيّرت الظروف عن بيئة التدريب (Model Drift) — بعد عمرة كبيرة، أو تغيير وقود، أو استبدال أجزاء — يصبح النموذج أقل دقة تدريجيًا **دون أن يعلن ذلك**. ولهذا يجب مراقبة أداء النموذج نفسه وإعادة تدريبه دوريًا. النموذج معدة لها برنامج صيانة، تمامًا كالمضخة.

5) **يعطي إجابة دائمًا.** وهذه من أخطر خصائصه سلوكيًا: النموذج لا يقول «لا أعرف» إلا إذا صُمّم صراحة ليقولها. وسيعطي تنبؤًا بثقة ظاهرية حتى في حالة تقع خارج نطاق خبرته تمامًا. وتقدير عدم اليقين **(Uncertainty Quantification)** يجب أن يكون جزءًا من مخرجات أي نظام جاد — «NOx متوقع 12 ppm بثقة عالية» مختلف تمامًا عن «NOx متوقع 12 ppm، لكن هذه الحالة بعيدة عن كل ما رأيته».

6) **لا يمكن إثبات سلوكه شاملًا.** وهذه النقطة تقودنا مباشرة إلى الخط الأحمر.

23.14 الذكاء الاصطناعي ومنظومة الحماية: الخط الذي لا يُتجاوَز

عدنا إلى النقطة التي بدأنا بها، لكن الآن ومعنا ما يكفي لفهم عمقها.

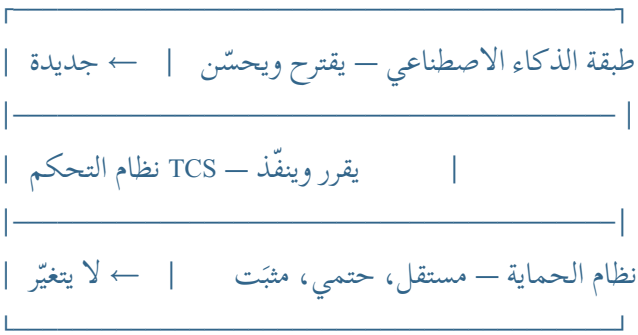
السؤال: لماذا لا يُسمح لنموذج ذكاء اصطناعي بأن يقرر قطع التوربين، حتى لو ثبت إحصائيًا أنه أدق من المنطق التقليدي؟

الجواب لا علاقة له بمستوى الذكاء ولا بنسبة الدقة. يتعلق بطبيعة ما نطلبه من منظومة الحماية:

ما تتطلبه الحماية	لماذا	هل يوفّره نموذج AI؟
حتمية (Deterministic)	نفس الحالة ← نفس الفعل، دائمًا وبلا استثناء	لا — احتمالي بطبيعته
قابلية إثبات مسبقة	يجب إثبات السلوك في كل الحالات قبل التشغيل	لا — يمكن اختباره على عينة لا إثباته على الكل
شفافية كاملة	يجب تتبّع كل قرار وتفسيره في التحقيق	جزئيًا في أحسن الأحوال
قابلية الاختبار الدوري	اختبار الإثبات (Proof Test) الدوري بنتيجة معروفة سلفًا	صعب — ما هي "النتيجة الصحيحة" لنموذج؟
بساطة كافية للتحقق	كلما قلّت التعقيدات قلّ احتمال الخطأ الخفي	لا — التعقيد هو جوهر النموذج
استقلالية	مستقلة عن نظام التحكم ومساراته	يعتمد على بيانات ومسارات مشتركة

والنقطة الجوهرية: وظيفة الحماية يجب أن تكون **قابلة للإثبات مسبقًا**. والنموذج الإحصائي — بحكم بنائه — ليس كذلك. هذا ليس عيبًا في النموذج، بل هو تعريفه: النموذج أداة استدلال من بيانات، والحماية آلية يقين مصممة. أدوات مختلفة لأغراض مختلفة.

وهذا الفصل ليس جديدًا في هذه الصناعة إطلاقًا. فنحن نطبّقه منذ عقود بين نظام التحكم ونظام الحماية نفسيهما: وحدة حماية مستقلة (VPRO أو ما يعادلها)، ومسار قطع مستقل بالأسلاك، وتصويت 2 من 3، وفلسفة إزالة التغذية للقطع (de-energize to trip) — كل هذا شرحناه في 12.12 و7.8 و7.9. **وإدخال الذكاء الاصطناعي لا يغيّر هذه الفلسفة؛ بل يضيف طبقة ثالثة فوق نظام التحكم، ويبقى نظام الحماية أسفل الجميع مستقلًا كما كان.**



اقرأ هذا المخطط من الأسفل: الطبقة السفلى هي الوحيدة التي لا يجوز المساس بها. وكل طبقة أعلى تضيف ذكاءً وتضيف معه احتمال خطأ — ولهذا كلما ارتفعت الطبقة، قلّت صلاحيتها في اتخاذ قرار لا رجعة فيه.

23.15 التوربين الذاتي: كيف سيبدو المستقبل واقعيًا؟

دون مبالغة تسويقية، هذا هو المسار الأرجح:

ما نراه فعلًا اليوم في وحدات عاملة:

- مراقبة ذكية وكشف شذوذ على نطاق أساطيل كاملة.
- صيانة تنبؤية تحوّل التوقفات غير المخططة إلى مخططة.
- تحسين إشرافي للاحتراق والأداء.
- تشخيص معان بالبيانات.
- ضبط ذاتي إشرافي ضمن حدود مغلقة.

ما يقترب خلال سنوات:

- توائم رقمية أنضج وأرخص، تصبح جزءًا قياسيًا من تسليم أي وحدة جديدة.
- نماذج على مستوى الأسطول تتعلّم من مئات الوحدات وتنقل الخبرة بينها — فعطل حدث في وحدة بأقصى الأرض يفيد وحدتك.
- مساعدين لغويين متخصصين للمشغّل يجيبون عن أسئلة تشغيلية بالرجوع إلى الوثائق والتاريخ.
- تكامل أعمق مع سوق الكهرباء: تحسين متى تشغّل ومتى تتوقف بناءً على أسعار متوقعة وتوقعات طقس وتوقعات إنتاج المتجددات.
- تحسين تسلسلات البدء لتقليل انبعاثات البدء وإجهاد الأجزاء معًا.

وما لن يتغيّر — وهذه هي النقطة التي أختم بها الفصل:

سيبقى نظام الحماية مستقلًا وحتميًا. وسيبقى القرار الحرج بيد الإنسان أو بيد منطق مثبت. وسيبقى المهندس الذي يفهم **لماذا** تتصرف الآلة كما تتصرف أثمن من أي نظام يقول له **ماذا** يفعل.

والتوربين «الذاتي» الذي يُتحدث عنه لن يكون توربينًا بلا مهندس. سيكون توربينًا يعمل معه مهندس يملك أدوات أفضل بكثير مما نملك اليوم. وهذا فرق جوهري: التقنية لم تُلغِ مهندس التوربينات في أي مرحلة من مراحل هذا الكتاب — من اللهب الانتشاري إلى DLN، ومن اللوحات الكهروميكانيكية إلى المتحكمات ثلاثية الردّية — بل رفعت في كل مرة مستوى ما يُطلب منه أن يفهمه.

23.16 خلاصة الفصل

- **نعم، بدأ الذكاء الاصطناعي فعلًا** في مراقبة التوربينات وصيانتها وتحسينها، وليس حديثًا مستقبليًا.
- الفرق بين "**AI** للمراقبة والتحسين والصيانة" و«AI مسؤول عن التحكم الحرج والحماية" هو الفرق الأهم في هذا الموضوع كله — ومن لا يميّزه سيبني نظامًا خطرًا أو سيرفض تقنية نافعة، وكلاهما خسارة.

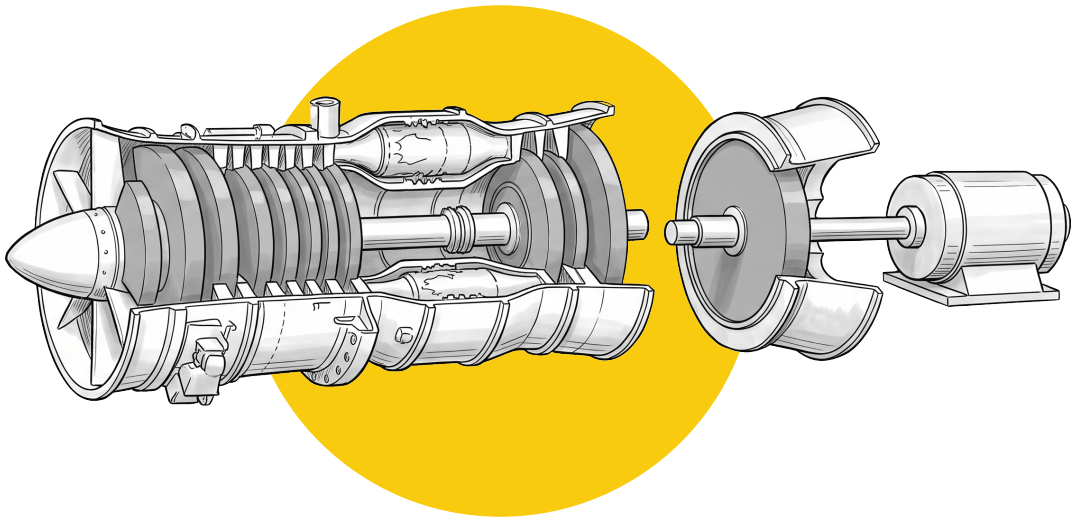
المعمارية الصحيحة: Sensors → TCS/DCS → Historian/Edge → AI Model → Recommendation/Setpoint → TCS.

والمعمارية المرفوضة: Sensors → AI → Fuel Shutoff Valve.

- **الذكاء الاصطناعي حلقة خارجية بطيئة فوق حلقات التحكم** — بنفس منطق التحكم المتتالي الذي درسناه في 20.6، لا بديلًا عنه.
- **كشف الشذوذ هو التطبيق الأنضج اليوم**، لأنه لا يحتاج بيانات أعطال ويلتقط ما تعجز عنه الحدود الثابتة: العلاقات بين المتغيرات.
- **كل توصية يجب أن تكون محدودة النطاق والمعدّل، ونظام التحكم هو من يفرض الحدود** — لا النموذج.
- **يجب أن تعمل الوحدة بشكل طبيعي تمامًا عند فقد طبقة الذكاء الاصطناعي.** إن لم تكن كذلك، فالتصميم خاطئ.
- **حدود النموذج حقيقية:** لا يتعامل مع ما لم يره، ولا يفهم السببية، ولا يرى إلا المقيس، ويتدهور بصمت، ويعطي إجابة دائمًا حتى حين يجب أن يصمت.
- **ويبقى نظام الحماية مستقلًا وحتميًا ومثبتًا — وهذا لا يتغيّر بتقدّم أي تقنية.**

الفصل الرابع والعشرون:

التوربينات المشتقة من الطيران (Aeroderivative) والآلات ثنائية العمود



24.1 لماذا يستحق هذا الموضوع فصلًا مستقلًا؟

معظم ما سبق في هذا الكتاب كُتب بلغة التوربين الصناعي الثقيل (Heavy Duty) — عمود واحد، سرعة ثابتة، كتلة ضخمة، مصمَّم للتشغيل المستمر بأحمال عالية. وهذا هو ما يقابله معظم مهندسي محطات الكهرباء.

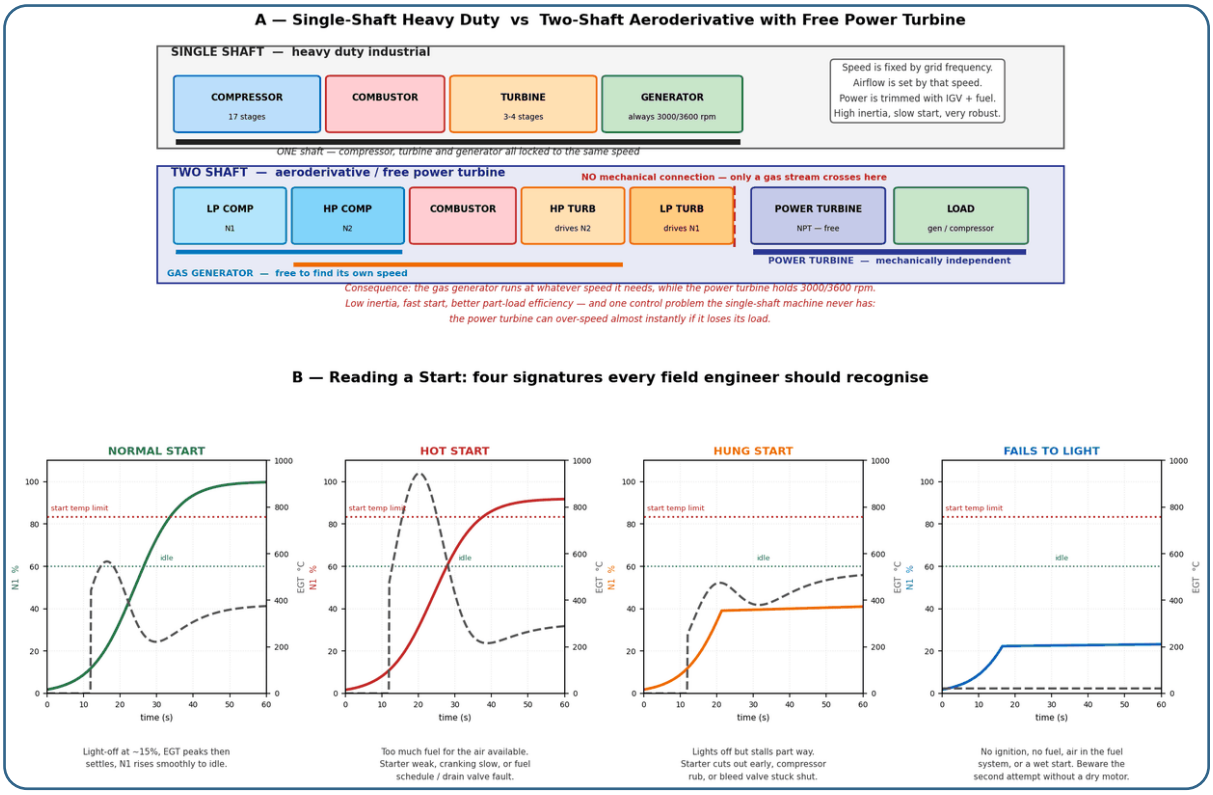
لكن في صناعة النفط والغاز تحديدًا — التي فصّلنا تطبيقاتها في الفصل الثالث (3.4) — تكثر عائلة أخرى تمامًا: التوربينات المشتقة من محركات الطيران **(Aeroderivative)**، وهي في جوهرها محركات طائرات نُزعت منها المروحة أو الفوهة النفاثة، ووُضع مكانها توربين قدرة حر **(Free Power Turbine)** يدير مولدًا أو ضاغطًا أو مضخة.

ولماذا تنتشر في هذا القطاع؟ لأن خصائصها تناسبه: بدء سريع جدًا (دقائق لا عشرات الدقائق)، وكفاءة عالية عند الأحمال الجزئية، ونسبة قدرة إلى وزن ممتازة (وهذا حاسم على منصة بحرية حيث كل طن يكلّف)، وإمكانية استبدال المحرك كاملًا في أيام بدل عمرة موقعية تستغرق أسابيع.

وهي تختلف عن التوربين الثقيل ليس في الحجم فقط، بل في المنطق نفسه:

	صناعي ثقيل (Heavy Duty)	مشتق من الطيران (Aeroderivative)
الأعمدة	عمود واحد غالبًا	عمودان أو ثلاثة
سرعة الضاغط	مقيّدة بتردد الشبكة	**حرة** — تتغير مع الحمل
نسبة الضغط	متوسطة (14–24 تقريبًا)	عالية (30–40 وأكثر)
كتلة العمود	ضخمة — عطالة عالية	خفيفة — عطالة منخفضة
زمن البدء	20–40 دقيقة	5–10 دقائق أو أقل
الكفاءة عند الحمل الكامل	جيدة	أعلى عادةً
الكفاءة عند الحمل الجزئي	تنخفض بوضوح	**تبقى جيدة** — ميزتها الكبرى
حساسية لجودة الوقود	أقل	**أعلى بكثير** — ممرات وفتحات أضيق
فلسفة الصيانة	إصلاح في الموقع	**استبدال المحرك وإصلاحه في ورشة**
حرارة العادم	أعلى — أنسب للدورة المركبة	أقل نسبيًا

والأهم لمهندس التحكم: هذا الاختلاف البنيوي يولّد مشاكل تحكم وحماية **غير موجودة أصلًا** في الآلة ذات العمود الواحد. ومن يأتي إلى وحدة أيروديريفاتيف بخبرة الآلة الثقيلة وحدها سيفاجأ.



الشكل 24.1 — أعلى: مقارنة بنيوية بين الآلة أحادية العمود والآلة ثنائية العمود ذات التوربين الحر. أسفل: توقيعات البدء الأربعة — طبيعي، ساخن، معلّق، وفشل اشتعال.

24.2 البنية: مولّد الغاز والتوربين الحر

الفكرة المعمارية تنقسم إلى قسمين وظيفيين منفصلين تمامًا:

1) مولّد الغاز **(Gas Generator / Gas Producer)**. يضم الضاغط وغرفة الاحتراق وتوربين عالي الضغط. ووظيفته الوحيدة: **إنتاج تيار غاز ساخن عالي الضغط**. والتوربين الموجود داخله لا ينتج قدرة مفيدة للخارج إطلاقًا — كل ما ينتجه يذهب لإدارة الضاغط الذي أمامه. وفي الآلات التي يكون مولّد الغاز فيها ثنائي الملف (Two-Spool Gas Generator) — أي ثلاثية الأعمدة إجمالًا مع توربين القدرة — يكون هناك عمودان متداخلان (concentric): عمود منخفض الضغط (N1) وعمود عالي الضغط (N2)، كل منهما يدور بسرعة مختلفة تمامًا عن الآخر.

2) توربين القدرة الحر **(Free Power Turbine)**. توربين منفصل يقع في مجرى العادم الخارج من مولّد الغاز، **ولا يرتبط به ميكانيكيًا على الإطلاق**. الشيء الوحيد الذي يعبر بينهما هو تيار الغاز. وهذا التوربين هو الذي يدير الحمل — مولدًا أو ضاغطًا.

والنتيجة التي تغيّر كل شيء: مولّد الغاز حرّ في أن يدور بالسرعة التي يحتاجها لإنتاج التدفق المطلوب، بينما توربين القدرة مقيّد بسرعة الحمل. **آلتان تدوران بسرعتين مختلفتين ومستقلتين، تربطهما نفخة غاز.**

لماذا يهم هذا الفصل الميكانيكي عمليًا؟ لأنه يعطي مرونة هائلة: عند الأحمال الجزئية، يستطيع مولّد الغاز أن يبطئ ويقلل تدفق الهواء بما يتناسب مع الوقود المحروق، فتبقى نسبة الوقود إلى الهواء — ومن ثمّ درجة حرارة الدورة والكفاءة — قريبة من الأمثل. أما الآلة أحادية العمود فسرعتها مثبَّتة بتردد الشبكة، فتدفق الهواء تقريبًا ثابت، وعند خفض الحمل تخفض الوقود على هواء لم ينخفض بنفس النسبة — فتنخفض حرارة الدورة وتنهار الكفاءة. **ولهذا يُوصف الأيروديريفاتيف بأنه «يحافظ على كفاءته عند الأحمال الجزئية».** وريش IGV المتغيرة في الآلة الثقيلة (9.5) هي محاولة جزئية لتعويض هذا القيد بالضبط.

24.3 السرعات: N1 وN2 وNPT — وماذا تقول كل واحدة

على شاشة وحدة أيروديريفاتيف سترى عدة سرعات لا سرعة واحدة، وكل منها تحكي قصة مختلفة:

الرمز	ما يمثّله	ماذا يعني تغيّره
N1 / NGG / NL	سرعة عمود الضغط المنخفض (أو مولّد الغاز في محرك ثنائي العمود)	مؤشر مباشر على "قدرة" مولّد الغاز — ويُستخدم غالبًا كمتغيّر التحكم الأساسي
N2 / NGP / NH	سرعة عمود الضغط العالي	يُراقَب للحماية ولتشخيص أعطال الضاغط
NPT / NPW	سرعة توربين القدرة	مربوطة بسرعة الحمل — وهي التي تحدد التردد إن كان الحمل مولّدًا

والعلاقات بينها هي أداة تشخيص قوية. ففي وحدة سليمة توجد علاقة ثابتة ومتوقعة بين N1 وN2 وحرارة العادم وتدفق الوقود عند ظروف محيطة معيّنة. وأي انزياح في هذه العلاقة يشير إلى شيء محدد:

- **N2** أعلى من المعتاد عند نفس **N1** والحمل: غالبًا تدهور في الضاغط عالي الضغط أو تسرّب داخلي.
- حرارة عادم أعلى عند نفس **N1**: تدهور في كفاءة المسار الساخن أو اتساخ ضاغط.
- **N1** لا يصل إلى قيمته المتوقعة عند الحمل الكامل: حدّ من حدود التحكم يعمل — حراري أو حدّ N2 أو حدّ ضغط.

وهذه هي بالضبط فكرة «قارن الوحدة بنفسها» التي بنينا عليها الفصل الثالث والعشرين — والوحدة الأيروديريفاتيف توفّر متغيرات أكثر تجعل هذه المقارنة أدق.

24.4 ما الذي يتغيّر في منظومة التحكم؟

هنا نصل إلى ما يهم مهندس التحكم فعليًا. أربعة اختلافات جوهرية:

1) حماية السرعة الزائدة لتوربين القدرة — الأخطر على الإطلاق

في الآلة أحادية العمود، إذا فُتح قاطع المولد فجأة (Load Rejection)، فإن الكتلة الدوّارة الضخمة — الضاغط والتوربين والمولد معًا — تحدّ من معدل التسارع، ويملك نظام التحكم زمنًا يُقاس بالثواني القليلة يستطيع فيها إغلاق صمامات الوقود.

أما في الآلة ذات التوربين الحر، فالوضع مختلف نوعيًا وخطير. توربين القدرة خفيف نسبيًا، ولا يرتبط بالضاغط الذي يمثل عبئًا مقاومًا كبيرًا. فإذا فقد حمله فجأة وهو يستقبل تيار غاز كامل الطاقة، **لا يوجد شيء يقاوم تسارعه إطلاقًا** — فيتسارع بمعدلات عنيفة قد تصل إلى سرعة التفكك في ثوانٍ معدودة.

والنتيجة المعمارية:

- حماية سرعة زائدة **مخصصة لتوربين القدرة نفسه**، مستقلة عن حماية مولّد الغاز، بحسّاسات خاصة بها.
- صمامات وقود **سريعة الإغلاق جدًا**، وغالبًا صمام قطع إضافي قريب من الحاقنات لتقليل حجم الوقود المحبوس.
- في بعض التصاميم: صمامات تحويل عادم **(Bleed / Dump)** تُنفّس تيار الغاز بعيدًا عن توربين القدرة فورًا.
- ومنطق مراقبة معدل التغيّر **(Rate of Change)** لا مجرد تجاوز عتبة — لأن الانتظار حتى بلوغ العتبة قد يكون متأخرًا.

هذه أهم نقطة في هذا الفصل كله. كل ما شرحناه في الفصل السابع عن حماية السرعة الزائدة ينطبق هنا، لكن **بهامش زمني أضيق كثيرًا وبأهمية مضاعفة**. ومن يعمل على وحدة ذات توربين قدرة حر يجب أن يعرف بالضبط: أين حسّاسات سرعة توربين القدرة؟ وكم عددها؟ وكيف يصوّت المنطق بينها؟ ومتى اختُبرت آخر مرة؟ **وهذا ليس سؤالًا لمهندس الحماية وحده.**

2) جداول التسارع والتباطؤ (Acceleration / Deceleration Schedules)

في التوربين الثقيل، منطق التحكم بالوقود يدور حول السرعة والحرارة والحمل. أما في الأيروديريفاتيف فيُضاف حدّان مهمان يعملان على **معدل** تغيّر الوقود لا على قيمته:

- جدول التسارع **(Acceleration Schedule):** يحدّ الحد الأقصى لزيادة الوقود مقابل السرعة الحالية. الغرض منه منع دفع وقود أكثر مما يستطيع الضاغط تمرير هواء له — وإلا حصل انحباس **(Surge)** أو ارتفاع حرارة.
- جدول التباطؤ **(Deceleration Schedule):** يحدّ الحد الأقصى لخفض الوقود. الغرض: منع انطفاء اللهب **(Flameout)** بسحب الوقود أسرع مما تسمح به ديناميكيات الاحتراق.

وهذان الحدّان يُنفَّذان عادةً كمنتقي حد أدنى/أعلى (Min/Max Select) حول مخرج المتحكم الأساسي — وهو تطبيق مباشر لكتل اختيار الإشارة التي شرحناها في 12.11. ومهندس يبحث عن سبب "بطء استجابة الوحدة" يجب أن يفحص هذه الجداول قبل أن يلمس ضبط **PID.**

3) التحكم في وضعين: التحكم بالسرعة والتحكم بالحمل

في وحدة أيروديريفاتيف تدير ضاغطًا (لا مولدًا)، لا يوجد «تردد شبكة» يفرض السرعة. فتوربين القدرة يعمل بسرعة متغيرة حسب متطلبات العملية، ونظام التحكم يوازن بين:

- سرعة توربين القدرة المطلوبة من العملية،
- وحدود مولّد الغاز (سرعة، حرارة، انحباس)،
- وحدود توربين القدرة نفسه.

وهذه بنية تحكم متعددة الحدود **(Multi-Limit Control)** حيث يعمل عدة متحكمات بالتوازي ويُختار الأدنى — وهي نفس فلسفة منحنى تحكم الحرارة التي شرحناها في 9.9، لكن بحدود أكثر.

4) الاستجابة السريعة نعمة ونقمة

عطالة منخفضة تعني استجابة سريعة للتغيرات — وهذا ممتاز لموازنة الشبكة. لكنها تعني أيضًا أن **أي خطأ في الضبط يظهر أسرع وأعنف**. حلقة تحكم مضبوطة بقوة زائدة على آلة ثقيلة قد تنتج تذبذبًا بطيئًا محتملًا؛ نفس الضبط على أيروديريفاتيف قد ينتج تذبذبًا يصل إلى القطع خلال ثوانٍ.

24.5 الانحباس والترنح (Surge and Stall) — وصمامات النزف

الضاغط عالي نسبة الضغط في الأيروديريفاتيف أكثر عرضة لمشكلة أساسية في الديناميكا الهوائية: الانحباس **(Surge)**.

ما يحدث فيزيائيًا: الضاغط يعمل في حالة توازن دقيقة بين الضغط الذي يستطيع بناءه وتدفق الهواء المار. فإذا ارتفع الضغط الخلفي أكثر مما يستطيع الضاغط دفعه — أو انخفض التدفق دون حدّ معيّن — ينفصل مسار الهواء عن أسطح الريش **(Stall)**، وقد ينعكس اتجاه التدفق كليًا للحظة **(Surge)**.

والعَرَض المسموع لا يُنسى: دويّ عنيف يشبه طلقة بندقية، وقد يتكرر بشكل دوري، مصحوبًا بارتفاع مفاجئ في حرارة العادم واضطراب في كل القراءات.

متى يحدث؟

- أثناء **التسارع السريع** — دفعت وقودًا أكثر مما تحمّل الضاغط (وهذا ما تمنعه جداول التسارع).
- عند **اتساخ أو تلف ريش الضاغط** — الخط الحدّي للانحباس ينزاح فيصبح الهامش أضيق.
- عند **انسداد فلاتر المدخل** — تدفق أقل عند نفس السرعة.
- عند **عطل في صمامات النزف أو الريش المتغيرة**.
- عند **تشوّه في تدفق المدخل** — انسداد جزئي أو ضرر بمجرى الدخول.

والدفاعات المصمَّمة ضده:

- صمامات النزف **(Bleed Valves / VBV):** تُفتح عند السرعات المنخفضة لتنفيس جزء من الهواء من المراحل الوسطى، فترفع التدفق عبر المراحل الأمامية وتُبعد الضاغط عن خط الانحباس. **وهي مفتوحة أثناء البدء ومغلقة عند التشغيل الكامل** — وصمام نزف عالق مغلقًا أثناء البدء سبب كلاسيكي للبدء المعلّق (Hung Start)، وعالق مفتوحًا عند الحمل الكامل سبب كلاسيكي لنقص قدرة غير مفسّر.

- الريش الموجِّهة المتغيرة **(VSV / VIGV):** تعيد توجيه الهواء بزاوية مناسبة لسرعة العمود الحالية.
- **جداول التسارع** كما سبق.

والقاعدة التشخيصية: إذا سمعت انحباسًا، فالسؤال الأول ليس «ما العطل في الضاغط؟» بل: **"ما الذي ضيّق هامش الانحباس؟"** — لأن الضاغط نفسه غالبًا سليم، وإنما ظرف ما دفع نقطة التشغيل نحو الخط الحدّي.

24.6 قراءة البدء: التوقيعات الأربعة

هذه من أنفع المهارات الميدانية في العمل على أي توربين، وتظهر بوضوح خاص في الأيروديريفاتيف لسرعة أحداثه. **البدء ليس حدثًا «نجح أو فشل» — إنه منحنى له شكل، والشكل يشخّص.**

المتغيران اللذان تقرأهما معًا هما: سرعة مولّد الغاز **(N1)** وحرارة العادم **(EGT / T5)** مقابل الزمن. وأربعة أشكال ينبغي أن يعرفها كل مهندس بالنظر، كما في الشكل أعلاه:

1) البدء الطبيعي (Normal Start)

المُشغّل الابتدائي يرفع السرعة، وعند نسبة معيّنة (نحو 15–20%) يُدخَل الوقود ويُشعَل. ترتفع حرارة العادم إلى ذروة ثم **تنخفض** — لأن تدفق الهواء يتزايد أسرع من الوقود. ثم تستقر عند قيمة الخمول، وتستمر السرعة في الصعود بسلاسة حتى الخمول. **الذروة ثم الانخفاض هي التوقيع الصحي.**

2) البدء الساخن (Hot Start)

الحرارة تتجاوز الحد المسموح للبدء. **المعنى الفيزيائي واحد دائمًا: وقود أكثر مما يناسب الهواء المتاح في تلك اللحظة.** والأسباب المحتملة:

- **الهواء أقل مما ينبغي:** مُشغّل ابتدائي ضعيف أو بطاريات منخفضة أو ضغط هواء بدء غير كافٍ، أو المشغّل فُصل مبكرًا، أو احتكاك في العمود.
- **الوقود أكثر مما ينبغي:** جدول وقود البدء منحرف، أو صمام تصريف (Drain / Dump Valve) عالق مغلقًا فلم يُصرَّف الوقود المتبقي من محاولة سابقة، أو صمام تحكم بالبدء متسرّب.
- **قياس خاطئ:** ثرموكابل معيب يقرأ عاليًا — **وهذا يجب استبعاده أولًا دائمًا** بمقارنة الثرموكابلات بعضها ببعض كما شرحنا في 13.10.

والخطر الحقيقي: البدء الساخن يستهلك عمر أجزاء المسار الساخن بشكل غير متناسب مع مدته. ودقائق معدودة من التجاوز قد تكلّف آلاف الساعات من العمر. **ولهذا لا يُتجاهَل بدء ساخن واحد بحجة أنه «نجح في النهاية».**

3) البدء المعلّق (Hung Start)

الوحدة اشتعلت فعلًا — الحرارة ارتفعت — لكن السرعة **توقفت عند قيمة أقل من الخمول ولم تكمل**. الوحدة عالقة في منطقة وسطى: الوقود يحترق، لكن التوربين لا ينتج قدرة كافية لتسريع الضاغط إلى الخمول.

الأسباب النموذجية:

- **المشغّل الابتدائي انفصل مبكرًا** أو لا يعطي عزمه الكامل.
- **صمام نزف عالق مغلقًا** — الضاغط يعمل قرب الانحباس فلا ينتج ضغطًا كافيًا.
- احتكاك **(Rub)** في الضاغط أو التوربين يستهلك جزءًا من العزم.
- **جدول وقود البدء منخفض جدًا** — عكس البدء الساخن تمامًا.
- **تسرّب في مسار الهواء** بين الضاغط وغرفة الاحتراق.

والخطر: الوحدة تبقى تحترق عند سرعة منخفضة وتدفق تبريد ضعيف — أي أنها **تسخن تدريجيًا وهي عالقة**. ولهذا يجب قطع البدء المعلّق، لا انتظار "أن يحلّ نفسه".

4) فشل الاشتعال (Fails to Light)

السرعة تصعد، الحرارة لا تتحرك. لم يحدث احتراق أصلًا. والأسباب تتوزع على ثلاث فئات:

- **لا وقود:** صمام مغلق، مضخة تعزيز متوقفة، فلتر مسدود، أو **هواء محبوس في خط الوقود** (سبب شائع جدًا بعد أعمال صيانة على نظام الوقود — ويجب دائمًا السؤال عن سبب دخول الهواء، لا مجرد تنفيسه).
- **لا شرارة:** شمعات إشعال تالفة، أو محوّل إشعال (Exciter) معطل، أو جهد تغذية منخفض، أو كابل إشعال مقطوع.
- **لا كشف لهب:** اشتعل فعلًا لكن كاشف اللهب لم يره، فقُطع البدء. وهذا خطأ قياس لا خطأ عملية — والتمييز بينهما هو جوهر منهجية الفصل الثالث عشر.

تحذير سلامة يجب أن يُحفظ: البدء الرطب **(Wet Start)**. إذا دخل وقود ولم يشتعل، فقد تجمّع وقود سائل غير محترق داخل غرفة الاحتراق ومجرى العادم. **ومحاولة بدء ثانية مباشرة قد تُشعل هذا الوقود المتجمّع دفعة واحدة** — فينتج انفجار في مجرى العادم أو حريق. الإجراء الصحيح دائمًا: تصريف كامل، ثم إدارة جافة **(Dry Motoring)** بلا وقود ولا إشعال لتهوية المجرى، ثم محاولة البدء. وهذا الإجراء موجود في كل دليل تشغيل، ويُتجاهَل كثيرًا تحت ضغط الوقت — وقد كلّف حوادث حقيقية.

24.7 مصفوفة تشخيص: مشاكل البدء

على غرار الفصل الحادي والعشرين، وبمنطق «العَرَض ← الأسباب المرجحة ← الفحص الأول»:

العَرَض	الأسباب المرجحة	الفحص الأول	الفحص التالي
لا دوران إطلاقًا عند أمر البدء	لا تغذية للمشغّل الابتدائي / عمود المشغّل مقطوع / العمود مُعاق	هل يوجد جهد أو هواء عند المشغّل؟	هل يدور المشغّل وحده؟ وهل يرتفع ضغط الزيت؟
دوران بطيء / سرعة غير كافية	جهد أو ضغط بدء منخفض / احتكاك بالعمود / قياس سرعة خاطئ	قارن قناتي السرعة معًا	حاول الإدارة اليدوية إن أمكن — وافحص خلوصات الأطراف
سرعة عالية بشكل غير طبيعي وتسارع سريع	انفصال عمود صندوق التروس المساعد	**أوقف فورًا** — إدخال الوقود الآن سيسبب ارتفاع حرارة	افحص وصلة الصندوق المساعد
بدء متأخر	فتحات وقود مقيّدة / هواء بالخط / إشعال ضعيف	افحص الإشعال أولًا (أرخص وأسرع)	فحص تدفق الحاقنات وتنفيس النظام
فشل الاشتعال	لا وقود / لا شرارة / لا كشف لهب	هل يوجد ضغط وقود عند المشعب؟	افحص المحوّل والشمعات ثم كاشف اللهب
بدء ساخن	وقود زائد أو هواء ناقص	استبعد الثروكابل المعيب أولًا	جدول وقود البدء، صمام التصريف، أداء المشغّل
بدء معلّق	مشغّل انفصل مبكرًا / صمام نزف مغلق / احتكاك	متى بالضبط انفصل المشغّل؟	حالة صمامات النزف والريش المتغيرة
اشتعال ثم إطفاء بعد ثوانٍ	جدول تباطؤ / انقطاع وقود / كاشف لهب	راجع منحنى الوقود لحظة الإطفاء	استقرار ضغط الوقود وتوقيت انتقال الصمامات
بدء بطيء إلى الخمول (بارد)	تسرب أو انسداد بخطوط إشارة الهواء / صمامات تحكم	افحص خطوط الإشارة الهوائية وفلاترها	حالة المنظّمات ووحدة التحكم بالوقود

24.8 مصفوفة تشخيص: مشاكل التشغيل

العَرَض	الأسباب المرجحة	ملاحظة تشخيصية
سرعة زائدة على توربين القدرة	فقد حمل مفاجئ / منظّم معيب / انفصال القارنة أو عمود الحمل	**الأخطر على الإطلاق** — تحقق من سلامة الحماية المستقلة قبل أي إعادة تشغيل
قدرة منخفضة وكل المؤشرات منخفضة	تدهور ضاغط / فلاتر مسدودة / صمام نزف عالق مفتوحًا	قارن بمنحنى الأداء المصحّح للظروف المرجعية (17.2)
N1 منخفض وحرارة عادم مرتفعة	تدهور في المسار الساخن أو الضاغط	تركيبة كلاسيكية تدل على فقد كفاءة حقيقي لا على خطأ قياس
محدود حراريًا (**Temperature Limited**)	تدهور تراكمي / حرارة محيطة عالية / اتساخ	جرّب غسيل الضاغط قبل افتراض تلف داخلي
انحباس أثناء التسارع (صوت انفجاري)	تسارع أسرع من قدرة الضاغط / نزف مغلق / تلف ريش	**لا تكرر المحاولة** — الانحباس المتكرر يتلف الريش
تسارع غير منتظم أو فشل في التسارع	جداول وقود / صمامات نزف / ريش متغيرة	تتبّع موضع الريش والصمامات مقابل السرعة
فشل في التباطؤ	صمام وقود عالق / منطق تسلسل	افحص الموضع الفعلي مقابل الأمر (19.5)
انطفاء اللهب أثناء التشغيل	خفض وقود سريع / ماء أو ملوثات بالوقود / تغيّر تركيبة	راجع اتجاه الوقود ثانية بثانية قبل الانطفاء
اهتزاز مرتفع	اختلال توازن / محاذاة / محمل / تراكم على الريش	افحص الطيف الترددي لا القيمة الإجمالية فقط (7.4)
ضغط زيت منخفض	مضخة / فلتر / صمام تنظيم / تسريب / قياس	افحص القياس أولًا ثم المسار
ضغط زيت مرتفع	صمام تنظيم / فلتر بارد / زيت غير مناسب	كثيرًا ما يكون مؤقتًا عند البدء البارد وطبيعيًا
حرارة زيت مرتفعة	مبرّد / تدفق / حمل حراري من محمل	تحقق من فارق الحرارة عبر المبرّد
استهلاك زيت مفرط	أختام / تصريف مسدود / ضغط تنفيس	راجع سجل الإضافة كاتجاه لا كحدث
تسريب زيت من مدخل الضاغط	ختم محمل أمامي / اختلال ضغوط التنفيس	مؤشر مبكر مهم — لا يُهمَل
تذبذب في كل المؤشرات معًا	نظام وقود / إشارة تحكم مشتركة / تغذية	ابحث عن العنصر المشترك بين المتغيرات المتذبذبة

والقاعدة نفسها التي تحكم كل جداول هذا الكتاب: حين تتذبذب أو تنحرف عدة مؤشرات **معًا**، فالسبب في عنصر مشترك بينها — نظام الوقود، أو التغذية الكهربائية، أو إشارة مرجعية، أو حتى بطاقة إدخال واحدة. وحين ينحرف مؤشر **واحد** بينما جيرانه ثابتون، فالمشكلة غالبًا في سلسلة قياس ذلك المؤشر تحديدًا.

24.9 فلسفة الصيانة: استبدال بدل الإصلاح

اختلاف جوهري في طريقة إدارة الأصل، ويجب أن يُفهم قبل شراء الوحدة لا بعده.

التوربين الثقيل يُفكّك ويُصلَح في موقعه: يُرفع الغطاء العلوي، وتُستبدل الريش، وتُجرى الأعمال، ثم يُعاد التجميع. عملية تستغرق أسابيع، وتحتاج رافعة ثقيلة وفريقًا كبيرًا وورشة موقعية.

والأيروديريفاتيف يُعامَل كوحدة قابلة للاستبدال: يُفك المحرك كاملًا من قاعدته ويُشحن إلى مركز إصلاح متخصص، ويُركَّب مكانه محرك آخر مُعاد تأهيله. **زمن التوقف قد ينخفض من أسابيع إلى أيام.**

	إصلاح موقعي	استبدال المحرك
زمن التوقف	أسابيع	أيام
متطلبات الموقع	ورشة ورافعة وفريق كبير	معدات مناولة فقط
الحاجة لمحرك احتياطي	لا	**نعم — وهو أصل مكلف**
ملاءمة المواقع النائية	ضعيفة	**ممتازة**
التكلفة الرأسمالية	أقل	أعلى (بسبب الاحتياطي)

وهذا هو السبب الحقيقي لانتشار الأيروديريفاتيف في المنصات البحرية والحقول النائية: ليس لأنه أكفأ فقط، بل لأن **إصلاحه لا يتطلب بناء ورشة على منصة في عرض البحر.**

نقطة تخطيطية مهمة: نموذج الاستبدال يعني أن **إتاحية الأسطول تعتمد على توفر محركات احتياطية** — وهذا قرار مالي واستراتيجي لا فني. محطة بأربع وحدات بلا محرك احتياطي واحد قد تكون أقل إتاحية من محطة بثلاث وحدات ومحرك احتياطي جاهز. وهذا مثال مباشر على ما شرحناه في 17.3 عن الفرق بين الموثوقية والإتاحية.

24.10 متى تختار هذه وليس تلك؟ ومنطقة الوسط بينهما

سؤال يواجه المهندس في مرحلة الدراسة والتصميم، وهذه هي المعايير الحاكمة:

اختر أيرودیریفاتیف عندما:

- المساحة والوزن مقيّدان (منصة بحرية، سفينة، موقع ضيق).
- تحتاج بدءًا سريعًا وتحميلًا سريعًا (احتياطي دوّار للشبكة، دعم المتجددات، طوارئ).
- نمط التشغيل فيه أحمال جزئية كثيرة أو بدء وإيقاف متكرر.
- الموقع نائٍ ولا يحتمل ورشة إصلاح موقعية.
- تحتاج دفعًا ميكانيكيًا بسرعة متغيرة (ضاغط، مضخة).

اختر توربينًا صناعيًا ثقيلًا عندما:

- التشغيل مستمر بحمل أساسي عالٍ لآلاف الساعات.
- تخطط لدورة مركبة كبيرة (حرارة العادم الأعلى أنسب لمرجل الاسترداد).
- جودة الوقود متغيرة أو أقل نظافة.
- تريد أكبر قدرة ممكنة من وحدة واحدة.
- الموقع يحتمل ورشة ورافعة، والتكلفة الرأسمالية الأولية عامل حاسم.

منطقة الوسط: هل توجد آلة «مختلطة» فعلًا؟

هذا سؤال يُطرح كثيرًا، ويستحق تصحيحًا اصطلاحيًا دقيقًا قبل الإجابة:

> **لا توجد عادةً فئة تجارية مستقلة اسمها «توربين غازي مختلط صناعي/مشتق من الطيران».** ما هو موجود فعلًا أن الشركات المصنّعة **تدمج تقنيات أو فلسفات تصميم من العائلتين** داخل آلة واحدة.

ولنستعرض الفرق الأساسي أولًا بشكل مركّز، ثم منطقة الوسط:

صناعي ثقيل (Heavy-Duty)	مشتق من الطيران (Aeroderivative)
مصمَّم ابتداءً لتوليد القدرة الصناعية	مشتق من محركات الطائرات
بنية ثقيلة ومتينة	خفيف ومدمج
سرعة دوران أقل عادةً	سرعة دوران أعلى عادةً
مصمَّم للتشغيل المستمر الطويل	ممتاز في البدء السريع وتغيّر الحمل
صيانة موقعية أيسر غالبًا	صيانة مُجزَّأة (استبدال وحدات)
نسبة قدرة إلى وزن أقل عمومًا	نسبة قدرة إلى وزن عالية جدًا
أمثلة: عائلات GE 9E/9HA، وSiemens SGT5/SGT6	أمثلة: GE LM2500/LM6000، وSiemens SGT-A35/SGT-A65

وهنا تأتي منطقة الوسط المثيرة للاهتمام.

أولًا — النواة الطائرية مع توربين قدرة صناعي. كثير من الآلات الحديثة تحمل خصائص من العائلتين معًا. فقد تُدمج **نواة مولّد غاز مشتقة من الطيران** مع **توربين قدرة حر مصمَّم صناعيًا** وحزمة (Package) صناعية كاملة. ومفهوميًا:

Aircraft-derived Gas Generator

↓

Industrial Free Power Turbine

↓

Generator / Compressor / Pump

وهذه في الحقيقة إحدى الخصائص الجوهرية لكثير من التوربينات المشتقة من الطيران نفسها، لا مجرد حالة خاصة: مولّد الغاز يأتي من محرك طيران، بينما **توربين القدرة والمحامل والحجرة وأنظمة التحكم والمعدات المساعدة والحزمة كلها مصممة خصيصًا للخدمة الصناعية**. أي أن الجزء "الطائري" هو القلب فقط، وكل ما يحيط به صناعي بالكامل — وهذا ما يجعل الآلة قادرة على تشغيل متواصل بآلاف الساعات، وهو ما لا يُطلب من محرك طائرة أصلًا.

وثانيًا — تقنية فضائية داخل معمارية صناعية. طوّر بعض المصنّعين توربينات صناعية تستخدم **تقنيات متقدمة مشتقة من صناعة الطيران والفضاء دون أن تكون أيروديريفاتيف خالصة**: أشكال ريش وتصميم ديناميكي هوائي متقدم، وطلاءات حاجزة حرارية، ومواد وسبائك، وأساليب تبريد داخلي، وتصنيع دقيق. فتحصل على:

Heavy–Duty Industrial Architecture

+

Aeroderivative / Aerospace Technology

↓

Advanced Industrial Gas Turbine

وهذا يمنح بعض مزايا العائلتين معًا: كفاءة عالية، وأداء جيد عند الأحمال الجزئية، وبدء أسرع، واستجابة عابرة أفضل، مع الاحتفاظ بالمتانة الصناعية وفترات التشغيل الطويلة بين العمرات وكثافة قدرة عالية.

تصنيف عملي بثلاث فئات

بالنسبة للعمل الميداني، أرى أن التصنيف الأنفع هو هذا:

1) توربين صناعي ثقيل (Heavy-Duty Industrial GT)

Compressor → Combustor → Turbine → Generator

مصمَّم كآلة صناعية متكاملة من البداية.

2) توربين مشتق من الطيران (Aeroderivative GT)

Aircraft–derived Gas Generator → Free / Power Turbine → Generator

مبني حول نواة مشتقة من الطيران.

3) مفهوم هجين / صناعي متقدم (Hybrid / Advanced Industrial)

Aero technology or core + Industrial power turbine / package

معمارية صناعية تستفيد من تقنية الطيران، أو نواة طائرية داخل غلاف صناعي كامل.

ولماذا يهمّ هذا التمييز في مجال النفط والغاز تحديدًا؟ لأن قرار الاختيار في هذا القطاع يُحسم غالبًا بعاملين متعارضين:

في التطبيقات البحرية وحقن الماء في الآبار، تكون الآلات المشتقة من الطيران جذابة بسبب **نسبة القدرة إلى الوزن العالية، والبصمة المكانية الصغيرة، والاستجابة السريعة** — وهذه بالضبط قيود المنصة البحرية.

وحيث تكون الأولوية لقدرة صناعية كبيرة ومتواصلة ومتانة عالية، تُفضَّل الآلات الصناعية الثقيلة.

والفئة الثالثة موجودة لأن كثيرًا من المشاريع تقع بين الحالتين — تحتاج مرونة الأيروديريفاتيف لكنها لا تحتمل نموذج صيانته، أو تحتاج متانة الثقيل لكنها لا تملك مساحته. **ومن يعرف أن هذه المنطقة الوسطى موجودة يطرح السؤال الصحيح على المورّد بدل أن يختار من عمودين فقط.**

وخيار رابع كثيرًا ما يُغفَل: التوربينات الصناعية **متوسطة الحجم ثنائية العمود** — وهي ليست مشتقة من الطيران، لكنها تستخدم نفس مبدأ التوربين الحر. وتجمع كثيرًا من مرونة الأيروديريفاتيف مع متانة التصميم الصناعي وتسامحه مع الوقود، وهي شائعة جدًا في دفع الضواغط في خطوط الأنابيب.

24.11 خلاصة الفصل

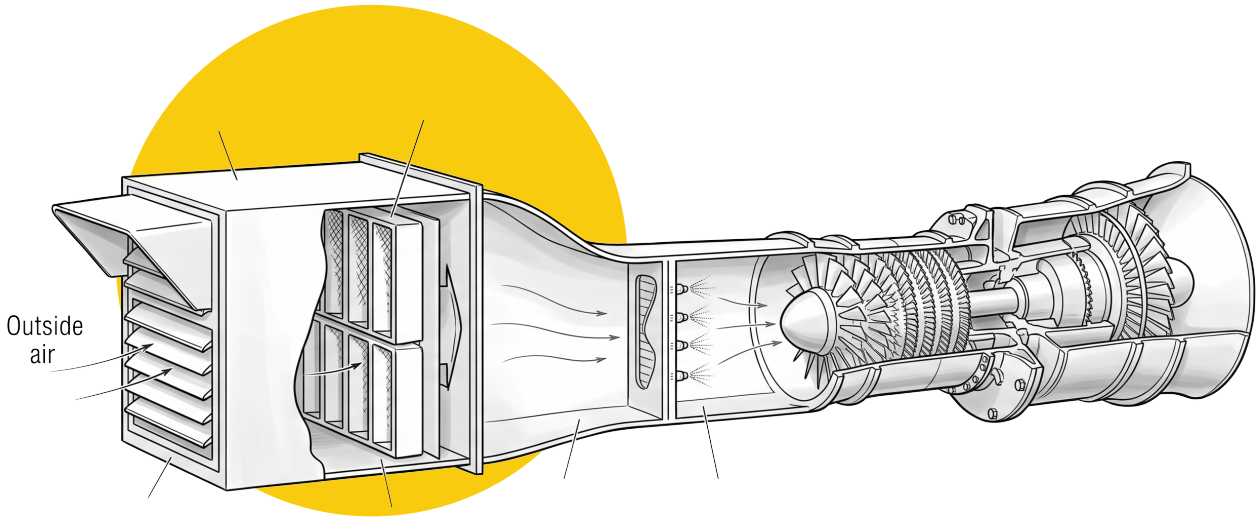
- **الأيروديريفاتيف ليس توربينًا ثقيلًا أصغر — إنه فلسفة تصميم مختلفة**، وُلدت من متطلبات الطيران: خفة، وكثافة قدرة، وسرعة استجابة.
- **الفصل الميكانيكي بين مولّد الغاز وتوربين القدرة** هو المفتاح لكل مزاياه ولكل تحدياته على السواء.
- **حماية السرعة الزائدة لتوربين القدرة هي أخطر ما في الأمر** — هامش زمني أضيق، وحاجة إلى منظومة حماية مخصصة ومستقلة ومختبَرة.
- **جداول التسارع والتباطؤ ليست تفصيلًا برمجيًا** — هي خط الدفاع الأول ضد الانحباس وضد انطفاء اللهب، وتُفحص قبل ضبط PID لا بعده.
- **صمامات النزف والريش المتغيرة تُدار مع السرعة**، وأعطالها تظهر كأعراض بدء وأعراض قدرة يسهل تشخيصها خطأً.
- **البدء منحنى له شكل، والشكل يشخّص:** طبيعي، ساخن، معلّق، أو لا اشتعال — أربعة توقيعات تُعرف بالنظر وتوجّه التحقيق فورًا.
- **البدء الرطب خطر سلامة حقيقي** — تصريف ثم إدارة جافة قبل أي محاولة ثانية، بلا استثناء.
- **نموذج الصيانة بالاستبدال** يغيّر تخطيط قطع الغيار والإتاحية جذريًا — والمحرك الاحتياطي جزء من الأصل لا من المخزون.

وأخيرًا، الرسالة التي تجمع هذا الفصل بما قبله: المبادئ التي بنيناها عبر الكتاب — سلسلة الإشارة، ومنهجية التنصيف، والتحقق من القياس قبل العملية، وفصل الحماية عن التحكم، ومقارنة الوحدة بنفسها — **تنطبق بحرفيتها على العائلتين**. ما يتغيّر هو الثوابت الزمنية وأسماء المتغيرات وحدة العواقب. **ومن أتقن المنهجية على عائلة انتقل إلى الأخرى في أسابيع؛ ومن حفظ الأرقام فقط سيبدأ من الصفر.**



الفصل الخامس والعشرون:

منظومة هواء السحب — الفلترة ومنع التجمد والتبريد



25.1 لماذا يستحق مدخل الهواء فصلًا كاملًا؟

تحدثنا عن مدخل الهواء في الفصل الخامس كجزء من مكونات التوربين، وعن التبريد ومنع التجمد بشكل موجز. لكن التجربة الميدانية تقول إن هذا الموضوع أكبر من فقرة: **منظومة السحب هي المسؤولة عن جزء معتبر من فقد الأداء التدريجي، وعن جزء من الأعطال المفاجئة، وعن قرارات اقتصادية بملايين الدولارات** — ومع ذلك تبقى في كثير من المحطات «الجزء الذي لا ينظر إليه أحد حتى يرتفع فرق الضغط».

ولنبدأ بالرقم الذي يضع الموضوع في نصابه: **توربين غازي كبير يبتلع في حدود 600 كيلوغرام من الهواء في الثانية الواحدة**. أي أكثر من خمسين ألف طن يوميًا. وحتى في بيئة تُوصف بأنها "نظيفة"، فإن ما يعبر مع هذه الكتلة من مواد غريبة يُقاس بمئات الكيلوغرامات سنويًا. وهذه المواد لا تختفي — إما أن يوقفها الفلتر، أو تدخل إلى آلة تكلّف عشرات الملايين.

ولذلك فإن السؤال ليس «هل نحتاج فلترة؟» بل «أي فلترة، وبأي ثمن في فقد الضغط؟»

وهذا الفصل يجيب عن ثلاثة أسئلة مترابطة تخص كل ما يحدث قبل أن يصل الهواء إلى المرحلة الأولى من الضاغط:

1. **كيف نُبقي الهواء نظيفًا** — الفلترة ومنظومة التنظيف الذاتي.
2. **كيف نمنع تجمّده** — وهي مشكلة تحدث في جو فوق الصفر، خلافًا لما يتوقعه معظم الناس.
3. **كيف نستفيد من برودة الهواء** — لأن الهواء البارد يعني قدرة أكبر وكفاءة أعلى، وهذه علاقة مباشرة وقابلة للاستثمار.

25.2 حقيقة أساسية تُغفَل: معظم الهواء الداخل لا يحترق أصلًا

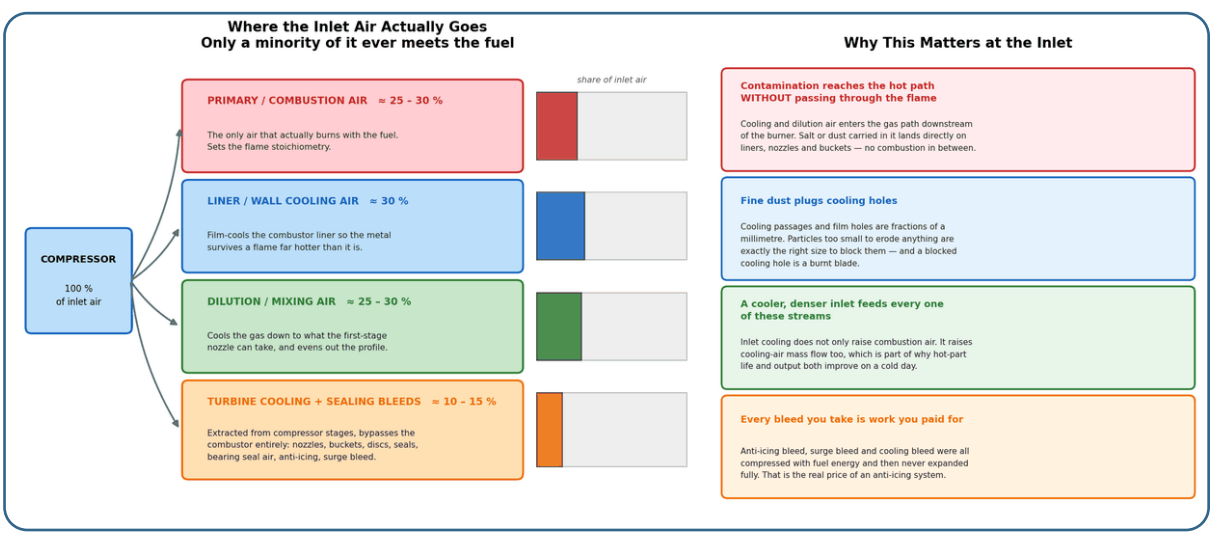
قبل أي شيء آخر، لا بد من تصحيح تصوّر شائع جدًا — بل إن كثيرًا من المهندسين يعملون سنوات قبل أن ينتبهوا له:

> **الهواء الذي يدخل التوربين ليس «هواء احتراق». الجزء الأكبر منه لا يلتقي بالوقود إطلاقًا — بل يذهب لتبريد غرفة الاحتراق وأجزاء المسار الساخن.**

والسبب فيزيائي بسيط: درجة حرارة اللهب عند النسبة القياسية للاحتراق تتجاوز ألفي درجة مئوية، وهي حرارة **لا يوجد معدن يتحملها**. فلو أدخلنا كل الهواء إلى منطقة اللهب لاحترقت الغرفة نفسها قبل أن تدور المرحلة الأولى دورة واحدة.

الحل الهندسي: **تقسيم تدفق الهواء إلى مسارات وظيفية مختلفة**:

المسار	النسبة التقريبية	الوظيفة
الهواء الأولي / هواء الاحتراق (Primary Air)	30%–25	هو وحده الذي يختلط بالوقود ويحترق فعلًا، ويحدد نسبة الخليط وحرارة اللهب
هواء تبريد البطانة (Liner / Film Cooling)	~30%	يمر عبر ثقوب وشقوق في جدار الغرفة ليكوّن **طبقة فيلم عازلة** تفصل المعدن عن اللهب
هواء التخفيف والخلط (Dilution Air)	30%–25	يُحقن في نهاية الغرفة ليخفض حرارة الغاز إلى ما تتحمله ريش المرحلة الأولى، ويوحّد توزيع الحرارة
هواء تبريد التوربين والأختام (Cooling & Sealing Bleeds)	15%–10	يُسحب من مراحل الضاغط **ويتجاوز غرفة الاحتراق كليًا** إلى الفوهات والريش والأقراص والأختام وهواء منع التجمد وصمامات النزف



الشكل 25.1 — يسار: توزيع هواء السحب على مساراته الوظيفية — الاحتراق، تبريد البطانة، التخفيف، والنزف للتبريد والأختام. يمين: أربع نتائج مباشرة لهذا التوزيع على تصميم منظومة السحب.

ولماذا هذه الحقيقة مهمة في فصل عن مدخل الهواء تحديدًا؟ لأربعة أسباب عملية:

1) الملوّثات تصل إلى المسار الساخن دون أن تمر بالنار. كثيرون يفترضون أن أي شيء يدخل مع الهواء «سيحترق». هذا خطأ: هواء التبريد وهواء التخفيف يدخلان مجرى الغاز **بعد** منطقة اللهب. فأي ملح أو غبار محمول فيهما يصل مباشرة إلى البطانات وقطع الانتقال والفوهات والريش. **ولذلك فإن جودة الفلترة تحمي المسار الساخن حماية مباشرة، لا غير مباشرة.**

2) الغبار الناعم يسدّ ثقوب التبريد. ثقوب التبريد وقنواته داخل الريش بأقطار تُقاس بأجزاء من المليمتر. والجسيمات التي هي أصغر من أن تسبب تعرية (أقل من 10 ميكرون) هي بالضبط الحجم المناسب لسدّ هذه الثقوب أو الترسّب داخلها. **وثقب تبريد مسدود يساوي ريشة محترقة** — وهذا من أخطر أنماط الفشل وأصعبها اكتشافًا قبل وقوعه. ولهذا صارت متطلبات الفلترة في وحدات الفئة F وH أشدّ بكثير مما كانت في الأجيال السابقة: التصميم صار أكثر تعقيدًا وأقل تسامحًا.

3) تبريد هواء السحب يزيد كل هذه التدفقات معًا. حين نبرّد هواء المدخل فترتفع كثافته، لا يزيد هواء الاحتراق وحده — بل يزيد أيضًا هواء التبريد والتخفيف. وهذا جزء من تفسير أن الوحدة في اليوم البارد تعطي قدرة أعلى **وتعيش أجزاؤها الساخنة أطول** في آن واحد.

4) كل نزف تأخذه هو شغل دفعت ثمنه ولم تسترده. هواء منع التجمد، وهواء النزف ضد الانحباس، وهواء التبريد — كلها ضُغطت باستهلاك طاقة، ثم خرجت من الدورة قبل أن تتوسع بالكامل عبر التوربين. **وهذا هو الثمن الحقيقي لأي نظام يعتمد على سحب هواء من الضاغط** — وسنعود إليه عند الحديث عن التسخين بالنزف في 25.7.

25.3 أربع آليات ضرر مختلفة — لا واحدة

من الأخطاء الشائعة اختزال دور الفلترة في «منع دخول الغبار». الحقيقة أن هناك أربع آليات ضرر مستقلة، ولكل منها حجم جسيمات مختلف ومسبب مختلف وعلاج مختلف. ومن لا يفرّق بينها لن يستطيع أن يختار فلترًا بشكل صحيح.

1) التعرية (Erosion)

جسيمات صلبة كاشطة — رمل وأتربة معدنية — تصطدم بريش الضاغط والمسار الساخن فتقتطع كميات مجهرية من المعدن في كل اصطدام. والمعدل يعتمد على طاقة الاصطدام وعدد الجسيمات وزاوية الارتطام وصلابة الطرفين.

والقاعدة العملية المستقرة في الصناعة: الجسيمات **أقل من 10 ميكرون لا تسبب تعرية معتبرة**، بينما الجسيمات **20 ميكرون وما فوق تسبب تعرية** إذا وُجدت بكميات كافية.

والأثر مزدوج: انخفاض في الأداء الديناميكي الهوائي، **وخطر ميكانيكي حقيقي** — لأن نقص مساحة المقطع في الريشة يرفع الإجهاد الموضعي، وانفصال ريشة أثناء التشغيل حدث كارثي.

2) التلوّث والاتساخ (Fouling)

هذا هو الأشيع والأكثر تأثيرًا اقتصاديًا. كفاءة الضاغط المحوري تعتمد على **نعومة أسطح الريش**، وهذه النعومة تُفقد بمواد تلتصق: أبخرة زيت، ودخان، وملح بحري، ورذاذ صناعي، وحبوب لقاح، ودقائق كربونية.

والأثر أكبر مما يتوقعه كثيرون: قد يصل فقد القدرة إلى نحو 20% في حالات التلوّث الشديد. والمنحنى المميز لهذا الفقد هو **انحدار أسّي متباطئ** مع ساعات التشغيل — سريع في البداية ثم يتباطأ.

ونقطة جوهرية: الفلترة تزيل بعض هذه المواد ولا تزيلها كلها. فبعض الأبخرة تمر عبر الفلتر وهي غازية ثم تتكثف بعده. وبعض المصادر تقع **خلف الفلتر أصلًا** — تسرّب زيت من محمل، أو تسرّب من نظام هيدروليكي. **ولذلك فإن «الفلتر ممتاز» لا يعني «لن يتّسخ الضاغط».**

والعلاج هو الغسيل — وهنا ملاحظة تاريخية مهمة: كان التنظيف بالمواد الكاشطة (قشور الجوز مثلًا) شائعًا في الماضي، **ولم يعد موصى به عمومًا** — لأنه يتلف طلاءات الريش وتشطيبها السطحي، ولأن جزيئات المادة الكاشطة نفسها قد تسدّ ممرات التبريد. البديل المعتمد اليوم هو **منظفات كيميائية خالية من الرماد** بغسيل على الخط (Online) أو خارج الخط (Offline)، والأخير أكثر فاعلية بكثير لأنه يتم عند سرعة الإدارة وبتغطية كاملة. (راجع 8.5.)

3) التآكل (Corrosion)

رواسب رطبة من ملح بحري وأحماض تسبب تنقّرًا (Pitting) في ريش الضاغط وصدأ في الأقراص. والتنقّر ليس مجرد خشونة سطحية — إنه مركّز إجهاد **(Stress Riser)** يقلّل عمر الكلال للريشة. والعلاج مزدوج: فلترة أفضل، **وطلاءات واقية** للريش والأقراص في البيئات المعروفة بعدوانيتها.

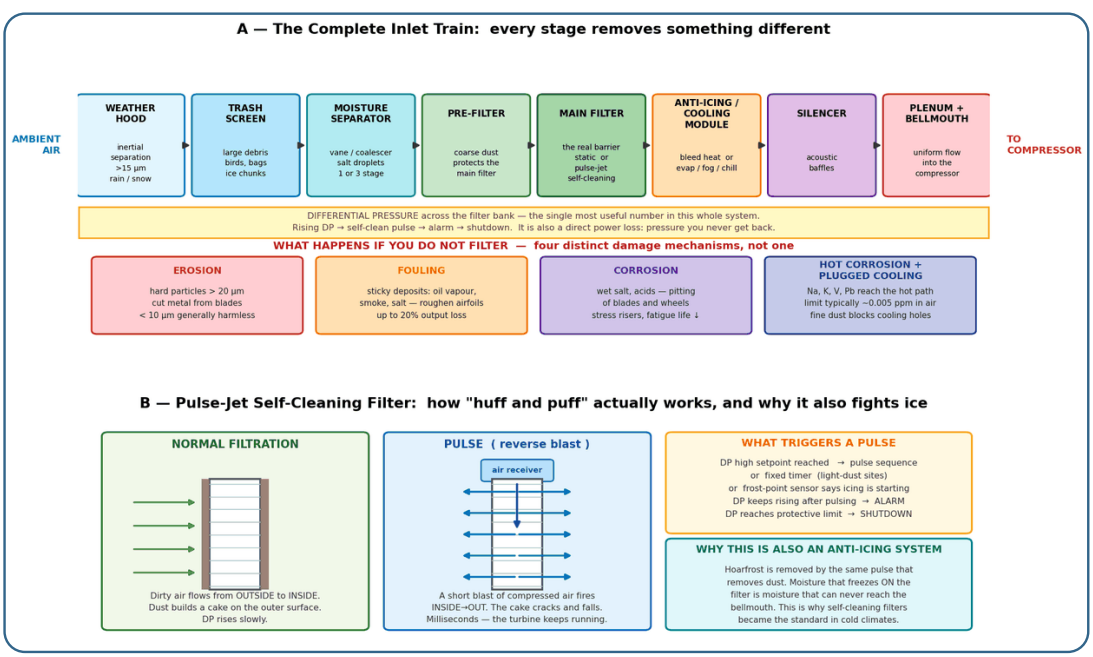
4) التآكل الساخن وانسداد ممرات التبريد (Hot Corrosion & Cooling Plugging)

وهذه — بشهادة الخبرة الصناعية — **أخطر نتيجة لفلترة غير كافية**. أربعة معادن تحديدًا هي المتهمة: الصوديوم **(Na)**، والبوتاسيوم **(K)**، والفاناديوم **(V)**، والرصاص **(Pb)**. هذه المعادن، بعد اتحادها بالكبريت أو الأكسجين أثناء الاحتراق، تترسب على أسطح المسار الساخن على شكل كبريتات أو أكاسيد، **فتخرق طبقة الأكسيد الواقية** التي تحمي المعدن — فتتأكسد الأجزاء بمعدل أسرع بأضعاف. **والحد النموذجي المستخدم عمليًا حين لا تكون تركيزات هذه المعادن في الوقود والماء معروفة بدقة: نحو 0.005 جزء بالمليون في هواء السحب.** وهو رقم صغير جدًا يوضح مدى حساسية الموضوع.

والمهم أن يُفهم أن الملوّثات تأتي من ثلاثة مصادر لا مصدر واحد: الوقود، والماء أو البخار المحقون، وهواء السحب. والحدود المسموحة تُحسب على **المجموع** لا على كل مصدر منفردًا — لأن الأجزاء الساخنة لا تفرّق من أين جاءت ذرة الصوديوم. ولهذا فإن محطة تحرق وقودًا نظيفًا جدًا قد تحتمل هواءً أقل نظافة، والعكس صحيح. **وهذه العلاقة يجب أن تكون واضحة عند تغيير مورّد وقود أو عند إضافة نظام حقن ماء.**

25.4 مراحل منظومة السحب: كل مرحلة تزيل شيئًا مختلفًا

منظومة السحب ليست «فلترًا». إنها سلسلة، وكل حلقة فيها مصممة لنوع مختلف من الملوّثات:



الشكل 25.2 — أعلى: مراحل منظومة السحب من غطاء الطقس حتى فوهة الدخول وآليات الضرر التي تحمي منها. أسفل: عمل فلتر التنظيف الذاتي النبضي ومنطق تشغيله.

المرحلة	مبدأ العمل	ما تزيله
غطاء الطقس / غطاء المدخل (Weather Hood)	فصل بالقصور الذاتي: يجبر الهواء على تغيير اتجاهه إلى أعلى بسرعة منخفضة، فتعجز الجسيمات الثقيلة عن اللحاق به	المطر والثلج والجسيمات الكبيرة — كفاءة تصل إلى نحو 98% لما هو أكبر من 15 ميكرون، وتنهار دون 10 ميكرون
الشبكة الواقية (Trash Screen)	حاجز ميكانيكي بسيط	مخلفات كبيرة، أكياس، طيور، وقطع جليد متساقطة — وتصميمها يسمح بمرور الهواء بفقد ضغط مقبول حتى لو تجمّدت جزئيًا
فاصل الرطوبة (Moisture Separator)	ريش معقوفة تفرض تغييرات اتجاه؛ القطرات تصطدم بالأسطح لعجزها عن اتباع الهواء، ثم تنزلق إلى مصرف	**قطرات الماء المالح** — وهي المرحلة الحاسمة في المواقع البحرية والساحلية
الفلتر التمهيدي (Pre-Filter)	فلترة خشنة	الغبار الخشن — ووظيفته الحقيقية **حماية الفلتر الرئيسي وإطالة عمره**
الفلتر الرئيسي (Main Filter)	ساكن أو ذاتي التنظيف	الحاجز الفعلي — وهو ما يحدد نظافة الهواء الواصل
وحدة منع التجمد / التبريد	تسخين أو تبريد	تعديل حالة الهواء، لا تنقيته
مكتم الصوت (Silencer)	حواجز صوتية	الضجيج
البلينوم وفوهة الدخول (Plenum & Bellmouth)	تشكيل التدفق	يوجّه الهواء بانتظام إلى المرحلة الأولى — وأي اضطراب هنا يعني حملًا غير متزن على الريش

فواصل الرطوبة: أحادية أم ثلاثية المراحل؟

هذه نقطة تصميمية حاسمة في المواقع البحرية:

- **فاصل أحادي المرحلة:** صف واحد من الريش المعقوفة. يعتمد على قصور القطرات الذاتي، **وفاعليته تتناسب مع سرعة الهواء** — فكلما زادت السرعة زاد زخم القطرة وزادت فرصة اصطدامها.

- **فاصل ثلاثي المراحل:** ريش، ثم وسادة تجميع **(Coalescer Pad)** بسمك نحو بوصة تلتقط القطرات الصغيرة وتدمجها في قطرات أكبر، ثم صف ريش ثانٍ يلتقط القطرات المندمجة.

ومتى نحتاج الثلاثي؟ حين تكون سرعات الرياح المتوقعة في الموقع عالية — لأن تركيز الملح في الهواء وحجم القطرات يزدادان مع سرعة الرياح. ولهذا فإن منصات بحر الشمال، بسرعات رياحها الإحصائية الأعلى، تُجهَّز عادةً بفواصل ثلاثية المراحل، بينما تكفي الأحادية في مناطق أهدأ.

وثلاث قواعد صيانية للفواصل:

- **حماية وسادة التجميع** من طين الحفر والإسمنت ومواد السفع الرملي والعواصف الترابية — وإلا انسدت وتطلبت استبدالًا متكررًا. وقد يلزم فلتر تمهيدي قبلها.
- **الحفاظ على أختام سائلة في المصارف** — وإلا سُحب ماء التصريف مرة أخرى إلى داخل المجرى بفعل الضغط السالب، وهو ما يبطل عمل الفاصل كليًا.
- **تتبّع فقد الضغط عبر الفاصل** كمؤشر انسداد.

نقطة فيزيائية طريفة ومفيدة عمليًا: الملح في الهواء البحري يبقى على شكل **قطرات مشبعة** ما دامت الرطوبة النسبية فوق نحو 45%، ولا يتبلور إلا تحت ذلك. وبما أن الرطوبة النسبية في الأجواء البحرية نادرًا ما تنزل تحت 45%، **فالملح هناك سائل دائمًا تقريبًا** — ولهذا يُزال بفواصل رطوبة لا بفلاتر جسيمات.

والاستثناء المثير: **حين يعمل نظام تسخين المدخل (منع التجمد)**، فإن تسخين الهواء يخفض رطوبته النسبية، وقد ينزل بها تحت 45% فيتحول الملح إلى بلورات جافة — وعندها يصبح قابلًا للإزالة بالفلاتر لا بالفواصل. **أي أن تشغيل نظام منع التجمد يغيّر فيزياء إزالة الملح نفسها.** وهذه من التفاصيل التي تُميّز من فهم المنظومة عمن حفظ مكوناتها.

25.5 الفلاتر: ساكنة أم ذاتية التنظيف؟

القرار الأهم في تصميم منظومة السحب.

الفلاتر الساكنة (Static / Barrier Filters)

عناصر فلترة ثابتة تُستبدل حين يرتفع فقد الضغط عبرها إلى الحد المسموح. بسيطة، بلا أجزاء متحركة، وبكفاءات عالية جدًا متاحة.

- **الميزة:** بساطة، وإمكانية بلوغ كفاءات فلترة عالية جدًا (فئات E وH بمصطلحات المعايير الحديثة)، وتكلفة رأسمالية أقل.
- **العيب:** استبدال دوري بتكلفة مستمرة ووقت عمل، وفقد ضغط يتزايد بين استبدال وآخر، وحساسية عالية للبيئات شديدة الأتربة.
- **الأنسب لـ:** البيئات النظيفة إلى المتوسطة، والمواقع الداخلية.

الفلاتر ذاتية التنظيف بالنبض (Pulse-Jet Self-Cleaning)

خراطيش أسطوانية يمر الهواء عبرها من الخارج إلى الداخل، فتتراكم طبقة الغبار (Dust Cake) على السطح الخارجي. وعند بلوغ فقد الضغط حدًا معيّنًا، **تُطلَق نفخة قصيرة جدًا من الهواء المضغوط في الاتجاه المعاكس (من الداخل إلى الخارج)**، فتنشقّ طبقة الغبار وتسقط. وتُسمى هذه العملية في الميدان **"Huff and Puff"**.

- **الميزة:** فقد ضغط شبه ثابت مع الزمن بدل التزايد المستمر، وعمر عناصر أطول بكثير، وقدرة على العمل في بيئات شديدة الأتربة، **وقدرة أصيلة على منع التجمد** (وهذه الأخيرة سنفصّلها بعد قليل).
- **العيب:** يحتاج منظومة هواء مضغوط وخزّان وصمامات ومنطق تحكم، وتكلفة رأسمالية أعلى، وأجزاء متحركة تحتاج صيانة.
- **الأنسب لـ:** البيئات الصحراوية شديدة الغبار، والمواقع القطبية، والمواقع التي يصعب فيها الوصول للاستبدال المتكرر.

منطق التحكم بالنبض — ما يجب أن يعرفه مهندس التحكم

- الإطلاق بفقد الضغط **(DP-based):** الأشيع والأصح — تُطلق دورة النبض عند بلوغ حدّ محدد، وتتوقف عند العودة تحت حد أدنى. وهذا يوفّر الهواء المضغوط ويطيل عمر العناصر.
- الإطلاق بمؤقّت **(Timer-based):** في المواقع خفيفة الغبار.
- **الإطلاق بحسّاس نقطة الصقيع:** يبدأ النبض عند اكتشاف احتمال تكوّن جليد — أي قبل ارتفاع فقد الضغط أصلًا.
- **سلّم التصعيد:** إن استمر فقد الضغط في الارتفاع **رغم** النبض ← إنذار. وإن بلغ الحد الحمائي ← إيقاف الوحدة. وهذا سلّم تصعيد كلاسيكي بمنطق الفصل الحادي والعشرين: النظام يحاول العلاج أولًا، ثم ينبّه، ثم يحمي.

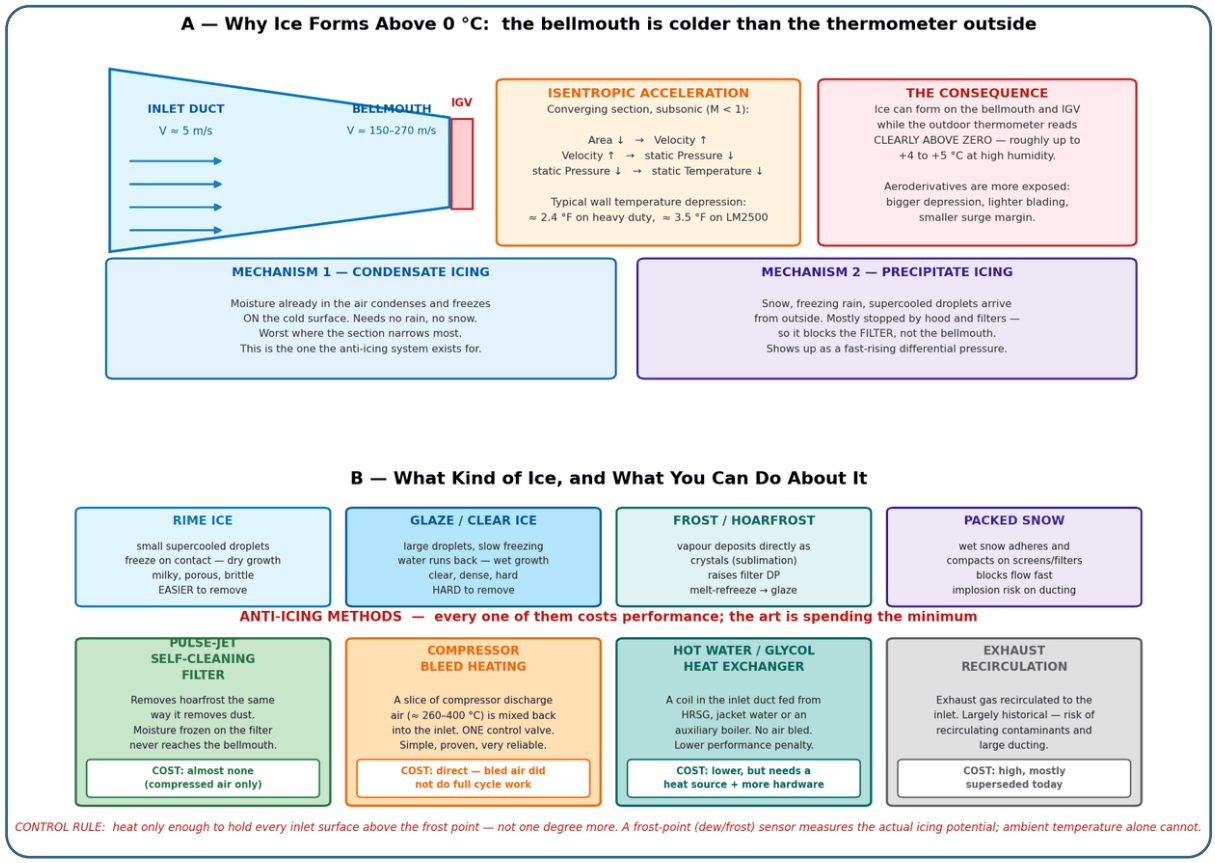
فقد الضغط عبر منظومة السحب ليس رقمًا صحيًا فقط — إنه خسارة أداء مباشرة ودائمة. كل مليمتر ماء من فقد الضغط عند المدخل هو ضغط لن يستعيده الضاغط أبدًا. والقاعدة التقريبية المستخدمة في الصناعة أن كل نحو 25 مليمتر ماء (بوصة ماء) من فقد ضغط المدخل يكلّف في حدود **0.3–0.5% من القدرة**، ويرفع معدل الحرارة بنسبة مشابهة. وهذا يعني أن منظومة سحب مهملة قد تكلّف المحطة **1–2% من قدرتها بشكل دائم** — وهو رقم يفوق في قيمته السنوية تكلفة استبدال الفلاتر بأضعاف. **ولهذا فإن تتبّع منحنى فقد الضغط مقابل الزمن ينبغي أن يكون على شاشة المشغّل، لا في تقرير شهري.**

25.6 التجمد: لماذا يحدث في جو فوق الصفر؟

هذه من أجمل النقاط الفيزيائية في هذا الكتاب، وأكثرها إثارة للدهشة عند سماعها أول مرة.

المفارقة: يمكن أن يتكوّن جليد على فوهة الدخول وريش IGV بينما ميزان الحرارة الخارجي يقرأ **فوق الصفر بوضوح** — وقد يصل ذلك إلى نحو +4 أو +5 درجات مئوية عند رطوبة عالية.

والتفسير في تسارع الهواء داخل الفوهة المتقاربة (Bellmouth).



الشكل 25.3 — أعلى: فيزياء التجمد بمدخل التوربين — التسارع داخل فوهة الدخول وانخفاض الحرارة الساكنة وآليتا التجمد. أسفل: أنواع الجليد وطرق منع التجمد الأربع.

الهواء يدخل مجرى السحب بسرعة منخفضة — في حدود 5 أمتار في الثانية. ثم يصل إلى فوهة الدخول، وهي **مقطع متقارب**. ومن معادلة الاستمرارية والعلاقات الأيزنتروبية للتدفق دون الصوتي ($M < 1$):

$$A \downarrow \;\Rightarrow\; V \uparrow \;\Rightarrow\; P_{static} \downarrow \;\Rightarrow\; T_{static} \downarrow$$

فتصل السرعة إلى نطاق **150–270 مترًا في الثانية**، وينخفض الضغط الساكن، وتنخفض معه **درجة الحرارة الساكنة**. ويُستعاد جزء من هذا الانخفاض عند الأسطح الصلبة (دعامات المحمل وريش IGV) بفعل الاسترجاع (Recovery)، لكن **تبقى هذه الأسطح أبرد من الجو المحيط بعدة درجات**.

والقيم المحسوبة المنشورة توضح الفرق بين العائلتين: انخفاض حرارة الجدار عند ريش IGV يقارب **3.5** درجة فهرنهايت (نحو **1.9** درجة مئوية) في محرك من فئة **LM2500**، مقابل **2.4 درجة فهرنهايت (نحو 1.3 درجة مئوية) في آلة صناعية ثقيلة**. وهذه أرقام **جدار مقاسة** في اختبارات بعينها؛ أما حدّ الجو المحيط الأعلى المذكور أعلاه فيجمع إلى انخفاض الحرارة الساكنة أثرَ تبخّر الرطوبة على الأسطح، ولذلك يتجاوز الفارق المقاس على الجدار وحده. وهذا الفرق ليس تفصيلًا: **الآلات المشتقة من الطيران أكثر عرضة للتجمد** — انخفاض حرارة أكبر، وريش ضاغط أخف، وهامش انحباس أضيق. (راجع الفصل الرابع والعشرين.)

آليتان مختلفتان للتجمد

1) التجمد التكاثفي **(Condensate Icing)**. الرطوبة الموجودة أصلًا في الهواء تتكاثف وتتجمد **على السطح البارد**. لا تحتاج مطرًا ولا ثلجًا — يكفي هواء رطب وسطح تحت نقطة الصقيع. **وهذه هي الآلية التي وُجدت أنظمة منع التجمد من أجلها**، لأنها تحدث في أخطر موضع: الفوهة وريش IGV، أي بعد كل الفلاتر.

2) التجمد الترسيبي **(Precipitate Icing)**. ثلج أو مطر متجمد أو قطرات فائقة التبريد تصل من الخارج. وهذه في معظمها **يوقفها غطاء المدخل والفلاتر** — فتظهر المشكلة كارتفاع سريع في فقد الضغط عبر الفلتر، لا كجليد في الفوهة. والخطر الأساسي منها هو القطرات فائقة التبريد التي تلتصق فورًا عند الملامسة.

أنواع الجليد — ولماذا يهم التمييز

النوع	كيف يتكوّن	الخصائص	صعوبة الإزالة
Rime (جليد ضبابي)	قطرات صغيرة فائقة التبريد تتجمد فور الملامسة — **نمو جاف**	حليبي، مسامي، محتبس الهواء، أقل كثافة، هشّ	**أسهل**
Glaze (جليد صافٍ)	قطرات كبيرة تتجمد ببطء، فيجري جزء من الماء للخلف قبل التجمد — **نمو رطب**	شفاف، كثيف، صلب، شديد الالتصاق	**أصعب بكثير**
Frost / Hoarfrost (صقيع)	بخار الماء يترسب مباشرة كبلورات (تسامي عكسي)	طبقة بلورية زغبة	يرفع فقد الضغط، وخطره في ذوبانه ثم تجمده ثانية كGlaze
ثلج متراكم	ثلج رطب يلتصق ويتراكم على الشبكات والفلاتر	يسدّ المرور بسرعة	خطر انهيار/انبعاج المجاري بفعل الضغط السالب

الأخطار الفعلية

- **انسداد الفلاتر** ← ارتفاع فقد الضغط ← فقد قدرة، ثم إيقاف، وفي الحالات الشديدة انبعاج المجاري بفعل قوى الانضغاط الداخلي **(Implosion)**.
- **تراكم الجليد في فوهة الدخول** ← تضييق مساحة المرور ← **تقليص هامش الانحباس** في الضاغط.
- **انفصال قطع الجليد** ← **FOD** مباشر على المراحل الأولى (راجع 16.2).
- **مرور هواء غير مُرشَّح** إذا انسدّ الفلتر وفُتح مسار تجاوز.

25.7 أنظمة منع التجمد — والمفاجأة: الفلتر نفسه أحدها

1) الفلتر ذاتي التنظيف كنظام منع تجمد

هذه نتيجة عملية مهمة جدًا وربما غير متوقعة: **خراطيش الفلتر ذاتي التنظيف تزيل الصقيع بنفس الطريقة التي تزيل بها الغبار.**

وأكثر من ذلك، كشفت الاختبارات الميدانية آليتين تفسران فاعليتها:

الآلية الأولى: حين يكون الهواء المحيط مشبعًا بالنسبة للجليد، **يتكوّن الصقيع على السطح الخارجي لعناصر الفلتر نفسها**، فيخرج الهواء من الفلتر عند نقطة الصقيع تمامًا. **والرطوبة التي تجمّدت على الفلتر لم تعد متاحة لتسبب مشكلة في الفوهة.** أي أن الفلتر يعمل كمصيدة رطوبة. وحين يتراكم الصقيع أكثر من اللازم، تزيله دورة التنظيف الذاتي.

والآلية الثانية: قياسات الاختبار أظهرت أن حرارة الهواء في فوهة الدخول تكون **أدفأ بنحو 2–3 درجات فهرنهايت (نحو 1–1.7 درجة مئوية)** من الهواء الخارج من حجرة الفلاتر — حتى بدون أي نظام تسخين — بفعل الكسب الحراري في المجرى.

والنتيجة الميدانية الموثّقة: اختبار ممتد على محرك LM2500 في غرب كندا خلال شتاء كامل، بفلتر ذاتي التنظيف **وبلا أي تسخين مدخل**، غطى نحو 2700 ساعة تشغيل شتوية بتسجيل مستمر للحرارة والرطوبة وفقد الضغط، مع تصوير بالفيديو عبر منافذ رؤية داخل البلينوم. النتيجة: ظهور صقيع على ريش IGV لفترة تقل عن دقيقة واحدة فقط، **بلا أي تراكم ولا أي مشكلة تجمد.**

ولهذا السبب أصبح الفلتر ذاتي التنظيف **النظام القياسي في البيئات عالية احتمال التجمد**، بل صار الخيار المفضّل في كندا لهذا السبب تحديدًا — لا لقدرته على الفلترة وحدها.

2) التسخين بنزف الضاغط (Compressor Bleed Inlet Heating)

النظام المستخدم عمليًا اليوم حين يلزم تسخين إضافي. الفكرة: **يُسحب جزء صغير من هواء مخرج الضاغط ويُخلط بالهواء الداخل** عند مدخل المنظومة.

وهواء مخرج الضاغط ساخن بطبيعته نتيجة الضغط — في نطاق يقارب **500 إلى 750 درجة فهرنهايت (نحو 260 إلى 400 درجة مئوية)** حسب الظروف المحيطة وطراز التوربين. ولحساب كمية الهواء الساخن اللازمة، يكفي توازن حراري بسيط:

$$\frac{W_{hot}}{W_{mixed}} = \frac{T_{mixed} - T_{ambient}}{T_{hot} - T_{ambient}}$$

مزاياه: بساطة شديدة — **صمام تحكم واحد فقط**. وموثوقية ممتازة موثّقة في ألاسكا وكندا وبحر الشمال. واستجابة سريعة.

وثمنه: تدهور أداء مباشر، لأن الهواء المنزوف ضُغط ولم يُستكمل توسّعه عبر التوربين. ولهذا فإن **القاعدة التصميمية هي: سخّن الحد الأدنى الضروري فقط** لإبقاء كل أجزاء المنظومة فوق نقطة الصقيع، ولا درجة واحدة زيادة.

3) المبادل الحراري بالماء الساخن أو الجلايكول

ملف تسخين في مجرى السحب يُغذّى من مصدر حرارة متاح: مرجل استرداد الحرارة، أو ماء التبريد، أو مرجل مساعد. **لا يُنزف هواء إطلاقًا**، ولذلك فإن **أثره على أداء التوربين أقل من نظام النزف** — وهذه نتيجة أكدتها دراسات مقارنة بين النظامين على وحدات صناعية. وثمنه معدات إضافية وحاجة إلى مصدر حرارة.

4) إعادة تدوير العادم (Exhaust Recirculation) — تاريخي أساسًا

كان يُستخدم في الأنظمة المبكرة، إلى جانب استرداد حرارة العادم. **لم يعد شائعًا اليوم** — بسبب حجم المجاري المطلوبة، وخطر إعادة تدوير ملوّثات العادم إلى المدخل، وأثره الأكبر على الأداء.

منطق التحكم بمنع التجمد

نقطة جوهرية يخطئ فيها كثيرون: درجة الحرارة وحدها لا تكفي لتحديد الحاجة إلى التسخين.

فالجو عند +2 مئوية ورطوبة 30% لا يمثل خطرًا يُذكر، بينما الجو عند +2 مئوية ورطوبة 95% خطر حقيقي. **ما نحتاجه هو قياس احتمال التجمد نفسه، لا الحرارة.**

والحل: حسّاس نقطة الندى/الصقيع **(Frost Point Sensor)**. ومبدأ عمله أنيق: شعاع من ثنائي باعث للضوء (LED) ينعكس على سطح مصقول مبرَّد كهربائيًا نحو ترانزستور ضوئي. **يُبرَّد السطح حتى تبدأ الرطوبة أو الصقيع بالترسب عليه فيقطع الشعاع.** وعند تلك اللحظة تُقاس حرارة السطح — والفرق بينها وبين حرارة الهواء **هو احتمال التجمد مباشرة.**

وميزته الحاسمة أنه **يقيس الرطوبة المطلقة**، متجنبًا المشاكل المعروفة لحسّاسات الرطوبة النسبية (انحراف، تلوث، بطء استجابة)، ويعطي إشارة تصلح مباشرة للدخول في منطق التحكم.

وبنية المنطق النموذجية:

- **شرطان معًا** — حرارة تحت عتبة، **و** احتمال تجمد مؤكَّد من حسّاس نقطة الصقيع.
- حزام تخميد **(Hysteresis)** واضح، لأن هذا نظام يعمل عند حافة حالة جوية متذبذبة — وبدون التخميد سيرفرف الصمام باستمرار (راجع 12.11).
- **تعديل تناسبي** لموضع صمام النزف بحسب حجم الفارق، لا تشغيل/إيقاف فقط.
- **إنذار عند تشغيل النظام** — لأن المشغّل يجب أن يعرف أنه يدفع الآن ثمن أداء، وأن يتوقع نقص القدرة المتاحة.
- **مراقبة فقد ضغط الفلتر** كخط دفاع مستقل: ارتفاعه السريع في جو بارد رطب مؤشر مباشر على تجمد ترسيبي.

25.8 تبريد هواء السحب: الفيزياء أولًا

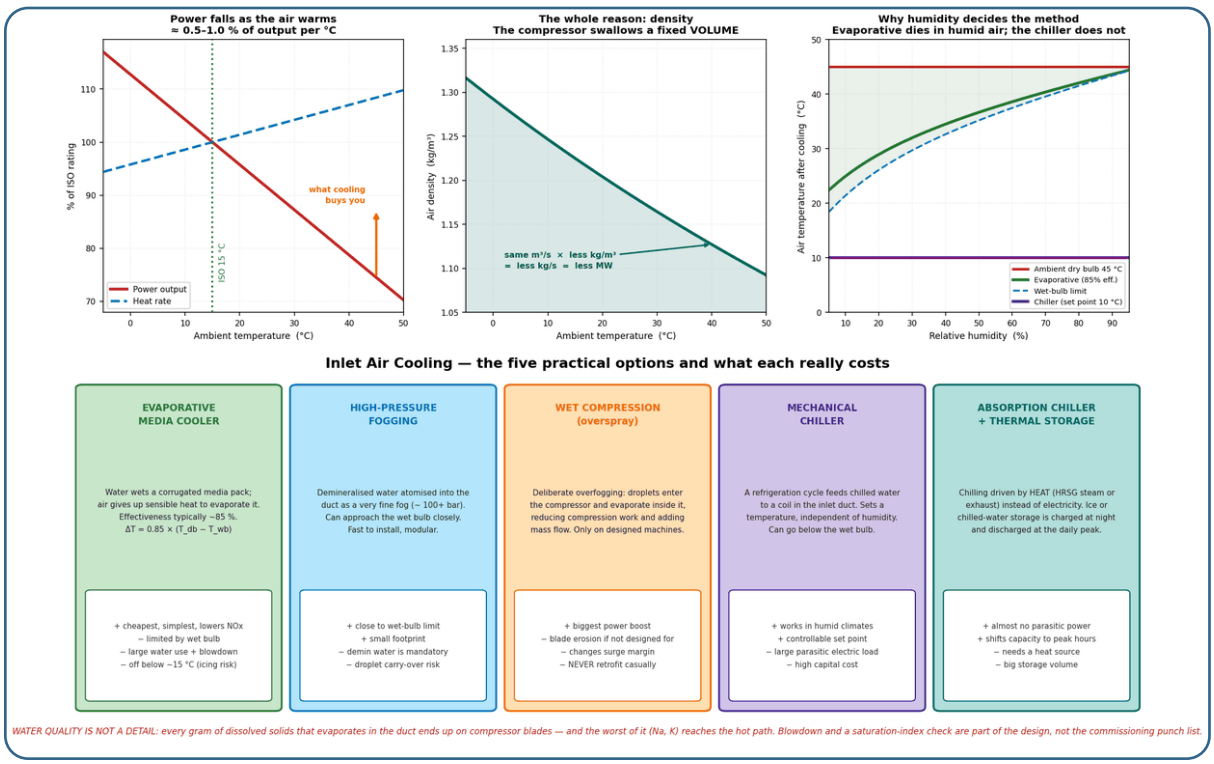
ننتقل الآن إلى الوجه المعاكس تمامًا، وهو الأهم عمليًا في منطقة الخليج والمناطق الحارة.

العلاقة الأساسية: التوربين الغازي **آلة ذات إزاحة حجمية شبه ثابتة**. الضاغط عند سرعة دوران محددة يبتلع **حجمًا** ثابتًا من الهواء في الثانية. والقدرة تتناسب طرديًا مع **الكتلة** المارّة، لا الحجم. والعلاقة بينهما هي الكثافة:

$$\dot{m} = \rho \times \dot{V}, \quad \rho = \frac{P}{R\,T}$$

فإذا ارتفعت درجة الحرارة، انخفضت الكثافة، وانخفضت الكتلة المارّة عند نفس الحجم — **فانخفضت القدرة**. ويُضاف إلى ذلك أثر ثانٍ: شغل الضغط نفسه يزداد مع ارتفاع حرارة الدخول، لأن الغاز الأسخن يحتاج شغلًا أكبر لبلوغ نفس نسبة الضغط.

والنتيجة العملية المعروفة: كل درجة مئوية إضافية في حرارة هواء الدخول تكلّف نحو 0.5 إلى 1.0% من القدرة، مع ارتفاع مصاحب في معدل الحرارة (أي انخفاض الكفاءة).



الشكل 25.4 — أعلى: أثر حرارة هواء الدخول على القدرة ومعدل الحرارة، وسببه الفيزيائي، وحدود كل طريقة تبريد بحسب الرطوبة. أسفل: مقارنة الطرق الخمس العملية.

والمفارقة الاقتصادية التي تجعل هذا الموضوع مهمًا: أشدّ ساعات الطلب على الكهرباء هي بالضبط أشدّ ساعات النهار حرارةً — أي اللحظة التي تكون فيها قدرة التوربين في أدنى مستوياتها، وسعر الكهرباء في أعلى مستوياته. **تبريد هواء السحب يعالج هذا التعارض من جذره**، ولهذا يُصنَّف عادةً كأحد أسرع الاستثمارات استردادًا لتكلفتها في المناطق الحارة.

25.9 طرق التبريد الخمس ومقارنتها

1) التبريد التبخيري بالوسائط (Evaporative Media Cooler)

الهواء يمر عبر حزمة وسائط ليفية مموّجة مبللة بالماء. الماء يتبخر ممتصًا **الحرارة الكامنة للتبخر** من الهواء نفسه، فتنخفض درجة حرارة الهواء الجافة. والعملية تسير على خط **إنثالبي ثابت**: حرارة محسوسة تُستبدل بحرارة كامنة.

والحد النظري المطلق: درجة حرارة البصيلة الرطبة **(Wet Bulb)**. لا يمكن للتبريد التبخيري أن ينزل دونها مهما فعلت.

وتُعرَّف **فاعلية المبرّد** بالنسبة:

$$\text{Effectiveness} = \frac{T_{1,DB} - T_{2,DB}}{T_{1,DB} - T_{1,WB}}$$

والفاعلية النموذجية تقارب 85%، ومنها:

$$\Delta T_{DB} = 0.85 \times (T_{DB} - T_{WB})$$

مثال عددي: جو عند 38 درجة مئوية ورطوبة نسبية 32%. البصيلة الرطبة المقابلة تقارب 24 درجة. فيكون الانخفاض:

$$\Delta T = 0.85 \times (38 - 24) = 11.9\ ^\circ\text{C}$$

أي أن الهواء يدخل الضاغط عند نحو 26 درجة بدل 38 — ما يقارب **10% زيادة في القدرة**.

نقاط تشغيلية:

- **نقطة ضبط دنيا للحرارة المحيطة** يُوقَف تحتها النظام — عادةً في حدود 15 درجة مئوية — **لتفادي خطر التجمد داخل المجرى**. وعند احتمال هبوط الحرارة تحت الصفر يجب **تعطيل النظام وتفريغه بالكامل** لحماية الخزان والأنابيب، ولمنع انسداد الوسائط بالجليد.
- مزيلات الرذاذ **(Drift Eliminators)** بعد الوسائط كطبقة أمان ضد انجراف قطرات غير متبخرة.
- **فائدة بيئية جانبية:** زيادة بخار الماء في هواء الدخول تخفض **NOx** بنفس منطق حقن الماء الذي شرحناه في 22.5.

2) الترذيذ الضبابي عالي الضغط (High-Pressure Fogging)

حقن ماء منزوع المعادن على شكل ضباب دقيق جدًا مباشرة في مجرى الهواء، بضغوط تتجاوز مئة بار عبر فوهات دقيقة. القطرات الصغيرة جدًا تتبخر في الهواء نفسه.

الميزة: يمكن أن يقترب من حد البصيلة الرطبة أكثر من الوسائط، وحجمه أصغر، وتركيبه أسرع، ويمكن توسيعه على مراحل. **العيب: ماء منزوع المعادن إلزامي بلا استثناء**، وضبط دقيق لحجم القطرات وتوزيع الفوهات، وخطر وصول قطرات غير متبخرة إلى الضاغط.

3) الضغط الرطب (Wet Compression / Overspray)

ترذيذ **زائد عن قصد** بحيث تدخل قطرات إلى الضاغط وتتبخر **داخله**. والأثر مزدوج: تبريد بين المراحل يقلل شغل الضغط، وزيادة في كتلة المائع المارّ.

وهذا يعطي أكبر زيادة في القدرة بين كل الطرق — لكنه **لا يجوز إطلاقًا على آلة غير مصممة له**. والفرق بين الميزة والضرر هنا هو التصميم المقصود لا كمية الماء: قطرات تدخل ضاغطًا غير مهيأ تعني **تعرية بحواف ريش المراحل الأولى**، وتغيّرًا في هامش الانحباس، وإجهادًا غير محسوب.

4) التبريد الميكانيكي (Mechanical Chiller)

دورة تبريد فعلية تغذّي ماءً مبرّدًا إلى ملف مبادل في مجرى السحب.

الميزة الحاسمة: لا يتقيد بالبصيلة الرطبة إطلاقًا. يمكنه التبريد إلى درجة محددة سلفًا بغض النظر عن الرطوبة — ولهذا فهو **الخيار الوحيد المجدي فعليًا في المناطق الساحلية الرطبة** حيث ينهار التبريد التبخيري. **العيب:** تكلفة رأسمالية عالية، **واستهلاك ذاتي كهربائي كبير** يقتطع من صافي المكسب — وهذا الاستهلاك يقع بالضبط في ساعة الذروة التي بُني النظام لأجلها، وهي مفارقة يجب حسابها بدقة.

5) التبريد الامتصاصي والتخزين الحراري (Absorption Chilling + TES)

التبريد الامتصاصي يعمل بالحرارة لا بالكهرباء — يستخدم بخارًا من مرجل الاسترداد أو حرارة عادم، بمحلول ليثيوم بروميد/ماء أو ماء/أمونيا. **فيلغي تقريبًا الاستهلاك الكهربائي الذاتي** — وهذه ميزته الكبرى.

والتخزين الحراري **(Thermal Energy Storage)** يضيف بُعدًا زمنيًا ذكيًا: تُشحن كتلة تخزين (جليد أو ماء مبرّد) **ليلًا** حين تكون الكهرباء رخيصة والجو بارد والوحدات أقل تحميلًا، **ثم تُفرَّغ نهارًا** في ساعة الذروة. فتحصل على تبريد عميق في اللحظة الأغلى **دون استهلاك كهربائي في تلك اللحظة**. والثمن: حجم تخزين كبير، وتعقيد تشغيلي إضافي.

جدول القرار السريع

إذا كان الموقع...	فالخيار الأنسب
حار وجاف (صحراوي داخلي) وماء متاح	**تبريد تبخيري بالوسائط** — الأبسط والأوفر
حار وجاف، والمساحة محدودة	**ترذيذ ضبابي**
حار ورطب (ساحلي)	**مبرّد ميكانيكي أو امتصاصي** — التبخيري بلا جدوى تقريبًا
به بخار فائض أو دورة مركبة	**امتصاصي** — يستفيد من حرارة متاحة أصلًا
فارق سعري كبير بين الذروة وخارجها	**تخزين حراري**
مياه شحيحة أو رديئة	**مبرّد** (لا يستهلك ماءً بالتبخير)
الآلة مصممة أصلًا للضغط الرطب	**ضغط رطب** ضمن حدود المصنّع

جودة الماء ليست تفصيلًا — إنها شرط سلامة للآلة. أي ماء يتبخر داخل مجرى السحب يترك أملاحه ومعادنه خلفه. ووجهتها النهائية هي شفرات الضاغط أولًا (تلوّث)، ثم المسار الساخن (تآكل ساخن — راجع 25.3).

وفي أنظمة الوسائط تحديدًا توجد مشكلة تراكمية دقيقة: إذا أُضيف ماء التعويض بمقدار المتبخر فقط، **فإن الماء في الخزان يزداد تركّزًا بالأملاح باطراد**، حتى تترسب على الوسائط فتقلل فاعلية التبخر، ويزداد خطر انجراف الأملاح مع الهواء. والعلاج هو التصريف المستمر **(Blowdown)** — بمعنى سحب جزء من ماء الخزان باستمرار لتخفيف تركيز الأملاح.

وبالتالي فإن **إجمالي الماء اللازم = ماء التبخر + ماء التصريف**. وتُقيَّم صلاحية الماء عبر مؤشر تشبّع **(Saturation Index)** يجمع العسر الكلي والقلوية والمواد الذائبة الكلية ودرجة الحموضة. **وهذا حساب يجب أن يتم في مرحلة التصميم، لا أن يُكتشف من فحص شفرات بعد سنة.**

25.10 البيئات الخاصة

البيئة	التحدي الرئيسي	الحلول النموذجية
بحرية / منصات	ملح في صورة قطرات مشبعة؛ رياح عالية ترفع التركيز وحجم القطرات	فواصل رطوبة ثلاثية المراحل، رفع منسوب المدخل، طلاءات واقية، مراقبة صارمة لNa
ساحلية	ملح بلوري لا قطرات (بعيدًا عن خط الموج)	فلاتر عالية الكفاءة تكفي غالبًا بدل الفواصل
صحراوية	غبار ناعم كثيف، عواصف ترابية، تقلّب حراري يومي كبير	فلاتر ذاتية التنظيف، مراحل تمهيدية، غسيل ضاغط متكرر
قطبية / باردة	تجمد، ثلج متطاير، ضباب جليدي (Ice Fog)	فلاتر ذاتية التنظيف، تسخين بالنزف، **رفع حجرة الفلاتر**
صناعية / قرب مصافٍ	أبخرة هيدروكربونية وكبريت وجسيمات لزجة	فلترة متعددة المراحل، ربما فلاتر كربونية، متابعة تلوّث الضاغط

تفصيل تصميمي أنيق للمواقع الثلجية: رفع حجرة فلاتر السحب إلى ارتفاع أعلى يقلّل كمية الثلج المتطاير الداخل بشكل كبير — تشير الدراسات إلى أن تدفق الثلج المتطاير ينخفض بمعامل يقارب **خمسة أضعاف** عند الانتقال من ارتفاع نحو مترين إلى نحو ثمانية أمتار. ولا فائدة تُذكر من الرفع أكثر، لأن الثلج المدفوع بالرياح يتركز قرب سطح الأرض. **حلّ لا يكلّف شيئًا في مرحلة التصميم ويستحيل تصحيحه بعد الإنشاء.**

وظاهرة تستحق الذكر في المواقع شديدة البرودة: الضباب الجليدي **(Ice Fog)**. عند حرق الوقود تتحرر حرارة وبخار ماء معًا. الحرارة تميل إلى خفض الرطوبة النسبية، والبخار يميل إلى رفعها. وفي الأجواء الأدفأ من نحو −29 درجة مئوية يغلب أثر الحرارة فتنخفض الرطوبة؛ أما في الأجواء الأبرد من نحو −34 درجة **فيغلب أثر البخار فترتفع الرطوبة** — وإذا منعت الأحوال الجوية اختلاط الهواء، تكوّن ضباب جليدي يكون فيه الجو مشبعًا بالنسبة للجليد. أي أن **عادم الوحدة نفسه قد يصنع الظرف الذي يهدد مدخلها**، وهذا اعتبار حقيقي في تخطيط مواقع المدخل والعادم في المناطق القطبية.

25.11 من الميدان: مصفوفة تشخيص لمنظومة السحب

العَرَض	الأسباب المرجحة	الفحص الأول	ملاحظة
فقد ضغط مرتفع تدريجيًا	تحميل فلاتر طبيعي / نبض غير فعّال / وسائط مبتلة	قارن بمنحنى الأساس المسجّل عند التسليم	التدرّج البطيء طبيعي؛ المهم معدّله لا قيمته
فقد ضغط يقفز فجأة	ثلج أو مطر متجمد / انسداد بمواد خارجية / وسائط منهارة	افحص الجو الآن وحالة الفلاتر بصريًا	في جو بارد رطب: افترض التجمد أولًا
نبض التنظيف لا يخفض **DP**	ضغط هواء منخفض / صمامات نبض معطلة / خراطيش مشبعة نهائيًا	افحص ضغط خزان الهواء وتتابع الصمامات	إن كانت الخراطيش مشبعة بالزيت فلن ينفع أي نبض
نبض متكرر جدًا	حد **DP** منخفض / بيئة شديدة الغبار / تسرّب بصمام	راجع نقاط الضبط وسجل عدد النبضات	النبض المفرط يقصّر عمر الخراطيش
قدرة أقل من المتوقع بلا سبب حراري	فقد ضغط سحب مرتفع / تلوّث ضاغط	صحّح الأداء للظروف المرجعية (17.2)	افصل بين فقد المدخل وتدهور الضاغط
تلوث ضاغط سريع رغم فلترة جيدة	مصدر تلوث **بعد** الفلتر	افحص تسرّبات الزيت وأختام المحامل	الفلتر لا يحمي مما يتولّد خلفه
جليد على **IGV** والجو فوق الصفر	تجمد تكاثفي طبيعي	افحص عمل نظام منع التجمد وحسّاس نقطة الصقيع	ليس عطلًا في القياس — إنها الفيزياء (25.6)

العَرَض	الأسباب المرجحة	الفحص الأول	ملاحظة
نظام منع التجمد يرفرف	غياب حزام تخميد / حسّاس متذبذب	راجع منطق التشغيل والتخميد	مشكلة تحكم لا مشكلة معدة
قدرة منخفضة في الشتاء رغم برودة الجو	نظام منع التجمد يعمل بلا داعٍ	راجع شرطي التشغيل وقيمة النزف	تسخين زائد = فقد أداء مستمر
ترسبات ملحية على ريش الضاغط	فاصل رطوبة / أختام مصارف / ماء تبريد رديء	افحص الفاصل والمصارف وجودة الماء	تتبّع Na في تحليل الترسبات
تبريد تبخيري بلا أثر يُذكر	رطوبة عالية / وسائط متكلّسة / توزيع ماء غير متجانس	احسب البصيلة الرطبة الآن	قد يكون النظام سليمًا والفيزياء هي الحد
قطرات ماء تصل للضاغط	مزيل رذاذ / فوهات ترذيذ / ضغط ترذيذ	افحص مزيل الرذاذ ونمط الفوهات	خطر تعرية فوري — أوقف النظام
صوت أو اهتزاز في مجاري السحب	ارتخاء ألواح / انبعاج جزئي / اضطراب تدفق	فحص بصري داخلي عند أول فرصة	خطر FOD من أجزاء المجرى نفسها

25.12 خلاصة الفصل

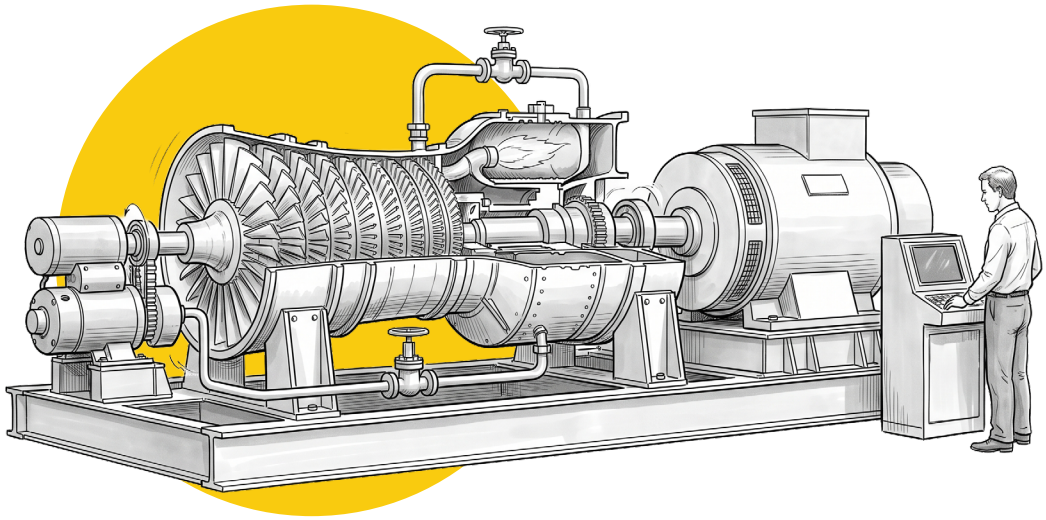
- **معظم الهواء الداخل لا يحترق** — نحو ثلاثة أرباعه يذهب لتبريد بطانة الغرفة وتخفيف الغاز وتبريد المسار الساخن. ولهذا تصل الملوّثات إلى الأجزاء الساخنة **دون أن تمر باللهب**، وتسدّ الجسيمات الناعمة ثقوب التبريد.
- **أربع آليات ضرر لا واحدة:** تعرية (أكبر من 20 ميكرون)، وتلوّث (حتى 20% فقد قدرة)، وتآكل، وتآكل ساخن من Na وK وV وPb بحد يقارب 0.005 جزء بالمليون في الهواء.
- **منظومة السحب سلسلة لا جهاز:** غطاء، شبكة، فاصل رطوبة، تمهيدي، رئيسي، وحدة تكييف، مكتم، بلينوم — كل حلقة لملوّث مختلف.
- **الفلتر ذاتي التنظيف يحلّ مشكلتين بجهاز واحد**: الغبار الكثيف **والصقيع** — وهذا سبب اعتماده قياسيًا في البيئات الباردة، بشهادة اختبارات ميدانية ممتدة.

- **التجمد يحدث فوق الصفر** بسبب هبوط الحرارة الساكنة في فوهة الدخول المتقاربة — وهو أشد في الآلات المشتقة من الطيران.
- **درجة الحرارة وحدها لا تكفي لقرار منع التجمد** — يلزم قياس احتمال التجمد بحسّاس نقطة صقيع، وتسخين الحد الأدنى فقط.
- **التسخين بنزف الضاغط أبسط وأوثق نظام تسخين، لكنه يكلّف أداءً؛ والمبادل بالماء الساخن أقل كلفة أداء لكنه يحتاج مصدر حرارة.**
- **كل درجة مئوية في هواء الدخول تساوي 0.5–1% من القدرة** — والتبريد يشتري قدرة في اللحظة التي تكون فيها أغلى.
- **التبريد التبخيري محدود بالبصيلة الرطبة؛ والمبرّد ليس كذلك** — وهذا هو المعيار الأول لاختيار الطريقة.
- **فقد الضغط عبر المدخل خسارة دائمة** بمعدل يقارب 0.3–0.5% من القدرة لكل بوصة ماء — تتبّعه على شاشة المشغّل لا في تقرير شهري.
- **جودة الماء شرط سلامة**: التصريف المستمر ومؤشر التشبّع جزء من التصميم لا من قائمة التسليم.

وخلاصة الخلاصة: مدخل الهواء هو المكان الوحيد في التوربين الذي تستطيع فيه أن تحدّد **ما الذي يدخل الآلة أصلًا**. وكل ما يفلت منه هنا سيُدفع ثمنه لاحقًا — في ريشة متآكلة، أو ثقب تبريد مسدود، أو ميغاواط لا تظهر على العدّاد. **إنه أرخص موضع في المنظومة كلها للوقاية، وأغلى موضع للإهمال.**

الفصل السادس والعشرون:

تسلسل بدء التشغيل — من الفحص القبلي إلى التحميل



26.1 لماذا فصل كامل لعملية البدء؟

شرحنا في 9.3 منطق التحكم بالبدء والإيقاف من زاوية نظام التحكم. وهذا الفصل يكمّله من زاوية أخرى تمامًا: **زاوية المهندس الواقف أمام الوحدة، ومعه قائمة، وأمامه شاشة، ومسؤولية أن يخرج الأمر بشكل صحيح.**

والسبب أن **البدء هو أكثر مراحل حياة التوربين كثافةً في الأحداث وأعلاها في احتمال الخطأ**. في نحو عشرين إلى ثلاثين دقيقة (أو خمس إلى عشر في وحدة أيروديريفاتيف) تنتقل الآلة من السكون التام إلى دوران بثلاثة آلاف دورة في الدقيقة واحتراق يتجاوز ألف درجة. وخلال هذه الدقائق:

- تتغيّر **حالة العشرات من المعدات المساعدة** — مضخات ومراوح وصمامات وقواطع.
- تتبدّل **مجموعة الحمايات النشطة** أكثر من مرة، فما هو حماية في مرحلة قد يكون سلوكًا طبيعيًا في أخرى.
- تُدخَل **مادة قابلة للاشتعال** إلى حجم مغلق ساخن — وهذا هو أخطر ما في الأمر.
- وتمرّ الآلة عبر **سرعات حرجة** ومناطق إجهاد حراري عابر.

والأهم: كثير من الأعطال التي تظهر لاحقًا أثناء التشغيل تكون **قد وُلدت أثناء بدء غير سليم** — بدء ساخن استهلك عمر ريش، أو تراكم وقود لم يُصرَّف، أو مضخة لم تُختبر فعلًا وإنما فُرض أنها تعمل.

ملاحظة على المحتوى: ما يلي منهجية عامة تصلح كإطار تفكير، **وليست بديلًا عن دليل التشغيل الخاص بوحدتك**. القيم والأرقام والتفاصيل تختلف بين طراز وآخر وبين موقع وآخر. **اقرأ هذا الفصل لتفهم لماذا تُطلب كل خطوة، ثم نفّذ الخطوات من دليلك أنت.**

26.2 لغة الأرقام: كيف تقرأ مخططات المعدات المساعدة

قبل الدخول في التسلسل، لا بد من فك شفرة تواجه كل مهندس جديد أمام مخطط توربين غازي: أسماء المعدات ليست أسماء، بل أرقام أجهزة **(Device Numbers)**.

فبدل أن يقول المخطط «مضخة الزيت المساعدة»، يقول **88QA**. وبدل "مفتاح ضغط الزيت المنخفض" يقول **63QA**. وهذه ليست شفرة سرية — إنها **نظام ترميز قياسي** يجعل المخططات مفهومة عبر الأطقم واللغات والبلدان.

بنية الرمز بسيطة جدًا حين تُفهم:

الجزء	معناه	أمثلة
الرقم الأول (وظيفة الجهاز)	نوع الجهاز	**88** = محرك كهربائي، **63** = مفتاح ضغط، **26** = مفتاح حرارة، **71** = مفتاح مستوى، **45** = كاشف حريق/دخان، **33** = مفتاح موضع، **20** = صمام كهرومغناطيسي
الحرف الأول (النظام)	أي منظومة	**Q** = الزيت (Lube Oil)، **H** = الهيدروليك، **F** = الوقود، **T** = التوربين/الحرارة، **A** = هواء التذرير/الهواء، **V** = التهوية، **E** = العادم، **B** = النافخ/المروحة (Blower)
الحرف/الرقم التالي	الوظيفة الدقيقة والترتيب	تمييز بين متعدد الأجهزة على نفس الوظيفة

وأمثلة توضح المنطق:

- **88QA** — محرك (88) على منظومة الزيت (Q) لمضخة مساعدة (A) ← **مضخة الزيت المساعدة**.
- **88QE** — محرك (88) على منظومة الزيت (Q) للطوارئ (E) ← **مضخة الزيت الطارئة بالتيار المستمر**.
- **63QA** — مفتاح ضغط (63) على منظومة الزيت (Q) ← يبدأ المضخة المساعدة عند انخفاض الضغط.
- **63QT** — مفتاح ضغط (63) على الزيت (Q) للقطع (T) ← **قطع لانخفاض ضغط الزيت**.
- **26QT** — مفتاح حرارة (26) على الزيت (Q) للقطع (T) ← قطع لارتفاع حرارة الزيت.
- **88HR** — محرك (88) هيدروليك (H) للسقّاطة (R - Ratchet) ← **آلية الدوران البطيء**.
- **63TF** — مفتاح ضغط (63) على مدخل التوربين (T) للفلتر (F) ← **فرق ضغط فلاتر السحب** (راجع 25.5).
- **63HG / 63HL** — مفاتيح ضغط الهيدروليك لصمام قطع الغاز / السائل.
- **88BT / 88VG / 88BA** — مراوح تهوية حجرة التوربين / صندوق التروس / الحجرة المساعدة (راجع 6.7).

ولماذا يستحق هذا شرحًا؟ لأن **المهندس الذي يفهم بنية الترميز يستطيع قراءة مخطط لوحدة لم يرها في حياته.** فحين يرى **63QQ** يعرف فورًا: مفتاح ضغط، على الزيت، ولأن الحرف مكرر فالأرجح فرق ضغط الفلتر. وهذه قدرة عملية حقيقية تفرّق بين من يحفظ وحدته ومن يفهم الصناعة.

والمنطق نفسه ينطبق على أسماء الإشارات داخل البرنامج. فمعظم منصات التحكم تستخدم تسمية منهجية للإشارات المنطقية: بادئة تدل على النوع (منطقي، تناظري، ثابت)، ثم مقطع يدل على المنظومة، ثم لاحقة تدل على المرتبة (إنذار، قطع، سماحة). ومن يفهم هذا النمط يستطيع أن يتتبّع إشارة في برنامج لم يره من قبل — وهذا هو جوهر ما شرحناه في 12.13.

26.3 الفحص القبلي (Pre-Start Checks) — لماذا كل بند موجود

القائمة القبلية ليست بيروقراطية. **كل بند فيها وُلد من حادثة.** ولنمرّ عليها مجموعة مجموعة، مع سبب كل بند — لأن المهندس الذي يعرف السبب لن يوقّع على بند لم يفحصه فعلًا.

أ) بعد أي عمل صيانة — قبل كل شيء آخر

- التأكد من مواضع الصمامات وإزالة كل الصفائح العازلة **(Spades / Blinds)** بعد أعمال مثل غسيل الضاغط. **صفيحة عازلة منسية هي السبب الأول لفشل بدء بعد صيانة** — وهي تندرج تحت السؤال الذهبي في هذا الكتاب كله: **"ما الذي تغيّر؟"** (الفصل الثالث عشر).
- **صفيحة عازلة على خط غسيل الضاغط موجودة ومركّبة** — لمنع مسار عكسي غير مقصود.
- **دعامات ومشابك الأنابيب وأجهزة القياس سليمة** — الاهتزاز أثناء التشغيل يفكّ ما تُرك مرتخيًا.

ب) منظومة الزيت — الشريان الذي لا يُساوَم عليه

- **مستوى الزيت في الخزان ضمن النطاق.**
- **تشغيل مضخة الزيت المساعدة والتحقق فعليًا** من: ضغط الطرد، وضغط مشعب الزيت، وضغط المدخل عند كل محمل على حدة، **ومرور الزيت في زجاجات الرؤية على خطوط العودة** — وهذه الأخيرة نقطة يغفلها كثيرون: الضغط الجيد لا يثبت التدفق. **زجاجة رؤية بلا تدفق تعني محملًا محرومًا رغم أن المانومتر يقول إن كل شيء ممتاز.**
- **البحث عن أي تسريب** بينما المنظومة تحت ضغط ودافئة.
- تشغيل مروحة مزيل الرذاذ **(Mist Eliminator)** وضبط الضغط السالب المطلوب في الخزان — لأن ضغطًا خاطئًا هنا يعني إما تسرّب أبخرة زيت إلى الحجرة، أو سحب ملوّثات إلى داخل المنظومة.

- **اختبار انتقال المضخة الطارئة تلقائيًا** بإيقاف المضخة المساعدة — لا بتشغيل الطارئة يدويًا. **الفرق بين الاختبارين هو الفرق بين إثبات أن المضخة تدور وإثبات أن مسار انطلاقها التلقائي سليم** (راجع 6.8).

ج) توصيل المعدات المساعدة ووضعها على «تلقائي»

كل مراوح التهوية (حجرة التوربين، الحجرة المساعدة، صندوق التروس، حجرة الوقود)، ومضخات الهيدروليك المساعدة، ونافخات الهيكل، ومراوح التصريف — **موصولة كهربائيًا، وعلى وضع تلقائي، وأزرار الإيقاف اليدوي محررة**.

وهذه نقطة أخطر مما تبدو: زر إيقاف يدوي مضغوط ومنسي على مروحة تهوية يعني أن المروحة **لن تعمل حين يطلبها المنطق** — والنتيجة إما فشل سماحة (في أحسن الأحوال) أو تراكم غاز في حجرة مغلقة (في أسوئها). راجع 6.7.

د) منظومة الوقود — أخطر ما في القائمة

للوقود الغازي:

- **تصريف مصائد التكثّف** في خط الغاز ومسقط الغاز قرب التوربين. **أي سائل في خط الغاز خطر مباشر** — سيصل إلى الحاقنات كسائل لا كغاز، فيحترق بشكل غير متحكم به ويسبب ارتفاع حرارة موضعيًا وتلف حاقنات (راجع 16.4).
- **التحقق من ضغط الغاز ودرجة حرارته** — والمطلوب هامش كافٍ فوق نقطة الندى (Superheat) لضمان ألا يتكثف شيء عند الخنق في الصمامات.
- فحص شوط صمام التوقف/التنظيم **(SRV)** وصمام التحكم **(GCV)** — أي التحقق من أن كل صمام يتحرك من موضع إلى موضع بالاستجابة الصحيحة، وأن قراءة الموضع تطابق الأمر (راجع 19.3).

للوقود السائل:

- تجهيز الفلاتر والمضخات **(Priming)** وطرد الهواء بالكامل. **الهواء المحبوس في خط وقود سائل سبب كلاسيكي لفشل الاشتعال** — ويجب ألا يُكتفى بتنفيسه، بل يُبحث عن **سبب دخوله**.

- **تنفيس الخط حتى صمام قطع الوقود السائل** بفتح أعلى منفس، وفتح صمام العزل تدريجيًا حتى يخرج سائل نقي بلا فقاعات، ثم إغلاق المنفس وفتح العزل بالكامل.
- التحقق من دوران موزّع التدفق **(Flow Divider)** بحرية — وهو المكوّن الذي يضمن توزيعًا متساويًا على كل الحاقنات؛ وعلوقه يعني حاقنات تأخذ أكثر وأخرى أقل، ومن ثمّ فارق حرارة عادم فورًا.
- **تجهيز الفلاتر الاحتياطية وإبقاؤها جاهزة للتحويل** — لأن انسداد فلتر أثناء التشغيل يجب أن يُعالَج بتحويل لا بإيقاف.
- **تفريغ خزّان التصريف** — بحيث يصبح **ارتفاع منسوبه لاحقًا مؤشرًا مباشرًا على تسرّب في المنظومة.** وهذه حيلة تشخيصية بسيطة وأنيقة: تصفير مرجع لتكتشف التغيّر.
- **تشغيل ماء التبريد** إلى مبرّد الزيت ومبرّد هواء التذرير.

هـ) هواء التذرير (Atomising Air) — للوقود السائل حصريًا

الوقود السائل لا يحترق كسائل — يجب **تذريره إلى رذاذ دقيق جدًا** ليختلط بالهواء ويحترق. وهذه وظيفة منظومة هواء التذرير: ضاغط معزز (Booster) يرفع ضغط جزء من هواء الضاغط ليدفعه عبر الحاقنات مع الوقود.

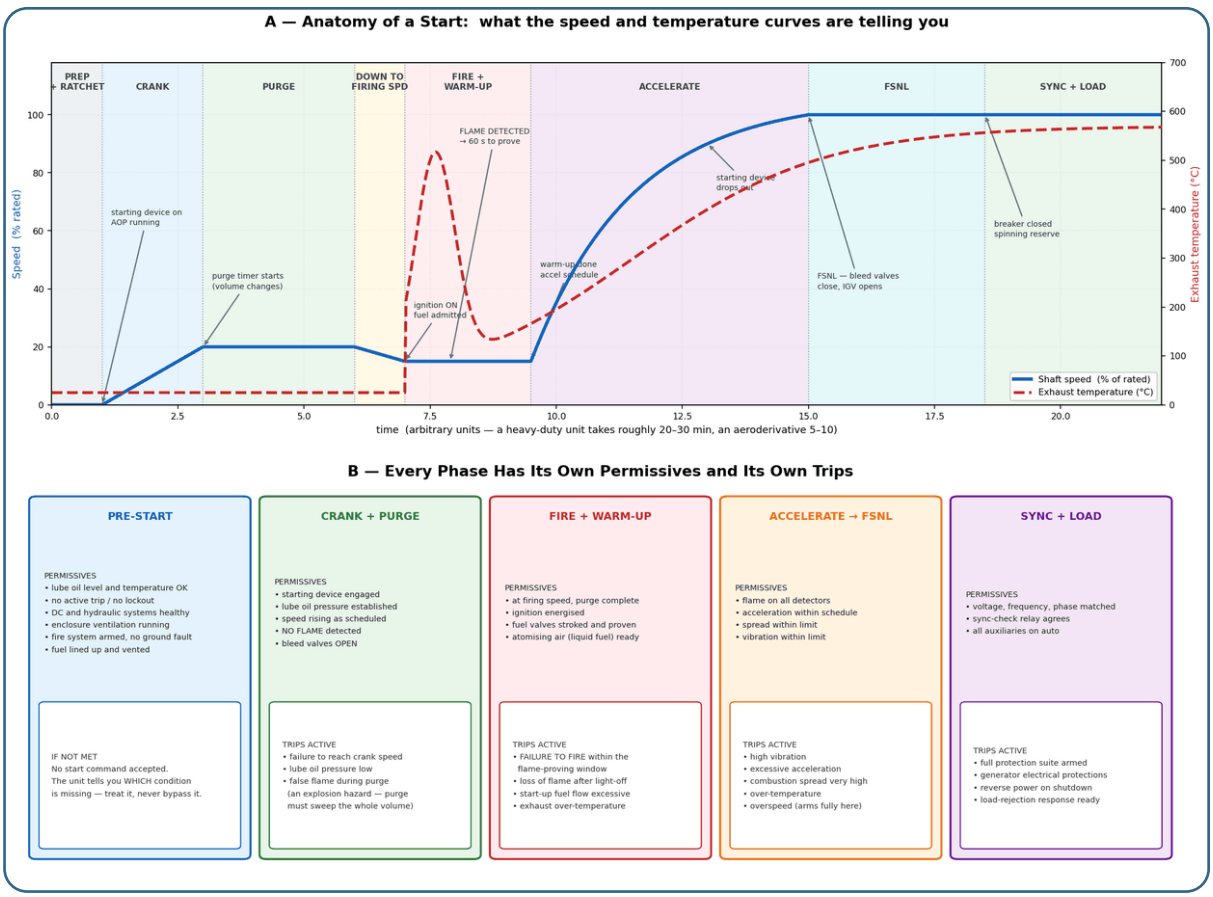
وهذه من أكثر النقاط التي تُشخَّص خطأً في الميدان. فأعراض نقص هواء التذرير — اشتعال ضعيف أو فاشل، حرارة غير متجانسة، دخان — تُنسب عادةً إلى الوقود أو الإشعال. **والحقيقة أن الوقود موجود والشرارة موجودة، لكن الرذاذ سيئ.** ولذلك يجب فحص ضغط هواء التذرير **نسبةً إلى ضغط مخرج الضاغط**، لا كقيمة مطلقة — فالنسبة بينهما هي ما يحدد جودة التذرير.

و) الحمايات والكهرباء

- **خلوّ دائرة التيار المستمر للحماية من أي عطل أرضي.** وقد شرحنا في 6.8 لماذا: منظومة معزولة عن الأرض تحتمل أول تلامس أرضي بلا انقطاع، لكن **التلامس الثاني يعني قصرًا قد يُفعّل أو يعطّل دوائر قطع كاملة**. البدء بوجود عطل أرضي قائم يعني الدخول بطبقة أمان مفقودة.
- **لا إنذارات قائمة على شاشة التحكم** — وإن وُجدت، تُفهَم قبل أن تُلغى.
- **فحص جودة الشرارة في شمعات الإشعال قبل تركيبها** — فحص بصري مباشر، لا افتراض.
- **التحقق من سلامة كل كواشف اللهب** — وهذه حاسمة في الاتجاهين معًا كما سنرى.

- **طفايات محمولة قرب مسقط الوقود وقرب التوربين.**
- **فتح مخمد العادم الرئيسي وإغلاق المحوِّل** (في محطات الدورة المركبة) — بحيث يكون للعادم مخرج مؤكّد. **بدء بمخرج عادم مغلق حدث كارثي.**

26.4 المراحل: ما يحدث فعلًا وما يجب أن تراقبه



الشكل 26.1 — أعلى: منحنيا السرعة وحرارة العادم أثناء البدء مع مراحل التسلسل وأحداثه المفتاحية. أسفل: السماحات والحمايات الفعّالة في كل مرحلة.

المرحلة صفر: الدوران البطيء (Ratchet / Turning Gear)

قبل أي شيء، تُدار الآلة ببطء شديد بواسطة آلية سقّاطة هيدروليكية أو ترس إدارة. **والغرض ليس التحضير للبدء، بل منع انحناء العمود.**

فالعمود الساخن الساكن يبرد من أسفل أسرع من أعلى (الحرارة تصعد)، فينحني قليلًا — وهو ما يُعرف بالانحناء الحراري **(Thermal Bow)**. وبدء آلة منحنية يعني اهتزازًا عنيفًا وربما احتكاكًا وتلفًا. **ولهذا فإن السقّاطة ليست معدة مساعدة ثانوية — هي حماية للعمود، ويجب ألا تتوقف بعد الإيقاف الساخن إلا بعد المدة المحددة.**

المرحلة الأولى: الإدارة (Cranking)

يُشغَّل جهاز البدء — محرك ديزل، أو محرك كهربائي، أو محوّل تردد ثابت (Static Frequency Converter) يستخدم المولد نفسه كمحرك — فترتفع السرعة تدريجيًا.

ما يجب أن تراقبه هنا:

- **ارتفاع ضغط الزيت وثباته** قبل أي شيء آخر.
- **صمامات النزف مفتوحة** — وهذا حاسم: عند السرعات المنخفضة يعمل الضاغط قرب منطقة الانحباس، وصمامات النزف هي ما يُبعده عنها (راجع 24.5). **صمام نزف عالق مغلقًا سيظهر هنا كصعوبة في التسارع.**
- **أصوات غير طبيعية من الحجرات** — وهذه لحظة الاستماع الذهبية، لأن الآلة تدور بلا احتراق فيسمع الأذن ما لا يظهر على أي حسّاس (احتكاك، ارتخاء، صرير محمل).
- خروج سائل من مصارف البدء الكاذب **(False Start Drain)** — وإن خرج سائل، **تُواصَل الإدارة حتى يخرج هواء جافّ**. لا يُدخَل وقود على حجم يحتوي سائلًا.

المرحلة الثانية: التطهير (Purge) — أخطر خطوة يُتساهل فيها

هذه هي الخطوة التي لا يجوز اختصارها بأي حال.

الغرض: **طرد أي مزيج قابل للاشتعال** من غرفة الاحتراق ومجرى العادم ومرجل الاسترداد إن وُجد، قبل إدخال أي مصدر إشعال. ومصدر ذلك المزيج قد يكون وقودًا متسربًا من محاولة سابقة، أو تسريبًا عبر صمام قطع غير محكم، أو بقايا وقود سائل.

والمنطق: عدد محدد من "تغييرات الحجم" **(Volume Changes)** — أي أن يمر عبر المنظومة حجم من الهواء يعادل عدة أضعاف حجمها الداخلي. ويُترجم هذا عمليًا إلى **مؤقّت تطهير** عند سرعة إدارة محددة.

ولماذا التشديد؟ لأن مرجل استرداد الحرارة في محطة دورة مركبة **حجم ضخم جدًا** مليء بأنابيب وزوايا وأركان ميتة. وحوادث انفجار العادم في هذه الصناعة — وقد وقعت — سببها المشترك تقريبًا دائمًا: **تطهير غير كافٍ، أو تسريب وقود لم يُكتشف، أو تجاوز مقصود لمؤقّت التطهير بحجة توفير الوقت.**

وحماية "اللهب الكاذب" **(False Flame)** خلال التطهير: إذا رأى أي كاشف لهب لهبًا أثناء التطهير — وهي مرحلة **لا يوجد فيها وقود إطلاقًا** — فهذا يعني أحد أمرين: **إما أن هناك احتراقًا فعليًا (تسريب وقود يحترق) وهي حالة طارئة، أو أن الكاشف معطل.** وكلاهما يمنع المتابعة. **وهذا مثال ممتاز على حماية «معكوسة»: حماية تعمل عند وجود إشارة يُفترض غيابها** — بعكس معظم الحمايات التي تعمل عند تجاوز قيمة.

المرحلة الثالثة: الهبوط إلى سرعة الإشعال

بعد التطهير، تُخفَّض السرعة إلى سرعة الإشعال **(Firing Speed)** — وهي أقل من سرعة التطهير.

ولماذا نُبطئ عمدًا؟ لأن الاشتعال يحتاج **سرعة هواء منخفضة في منطقة الحاقن** حتى تستقر جبهة اللهب. عند سرعة عالية جدًا يُطفأ اللهب الوليد قبل أن ينتشر — تمامًا كما تُطفأ الشمعة بنفخة قوية. **سرعة الهواء أعلى من سرعة انتشار اللهب تعني ألا لهب.**

المرحلة الرابعة: الإشعال (Firing) وإثبات اللهب

هنا تُدخَل المادة القابلة للاشتعال إلى حجم ساخن. وهذه أخطر عشرين ثانية في العملية كلها.

التسلسل:

1. **تفعيل الإشعال** — محوّل عالي الطاقة يغذّي شمعات في غرفتين عادةً (لا كل الغرف).
2. **إدخال الوقود** بمعدل محسوب مسبقًا (Startup Fuel Flow) — لا بمعدل يحدده متحكم.
3. **انتظار كشف اللهب** خلال نافذة زمنية محددة.
4. **انتشار اللهب** من الغرفتين المشتعلتين إلى بقية الغرف عبر أنابيب اللهب المتقاطعة **(Crossfire Tubes)**.
5. **إثبات اللهب على كل الكواشف** خلال مهلة محددة.

والحمايات الفعّالة في هذه اللحظة:

- فشل الاشتعال **(Failure to Fire):** لم يُكشف لهب خلال النافذة ← **قطع فوري وإغلاق الوقود**. والسبب واضح: كل ثانية إضافية تعني وقودًا يتراكم بلا احتراق.
- **فقد اللهب بعد الاشتعال:** انطفأ بعد أن اشتعل ← قطع.
- **تدفق وقود بدء زائد:** إذا تجاوز الوقود المحسوب حدًا معيّنًا ← قطع، منعًا للبدء الساخن.
- **حرارة عادم زائدة أثناء البدء:** بحدّ أدنى من حدّ التشغيل العادي.

والخطأ الشائع الذي يجب تجنّبه: لا تحاول البدء مرة ثانية مباشرة بعد فشل اشتعال. الوحدة الآن تحتوي على وقود غير محترق. الإجراء الصحيح: تصريف كامل، ثم إدارة جافة **(Dry Motoring)** بلا وقود ولا إشعال لتهوية المجرى بالكامل، ثم محاولة جديدة. (راجع 24.6.)

نقطة تشخيصية تُميّز المهندس المتمرّس: عند فشل اشتعال، السؤال الأول ليس «لماذا لم يشتعل؟» بل: «هل اشتعل ولم نره، أم لم يشتعل فعلًا؟»

فالفرق جوهري:

إن لم يشتعل، فالمشكلة في الوقود أو الشرارة أو الهواء أو سرعة الإشعال.

وإن اشتعل ولم يُكشف، فالمشكلة في كاشف اللهب أو تركيبه أو نظافة نافذته.

والدليل الحاسم بسيط: هل ارتفعت حرارة العادم؟ إن ارتفعت فقد حدث احتراق بالتأكيد، والمشكلة في الكشف. وإن لم ترتفع فلم يحدث احتراق. دقيقة واحدة من قراءة الترند توفّر ساعات من الفحص في الاتجاه الخاطئ — وهذا بالضبط منهج «تحقّق من القياس أولًا» الذي بُني عليه الفصل التاسع عشر.

المرحلة الخامسة: الإحماء (Warm-Up)

بعد إثبات اللهب، **تبقى الوحدة عند سرعة الإشعال لمدة محددة قبل التسارع**.

ولماذا لا نتسارع فورًا؟ لأن أجزاء المسار الساخن — البطانات وقطع الانتقال والفوهات والريش — انتقلت للتو من حرارة الجو إلى حرارة احتراق. والإجهاد الحراري الناتج عن تدرّج حراري عنيف هو المسبب الأول للكلال الحراري الميكانيكي **(TMF)** الذي شرحناه في 16.5. فترة الإحماء تسمح للحرارة بالانتشار في سُمك المعدن بدل أن تبقى محصورة في السطح.

ولهذا فإن كل دقيقة تُقتطع من الإحماء بحجة «تسريع البدء» تُدفَع لاحقًا من عمر أجزاء تكلّف مئات الآلاف. وهذا موضوع اقتصادي بحت، لا موضوع صبر.

المرحلة السادسة: التسارع إلى السرعة الاسمية

يعمل الآن **جدول التسارع** (راجع 24.4) الذي يحدّد معدل زيادة الوقود مقابل السرعة.

ما يحدث خلال هذه المرحلة:

- **جهاز البدء يفصل** عند نسبة معيّنة، حين يصبح التوربين قادرًا على تسريع نفسه (Self-Sustaining Speed). ويجب التحقق من هذا الانفصال، ومن توقف محرك البدء بعد فترة تبريده.
- العبور بالسرعات الحرجة **(Critical Speeds)** — وهي سرعات تتوافق مع الترددات الطبيعية للعمود، ويرتفع فيها الاهتزاز مؤقتًا. **المطلوب العبور السريع منها لا التوقف عندها** (راجع 5.5).
- **صمامات النزف تُغلق** عند نسبة سرعة محددة، حين يخرج الضاغط من منطقة خطر الانحباس.
- **حرارة العادم ترتفع باطراد** — وفارق الحرارة (Spread) يجب أن يبقى ضمن الحد.

والحمايات النشطة هنا:

- التسارع المفرط **(Excessive Acceleration)** — معدل تغيّر سرعة أعلى من المتوقع قد يعني انفصال حمل أو خللًا في القياس.
- **الاهتزاز المرتفع.**
- **فارق حرارة العادم المرتفع جدًا.**
- **الحرارة الزائدة.**
- **حماية السرعة الزائدة** تصبح مسلّحة بالكامل.

المرحلة السابعة: السرعة الكاملة بلا حمل (FSNL)

الوحدة الآن عند سرعتها الاسمية، والقاطع مفتوح. وهذه **محطة تحقّق شاملة قبل الربط**، لأنها آخر فرصة للفحص والآلة دائرة والقاطع مفتوح:

- **التحقق من إغلاق صمامات النزف.**
- **دخول نافخات الهيكل تلقائيًا** واحدًا تلو الآخر بتأخير زمني بينها.
- التحقق من موضع ريش **IGV** عند القيمة المتوقعة لهذه الحالة.
- **اختبار انتقال مضخات الزيت والهيدروليك تلقائيًا** بعزل مفاتيح الضغط واحدًا واحدًا — **وهذا اختبار حقيقي لا افتراض.**
- **بدء التنظيف الذاتي لفلاتر السحب** بعد التخلص من الرطوبة (راجع 25.5).
- **تسجيل قيم مرجعية كاملة:** ضغوط الزيت عند كل محمل، وضغط الهيدروليك، وضغط زيت القطع، وفروق ضغط كل الفلاتر، وضغط مخرج الضاغط، وضغط هواء التذرير. **هذه القيم هي خط الأساس الذي ستُقارن به كل قراءة مستقبلية** — ومن لا يسجّلها اليوم لن يعرف غدًا هل تغيّر شيء.
- **تسليح منظومة إطفاء الحريق.**
- **فحص بصري لتسريبات غاز العادم** من فتحات الخدمة ووصلات التمدد.

المرحلة الثامنة: التزامن والتحميل

تفصيلها الكامل في 18.1 و18.6. والمختصر:

- **الحاكم يضبط التردد، ومنظّم الجهد يضبط الجهد، وجهاز التزامن يطابق الطور** ثم يصدر أمر الإغلاق.
- **فور إغلاق القاطع تأخذ الوحدة حملًا أوليًا صغيرًا** (الاحتياطي الدوّار) — وهو مقصود لضمان ألا تُسحب الوحدة كمحرك.
- **ثم يُرفع الحمل بمعدل محكوم** — لأن التحميل السريع يعني إجهادًا حراريًا عابرًا، تمامًا كما في الإحماء.

ونقطة تشغيلية عملية للوقود السائل تحديدًا: الارتفاع المفاجئ في تدفق الوقود عند التحميل قد **يُسقط ضغط الوقود** إن لم تكن المضخات مهيأة. ولذلك يجب مراقبة ضغط الوقود بشكل متواصل خلال هذه الفترة والتدخل عند الحاجة.

26.5 البدء البارد والساخن والدافئ

ليست كل البدايات متشابهة. والتمييز بينها ضروري لفهم لماذا يختلف زمن البدء من مرة لأخرى:

النوع	متى	ما يتغيّر
بدء بارد (Cold Start)	بعد توقف طويل — الآلة بحرارة الجو	فترة إحماء أطول، تسارع أبطأ، تدرّج تحميل أطول، إجهاد حراري أعلى
بدء دافئ (Warm Start)	بعد توقف متوسط — بقايا حرارة	معدلات وسيطة
بدء ساخن (Hot Start)	بعد توقف قصير — الآلة ما زالت ساخنة	أسرع بكثير: المعدن قريب من حرارة تشغيله، فالإجهاد الحراري أقل

ونقطتان مهمتان:

الأولى: يجب ألا يُخلط بين «Hot Start» بمعنى **بدء بعد توقف قصير** (وهو أمر طبيعي ومرغوب)، و«Hot Start» بمعنى **بدء تجاوزت فيه الحرارة الحد** (وهو عطل — راجع 24.6). **نفس المصطلح لمعنيين مختلفين تمامًا**، وهذا مصدر التباس حقيقي بين المهندسين. والسياق وحده يفرّق.

والثانية: البدء البارد يستهلك عمر أجزاء أكثر بكثير من البدء الساخن. وهذا هو أساس مفهوم "ساعات التشغيل المكافئة" **(EOH)** الذي شرحناه في 8.4: عدد البدايات ليس رقمًا واحدًا في حساب العمر، بل يُوزَن كل بدء بحسب نوعه وشدّته.

26.6 من الميدان: أكثر ما يفشل في البدء

العَرَض	الأسباب المرجحة بالترتيب	الفحص الأول
أمر البدء مرفوض	سماحة غير محققة / إنذار قائم / معدة على يدوي	اقرأ قائمة السماحات على الشاشة — النظام يقول لك أيّها ناقص
لا دوران	جهاز البدء / تغذية / قابض / العمود مُعاق	هل يدور جهاز البدء وحده؟ وهل يرتفع ضغط الزيت؟
السرعة لا تصل لسرعة الإدارة	جهاز بدء ضعيف / احتكاك / نزف مغلق	قارن قناتي السرعة، وافحص مواضع صمامات النزف
التطهير لا ينتهي	مؤقّت / سرعة غير مستقرة / لهب كاذب	لهب كاذب؟ **لا تتجاوزه — افحص التسرّب والكاشف**
فشل الاشتعال	لا وقود / لا شرارة / لا كشف	**هل ارتفعت حرارة العادم؟** يفصل بين المسارين فورًا
اشتعال في بعض الغرف فقط	أنابيب لهب متقاطعة / حاقنات / موزّع تدفق	فارق حرارة العادم يدلّك على الغرف المتأثرة
بدء ساخن	وقود زائد / هواء ناقص / قياس خاطئ	استبعد الثرموكابل أولًا، ثم جدول الوقود والتصريف
بدء معلّق	جهاز بدء انفصل مبكرًا / نزف مغلق / احتكاك	**متى بالضبط انفصل جهاز البدء؟**
اهتزاز مرتفع عند سرعة معيّنة	سرعة حرجة / انحناء حراري / اختلال توازن	هل سبقت السقّاطةُ البدءَ بالمدة الكاملة؟

العَرَض	الأسباب المرجحة بالترتيب	الفحص الأول
فارق حرارة عادم واسع عند **FSNL**	حاقن / موزّع تدفق / ثرموكابل	افحص **نمط** الفارق حول المحيط لا قيمته فقط (13.10)
قطع فور إغلاق القاطع	تزامن خارج النافذة / تعاقب أطوار / حماية	راجع سجل الحدث بالطوابع الزمنية (18.4)
ضغط وقود ينهار عند التحميل	مضخات / فلاتر / منظّم ضغط	راقب ضغط الوقود أثناء رفع الحمل، وحمّل أبطأ
مضخة زيت طارئة لا تعمل تلقائيًا	مفتاح ضغط / مسار DC / منطق	اختبر المسار التلقائي لا التشغيل اليدوي

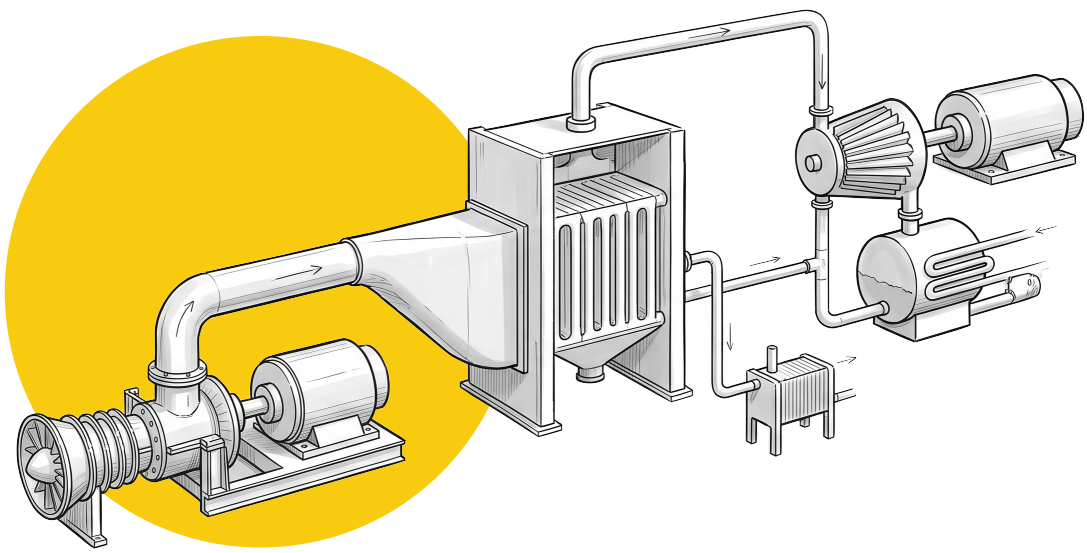
26.7 خلاصة الفصل

- **الفحص القبلي ليس بيروقراطية** — كل بند فيه وُلد من حادثة، ومن يعرف السبب لن يوقّع على بند لم يفحصه.
- **أرقام الأجهزة لغة قياسية**، ومن يفهم بنيتها يقرأ مخطط أي وحدة في العالم.
- **التطهير هو الخطوة التي لا تُختصر أبدًا** — وحماية اللهب الكاذب أثناءه حماية «معكوسة» تعمل على وجود إشارة يُفترض غيابها.
- **نُبطئ عمدًا قبل الإشعال** لأن سرعة هواء عالية تمنع استقرار اللهب.
- **عند فشل الاشتعال، اسأل أولًا: هل اشتعل ولم نره؟** وحرارة العادم هي الفاصل.
- **بعد أي فشل اشتعال: تصريف، ثم إدارة جافة، ثم محاولة** — بلا استثناء.
- **فترة الإحماء استثمار في عمر الأجزاء**، لا وقتًا ضائعًا.
- **FSNL** محطة تحقّق لا محطة عبور — سجّل خط الأساس هناك، فهو مرجعك كل عام قادم.
- **البدء البارد يستهلك عمرًا أكثر من الساخن** — ولهذا تُوزَن البدايات لا تُعدّ.

والخلاصة الجامعة: عملية البدء هي المكان الذي **يلتقي فيه كل ما في هذا الكتاب في عشرين دقيقة**: الأنظمة المساعدة، ومنظومة الوقود، وسلسلة الإشارة، ومنطق التحكم، والحمايات، والمولد والشبكة. **ومن يستطيع أن يقف أمام وحدة أثناء بدئها ويشرح لماذا يحدث كل شيء في لحظته — فقد فهم التوربين الغازي.**

الفصل السابع والعشرون:

الدورة المركبة والتوليد المشترك



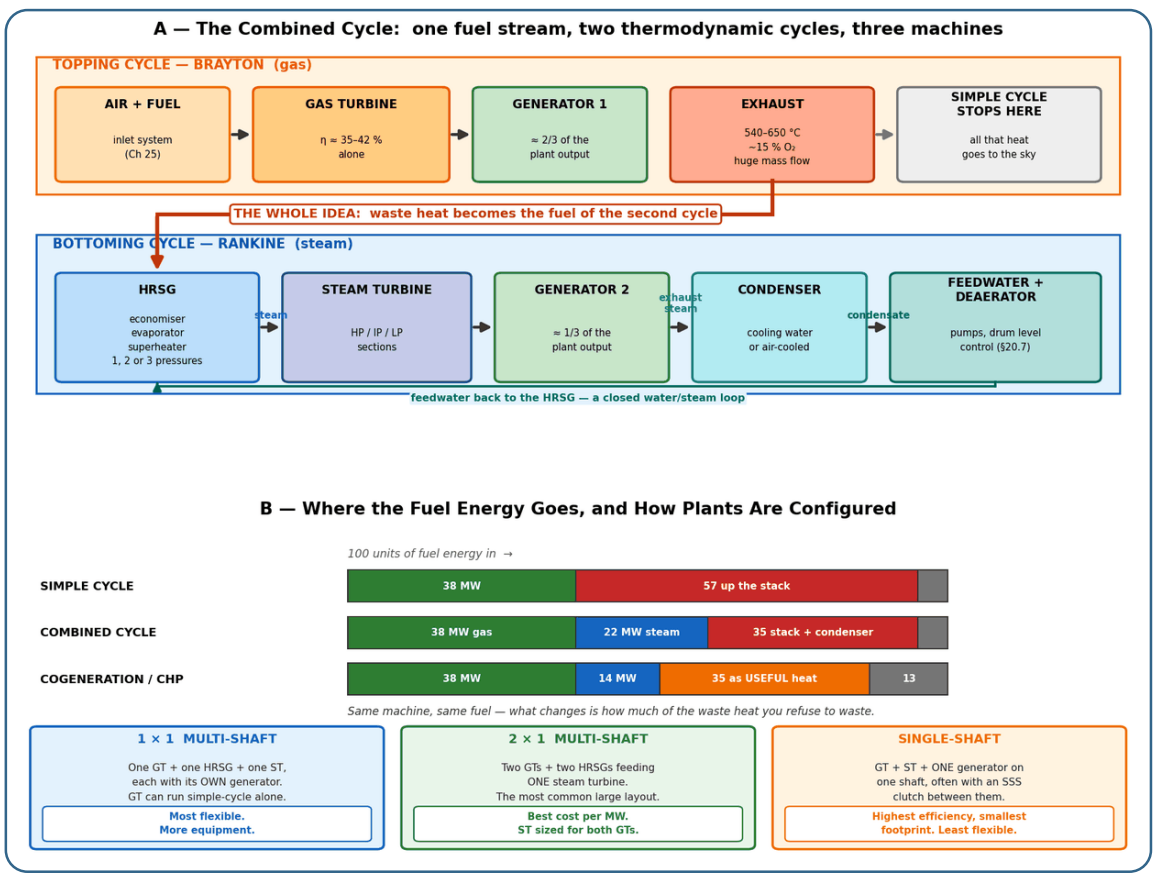
27.1 الفكرة في سطر واحد

ذكرنا الدورة المركبة في مواضع كثيرة من هذا الكتاب — في 2.5 كمفهوم، وفي 3.1 كتطبيق، وفي 20.7 عند التحكم بمستوى الطبلة، وفي 22.11 كأداة بيئية. وحان وقت جمعها في فصل واحد، لأنها **أهم تطور اقتصادي في تاريخ التوربينات الغازية**، ولأن نصف قرّاء هذا الكتاب يعملون في محطات دورة مركبة دون أن يكون أحد قد شرح لهم النصف الآخر من المحطة.

والفكرة كلها في سطر:

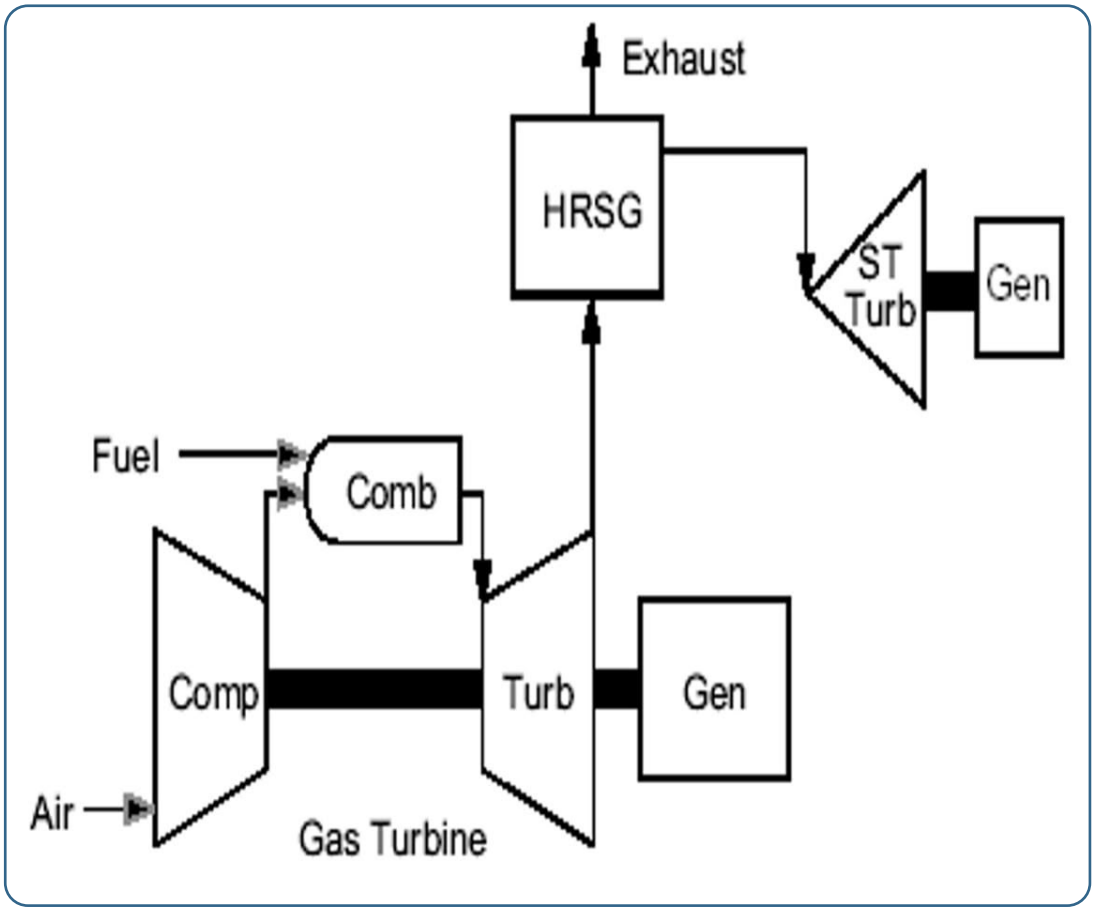
> **التوربين الغازي يحوّل نحو 38% من طاقة الوقود إلى كهرباء، ويرمي الباقي في السماء عند 650–550 درجة مئوية. والدورة المركبة ترفض هذا الرمي.**

فالعادم ليس نفاية — إنه **تيار حراري ضخم عالي الجودة**: مئات الكيلوغرامات في الثانية عند حرارة كافية تمامًا لتوليد بخار عالي الضغط. ووضْع مرجل في مساره وتوربين بخاري بعده يرفع كفاءة المنشأة من نحو 38% إلى ما يتجاوز 60% في أحدث الوحدات — **دون حرق قطرة وقود إضافية**.



الشكل 27.1 — أعلى: الدورة المركبة كاملة — دورة برايتون العليا ودورة رانكن السفلى وتيار العادم الذي يربطهما. أسفل: توزيع طاقة الوقود وتكوينات المحطات الثلاثة.

والنتيجة بالأرقام التقريبية: من كل مئة وحدة طاقة وقود، تعطي الدورة البسيطة نحو 38 وحدة كهرباء وتضيّع 57 في المدخنة. أما الدورة المركبة فتضيف نحو 22 وحدة أخرى من نفس المئة — أي أن **التوربين البخاري يوفّر ما يقارب ثلث قدرة المحطة مجانًا من ناحية الوقود.**



27.2 الدورتان: لماذا تتكاملان بهذا الشكل؟

هذا ليس دمجًا عشوائيًا لآلتين — إنه **تكامل ديناميكي حراري دقيق**، وسببه أن الدورتين تعملان في نطاقين حراريين مختلفين ومتتاليين:

	دورة برايتون (الغازية)	دورة رانكن (البخارية)
المائع	هواء وغازات احتراق	ماء وبخار
حرارة الدخول	1300–1600 °م	540–600 °م
حرارة الخروج	540–650 °م	30–45 °م (في المكثف)
القوة	تتحمل حرارة دخول عالية جدًا	تستطيع رفض الحرارة عند درجة منخفضة جدًا
الضعف	ترفض الحرارة عند درجة عالية جدًا	لا تتحمل حرارة دخول عالية

وهنا جمال الفكرة: ضعف كل دورة هو قوة الأخرى. برايتون ممتازة في الطرف الساخن وسيئة في الطرف البارد؛ ورانكن ممتازة في الطرف البارد ومحدودة في الساخن. **فوضع إحداهما فوق الأخرى يعطي دورة مركّبة تمتد من 1500 درجة إلى 35 درجة** — وكل مهندس درس كارنو يعرف ماذا يعني اتساع الفارق الحراري: كفاءة أعلى.

ولهذا السبب تحديدًا تكون الآلات الصناعية الثقيلة أنسب للدورة المركبة من المشتقة من الطيران (راجع 24.10): حرارة عادمها أعلى، فالبخار الذي تنتجه أعلى ضغطًا وحرارة، فالدورة السفلى أكفأ.

27.3 مرجل استرداد الحرارة (HRSG): قلب الدورة السفلى

هذا هو المكوّن الذي يجهله معظم مهندسي التوربينات مع أنه **يقف مباشرة في مسار عادم آلتهم ويؤثر على أدائها**.

البنية: ثلاثة أقسام بترتيب مقصود

الغازات الساخنة تدخل من الأعلى (أو من جانب) وتتدرّج نزولًا في الحرارة عبر حزم أنابيب مرتّبة **عكس اتجاه سريان الماء** — وهذا الترتيب المعاكس (Counter-flow) ليس صدفة، بل هو ما يسمح باستخلاص أكبر قدر من الحرارة:

القسم	ما يفعله	حرارة الغاز عنده
المُحمِّص الفائق (Superheater)	يرفع حرارة البخار المشبع فوق حرارة التشبع	الأسخن — أول ما يلاقي الغاز
المُبخِّر (Evaporator)	يحوّل الماء المشبع إلى بخار مشبع عند ضغط ثابت	متوسط
المُقتصِد (Economizer)	يسخّن ماء التغذية إلى ما يقارب حرارة التشبع	الأبرد — آخر ما يلاقي الغاز

والمنطق: أسخن غاز يقابل أسخن ماء، وأبرد غاز يقابل أبرد ماء. **لو عكسنا الترتيب لاستحال نقل الحرارة في نصف المرجل.**

مفهومان يحكمان تصميم أي HRSG

1) نقطة القرص **(Pinch Point).** أضيق فارق حراري بين الغاز والماء داخل المرجل، ويقع عند **مخرج المبخّر / مدخل المقتصد**. وهو الفارق الذي يحدّد كم من الحرارة يمكن استرداده فعليًا:

- **نقطة قرص صغيرة** (8–12 درجة مثلًا) ← استرداد أكبر ← بخار أكثر ← قدرة أعلى — **لكن مساحة تبادل حراري أكبر بكثير وتكلفة أعلى.**
- **نقطة قرص كبيرة** ← مرجل أرخص وأصغر ← لكن حرارة أكثر تخرج من المدخنة.

وهذه هي المقايضة الهندسية المركزية في تصميم أي مرجل استرداد — وهي أيضًا تفسير عملي لسؤال يُطرح كثيرًا: «لماذا لا نسترد كل الحرارة؟» الجواب: **كلما اقتربت من الاسترداد الكامل احتجت مساحة تبادل لا نهائية.**

2) فارق الاقتراب **(Approach Temperature).** الفارق بين حرارة الماء الخارج من المقتصد وحرارة التشبع في الطبلة. ويُترك عمدًا فارق صغير **لمنع التبخير داخل المقتصد** (Steaming) — وهي ظاهرة تسبب صدمات هيدروليكية وتآكلًا في أنابيب لم تُصمم للبخار.

لماذا مستويات ضغط متعددة؟

المراجل الحديثة ليست ذات ضغط واحد، بل مستويين أو ثلاثة **(HP / IP / LP)**، وغالبًا مع إعادة تسخين **(Reheat)**.

والسبب أنيق: بعد أن يستخلص المستوى عالي الضغط ما يستطيع، **تبقى الغازات ساخنة بما يكفي لتوليد بخار عند ضغط أقل**. فبدل إخراج تلك الحرارة إلى المدخنة، نضيف حزمة ثانية بضغط أدنى، ثم ثالثة. **كل مستوى إضافي يستخلص شريحة أخرى من الحرارة المتبقية** ويخفض حرارة المدخنة أكثر.

والنتيجة العملية: مرجل ثلاثي الضغط مع إعادة تسخين قد يخفض حرارة المدخنة إلى نحو 80–100 درجة مئوية بدل 200 وأكثر في مرجل أحادي الضغط — وهذا فارق كبير في كفاءة المنشأة.

قيد حراري لا يُتجاوز — الحدّ الحمضي **(Acid Dew Point):** لا يجوز تبريد غاز العادم إلى ما دون درجة يبدأ عندها حمض الكبريتيك بالتكثّف على أنابيب المقتصد، وإلا حدث **تآكل حمضي** يثقب الأنابيب. وهذه الدرجة تعتمد على **محتوى الكبريت في الوقود**: وقود نظيف جدًا يسمح بتبريد أعمق وكفاءة أعلى، ووقود عالي الكبريت يفرض حدًّا أعلى.

وهذه واحدة من أوضح الأمثلة على أن قرار شراء الوقود قرار هندسي: جودة الوقود لا تحدد فقط انبعاثاتك (22.10) وعمر أجزائك الساخنة (16.2)، بل **كم من الحرارة يُسمح لك أصلًا أن تسترد**.

27.4 الجانب البخاري: التوربين والمكثف والماء

التوربين البخاري في محطة دورة مركبة كبيرة يكون عادةً بثلاثة أقسام على عمود واحد: عالي الضغط (HP)، ومتوسط الضغط (IP)، ومنخفض الضغط (LP). والبخار يمرّ عبرها بالتتابع، ويُعاد تسخينه بين HP وIP في المرجل إن كان التصميم بإعادة تسخين.

والمكثف **(Condenser)** هو الجزء الذي يجعل دورة رانكن ممكنة أصلًا. وظيفته تكثيف البخار الخارج من LP، **وبذلك يخلق ضغطًا سالبًا (خلاءً) في مخرج التوربين**. وهذا الخلاء ليس تفصيلًا: **كلما تحسّن الخلاء زاد الفارق الضغطي عبر التوربين وزادت قدرته**.

ولذلك فإن أداء المكثف هو أحد أكثر مؤشرات الأداء حساسية في المحطة:

- تدهور الخلاء ← قدرة أقل من التوربين البخاري فورًا.
- والأسباب النموذجية: **تسرّب هواء إلى داخل المكثف** (وهو الأشيع، ويُعالَج بمنظومة استخراج الهواء)، أو اتساخ أنابيب التبريد، أو ارتفاع حرارة ماء التبريد، أو نقص تدفقه.

ونوعا المكثف:

- مبرَّد بالماء **(Water-Cooled):** أفضل أداءً، لكنه يحتاج مصدر ماء تبريد — بحر أو نهر أو أبراج تبريد.
- مبرَّد بالهواء **(Air-Cooled Condenser — ACC):** لا يحتاج ماءً تقريبًا، **وهو الخيار في المواقع الصحراوية،** لكنه أكبر حجمًا وأعلى تكلفة، **وأداؤه يتدهور بشدة في اليوم الحار** — أي في نفس اليوم الذي تنخفض فيه قدرة التوربين الغازي أصلًا (راجع 25.8). **مضاعفة للمشكلة نفسها في نفس اللحظة.**

27.5 التكوينات: كيف تُرتَّب الآلات؟

التكوين	البنية	متى يُختار
1 × 1 متعدد الأعمدة	توربين غازي واحد + مرجل + توربين بخاري، **لكل منهما مولّده**	الأكثر مرونة: يمكن تشغيل الغازي وحده بدورة بسيطة، وصيانة أحدهما دون الآخر
2 × 1 متعدد الأعمدة	توربينان غازيان + مرجلان يغذّيان **توربينًا بخاريًا واحدًا**	**الأشيع في المحطات الكبيرة** — أفضل تكلفة لكل ميغاواط
عمود واحد **(Single-Shaft)**	غازي + بخاري + **مولّد واحد** على عمود واحد	أعلى كفاءة وأصغر بصمة مكانية، لكن أقل مرونة

القابض ذاتي التعشيق **(SSS Clutch)** — حل هندسي جميل يستحق الذكر. في تكوين العمود الواحد، تُوضَع بين التوربين الغازي والتوربين البخاري **قابضة تعشّق نفسها تلقائيًا حين تتساوى السرعتان، وتفصل تلقائيًا حين يبطئ الجانب البخاري.**

والفائدة العملية كبيرة: يستطيع التوربين الغازي أن يبدأ ويُحمَّل **بدورة بسيطة أولًا** والقابض مفصول، بينما يسخن المرجل ويبني بخاره على مهل. ثم حين يصل البخار إلى الشروط المطلوبة ويتسارع التوربين البخاري إلى سرعة العمود، **تعشّق القابضة نفسها بلا أي أمر ولا مشغّل ولا منطق.**

وهذه بنية ميكانيكية بحتة تحقق ما كان سيحتاج منظومة تحكم معقدة — وهي مثال ممتاز على مبدأ يستحق التعميم: **أبسط حل هو الحل الذي لا يحتاج تحكمًا أصلًا.**

27.6 الحرق الإضافي (Duct Firing)

عادم التوربين الغازي يحتوي على نحو **15% أكسجين** — أي أنه، من ناحية كيميائية، **هواء ساخن قابل للاحتراق فيه مرة أخرى.**

ومن هنا جاءت فكرة **الحرق الإضافي**: حرّاقات تُركَّب في مجرى العادم قبل المرجل، تحرق وقودًا إضافيًا مباشرة في تيار العادم فترفع حرارته، فينتج المرجل بخارًا أكثر، فيعطي التوربين البخاري قدرة أكبر.

متى تُستخدم؟

- **لتغطية ذروة الطلب**: زيادة قدرة سريعة دون بناء وحدة جديدة.
- **لتثبيت إنتاج البخار** في محطات التوليد المشترك حين يتغيّر حمل التوربين الغازي.
- **لتعويض فقد القدرة في الأيام الحارة.**

وثمنها: الكفاءة الحدّية لهذا الوقود الإضافي **أقل من كفاءة المحطة الأساسية** — لأنه يمرّ عبر الدورة السفلى فقط، لا عبر الدورتين. **فهي أداة قدرة لا أداة كفاءة**، وتُستخدم عند الحاجة للميغاواط بأي ثمن، لا لخفض تكلفة الميغاواط.

27.7 التوليد المشترك (Cogeneration / CHP)

وهنا نصل إلى تطبيق قد يكون **أعلى كفاءة استخدام للوقود على الإطلاق** — وهو شائع جدًا في القطاع الصناعي الذي يعمل فيه كثير من قرّاء هذا الكتاب.

الفكرة: ماذا لو لم نكن نحتاج كل تلك الحرارة ككهرباء، بل نحتاج **حرارة بذاتها؟**

في مصفاة، أو مصنع بتروكيماويات، أو محطة تحلية، أو مصنع ورق — يوجد **طلب ضخم على البخار الصناعي** بالتوازي مع الطلب على الكهرباء. وبدل شراء الكهرباء من الشبكة وحرق وقود منفصل في مرجل لإنتاج البخار، يمكن:

وقود واحد ← توربين غازي ← كهرباء
↓
العادم ← مرجل استرداد ← بخار للعملية الصناعية

والنتيجة أن «كفاءة استخدام الوقود» الإجمالية قد تتجاوز 80% — لأننا لم نعد نقيس الكهرباء وحدها، بل الكهرباء **زائد الحرارة المفيدة**.

والصور الشائعة:

- بخار استخلاص **(Extraction Steam):** يُسحب بخار من مرحلة وسطى في التوربين البخاري عند الضغط الذي تحتاجه العملية.
- توربين ضغط خلفي **(Back-Pressure Turbine):** التوربين البخاري لا يفرغ في مكثف بخلاء، بل عند ضغط مفيد يذهب كله للعملية. أبسط بكثير — بلا مكثف ولا منظومة ماء تبريد.
- **بخار مباشر من المرجل** دون توربين بخاري أصلًا.

النقطة التي تُغفَل في مقارنة الكفاءات: لا يصح مقارنة محطة توليد مشترك بكفاءة «80%» مع محطة دورة مركبة بكفاءة «60%» والاستنتاج بأن الأولى أفضل — **لأن الرقمين لا يقيسان الشيء نفسه**. الأول يقيس **كل الطاقة المفيدة** (كهرباء + حرارة)، والثاني يقيس **الكهرباء فقط**. والحرارة والكهرباء ليستا متكافئتين في القيمة الاقتصادية ولا الديناميكية الحرارية.

والمعيار الصحيح للمقارنة هو "الوقود الموفَّر" **(Fuel Savings):** كم وقودًا كنت ستحرق لو أنتجت نفس الكهرباء ونفس الحرارة **بشكل منفصل**؟ الفرق بين ذلك وبين ما تحرقه فعلًا هو المكسب الحقيقي. **وهذا التمييز مهم حين تُقارن عروضًا أو تُعدّ دراسة جدوى** — والخلط فيه شائع جدًا في العروض التسويقية.

27.8 ما الذي يتغيّر لمهندس التحكم؟

هذا هو القسم الذي يهمّ قارئ هذا الكتاب أكثر من غيره: **الدورة المركبة تضيف طبقة تحكم كاملة لم تكن موجودة في الدورة البسيطة.**

1) البدء صار عملية منسّقة بين آلتين

في الدورة البسيطة، البدء يخصّ التوربين الغازي وحده (الفصل السادس والعشرون). أما في الدورة المركبة فالمرجل والتوربين البخاري لهما **قيودهما الحرارية الخاصة**، وهي أبطأ بكثير:

- **معدلات تسخين محدودة للطبلة والأنابيب** — لأن التسخين السريع يولّد إجهادًا حراريًا في جدران سميكة.
- **معدل تسخين محدود لعمود التوربين البخاري** — وهو أثقل الأجزاء وأبطؤها استجابة، والإجهاد الحراري فيه يستهلك عمر كلال حقيقيًا.
- **بخار بشروط مناسبة قبل الدخول للتوربين** — بخار أبرد أو أرطب من اللازم يسبب صدمة حرارية وتآكلًا بالتنقيط.

والنتيجة: بدء الدورة المركبة الباردة قد يستغرق **ساعتين إلى ثلاث**، بينما الغازي وحده يجهز في نصف ساعة. **وهذا هو السبب الحقيقي وراء تعقيد البدء في هذه المحطات** — لا التوربين الغازي.

والحلول المستخدمة لتسريعه: إبقاء المرجل دافئًا بين التوقفات (Bottling / Warm-Keeping)، وتصاميم مرجل سريعة البدء (Fast-Start HRSG)، ومنطق تحميل يوازن بين استعجال الشبكة واستهلاك عمر الأجزاء.

2) التوربين الغازي لم يعد وحده

في الدورة البسيطة، حرارة عادم التوربين نتيجة. **وفي الدورة المركبة، حرارة العادم مورد.** وهذا يغيّر منطق التحكم:

- **عند الأحمال الجزئية**، تُستخدم ريش IGV) 9.5) لخفض تدفق الهواء **لإبقاء حرارة العادم عالية** — فيبقى المرجل قادرًا على إنتاج بخار جيد. أي أن IGV صارت تخدم الدورة السفلى لا الغازية وحدها.
- **قرار تحميل المحطة** لم يعد «كم ميغاواط من الغازي؟» بل «كيف أوزّع الحمل بين الغازي والبخاري بأفضل كفاءة إجمالية؟»
- **الضغط الخلفي على العادم** الناتج عن المرجل خصم دائم من قدرة التوربين الغازي (بنفس منطق فقد ضغط المدخل في 25.5). **ولذلك فإن انسداد المرجل أو تدهور نظافته يظهر كنقص قدرة في الغازي** — وهي علاقة يفاجأ بها كثير من المهندسين.

3) منظومة تحكم أوسع وأكثر تشابكًا

- **تحكم مستوى الطبلة** — فصّلناه بالكامل في 20.7 مع ظاهرتَي الانكماش والانتفاخ.
- **تحكم ضغط البخار الرئيسي** وصمامات التجاوز (Bypass) التي توجّه البخار إلى المكثف مباشرة عند البدء أو عند قطع التوربين البخاري.
- **تحكم حرارة البخار الفائق** بحقن ماء (Attemperation).
- **تحكم خلاء المكثف** ومنظومة استخراج الهواء.
- **منطق قطع متشابك:** قطع التوربين البخاري يجب أن يفتح صمامات التجاوز فورًا وإلا ارتفع ضغط المرجل؛ وقطع التوربين الغازي يعني فقد مصدر الحرارة كليًا.

والنتيجة: التنسيق بين نظام تحكم التوربين (TCS) ونظام التحكم الموزّع (DCS) — الذي شرحناه في الفصل الحادي عشر — **يصبح في الدورة المركبة أمرًا حرجًا لا اختياريًا**. والحوادث التي مصدرها سوء تنسيق بين النظامين أكثر شيوعًا مما يُعتقد.

27.9 كيمياء الماء والبخار: لماذا تهمّ مهندس التوربينات؟

قد يبدو هذا موضوع الكيميائي لا المهندس، لكنه ليس كذلك — **لأن نتائجه تظهر كأعطال ميكانيكية**.

المشكلة	السبب	ما تراه
ترسبات في أنابيب المرجل	عسر وأملاح في ماء التغذية	فارق ضغط متزايد، ونقاط ساخنة، وانفجار أنابيب
تآكل	أكسجين مذاب، أو حموضة خاطئة	ثقوب في الأنابيب، وتسريبات
انجراف (Carryover)	مستوى طبلة مرتفع، أو رغوة، أو تحميل زائد	**أملاح تصل إلى ريش التوربين البخاري** فترسب وتُتلف
تآكل بالتنقيط (Erosion by droplets)	رطوبة عالية في مراحل LP	تآكل حواف الريش الأخيرة

والرابط المباشر بعالمك: انجراف الأملاح مع البخار إلى ريش التوربين البخاري هو **نفس منطق** وصول الملح مع هواء السحب إلى ريش الضاغط (25.3) — مائع يحمل ملوّثًا يترسب على ريشة. **المبدأ واحد، والمائع مختلف.**

ولذلك يجب أن يفهم مهندس المحطة ثلاثة أرقام على الأقل: التوصيلية (Conductivity) كمؤشر إجمالي على الأملاح، والأكسجين المذاب كمؤشر على خطر التآكل، ودرجة الحموضة. **وانحراف أي منها ليس «مشكلة المختبر» — إنه إنذار مبكر على عطل ميكانيكي قادم.**

27.10 من الميدان: أعراض تخصّ الدورة المركبة

العَرَض	الأسباب المرجحة	ملاحظة تشخيصية
قدرة الغازي أقل من المتوقع، والحرارة طبيعية	ضغط خلفي مرتفع من المرجل / فقد ضغط مدخل	قارن الضغط الخلفي بمنحنى الأساس — قد يكون المرجل هو السبب لا التوربين
قدرة البخاري منخفضة	تدهور خلاء المكثف / بخار أقل من المرجل	افحص الخلاء أولًا — تسرّب الهواء هو السبب الأشيع
الخلاء يتدهور تدريجيًا	تسرّب هواء / أنابيب متسخة / ماء تبريد أدفأ	اختبار معدل ارتفاع الضغط بإيقاف منظومة الاستخراج
مستوى الطبلة يتذبذب عند تغيّر الحمل	انكماش وانتفاخ / ضبط تحكم / صمام ماء التغذية	راجع 20.7 — وافحص هل التحكم ثلاثي العناصر يعمل فعلًا
حرارة البخار الرئيسي غير مستقرة	حقن التبريد (Attemperation) / حمل الغازي متغير	افحص صمام الحقن وحسّاس الحرارة بعده
صمامات التجاوز مفتوحة أثناء التشغيل العادي	قطع البخاري / منطق / تسريب صمام	استهلاك هائل للطاقة — يجب معالجته فورًا
بدء بطيء جدًا للدورة المركبة	قيود حرارية للمرجل والبخاري	طبيعي في البدء البارد — قارن بمنحنى البدء التصميمي
ترسبات على ريش التوربين البخاري	انجراف من الطبلة / كيمياء ماء	راجع سجل مستوى الطبلة والتوصيلية بالفترة السابقة
ارتفاع حرارة المدخنة	تدهور تبادل حراري / انسداد / حرق إضافي	حرارة مدخنة أعلى = حرارة مهدورة = كفاءة أقل
اهتزاز في التوربين البخاري عند البدء	تسخين غير متجانس / انحناء حراري	نفس منطق السقّاطة في التوربين الغازي (26.4)

27.11 خلاصة الفصل

- **الدورة المركبة ترفض أن ترمي 57% من طاقة الوقود في السماء** — وترفع الكفاءة من نحو 38% إلى ما يتجاوز 60% دون وقود إضافي.
- **الدورتان متكاملتان لا مضافتان:** برايتون قوية في الطرف الساخن، ورانكن قوية في الطرف البارد.
- **نقطة القرص وفارق الاقتراب** يحكمان تصميم المرجل، **والحدّ الحمضي** يحكم كم يمكن تبريد العادم — وهو مرتبط مباشرة بجودة الوقود.
- **مستويات الضغط المتعددة وإعادة التسخين** تستخلص شرائح متتالية من الحرارة المتبقية.
- **أداء المكثف حسّاس جدًا**، وتسرّب الهواء أشيع أسباب تدهور الخلاء — والمكثف الهوائي يتدهور في نفس اليوم الحار الذي يتدهور فيه التوربين الغازي.
- **القابض ذاتي التعشيق** حل ميكانيكي يحقق ما كان سيحتاج منظومة تحكم كاملة.
- **الحرق الإضافي أداة قدرة لا أداة كفاءة.**
- **التوليد المشترك قد يتجاوز 80% كفاءة استخدام للوقود** — لكن المقارنة الصحيحة تكون بالوقود الموفَّر لا بنسبة الكفاءة.
- **البدء صار عملية منسّقة بين آلتين**، والقيد ليس التوربين الغازي بل الإجهاد الحراري في المرجل والتوربين البخاري.
- **حرارة العادم تحولت من نتيجة إلى مورد** — وهذا يغيّر منطق جدولة IGV وقرار توزيع الحمل.
- **كيمياء الماء ليست موضوع المختبر** — انحرافها يظهر كأعطال ميكانيكية في التوربين البخاري.

وخلاصة تربط هذا الفصل بالكتاب كله: التوربين الغازي في محطة دورة مركبة **لم يعد آلة قائمة بذاتها — صار مكوّنًا في منظومة**. وقرار في تشغيله يظهر أثره في المرجل، وعطل في المكثف يظهر كنقص قدرة، وانحراف كيميائي يظهر بعد أشهر كتلف ريش. **ومن يفهم المحطة كنظام واحد يشخّص في ساعة ما يستغرق غيره أيامًا.**

الخاتمة

بدأنا هذا الكتاب بسؤال بسيط — ما هو التوربين الغازي؟ — وانتهينا بسبعة وعشرين فصلًا تغطي مساره كاملًا: من الفيزياء التي تجعله يدور، إلى الهواء الذي يدخله قبل أن يلمس ريشة واحدة، إلى المكوّن الذي يتحمل الحرارة، إلى النظام الذي يقرر كمية الوقود، إلى الحماية التي توقفه قبل أن يتلف، إلى السلسلة التي تنقل الإشارة من الحقل إلى الشاشة، إلى المولد الذي يربطه بالشبكة، إلى المرجل الذي يلتقط حرارته المهدورة، إلى الانبعاثات التي يخرجها والذكاء الاصطناعي الذي بدأ يشاركنا مراقبته — وأخيرًا إلى ما يحدث فعلًا حين تسوء الأمور، وكيف نحقق فيه بمنهج منظّم.

وإن كان لا بد من تلخيص هذا كله في بضع أفكار تبقى بعد إغلاق الكتاب، فهي هذه:

أولًا: التوربين الغازي منظومة، لا معدة.

هذه هي الفكرة التي حاولت أن تتكرر في كل فصل. الوحدة التي «لا تشتعل» قد تكون مشكلة وقود، أو إشعال، أو منطق سماحة، أو حسّاس لهب، أو ببساطة إشارة لم تصل. والوحدة التي «تقطع بلا سبب» قد لا يكون فيها عطل إطلاقًا — بل تأريض كابل أو وصلة متراخية. من يرى المعدة كصندوق واحد سيقف عاجزًا أمام نصف الأعطال؛ ومن يرى المنظومة سيعرف من أين يبدأ.

ثانيًا: القياس هو أساس كل شيء.

لا حماية أفضل من الحسّاس الذي يغذّيها، ولا حلقة تحكم أفضل من القياس الذي يغلقها، ولا تحكم متقدم يعوّض عن قراءة خاطئة. هذه الفكرة تكررت من الفصل السابع إلى التاسع عشر إلى العشرين، وهي — في تقديري — أهم ما يميّز مهندسًا يشخّص بسرعة عن آخر يستبدل قطعًا ويأمل.

ثالثًا: النمط أهم من القيمة.

قراءة واحدة مرتفعة تعني القليل. أما **العلاقة** بين القراءات — كاشف واحد يقرأ بينما البقية صفر، أو ارتفاع الجميع بالتساوي مع ثبات الفارق، أو تردد 1X مقابل 2X، أو انزياح عن خط الأساس مقابل قيمة مطلقة — فهي التي تحمل التشخيص. تعلّم أن تنظر إلى الشكل، لا إلى الرقم.

رابعًا: الحماية التي لم تُختبر غير موجودة.

منطق الحماية ساكن بطبيعته، وأعطاله صامتة. الوحدة التي تعمل بشكل مثالي منذ سنوات قد تكون بلا حماية فعّالة منذ سنوات أيضًا — والفرق بين الحالتين لا يظهر إلا في اللحظة التي لا نريد أن نكتشفه فيها. الاختبار الدوري، وإدارة التجاوز، وإدارة التغيير، ليست إجراءات إدارية بل هي ما يجعل كل ما في الفصل السابع حقيقيًا.

خامسًا: وثّق ما تعرفه، وشكّك فيما تفترضه.

معظم الأخطاء الجسيمة التي مررت بها أو سمعت عنها لم تبدأ بجهل، بل **بافتراض**: افتراض أن الصمام مغلق، أن الحماية تعمل، أن المخطط يمثّل الواقع، أن الحسّاس المكتوب اسمه على الشاشة هو المتصل فعلًا. والفارق بين الافتراض والمعرفة خطوة واحدة: التحقق.

وأخيرًا — ملاحظة على حدود هذا الكتاب

هذا الكتاب يشرح **المبادئ** ويقدّم **إطارًا للتفكير**، لكنه لا يحل — ولا يجوز أن يحل — محل ثلاثة أشياء: **وثائق المصنّع** الخاصة بوحدتك، **وإجراءات منشأتك** ومصفوفة السبب والأثر المعتمدة فيها، و**حكم المهندس المسؤول** الذي يرى المعدة أمامه. حيث اختلف هذا الكتاب عن أيٍّ من الثلاثة، فالأولوية لها لا له.

وأما ما أرجوه من هذا العمل فبسيط: أن يجد فيه مهندس أو فني عربي — يقف أمام وحدة توربين غازي في محطة أو حقل أو منصة — طريقًا أوضح مما كان أمامي حين بدأت. وإن حدث ذلك مرة واحدة، فقد أدّى الكتاب غرضه.

والله الموفق.

هاشم حسين الخصاونة

ملحق أ: مسرد المصطلحات والاختصارات

خلال فصول الكتاب استخدمنا عددًا كبيرًا من الاختصارات التقنية الشائعة بصناعة التوربينات الغازية. هذا الملحق يجمعها بمكان واحد كمرجع سريع، مقسّمة حسب المجال، مع إشارة مختصرة لأول قسم شرحها بالتفصيل.

الأداء والدورة الحرارية

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
TIT	Turbine Inlet Temperature	حرارة دخول التوربين — العامل الأهم بكفاءة وقدرة الدورة (2.3، 7.3)
EGT	Exhaust Gas Temperature	حرارة غازات العادم — القياس العملي البديل عن حرارة الاحتراق (7.3، 9.2)
CPR	Compressor Pressure Ratio	نسبة ضغط الضاغط — خروج الضاغط مقسومًا على دخوله (2.4)
HRSG	Heat Recovery Steam Generator	مرجل استرداد الحرارة بمحطات الدورة المركّبة (3.1، 20.7)
LHV / HHV	Lower / Higher Heating Value	القيمة الحرارية الدنيا/العليا للوقود — تحديد أيهما المعتمد شرط لأي مقارنة أداء (17.2، ملحق و)
EOH	Equivalent Operating Hours	ساعات التشغيل المكافئة — تحتسب أثر البدء/الإيقاف على عمر الأجزاء الساخنة (8.4، 16.2)
ACH	Air Changes per Hour	معدل تبديل هواء الحجرة بالساعة — أساس تحجيم مراوح التهوية (6.7)

المكونات والمسار الساخن

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
IGV / VIGV	(Variable) Inlet Guide Vane(s)	ريش التوجيه المتغيرة عند مدخل الضاغط (9.5)
VSV	(Variable Stator Vane(s	ريش موجهة متغيرة بين مراحل الضاغط (9.5)
VBV	(Variable Bleed Valve(s	صمامات نزف متغيرة لحماية الضاغط من الانحباس (9.5)
TBC	Thermal Barrier Coating	الطلاء الحراري العازل على شفرات المسار الساخن (5.4، 16.2)
CMC	Ceramic Matrix Composites	المواد المركّبة السيراميكية بأحدث الأجيال (5.4)
HGP	Hot Gas Path	المسار الساخن: غرفة الاحتراق والفوهات والشفرات وأغلفتها (الفصل 16)
FOD	Foreign Object Damage	ضرر جسم غريب قادم من خارج المحرك (16.2)
DOD	Domestic Object Damage	ضرر جسم داخلي انفصل وضرب ما بعده — يعني دائمًا عطلًا أصليًا أعلى المجرى (16.2)

الوقود والاحتراق والانبعاثات

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
GCV	Gas Control Valve	صمام التحكم بالوقود الغازي (6.2، 9.2)
FSR	Fuel Stroke Reference	مرجع الوقود النهائي الفائز من منطق أقل قيمة تفوز (9.1، 9.2)
DLN	Dry Low NOx	احتراق الخلط المسبق الفقير الجاف لخفض أكاسيد النيتروجين (5.3)

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
WI	Wobbe Index	دليل ووبي — مؤشر قابلية تبادل الغازات عند نفس الفوهة (6.2)
SCR	Selective Catalytic Reduction	الاختزال الحفزي الانتقائي لإزالة NOx بمسار العادم (5.3، 22.8)
CEMS	Continuous Emissions Monitoring System	نظام قياس الانبعاثات المستمر عند المدخنة (5.3)

التحكم والقياس

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
MVS	Minimum Value Select	منطق "أقل قيمة تفوز" لاختيار مرجع الوقود (9.1، 12.11)
TMR	Triple Modular Redundant	ثلاثة معالجات مستقلة تصوّت على القرار (7.1، 9.1)
SIFT	Software Implemented Fault Tolerance	تصويت برمجي يقارن قراءات المعالجات (9.6)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer	حسّاس موضع حثّي بلا تلامس كهربائي متحرك، يُستخدم في الحلقات الحرجة (9.7)
MPU	Magnetic Pickup Unit	حسّاس السرعة المغناطيسي على العجلة المسننة (7.2)
RTD	Resistance Temperature Detector	حسّاس حرارة بالمقاومة — دقة وثبات للقياسات الميكانيكية (12.1)
T/C	Thermocouple	الثرموكابل — قياس فارق حرارة بين وصلتين (12.1)
CJC	Cold Junction Compensation	تعويض الوصلة الباردة للثرموكابل (12.1)

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
HART	Highway Addressable Remote Transducer	بروتوكول رقمي فوق إشارة 4–20 مللي أمبير (19.4)
AI / AO / DI / DO	Analog/Digital Input/Output	أنواع إشارات بطاقات الإدخال والإخراج (12.1، 19.2)
LD / FBD / ST / IL / SFC	لغات IEC 61131-3	أساليب البرمجة الصناعية الخمسة (الفصل 12)
PLC / PAC	Programmable Logic/Automation Controller	المتحكم المنطقي/الأتمتة القابل للبرمجة (الفصل 15)
SP / PV / MV	Set Point / Process Variable / Manipulated Variable	نقطة الضبط، القيمة المقاسة، ومتغيّر التحكم — أركان الحلقة المغلقة (20.1)
PID	Proportional–Integral–Derivative	المتحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي (20.3)
MPC	Model Predictive Control	التحكم التنبؤي المبني على النموذج (20.6)
HMI	Human-Machine Interface	واجهة التشغيل (9.4)
DCS	Distributed Control System	نظام التحكم الموزّع بمستوى المنشأة (الفصل 11)
TCS	Turbine Control System	نظام التحكم بالتوربين — المتخصص بالتوربين نفسه، مقابل DCS على مستوى المنشأة (11.1)
Historian	Data Historian	مخزّن البيانات التاريخية — قاعدة بيانات زمنية تحفظ قراءات التشغيل للتحليل اللاحق (23.10)
FSNL	Full Speed No Load	السرعة الكاملة بلا حمل — محطة التحقق قبل الربط بالشبكة (26.4)

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
TMF	Thermo-Mechanical Fatigue	الكلال الحراري الميكانيكي لأجزاء المسار الساخن (16.5)
PMS	Power Management System	نظام إدارة الطاقة وتنسيق تحميل الوحدات (6.6)
UPS	Uninterruptible Power Supply	التغذية غير المنقطعة لأحمال التحكم الحرجة (6.8)

الحماية والسلامة

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
ESD	Emergency Shutdown	الإيقاف الطارئ — أعلى مستوى بسلّم الحماية (7.8)
SIS	Safety Instrumented System	نظام الأدوات الآمن — طبقة الحماية المستقلة عن التحكم (7.8)
SIL	Safety Integrity Level	مستوى تكامل السلامة (1–4) وفق IEC 61508/61511 (7.8)
1oo2 / 2oo2 / 2oo3	X out of Y Voting	فلسفات التصويت بين القنوات — موازنة الأمان مقابل الإتاحية (7.8)
PST	Partial Stroke Test	اختبار المشوار الجزئي لصمامات الإيقاف أثناء التشغيل (7.8)
F&G	Fire & Gas System	نظام كشف الحريق والغاز (6.7، 7.6)
LOTO	Lock Out, Tag Out	العزل والإقفال والوسم قبل العمل على المعدة (8.6)
PTW	Permit to Work	نظام تصريح العمل (8.6)

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
MOC	Management of Change	إدارة التغيير — مراجعة موثّقة قبل أي تعديل غير مطابق للأصل (8.6)

الكهرباء والمولد

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
AVR	Automatic Voltage Regulator	منظم الجهد الآلي — يضبط الإثارة والجهد والقدرة الرَّدّية (6.6، 18.2)
LCI	Load Commutated Inverter	محوّل البدء الساكن — استخدام المولد كمحرك أثناء البدء (6.4)
MW / MVAr / MVA	القدرة الفعّالة / الرَّدّية / الظاهرية	الوقود يشتري MW، والإثارة تشتري MVAr (18.2)
ANSI Device No.	أرقام أجهزة الحماية القياسية	مثل 25، 40، 32، 87G — لغة التخاطب بحمايات المولد (18.3)

الصيانة والاختبار والموثوقية

الاختصار	المعنى الكامل	شرح مختصر
RCA	Root Cause Analysis	تحليل السبب الجذري بدل معالجة العرض (8.3، 10.1)
MTBF / MTTR	Mean Time Between Failures / To Repair	متوسط الزمن بين الأعطال / متوسط زمن الإصلاح (17.3)
FAT	Factory Acceptance Test	اختبار قبول المصنع قبل شحن نظام التحكم (17.1)
P&ID	Piping & Instrumentation Diagram	مخطط الأنابيب والأجهزة — الوثيقة المرجعية لأي عمل ميداني (ملحق هـ)

ملحق ب: جدول تشخيص سريع للأعراض الشائعة

هذا الجدول ملخّص عملي يطبّق منهجية التشخيص المنظّم التي شرحناها في 8.3 على أشهر الأعراض التي يواجهها أي مهندس تشغيل أو صيانة. والهدف منه نقطة انطلاق سريعة للتفكير، لا بديلًا عن التحقق الفعلي قبل أي إصلاح — ولا بديل عن جداول التشخيص التفصيلية الخاصة بكل صانع ووحدة.

العرض الملاحظ	الأسباب المحتملة الشائعة	القسم المرجعي	إجراء أولي مقترح
حرارة عادم مرتفعة بشكل غير متماثل بين الثرموكابلات (Spread عالي)	انسداد جزئي بحاقن وقود، أو توزيع هواء/وقود غير متساوٍ بين غرف الاحتراق	5.3، 7.3	استبعاد الثرموكابل المنحرف أولًا (فحص الحسّاس والتوصيلات وقناة الإدخال)، ثم قراءة نمط الفارق حول المحيط، ثم فحص الحاقنات بالمنظار
اهتزاز متزايد تدريجيًا على مدى أيام/أسابيع	تآكل أو تراكم رواسب على الريش، بداية تدهور محمل	5.5، 7.4، 8.5	مراجعة اتجاه مؤشرات الأداء، جدولة فحص بالبوروسكوب أو فحص محامل
اهتزاز مفاجئ وحاد	خلل ميكانيكي مفاجئ (كسر ريشة، فقدان توازن)	5.4، 7.4	إيقاف فوري حسب منطق الحماية، عدم إعادة التشغيل قبل فحص شامل
تكرار فشل بدء التشغيل عند نفس الخطوة (مثلًا عدم نجاح الإشعال)	مشكلة بنظام الوقود أو الإشعال أو أحد السماحات (Permissives)	6.4، 7.5، 9.3	مراجعة سجل الأحداث لتحديد الخطوة بالضبط، التحقق من السماحات وفحص الأنظمة المساعدة
قراءة حسّاس واحد تنحرف عن باقي الحسّاسات المكرّرة لنفس القياس	عطل بالحسّاس نفسه أو بدارة توصيله	7.1، 9.6	التحقق من الحسّاس المشتبه به بشكل مستقل، عدم افتراض عطل بالمعدة قبل استبعاد الحسّاس

العرض الملاحظ	الأسباب المحتملة الشائعة	القسم المرجعي	إجراء أولي مقترح
عطل متكرر بنفس المكوّن رغم الاستبدال	معالجة العرض فقط دون السبب الجذري (كمشكلة محاذاة ميكانيكية مثلًا)	8.3	تحليل السبب الجذري بدل الاكتفاء بالاستبدال المتكرر
انحراف بسيط بسلوك حلقة تحكم (استجابة أبطأ/أسرع من المعتاد، عدم استقرار خفيف)	معايرة حسّاس موضع (كـ LVDT) خرجت عن النطاق المسموح	9.7	جدولة معايرة نقطة الصفر والمدى الخطي للحسّاس المعني
تدهور تدريجي بمؤشرات الأداء (كفاءة، قدرة) دون عطل واضح	تلوث أو تآكل بريش الضاغط، أو تدهور طبيعي بأجزاء الممر الحار	2.5، 8.5	مراجعة اتجاه بيانات مراقبة الأداء، تقييم الحاجة لتنظيف الضاغط أو تقديم موعد فحص

ملحق ج: مقارنة عامة بين منصات التحكم الشائعة

على مدى الفصل التاسع تكلمنا عن مبادئ التحكم بشكل عام (منطق TMR، MVS، الحسّاسات، إلخ) دون التقيّد بمنصة تحكم تجارية واحدة بعينها. هذا الملحق يقدّم جدولًا سريعًا للمراجعة فقط — للمقارنة التفصيلية الكاملة مع الشرح والرسوم التوضيحية، راجع الفصل الخامس عشر بالكامل.

نقطة يجب توضيحها قبل الجدول: ليست كل منصات الجدول من نفس الفئة. GE Mark VIe وWoodward MicroNet Plus أنظمة **متخصصة** بالتوربينات والمحركات الرئيسية (Prime Movers) منذ التصميم الأساسي. أما Allen-Bradley ControlLogix فهو منصة PLC/PAC **عامة الغرض**، تُستخدم بتطبيق توربين فقط لو صُمِّم تطبيق مخصص فوقها — راجع 15.1 للتفصيل الكامل بهذا الفرق قبل قراءة أي عمود بالجدول أدناه.

المنصة	الشركة المصنّعة	طبيعة النظام	فلسفة الردّية
Mark (وأجياله، مثل Mark VIe)	GE Vernova	Turbine Control متخصص	TMR (عادة 15.3)
MicroNet Plus	Woodward	Prime Mover Control متخصص	Simplex حتى Redundant (15.4)
ControlLogix / CompactLogix	Rockwell Automation	PLC/PAC عام الغرض	حسب تصميم المهندس (15.5)
منصات متخصصة أخرى (مثل Tri-Sen وPetrotech وغيرها)	صانعون متخصصون	تختلف حسب الطراز	تختلف حسب الطراز

ملاحظات مختصرة: Mark VIe منتشر جدًا مع وحدات GE بردّية عالية. MicroNet Plus معروف بحلقات تحكم السرعة (الحاكم) وتطبيقات متنوعة تتجاوز التوربينات الغازية — ضواغط، محركات، توربينات مائية. ControlLogix قوي ومرن جدًا، لكن منطق التوربين (تسلسل، وقود، سرعة، حرارة، حماية) يُبنى بالكامل كتطبيق مخصص فوقه. المنصات المتخصصة الأخرى تُستخدم أحيانًا كبديل أو Retrofit لوحدات قائمة، أو بتطبيقات أصغر.

من واقع عملي: رغم اختلاف الواجهة والتفاصيل البرمجية بين هذه المنصات، المفاهيم الأساسية التي شرحناها في الفصل التاسع (منطق MVS، فكرة التصويت بين المعالجات، تكرار الحسّاسات) تتكرر بشكل شبه ثابت — لأنها تحل نفس المشكلة الهندسية الأساسية: كيف نتحكم بأمان وموثوقية بمعدة باهظة الثمن وحرجة التشغيل. المهندس الذي يفهم المبدأ العام يستطيع الانتقال بين منصات مختلفة بسرعة أكبر ممن حفظ خطوات منصة واحدة فقط عن ظهر قلب.

ملحق د: أهم المعايير والمواصفات القياسية المتعلقة بالتوربينات الغازية

على مدى هذا الكتاب أشرنا بمواضع متفرقة لمعايير قياسية عالمية (API 670 في الفصل السابع، IEC 61508 وIEC 61511 لموضوع SIS/SIL، IEC 62443 وNIST للأمن السيبراني في الفصل التاسع). هذا الملحق يجمعها مع مجموعة أوسع من المعايير المتخصصة بالتوربينات الغازية ومعداتها المرتبطة، كمرجع سريع يوضّح **من يصدر كل معيار، ونطاقه العام، وأي فصل من الكتاب يرتبط به** — دون الدخول بتفاصيل بنودها الفنية الدقيقة (الأرقام والحدود الفعلية تختلف حسب نسخة المعيار والتطبيق، وتُحدَّث دوريًا، فمرجعها الوحيد الموثوق هو النسخة الرسمية المشتراة من الجهة المصدرة).

لماذا تهم هذه المعايير مهندس التوربينات عمليًا؟ المعايير القياسية توفّر «لغة مشتركة» بين المشتري (صاحب المصنع أو المنشأة) والشركة المصنّعة والجهات الرقابية — بدلًا من كل طرف يحدد متطلباته الخاصة من الصفر، المعيار يوفّر أساسًا متفقًا عليه صناعيًا لعقود الشراء (Procurement)، تصميم السلامة، طرق الاختبار والقبول، وأسلوب التركيب. من واقع الميدان، معرفة «أي معيار يغطي أي موضوع» توفّر وقتًا كبيرًا عمليًا — سواء عند كتابة أو مراجعة مواصفات شراء وحدة جديدة، أو عند تبرير قرار تصميم معيّن لجهة تفتيش أو تدقيق.

معايير API (معهد البترول الأمريكي — American Petroleum Institute):

عائلة معايير API من أكثر المعايير استخدامًا عمليًا بمشاريع النفط والغاز تحديدًا (يرتبط هذا مباشرة بتطبيقات 3.4 التي شرحناها)، وتغطي معدات دوّارة ومساعدة متعددة، لا التوربين وحده:

المعيار	النطاق العام	الارتباط بفصول الكتاب
API 616	التوربينات الغازية لخدمات صناعة البترول والكيماويات والغاز (تاريخيًا أشهر معيار API مخصص للتوربين الغازي نفسه، وبعض إصداراته الحديثة دُمجت ضمن عائلة معايير التوربينات الأخرى — يُنصح دومًا بالتأكد من آخر تصنيف رسمي عند الاستخدام الفعلي)	مبدأ عمل التوربين وبنيته، الفصلان الثاني والخامس

المعيار	النطاق العام	الارتباط بفصول الكتاب
API 670	أنظمة حماية المكائن الدوّارة (Machinery Protection Systems) — الاهتزاز، السرعة الزائدة، الموضع المحوري	مراقبة الاهتزاز 7.4، وقياس السرعة والحماية من السرعة الزائدة 7.2
API 671	القارنات الخاصة (Special Purpose Couplings) لخدمات صناعة البترول والكيماويات والغاز	العمود والمحامل 5.5
API 613	تروس خاصة (Special Purpose Gear Units)	علبة التروس الملحقة، 6.4
API 614	أنظمة التزييت وإحكام العمود وزيت التحكم (Lubrication, Shaft-Sealing and Control-Oil Systems)	نظام التزييت 6.1
API 617	ضواغط محورية وطاردة مركزية (Axial and Centrifugal Compressors)	التوربين كمحرك دفع للضواغط، 3.4
API 546	آلات متزامنة عديمة الفرش (Brushless Synchronous Machines)	نظام الإثارة والمولد 6.6
API 661	مبادلات حرارية مبرَّدة بالهواء (Air-Cooled Heat Exchangers)	نظام التبريد والتهوية 6.3
API 686	تركيب المكائن (Machinery Installation and Installation Design)	الفحوصات والتركيب، الفصل الثامن

عائلة معايير ISO 3977 — شراء التوربينات الغازية (Gas Turbines — Procurement):

عائلة معايير مخصصة للتوربينات الغازية تحديدًا، تصدرها المنظمة الدولية للمعايير (ISO)، وتتكون من عدة أجزاء مستقلة يغطي كل جزء منها جانبًا مختلفًا من عملية الشراء والتوصيف الفني:

الجزء	العنوان العام	الارتباط بفصول الكتاب
ISO 1-3977	مقدمة عامة وتعريفات (General introduction and definitions)	مصطلحات مشتركة عبر الكتاب كله
ISO 2-3977	ظروف مرجعية قياسية وتصنيفات القدرة (Standard reference conditions and ratings)	يرتبط بمفهوم ظروف ISO المرجعية الذي شرحناه في 2.4
ISO 3-3977	متطلبات التصميم (Design requirements)	يرتبط بمكونات التوربين، الفصل الخامس
ISO 4-3977	الوقود والبيئة (Fuels and environment)	يرتبط بنظام الوقود 6.2 والانبعاثات
ISO 5-3977	تطبيقات صناعة النفط والغاز الطبيعي (Applications for petroleum and natural gas industries)	يرتبط بتطبيقات النفط والغاز 3.4
ISO 7-3977	معلومات فنية (Technical information)	توثيق فني عام يخص التوصيف والمواصفات
ISO 8-3977	الفحص والاختبار والتركيب والتشغيل التجريبي (Inspection, testing, installation and commissioning)	يرتبط بتسلسل التشغيل التجريبي واختبارات الأداء والقبول، 17.1 و17.2
ISO 9-3977	الاعتمادية والتوفّر وقابلية الصيانة والسلامة (Reliability, availability, maintainability and safety)	يرتبط بمفاهيم الصيانة (الفصل الثامن) والحماية (الفصل السابع)

ISO 21789 — تطبيقات التوربين الغازي: السلامة (Gas turbine applications — Safety):

معيار مخصص بالكامل لمتطلبات السلامة بتطبيقات التوربين الغازي — يغطي مفاهيم عامة مثل تقييم المخاطر، السلامة الميكانيكية، أنظمة الوقود، مراقبة الاحتراق، أنظمة العادم، الأغلفة (Enclosures)، الوقاية من الحريق، تصنيف المناطق الخطرة، والتهوية. يتقاطع مباشرة مع فلسفة الحماية التي بنينا عليها الفصل السابع بالكامل (7.1)، ومع نظام الحريق والغاز (7.6) تحديدًا.

NFPA 37 — معيار تركيب واستخدام محركات الاحتراق الثابتة والتوربينات الغازية:

يصدره الاتحاد الوطني الأمريكي للوقاية من الحريق (NFPA)، ويغطي متطلبات التركيب العملي لمحركات الاحتراق الثابتة والتوربينات الغازية — تجهيزات الوقود، أنظمة العادم، التهوية، والوقاية من الحريق بموقع التركيب نفسه. معيار مكمّل لـISO 21789 من زاوية عملية أكثر تحديدًا بمتطلبات التركيب الفعلي، ويرتبط بأنظمة الوقود (6.2) ونظام الحريق والغاز (7.6).

NFPA 750 — معيار أنظمة الحماية من الحريق بالرذاذ المائي (Water Mist Fire Protection Systems):

يغطي تصميم وتركيب أنظمة إطفاء الحريق بالرذاذ المائي — وسيلة إطفاء بديلة عن الرشاشات التقليدية أو أنظمة الغاز، تُستخدم أحيانًا بأغلفة التوربينات وغرف المعدات الحرجة. يرتبط مباشرة بنظام الحريق والغاز الذي شرحناه في 7.6، كمثال على أحد الخيارات التقنية المتاحة لوسيلة الإطفاء نفسها.

كيف تترابط هذه المعايير عمليًا؟ يفيد النظر لها كأربع طبقات مختلفة الغرض: معايير **API** تخص تصميم وتصنيع **المعدات نفسها ومكوناتها الفرعية** (التوربين، القارنات، التروس، نظام التزييت، المولد...)، وعائلة **ISO 3977** تخص مرحلة **الشراء والتوصيف** الشاملة للوحدة ككل، و**ISO 21789** و**NFPA 37** يخصان **متطلبات السلامة والتركيب** بالموقع، و**NFPA 750** (مع IEC 61508/61511 التي ذكرناها في الفصل السابع) يخص **أنظمة فرعية متخصصة** (وسيلة إطفاء معيّنة، أو منطق حماية آلي معيّن). معيار واحد نادرًا ما يكفي وحده بمشروع توربين غازي حقيقي — المشاريع الكبيرة عادة تشترط الالتزام بعدة معايير متزامنة من أكثر من جهة إصدار (API وISO وNFPA وIEC معًا)، كل واحد يغطي زاوية مختلفة تمامًا عن الأخرى.

من واقع الميدان، أهم نقطة عملية يجب تذكّرها: المعايير تُراجَع وتُحدَّث دوريًا (ولكل جزء من أجزاء ISO 3977 تاريخ إصدار مختلف، ويُراجَع كل جزء ويُحدَّث على حدة)، ومتطلبات مشروع معيّن عادة تحدد نسخة بعينها يجب الالتزام بها تعاقديًا — لذلك التأكد من «أي نسخة» مطلوبة بالضبط بمشروع معيّن خطوة أساسية قبل أي عمل تصميم أو تدقيق يعتمد على معيار قياسي، ولا يجوز افتراض أن أحدث نسخة متاحة هي تلقائيًا المطلوبة تعاقديًا.

ملحق هـ: المراجع والقراءات الإضافية

هذا الكتاب مبني في جوهره على **الخبرة الميدانية المباشرة**، لكنه استند أيضًا إلى إطار معرفي راسخ تقدّمه المراجع والمعايير المدرجة أدناه. أُدرجها هنا لغرضين: **الأمانة العلمية**، و**إرشاد القارئ** الذي يريد التعمّق في موضوع بعينه.

ملاحظة مهمة حول الاستخدام: كل ما ورد في هذا الكتاب من شرح ورسوم هو **صياغة أصلية من إعدادي**. لم يُقتبَس نص من أي مرجع أدناه، ولم تُعَد إنتاج أي جداول أو أشكال أو متطلبات رقمية منها — فالمعايير المدرجة وثائق تجارية محمية بحقوق نشر، وأُشير إليها هنا **بعنوانها ونطاقها العام فقط**. من يحتاج المحتوى الفعلي لأي معيار فعليه الرجوع إلى النسخة الرسمية الصادرة عن الجهة المُصدِرة، **والتحقق من الإصدار المعتمد في عقده تحديدًا** — فلا يصح افتراض أن «الأحدث» هو المطبَّق.

أولًا: مراجع هندسة التوربينات الغازية

هذه مراجع عامة معتمدة عالميًا، تصلح للتعمّق فيما تناوله هذا الكتاب بإيجاز:

المرجع	نطاقه العام	مفيد بشكل خاص لـ
Gas Turbine Engineering Handbook — M. P. Boyce	مرجع شامل يغطي الديناميكا الحرارية، التصميم، المكونات، الأداء، والصيانة	الفصول 2، 5، 8، 16
Gas Turbine Handbook: Principles and Practice — A. Giampaolo	توجّه عملي نحو التشغيل والصيانة وحل المشكلات	الفصول 8، 10، 16
Sawyer's Gas Turbine Engineering Handbook	مرجع كلاسيكي متعدد المجلدات في نظرية وتطبيقات التوربينات	الفصول 1–5
Gas Turbine Combustion — A. H. Lefebvre & D. R. Ballal	مرجع متخصص في الاحتراق والانبعاثات وتصميم غرف الاحتراق	5.3، 7.5

المرجع	نطاقه العام	مفيد بشكل خاص لـ
Rotordynamics of Automotive and Industrial Turbomachinery (مراجع ديناميكا الدوّار عمومًا)	السرعات الحرجة، مخطط كامبل، الاهتزاز اللَّيّي	5.5، 7.4
Machinery Vibration: Measurement and Analysis — V. Wowk	القياس والتحليل الطيفي وتشخيص أعطال الاهتزاز	7.4، 13
Process Control: Modeling, Design and Simulation (مراجع التحكم الصناعي عمومًا)	نظرية PID، الضبط، التحكم المتتالي والأمامي والمتقدم	الفصل 20
Instrument Engineers' Handbook — B. Lipták	مرجع موسوعي في القياس والتحكم والعناصر النهائية	الفصلان 19، 20
Boiler Control Systems Engineering — G. F. Gilman	التحكم بالمراجل، ومنه التحكم ثلاثي العناصر بمستوى الطبلة	20.7

ملحوظة: مرجع حكومي متاح مجانًا

يستحق الإفراد بالذكر: **The Gas Turbine Handbook** الصادر عن وزارة الطاقة الأمريكية (DOE/NETL) — مرجع تقني شامل بأقلام نخبة من الباحثين والمصنّعين، يغطي الدورات والاحتراق والمواد والتبريد وتقنيات القياس. ولأنه منشور حكومي فهو **بالملك العام ومتاح للتنزيل مجانًا** — ما يجعله أفضل خطوة تالية لقارئ هذا الكتاب الذي يريد التعمّق بالجانب البحثي والتصميمي دون كلفة.

ثانيًا: المعايير والمواصفات القياسية

مفصّلة بنطاقها وربطها بفصول الكتاب في **ملحق د**، وتُلخَّص هنا بحسب الجهة المُصدِرة:

- **API** (American Petroleum Institute): API 616 (التوربينات الغازية لخدمات البترول والكيماويات والغاز)، API 670 (أنظمة حماية المكائن)، API 671 (القارنات الخاصة)، API 613 (وحدات التروس الخاصة — Special Purpose Gear Units)، API 614 (أنظمة التزييت والإحكام)، API 617 (الضواغط المحورية والطاردة المركزية)، API 546 (المولدات المتزامنة)، API 661 (المبادلات المبرَّدة بالهواء)، API 686 (ممارسات التركيب).
- **ISO** (International Organization for Standardization): سلسلة ISO 3977 (شراء التوربينات الغازية — أجزاؤها المختلفة تغطي المصطلحات، ظروف الأداء، التصميم، الوقود، الانبعاثات، الأنظمة المساعدة، والمواثيق)، ISO

21789 (تطبيقات التوربينات الغازية — السلامة)، وسلسلة ISO 20816 (وسابقاتها ISO 7919 وISO 10816) لقياس وتقييم اهتزاز المكائن.

- NFPA 37 :(National Fire Protection Association) **NFPA** (تركيب محركات الاحتراق الثابتة والتوربينات الغازية)، NFPA 750 (أنظمة الحماية من الحريق برذاذ الماء)، إضافةً إلى معايير أخرى تخص أنظمة كشف الحريق والإطفاء.
- **IEC** (International Electrotechnical Commission): سلسلة IEC 61508 وIEC 61511 (السلامة الوظيفية وأنظمة الأدوات الآمنة — الأساس المرجعي لمفاهيم SIS وSIL في 7.8)، وسلسلة IEC 62443 (الأمن السيبراني لأنظمة الأتمتة والتحكم الصناعي — 9.8، 11.7)، وIEC 61131-3 (لغات برمجة المتحكمات — الفصل 12).
- **ANSI/IEEE**: أرقام أجهزة الحماية القياسية (ANSI Device Numbers) المستخدمة في 18.3، ومعايير IEEE الخاصة بحماية المولدات والتزامن.
- **ASME**: مواثيق اختبار الأداء (Performance Test Codes) الخاصة بالتوربينات الغازية ومحطات الدورة المركّبة — الأساس المرجعي لمنهجية اختبار الأداء والتصحيح للظروف المرجعية في 17.2.

ثالثًا: وثائق المصنّعين

الفئة الأهم عمليًا على الإطلاق، وأولويتها **تعلو على كل ما سبق** عند التعارض:

- دليل التشغيل والصيانة **(O&M Manual)** الخاص بوحدتك تحديدًا.
- مصفوفة السبب والأثر **(Cause & Effect Matrix)** المعتمدة في منشأتك.
- مخططات الحلقات **(Loop Drawings)** ومخططات الأنابيب والأجهزة (P&ID).
- **قوائم نقاط الضبط والثوابت القابلة للضبط** المعتمدة والموثّقة.
- **نشرات المصنّع الفنية** (Technical Information Letters) التي تُصدَر بعد التسليم وتحمل غالبًا أهم التحديثات العملية.

تنبيه بشأن التعامل مع هذه الوثائق: كثير منها يحمل تصنيف سرّية وحقوق نشر، ويحتوي على أرقام تاغات وبيانات مشروع بعينه. الاستفادة منها في التعلّم مشروعة ومطلوبة، أما تداولها أو إعادة نشرها أو اقتباس محتواها في أعمال مفتوحة فأمر مختلف تمامًا — وهو ما التزمتُ به في هذا الكتاب.

رابعًا: مصادر المؤلف والمجتمعات الهندسية

- **الخبرة الميدانية المباشرة** الممتدة لأكثر من عشرين عامًا في تشغيل التوربينات الغازية وأنظمة تحكمها وحمايتها وصيانتها، وهي المصدر الأساسي للحالات العملية في الفصل الثالث عشر وللملاحظات المعنونة بـ«من واقع الميدان» عبر الكتاب.
- **رسالة الماجستير** الخاصة بي في مجال التحكم بمستوى الطبلة في مراجل استرداد الحرارة، وهي مصدر القسم 20.7 والأشكال المرافقة له.
- **المجتمعات الهندسية المتخصصة على الإنترنت** — وأبرزها منتدى Control.com بأرشيفه الضخم لنقاشات أعطال التوربينات الغازية وأنظمة تحكمها، ومنتدى Eng-Tips — التي استُلهمت منها أنماط المشاكل المتداولة في القسم 13.13، بإعادة صياغة وتعميم كاملين دون نقل حرفي. أنصح كل مهندس توربينات بمتابعة هذه المجتمعات — فقراءة مشاكل الآخرين قبل أن تقع عندك من أرخص أنواع الخبرة ثمنًا.

ملحق و: وحدات القياس والتحويلات الشائعة

المهندس الميداني يتنقل يوميًا بين وثائق أمريكية وأوروبية تستخدم وحدات مختلفة لنفس الكمية. هذا الملحق مرجع سريع لأكثر التحويلات تكرارًا بعالم التوربينات الغازية — مع التنبيهات التي تمنع أشهر أخطاء الخلط.

الضغط

من	إلى	المعامل التقريبي
bar	psi	× 14.5
bar	kPa	× 100
kg/cm²	bar	× 0.981 (متقاربان لكن ليسا متطابقين)
ضغط مطلق (psia / bara)	ضغط نسبي (psig / barg)	اطرح الضغط الجوي (≈ 1.013 bar عند سطح البحر)

⚠ **التنبيه الأهم:** الخلط بين المطلق والنسبي (a مقابل g) أكثر خطأ وحدات يسبب أعطالًا حقيقية — خصوصًا بإعدادات مدى النواقل (17.5) وحسابات نسبة الضغط.

الحرارة

التحويل	العلاقة
مئوي ← فهرنهايت	$F = °C \times 1.8 + 32°$
فهرنهايت ← مئوي	$C = (°F - 32) \div 1.8°$
فارق حرارة (لا درجة)	فارق 1°C = فارق 1.8°F — **بلا إزاحة 32**

عند تحويل فارق حرارة عادم (Spread، 10.3) أو حزام تخميد (12.11) لا تضف الـ 32 — هذا خطأ متكرر فعليًا عند مقارنة وثائق بوحدات مختلفة.

الاهتزاز والإزاحة

الكمية	الوحدات	ملاحظة
إزاحة العمود (مجسات القرب)	1 mil = 25.4 µm	وتُقرأ عادة قمة-لقمة (pp)
سرعة الاهتزاز (هياكل/تسارع)	1 inch/s = 25.4 mm/s	وتُقرأ RMS أو Peak — **حدّد أيهما قبل أي مقارنة**
تنبيه معايرة	—	لا تُقارن إزاحة بسرعة اهتزاز — راجع التحذير بـ 7.4: كميتان فيزيائيتان مختلفتان

القدرة والطاقة والكفاءة

الكمية	العلاقة
القدرة	1 MW = 1,341 hp تقريبًا
الطاقة الحرارية	1 kWh = 3,412 Btu = 3.6 MJ
معدل الحرارة ↔ الكفاءة	الكفاءة % = 3,412 ÷ Heat Rate (Btu/kWh) × 100، أو Heat Rate (kJ/kWh) × 100 ÷ 3,600 =
مثال للتحقق السريع	Heat Rate ≈ 9,480 Btu/kWh يكافئ كفاءة ≈ 36%

عند مقارنة معدلات حرارة (17.2) تأكد أولًا: هل الرقمان على أساس القيمة الحرارية الدنيا (LHV) أم العليا (HHV) للوقود؟ الفارق بينهما بحدود 10% للغاز الطبيعي — أي أكبر من أي تدهور أداء تبحث عنه أصلًا. مقارنة LHV بـHHV تُنتج استنتاجًا خاطئًا بالكامل.

التدفق والكميات الأخرى

الكمية	العلاقة
تدفق حجمي للغاز	1 MMSCFD ≈ 1,180 Nm³/h تقريبًا (انتبه لفرق الظروف المرجعية Standard مقابل Normal)
السرعة الدورانية	RPM ↔ Hz: التردد = RPM ÷ 60؛ وسرعة التزامن = 120 × تردد الشبكة ÷ عدد الأقطاب (18.1)
القوة والعزم	1 lb·ft = 0.738 N·m

ملاحظة: المعاملات أعلاه للاستخدام الهندسي السريع. للحسابات التعاقدية واختبارات الأداء الرسمية، استخدم المعاملات الدقيقة المنصوص عليها بمواثيق الاختبار المعتمدة بالعقد.

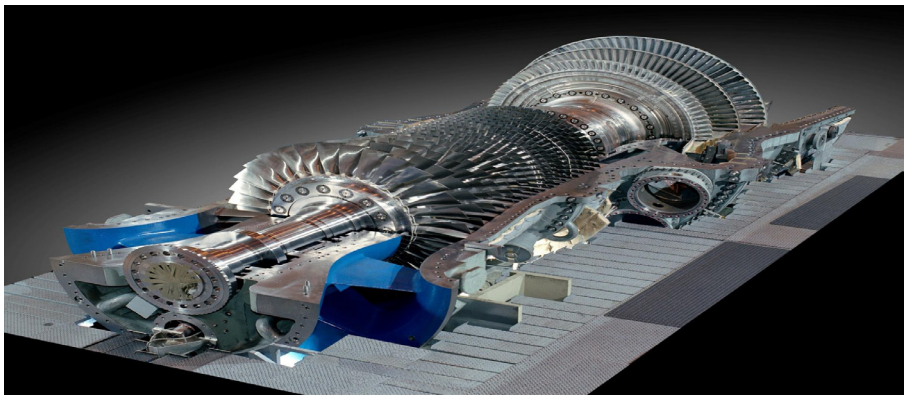
ملحق ز: عرض تقديمي

التوربين الغازي - التشغيل والتحكم

Introduction TO THE GAS TURBINE (Operation and control)

NAME: HASHEM ALKHASAWNEH
PRESENTATION
DATE: 21/08/2022

What is the Gas Turbine



Gas Turbine Application

1. Power Generation:



Gas Turbine Application

2. Aviation:





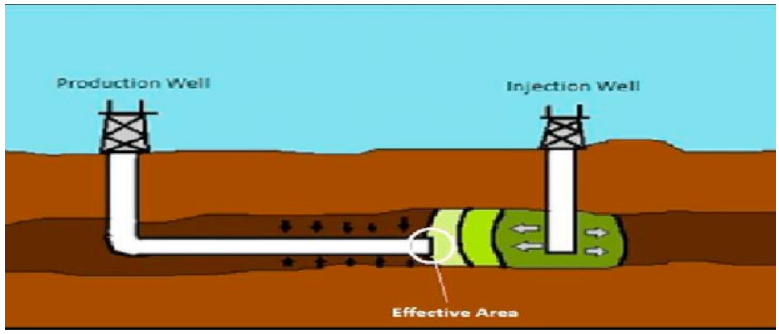
Gas Turbine Application

3. Water Injection:



Gas Turbine Application

4. Gas Injection:



Gas Turbine Application

5. LNG:



Gas Turbine Application

6. High speed road vehicle:



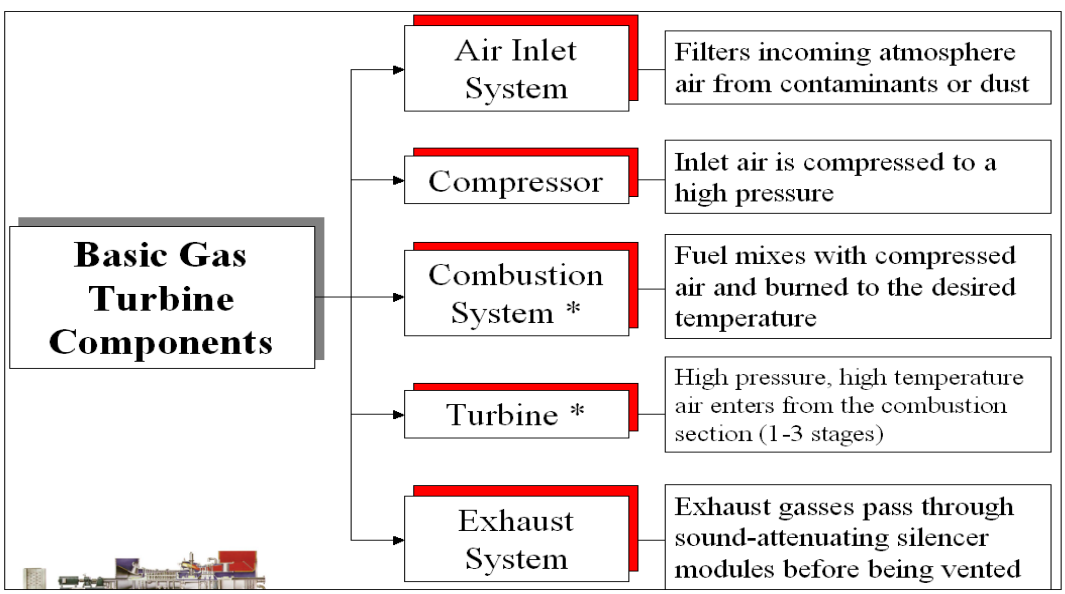
Gas Turbine Application

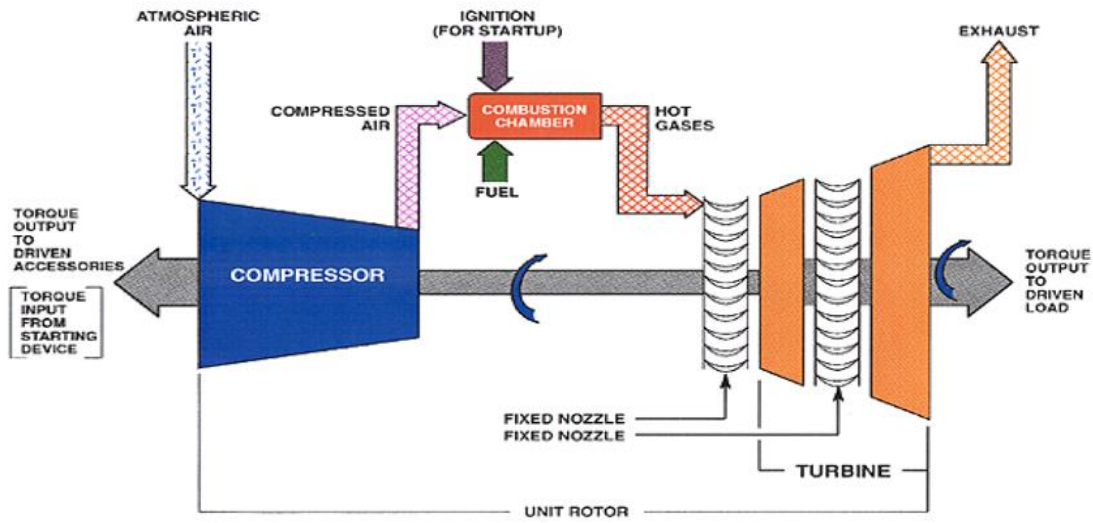
7. Big ships:

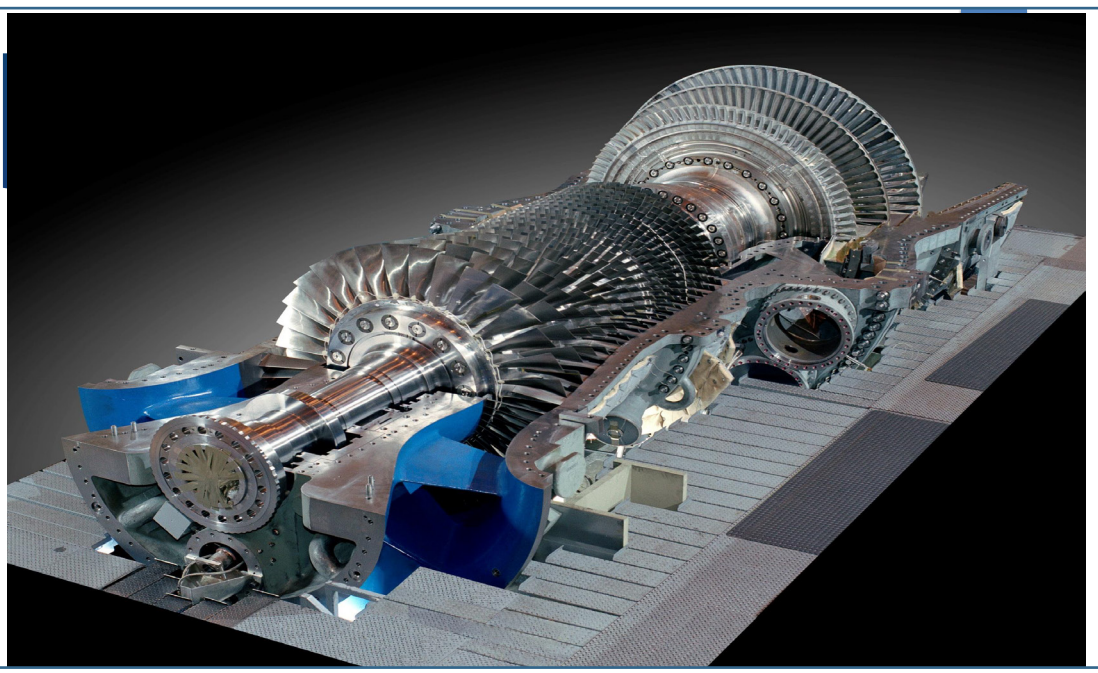


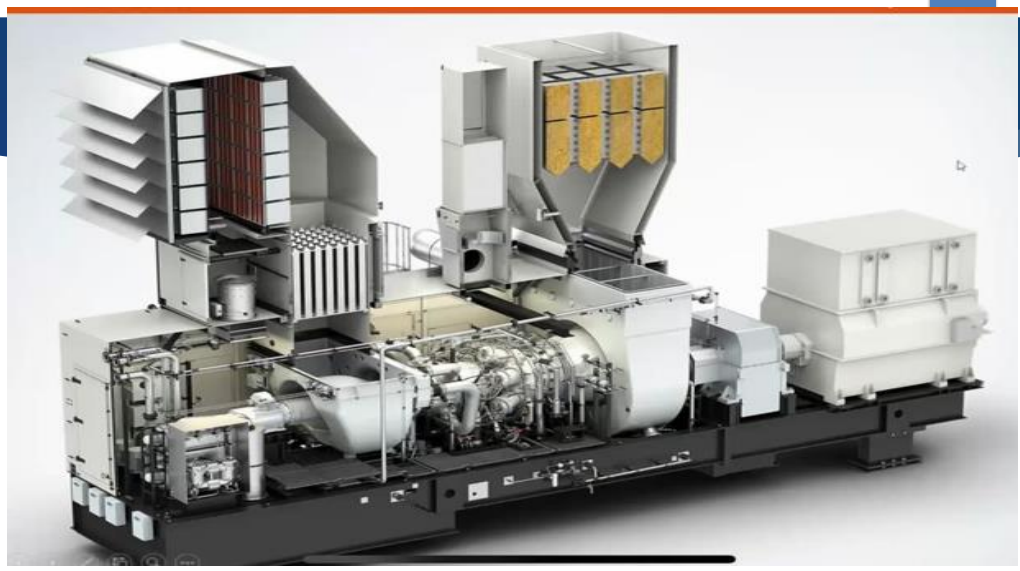


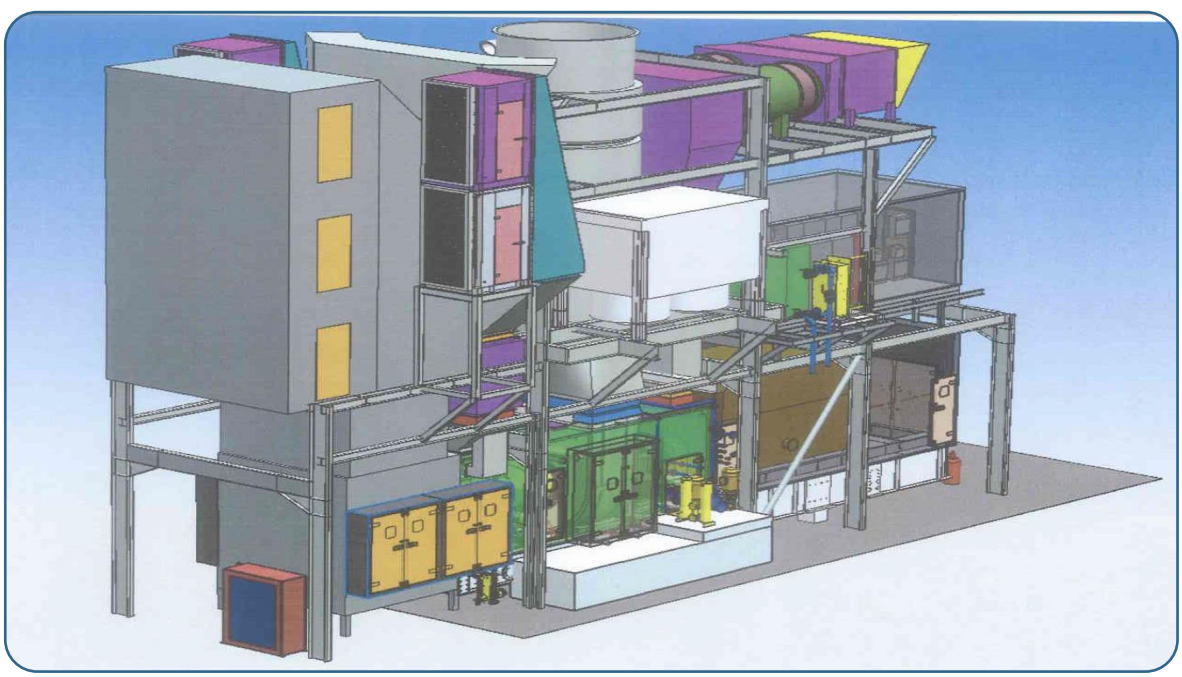





ATMOSPHERIC AIR
IGNITION (FOR STARTUP)
EXHAUST
COMPRESSED AIR
COMBUSTION CHAMBER
HOT GASES
FUEL
TORQUE OUTPUT TO DRIVEN ACCESSORIES
COMPRESSOR
TORQUE OUTPUT TO DRIVEN LOAD
TORQUE INPUT FROM STARTING DEVICE
FIXED NOZZLE
FIXED NOZZLE
TURBINE
UNIT ROTOR

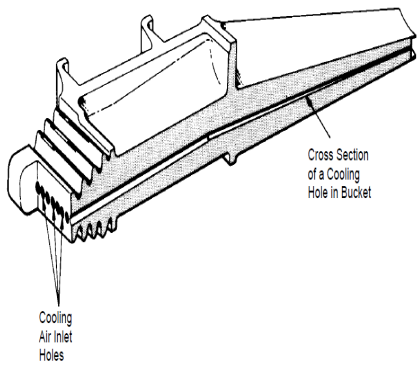


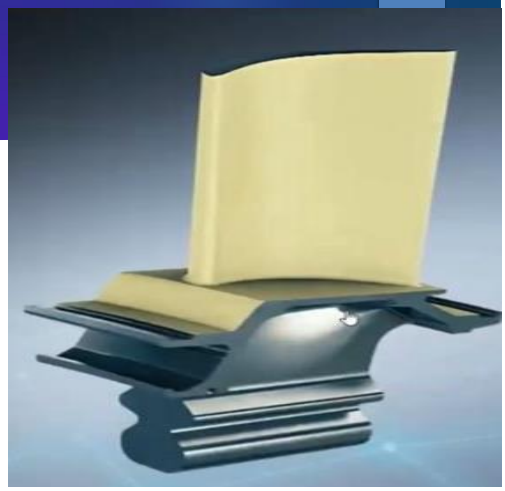


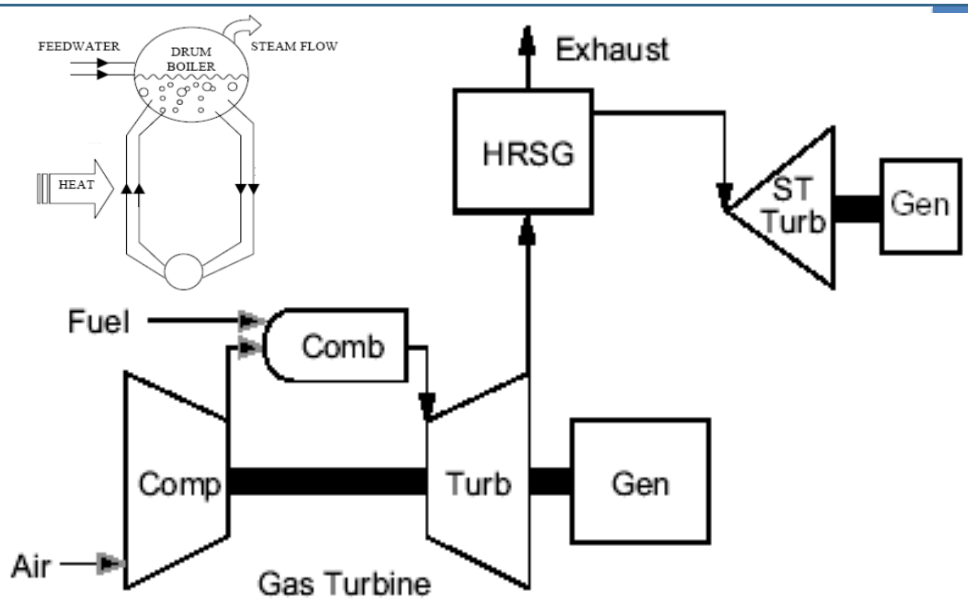


Watch the below Video

- 01 GT Animated-1.mp4

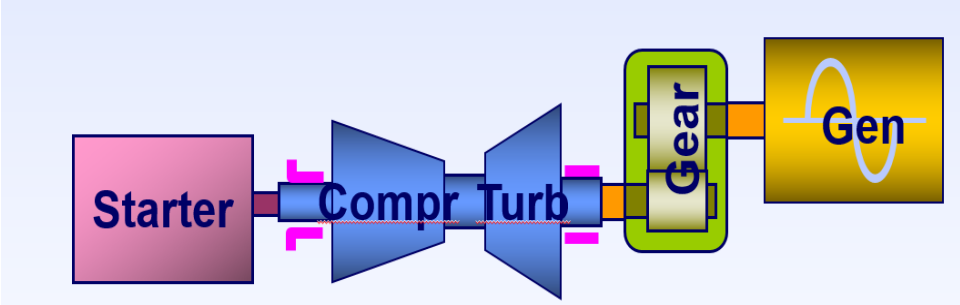






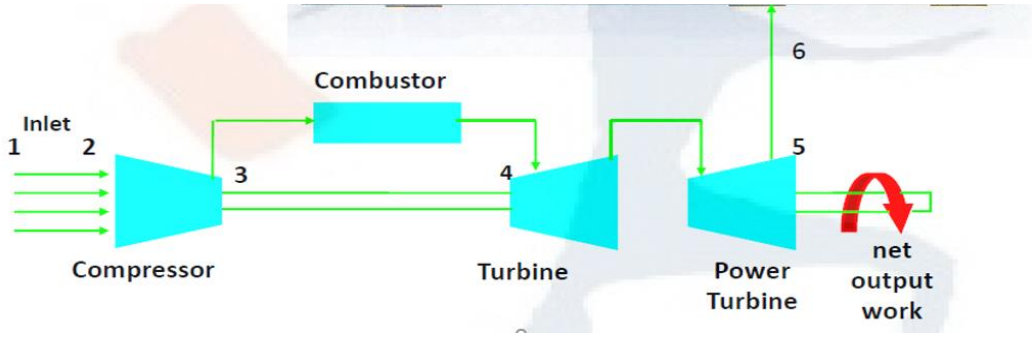
Speed Reduction:

1. Gear Box:

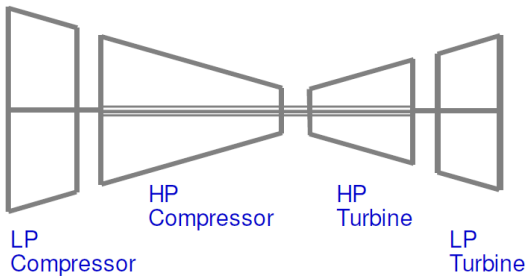


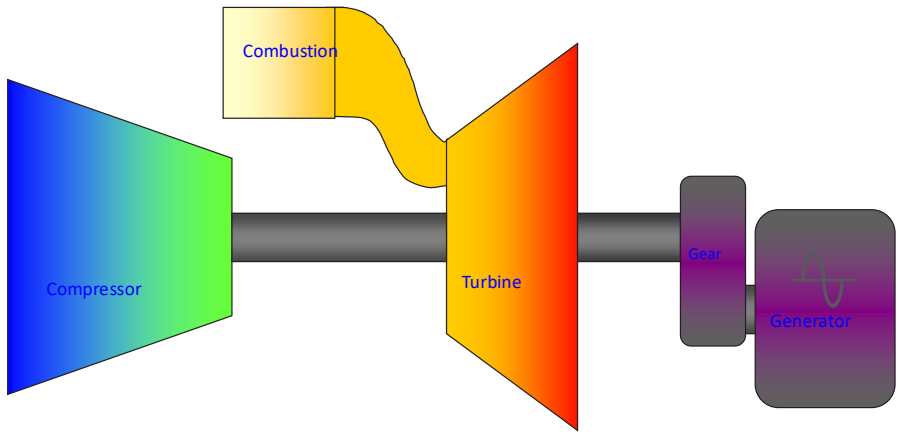
Speed Reduction:

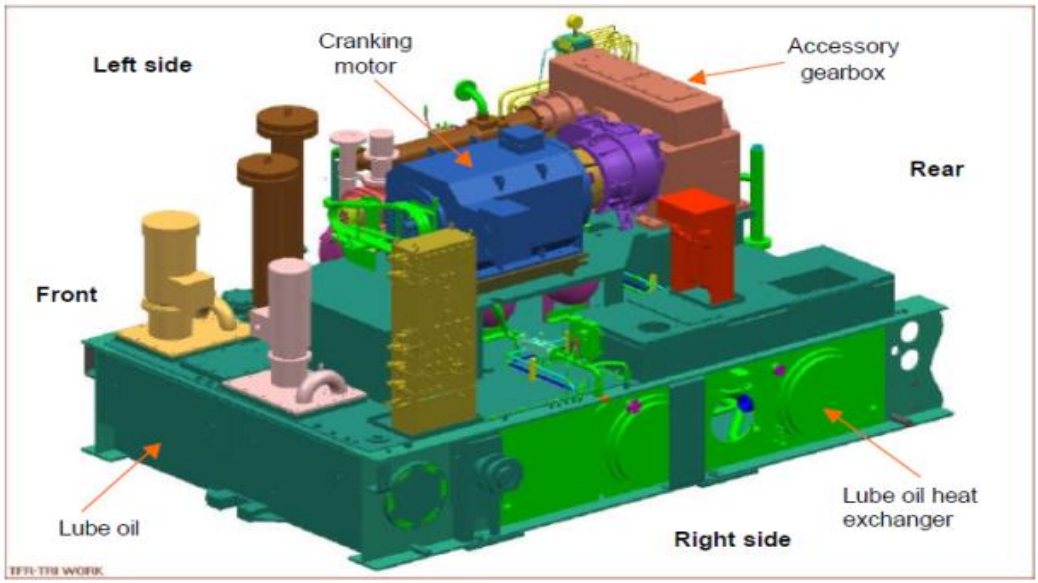
2. Free Turbine:

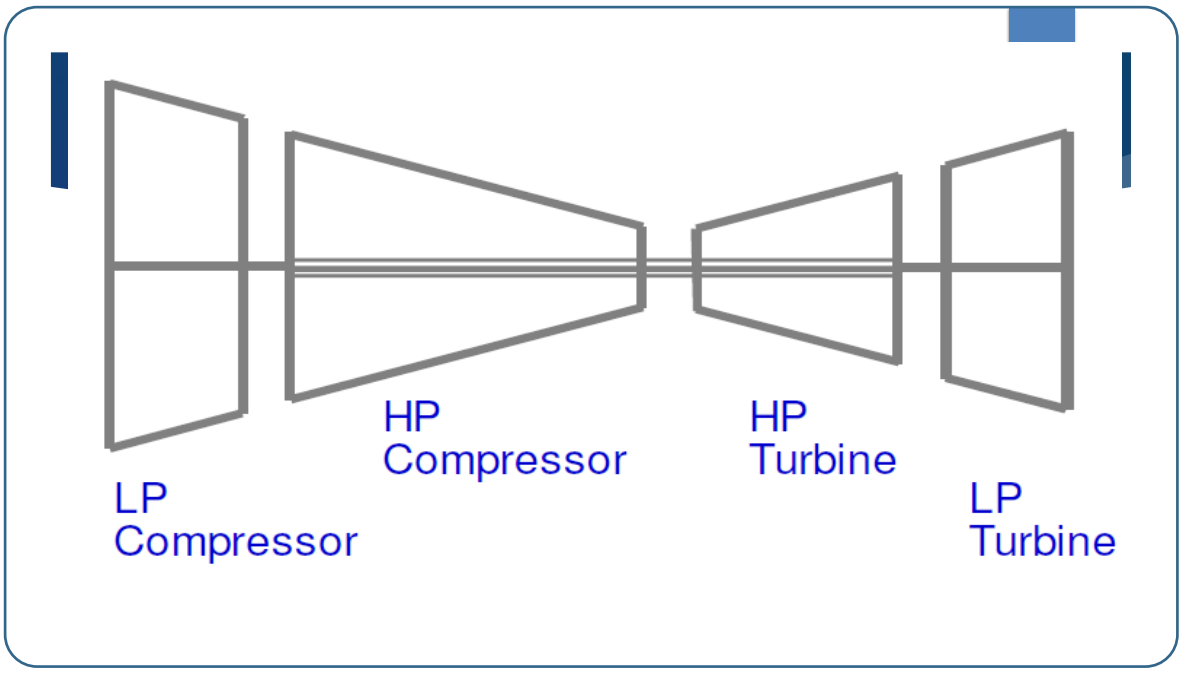


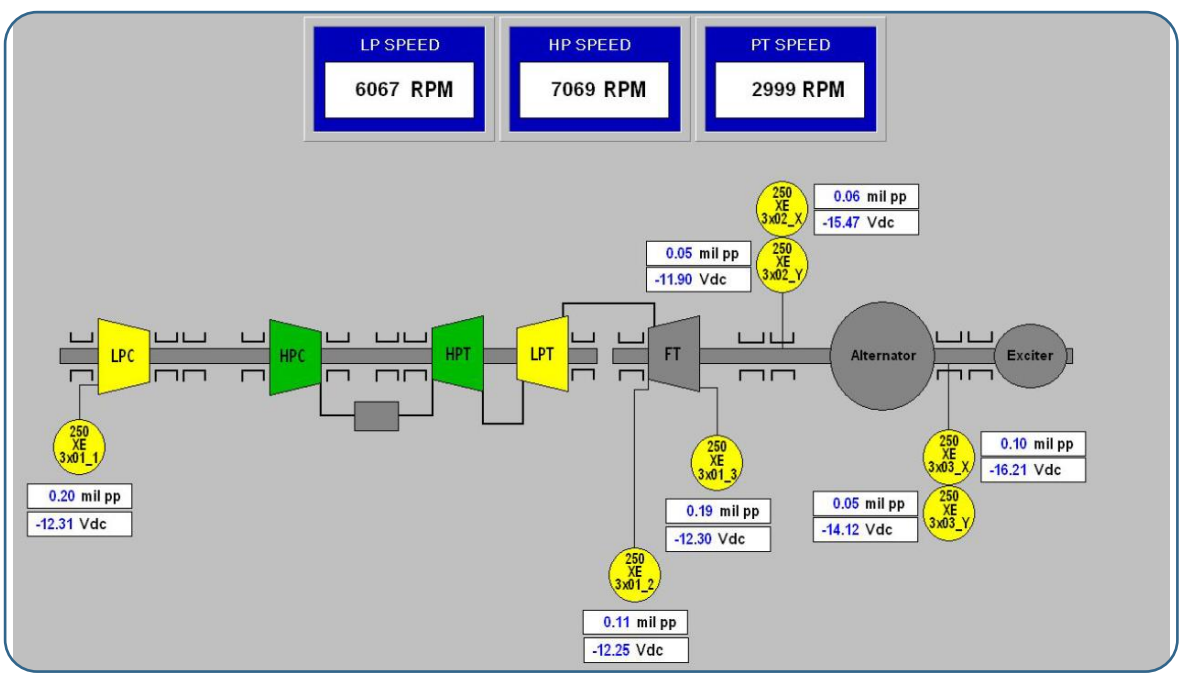
A two-shaft Gas Turbine



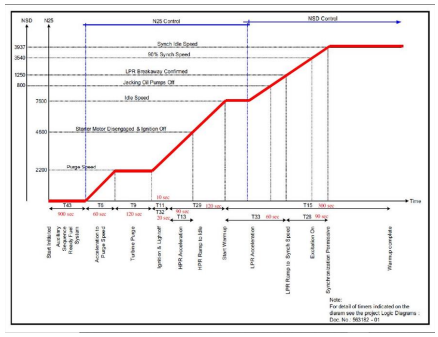

Combustion
Compressor
Turbine
Gear
Generator

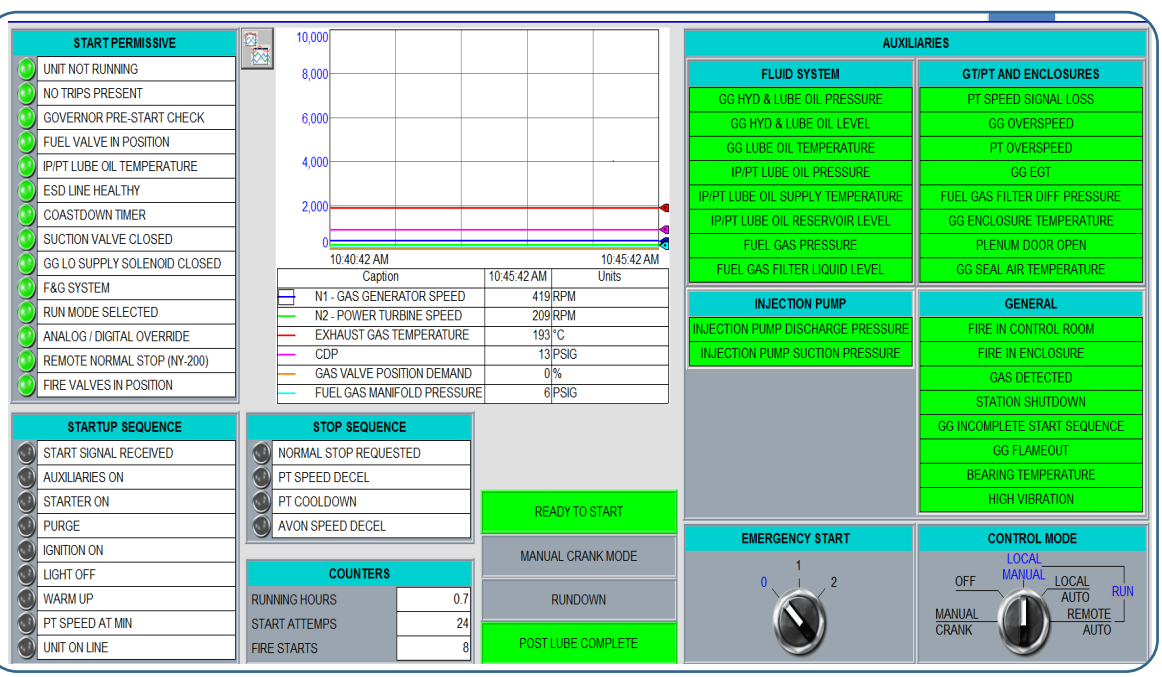

Left side
Cranking motor
Accessory gearbox
Rear
Front
Lube oil
Lube oil heat exchanger
Right side


HP
Compressor
HP
Turbine
LP
Compressor
LP
Turbine


LP SPEED
6067 RPM
HP SPEED
7069 RPM
PT SPEED
2999 RPM
250 XE 3x02_X
0.06 mil pp
-15.47 Vdc
0.05 mil pp
-11.90 Vdc
250 XE 3x02_Y
LPC
HPC
HPT
LPT
FT
Alternator
Exciter
250 XE 3x01_1
0.20 mil pp
-12.31 Vdc
250 XE 3x01_3
0.19 mil pp
-12.30 Vdc
250 XE 3x01_2
0.11 mil pp
-12.25 Vdc
250 XE 3x03_X
0.10 mil pp
-16.21 Vdc
0.05 mil pp
-14.12 Vdc
250 XE 3x03_Y

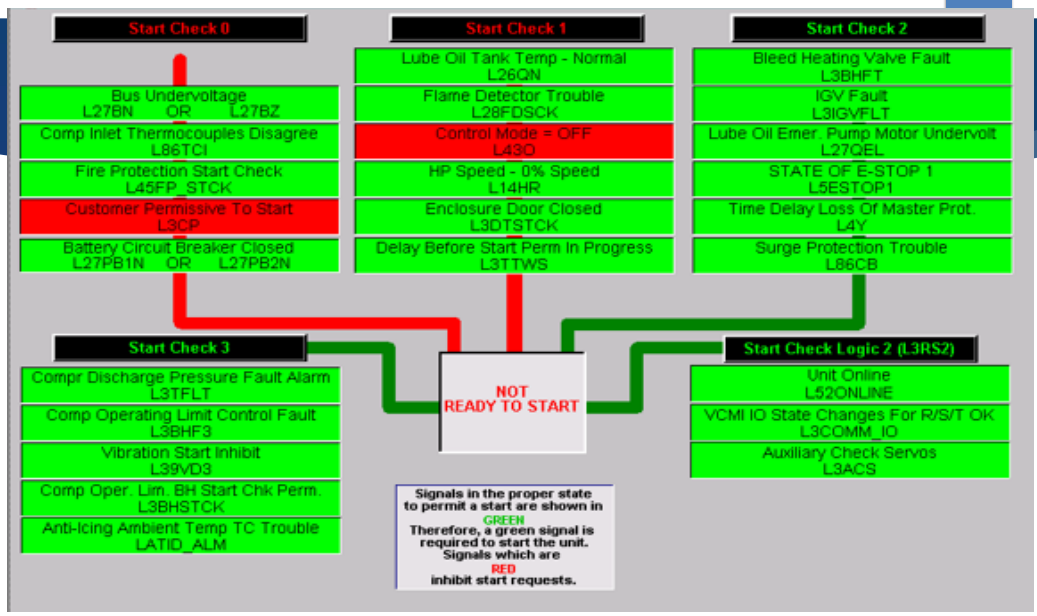
Startup Sequence:

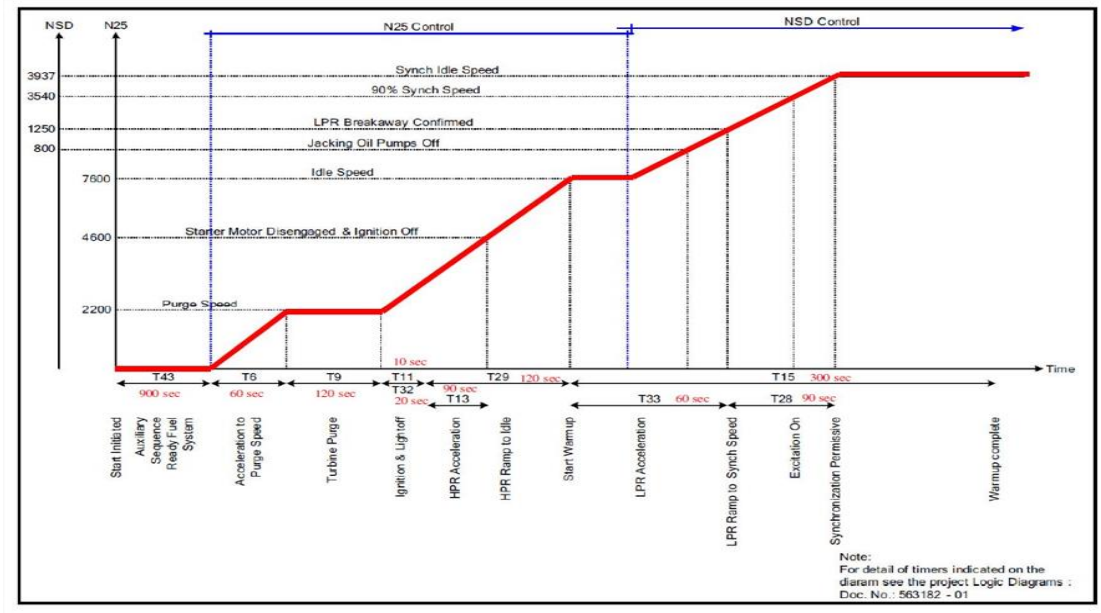


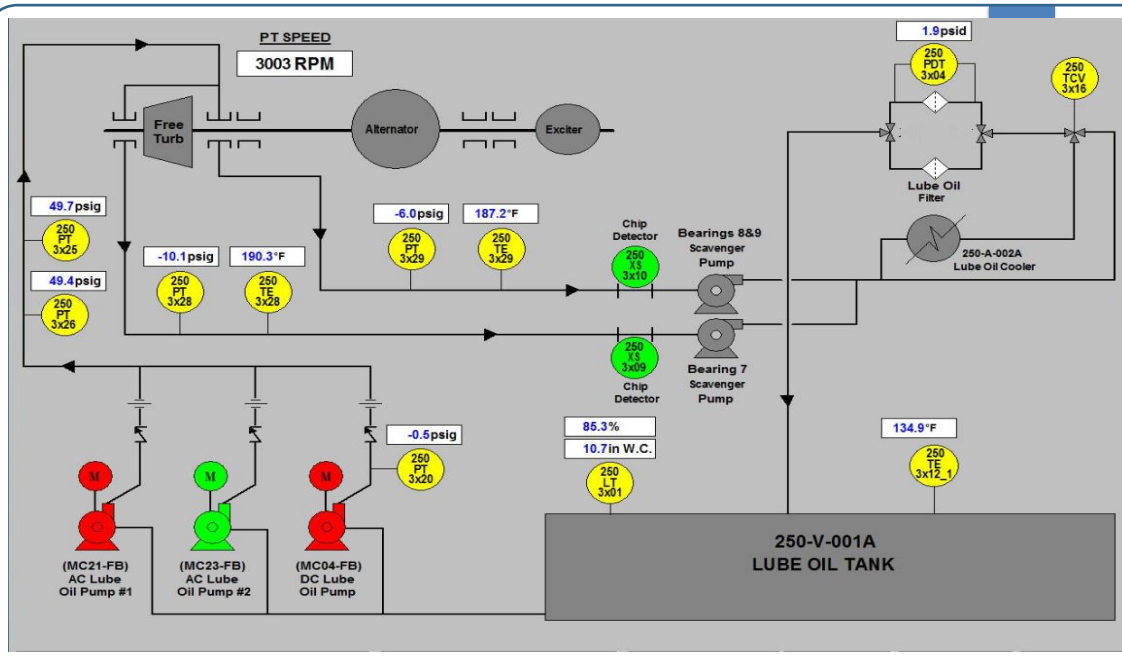


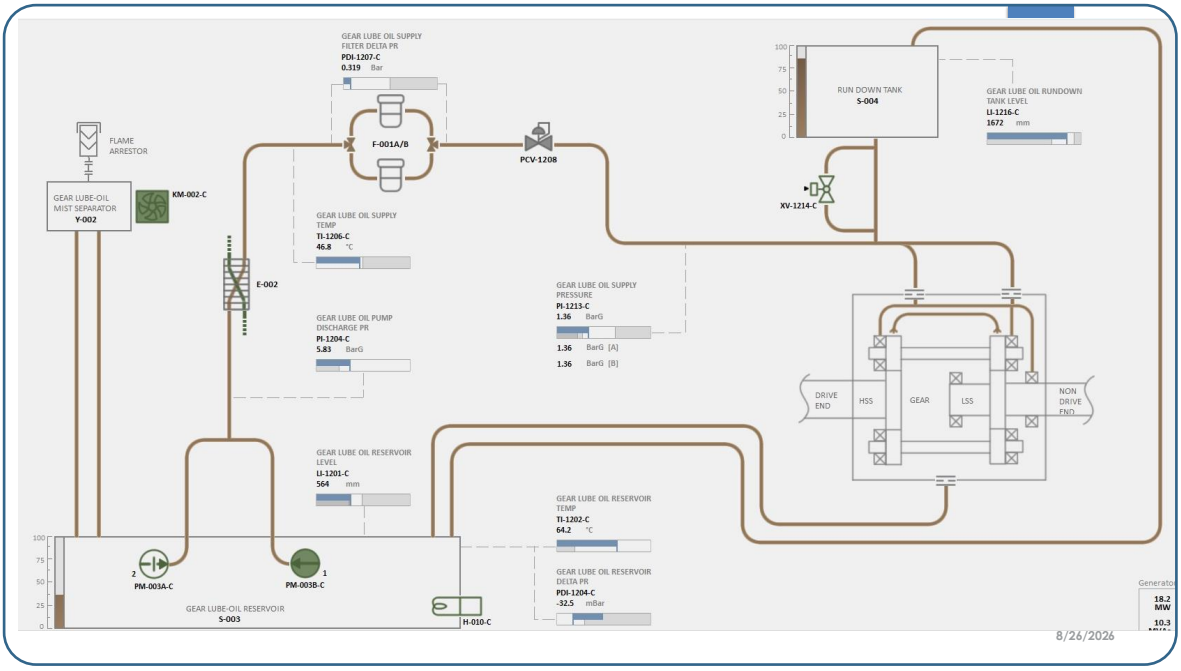

MANUAL CRANK SEQUENCE PERMISSIVES
UNIT CRANK PERMISSIVE
AIR AND VENTILATION
TURBINE COMB. AIR FILTER STG 1 DELTA PRESSURE - SF (PDI-7036-D)
TURBINE COMB. AIR FILTER STG 2 DELTA PRESSURE - SF (PDI-7035-D)
TURBINE ENCL. VENT INLET FILTER DOORS (ANY) OPEN (ZSL-7038-D)
TURBINE COMB. AIR FILTER DOORS (ANY) OPEN (ZSL-7006-D)
TURBINE ENCL. DOORS (ANY) OPEN (ZSL-6019-D)
ALL TURBINE ENCL. VENT FANS UNAVAILABLE (KM-051/52/53-D)
TURBINE LUBE OIL
TURBINE LUBE OIL RESERVOIR TEMP - SF (TI-7011-D)
TURBINE LUBE OIL RESERVOIR TEMP - WL (TI-7011-D)
TURBINE LUBE OIL RESERVOIR LEVEL - SF (LI-7001-D)
TURBINE LUBE OIL RESERVOIR LEVEL - WL (LI-7001-D)
GEAR LUBE OIL
GEAR LUBE OIL RESERVOIR TEMP - SF (TI-1202-D)
GEAR LUBE OIL RESERVOIR TEMP - WL (TI-1202-D)
GEAR LUBE OIL RESERVOIR LEVEL - SF (LI-1201-D)
GEAR LUBE OIL RESERVOIR LEVEL - WL (LI-1201-D)
GEAR LUBE OIL RESERVOIR DELTA PRESSURE - SF (PDI-1204-D)
GEAR LUBE OIL SUPPLY FILTER DELTA PRESSURE - SF (PDI-1207-D)
GEAR LUBE OIL DEMISTER FAN UNAVAILABLE (KM-002-D)
BOTH GEAR LUBE OIL PUMPS UNAVAILABLE (PM-003A/B-D)
AIR STARTER
AIR STARTER UNAVAILABLE
GENERATOR LUBE OIL
GENERATOR LUBE OIL TANK TEMP - SF (TI-7057-D)
GENERATOR LUBE OIL TANK TEMP - WL (TI-7057-D)
GENERATOR LUBE OIL TANK LEVEL - SF (LI-7013-D)
GENERATOR LUBE OIL TANK LEVEL - WL (LI-7013-D)
GENERATOR LUBE OIL SUPPLY PRESSURE - SF (PI-7067-D)
GENERATOR LUBE OIL PUMP DISCHARGE PRESSURE - SF (PI-7065-D)
GENERATOR LUBE OIL PUMP UNAVAILABLE (PM-043-D)
GENERATOR JACKING OIL PUMP DE UNAVAILABLE (PM-041-D)
GENERATOR JACKING OIL PUMP NDE UNAVAILABLE (PM-042-D)
GAS FUEL
GAS FUEL PRIMARY SOV NOT CLOSED (XCV-7004A-D)
GAS FUEL SECONDARY SOV NOT CLOSED (XCV-7004B-D)
GAS FUEL VENT VALVE NOT OPEN (XCV-7001-D)
LIQUID FUEL
LIQUID FUEL PRIMARY SOV NOT CLOSED (FCV-7003-D)
LIQUID FUEL SECONDARY SOV NOT CLOSED (XCV-7023-D)
MISCELLANEOUS
HPC SPEED (XN25) ABOVE 300 RPM
UNIT NOT IN 'OUT OF OPERATION'
FOUR HOUR LOCK OUT ACTIVE
ACTIVE ALARMS AND SHUTDOWNS
ANY NORMAL STOP ALARM ACTIVE
ANY STEP TO IDLE ALARM ACTIVE
ANY DECEL TO MIN LOAD ALARM ACTIVE
ANY EMERGENCY SHUTDOWN ACTIVE
WATER WASH SEQUENCE PERMISSIVES
UNIT WATER WASH PERMISSIVE
DEPENDENCY:
MANUAL CRANK PERMISSIVE
MISCELLANEOUS
LPT INLET TEMP (T48) ABOVE 93 DEG C (TI-7022-D)
TURNING MOTOR UNAVAILABLE (M-103-D)
WATER WASH AIR SUPPLY PRESSURE - SF (PI-7018-D)
WATER WASH SYSTEM
WATER WASH TANK LEVEL - WL (LI-7008-D)
WATER WASH PUMP UNAVAILABLE (PM-039-D)
UNIT START SEQUENCE PERMISSIVES
UNIT START PERMISSIVE
DEPENDENCY:
MANUAL CRANK PERMISSIVE
EXTERNAL
COMMON VIBRATION MONITOR FAULT (NXI-7103-D)
COMMON FIRE & GAS MONITOR FAULT (NXI-7011-D)
TURBINE/GEAR/GENERATOR LUBE OIL
SYNTH LUBE OIL VG FILTER DELTA PRESSURE - SF (PDI-7006-D)
GEAR LUBE OIL SUPPLY TEMP - SF (TI-1206-D)
GEAR LUBE OIL RUNDOWN TANK LEVEL - SF (LI-1216-D)
GENERATOR LUBE OIL MECH PUMP PRESSURE - SF (PI-7066-D)
GENERATOR LUBE OIL RUNDOWN TANK LEVELS - SF (LI-7011/12-D)
BOTH LUBE OIL COOLERS UNAVAILABLE (AM-021A/B-D)
LIQUID FUEL
LIQUID FUEL PRIMARY MANIFOLD TEMP - SF (TI-7014-D)
LIQUID FUEL SECONDARY MANIFOLD TEMP - SF (TI-7015-D)
GENERATOR INSTRUMENTATION
GENERATOR COOLER AIR DE INLET TEMP - SF (TI-7032-D)
GENERATOR COOLER AIR NDE INELT TEMP - SF (TI-7033-D)
GENERATOR COOLER AIR OUTLET TEMP - SF (TI-7034-D)
AIR STARTER
AIR STARTER USAGE TIME EXCEEDED FOR START
CORE START PERMISSIVES
CORE START PERMISSIVE
CONTROLLER IN CALIBRATION MODE
LPT INLET TEMP (T48) GREATER THEN 204 DEG C (TI-7022-D)
LPT INLET TEMP (T48) 3 ADJACENT SENSORS - SF (TI-7022-D)
LPT INLET TEMP (T48) ANY 4 SENSORS - SF (TI-7022-D)
HPC DISCHARGE TEMP (T3) - SF (TI-7019-D)
UNIT START GAS FUEL PERMISSIVES
GAS FUEL
GAS FUEL SUPPLY TEMP - SF (TI-7016-D)
GAS FUEL SUPPLY PRESSURE - SF (PI-7017A/B-D)
GAS FUEL DEMISTER LEVEL - AHH (LAHH-7003-D)
UNIT START LIQUID FUEL PERMISSIVES
LIQUID FUEL
LIQUID FUEL PUMP DISCHARGE PRESSURE - SF (PI-7030-D)
LIQUID FUEL PUMP UNAVAILABLE (PM-037-D)
LIQUID FUEL PUMP SUCTION PRESSURE - SF (PI-7026-D)

8/26/2026


Start Check 0
Bus Undervoltage L27BN OR L27BZ
Comp Inlet Thermocouples Disagree L86TCI
Fire Protection Start Check L45FP_STCK
Customer Permissive To Start L3CP
Battery Circuit Breaker Closed L27PB1N OR L27PB2N
Start Check 1
Lube Oil Tank Temp - Normal L26QN
Flame Detector Trouble L28FDSCK
Control Mode = OFF L43O
HP Speed - 0% Speed L14HR
Enclosure Door Closed L3DTSTCK
Delay Before Start Perm In Progress L3TTWS
Start Check 2
Bleed Heating Valve Fault L3BHFT
IGV Fault L3IGVFLT
Lube Oil Emer. Pump Motor Undervolt L27QEL
STATE OF E-STOP 1 L5ESTOP1
Time Delay Loss Of Master Prot. L4Y
Surge Protection Trouble L86CB
Start Check 3
Compr Discharge Pressure Fault Alarm L3TFLT
Comp Operating Limit Control Fault L3BHF3
Vibration Start Inhibit L39VD3
Comp Oper. Lim. BH Start Chk Perm. L3BHSTCK
Anti-Icing Ambient Temp TC Trouble LATID_ALM
NOT READY TO START
Start Check Logic 2 (L3RS2)
Unit Online L52ONLINE
VCMI IO State Changes For R/S/T OK L3COMM_IO
Auxiliary Check Servos L3ACS
Signals in the proper state to permit a start are shown in GREEN
Therefore, a green signal is required to start the unit. Signals which are RED inhibit start requests.


NSD
N25
N25 Control
NSD Control
3937
3540
1250
800
7600
4600
2200
Synch Idle Speed
90% Synch Speed
LPR Breakaway Confirmed
Jacking Oil Pumps Off
Idle Speed
Starter Motor Disengaged & Ignition Off
Purge Speed
10 sec
Time
T43
900 sec
T6
60 sec
T9
120 sec
T11
T32
20 sec
90 sec
T13
T29
120 sec
T15
300 sec
T33
60 sec
T28
90 sec
Start Initiated
Auxiliary Sequence Ready Fuel System
Acceleration to Purge Speed
Turbine Purge
Ignition & Lightoff
HPR Acceleration
HPR Ramp to Idle
Start Warmup
LPR Acceleration
LPR Ramp to Synch Speed
Excitation On
Synchronization Permissive
Warmup complete
Note:
For detail of timers indicated on the diarem see the project Logic Diagrams :
Doc. No : 563182 - 01


PT SPEED
3003 RPM
Free Turb
Alternator
Exciter
1.9psid
250 PDT 3x04
250 TCV 3x16
Lube Oil Filter
250-A-002A Lube Oil Cooler
49.7psig
250 PT 3x25
49.4psig
250 PT 3x26
-10.1psig
250 PT 3x28
190.3°F
250 TE 3x28
-6.0psig
250 PT 3x29
187.2°F
250 TE 3x29
Chip Detector
250 XS 3x10
Bearings 8&9 Scavenger Pump
250 XS 3x09
Chip Detector
Bearing 7 Scavenger Pump
-0.5psig
250 PT 3x20
85.3%
10.7in W.C.
250 LT 3x01
134.9°F
250 TE 3x12_1
(MC21-FB) AC Lube Oil Pump #1
(MC23-FB) AC Lube Oil Pump #2
(MC04-FB) DC Lube Oil Pump
250-V-001A
LUBE OIL TANK

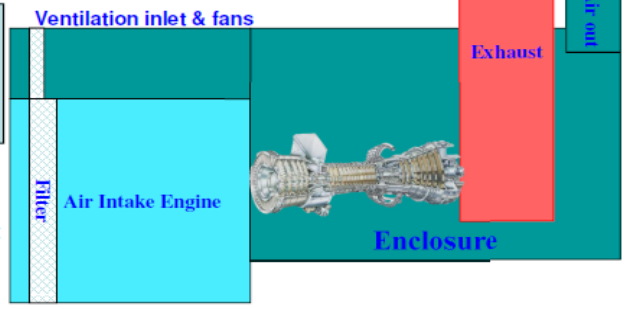


SUBROUTINE
AUX SYSTEMS

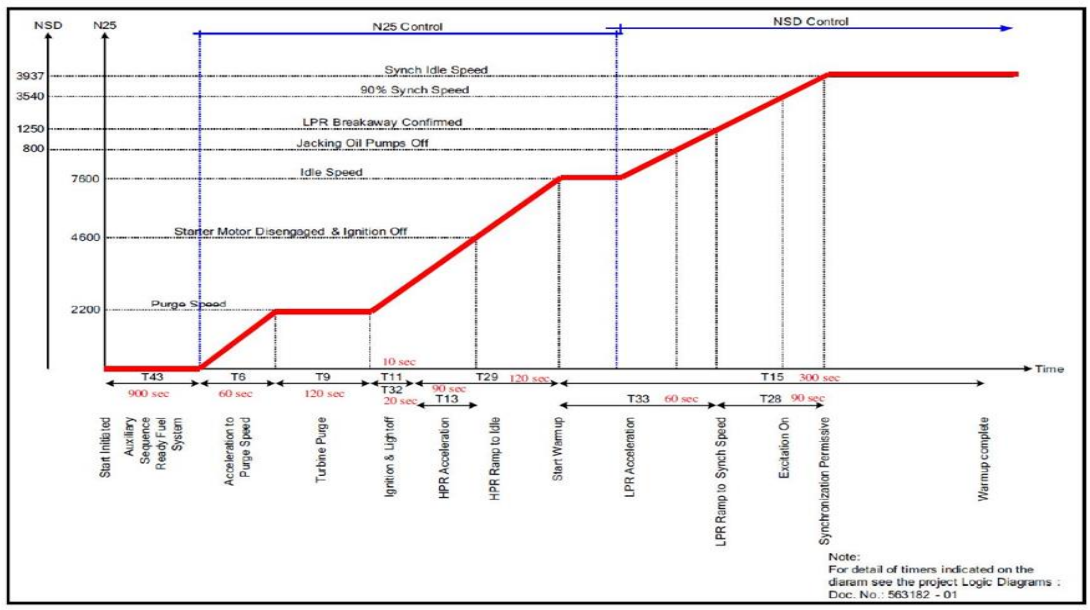
Ventilation system

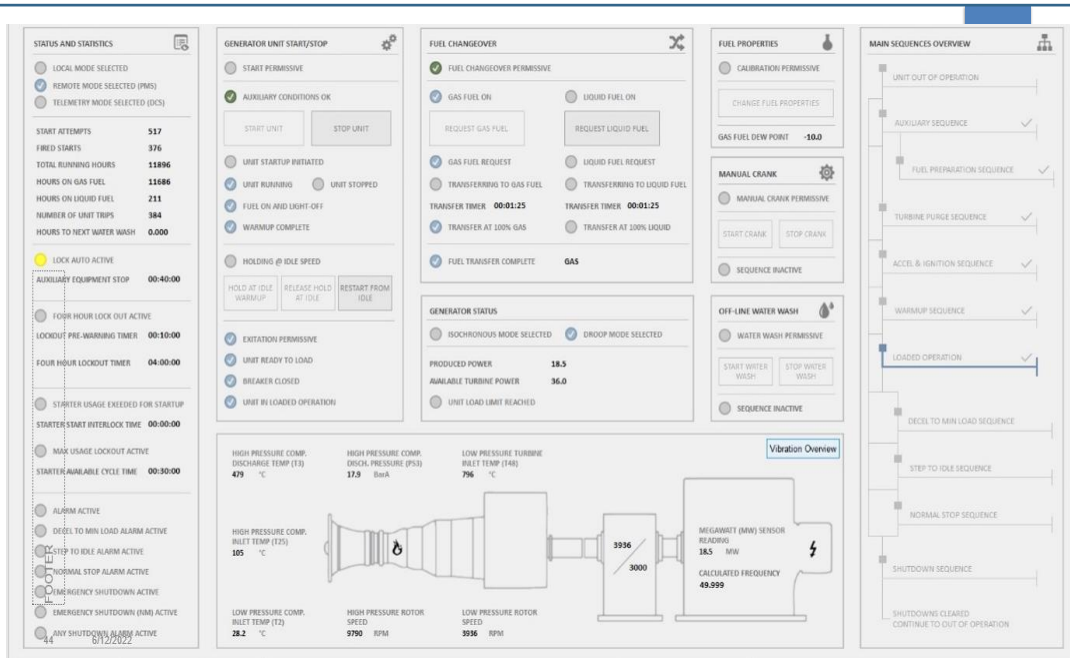
- Duty vent fans is started
- Enclosure pressure is checked
- Enclosure purge is initiated
- Power to Non EX equipment is applied when enclosure purge is finished.

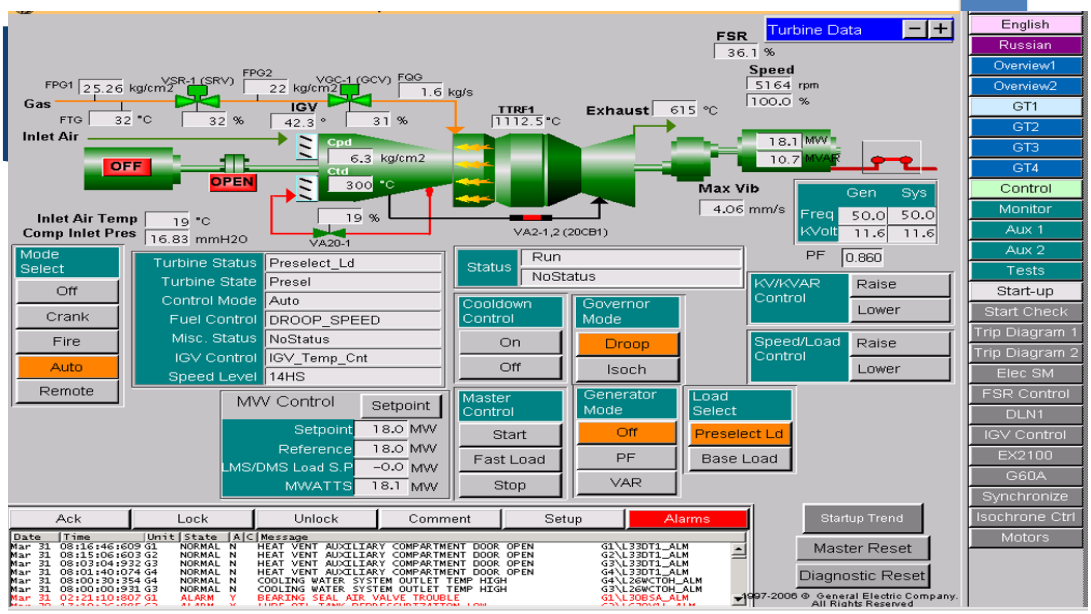
When the above checks are OK the ventilation system part of auxilliary sequence is fullfilled.



When both lube oil and ventilation system has passed the start-up checks. The auxilliary sequence is OK and turbine is ready for roatation.

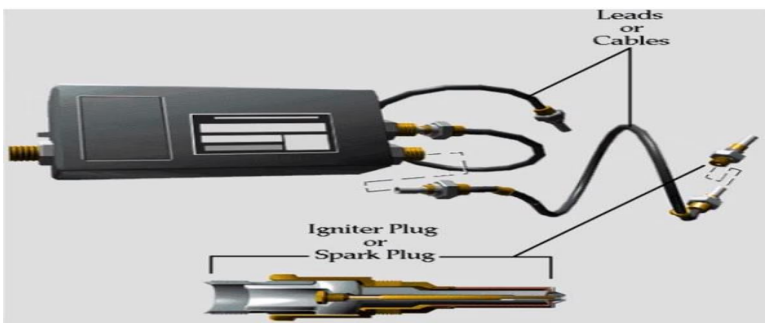

NSD
N25
N25 Control
NSD Control
3937
3540
1250
800
7600
4600
2200
Synch Idle Speed
90% Synch Speed
LPR Breakaway Confirmed
Jacking Oil Pumps Off
Idle Speed
Starter Motor Disengaged & Ignition Off
Purge Speed
Time
10 sec
T43 900 sec
T6 60 sec
T9 120 sec
T11
T32 20 sec
90 sec
T13
T29 120 sec
T15 300 sec
T33 60 sec
T28 90 sec
Start Initiated
Auxiliary Sequence Ready Fuel System
Acceleration to Purge Speed
Turbine Purge
Ignition & Lightoff
HPR Acceleration
HPR Ramp to Idle
Start Warmup
LPR Acceleration
LPR Ramp to Synch Speed
Excitation On
Synchronization Permissive
Warmup complete
Note:
For detail of timers indicated on the diarem see the project Logic Diagrams :
Doc. No : 563182 - 01

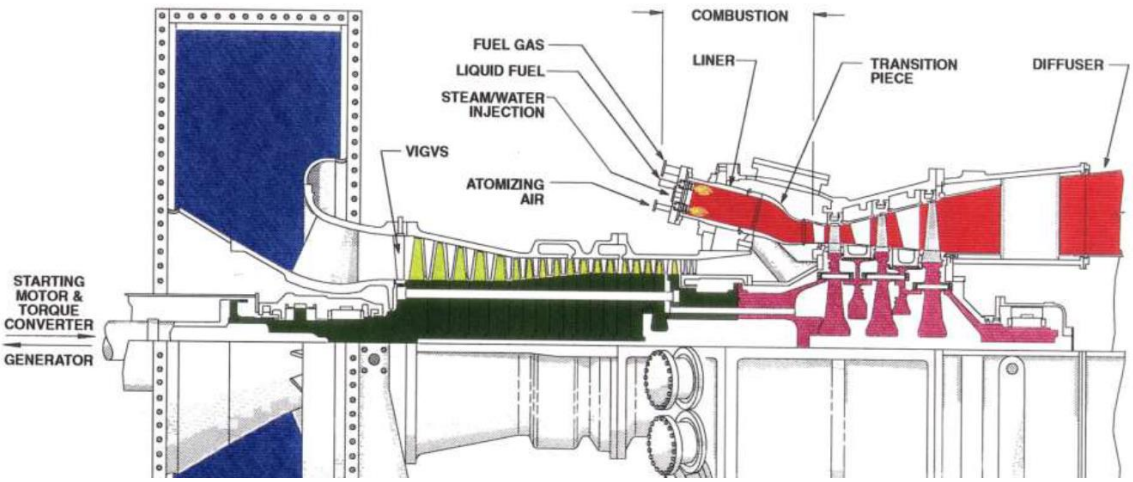

STATUS AND STATISTICS
LOCAL MODE SELECTED
REMOTE MODE SELECTED (PMS)
TELEMETRY MODE SELECTED (DCS)
START ATTEMPTS 517
FIRED STARTS 376
TOTAL RUNNING HOURS 11896
HOURS ON GAS FUEL 11686
HOURS ON LIQUID FUEL 211
NUMBER OF UNIT TRIPS 384
HOURS TO NEXT WATER WASH 0.000
LOCK AUTO ACTIVE
AUXILIARY EQUIPMENT STOP 00:40:00
FOUR HOUR LOCK OUT ACTIVE
LOCKOUT PRE-WARNING TIMER 00:10:00
FOUR HOUR LOCKOUT TIMER 04:00:00
STARTER USAGE EXEEDED FOR STARTUP
STARTER START INTERLOCK TIME 00:00:00
MAX USAGE LOCKOUT ACTIVE
STARTER AVAILABLE CYCLE TIME 00:30:00
ALARM ACTIVE
DECEL TO MIN LOAD ALARM ACTIVE
STEP TO IDLE ALARM ACTIVE
NORMAL STOP ALARM ACTIVE
EMERGENCY SHUTDOWN ACTIVE
EMERGENCY SHUTDOWN (NM) ACTIVE
ANY SHUTDOWN ALARM ACTIVE
GENERATOR UNIT START/STOP
START PERMISSIVE
AUXILIARY CONDITIONS OK
START UNIT
STOP UNIT
UNIT STARTUP INITIATED
UNIT RUNNING
UNIT STOPPED
FUEL ON AND LIGHT-OFF
WARMUP COMPLETE
HOLDING @ IDLE SPEED
HOLD AT IDLE WARMUP
RELEASE HOLD AT IDLE
RESTART FROM IDLE
EXITATION PERMISSIVE
UNIT READY TO LOAD
BREAKER CLOSED
UNIT IN LOADED OPERATION
FUEL CHANGEOVER
FUEL CHANGEOVER PERMISSIVE
GAS FUEL ON
LIQUID FUEL ON
REQUEST GAS FUEL
REQUEST LIQUID FUEL
GAS FUEL REQUEST
LIQUID FUEL REQUEST
TRANSFERRING TO GAS FUEL
TRANSFERRING TO LIQUID FUEL
TRANSFER TIMER 00:01:25
TRANSFER TIMER 00:01:25
TRANSFER AT 100% GAS
TRANSFER AT 100% LIQUID
FUEL TRANSFER COMPLETE
GAS
GENERATOR STATUS
ISOCHRONOUS MODE SELECTED
DROOP MODE SELECTED
PRODUCED POWER 18.5
AVAILABLE TURBINE POWER 36.0
UNIT LOAD LIMIT REACHED
FUEL PROPERTIES
CALIBRATION PERMISSIVE
CHANGE FUEL PROPERTIES
GAS FUEL DEW POINT -10.0
MANUAL CRANK
MANUAL CRANK PERMISSIVE
START CRANK
STOP CRANK
SEQUENCE INACTIVE
OFF-LINE WATER WASH
WATER WASH PERMISSIVE
START WATER WASH
STOP WATER WASH
SEQUENCE INACTIVE
MAIN SEQUENCES OVERVIEW
UNIT OUT OF OPERATION
AUXILIARY SEQUENCE
FUEL PREPARATION SEQUENCE
TURBINE PURGE SEQUENCE
ACCEL & IGNITION SEQUENCE
WARMUP SEQUENCE
LOADED OPERATION
DECEL TO MIN LOAD SEQUENCE
STEP TO IDLE SEQUENCE
NORMAL STOP SEQUENCE
SHUTDOWN SEQUENCE
SHUTDOWNS CLEARED CONTINUE TO OUT OF OPERATION
Vibration Overview
HIGH PRESSURE COMP. DISCHARGE TEMP (T3) 479 °C
HIGH PRESSURE COMP. DISCH. PRESSURE (PS3) 17.9 BarA
LOW PRESSURE TURBINE INLET TEMP (T48) 796 °C
HIGH PRESSURE COMP. INLET TEMP (T25) 105 °C
3936
3000
MEGAWATT (MW) SENSOR READING 18.5 MW
CALCULATED FREQUENCY 49.999
LOW PRESSURE COMP. INLET TEMP (T2) 28.2 °C
HIGH PRESSURE ROTOR SPEED 9790 RPM
LOW PRESSURE ROTOR SPEED 3936 RPM



Troubleshooting Example During The Startup:

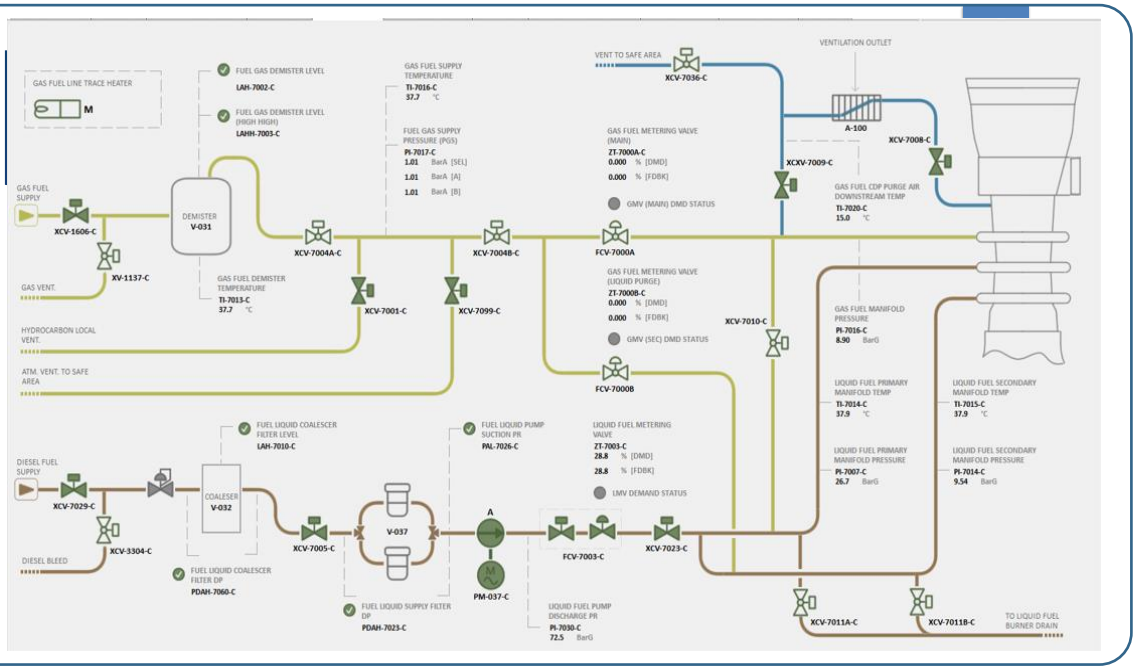
Fail to Light:

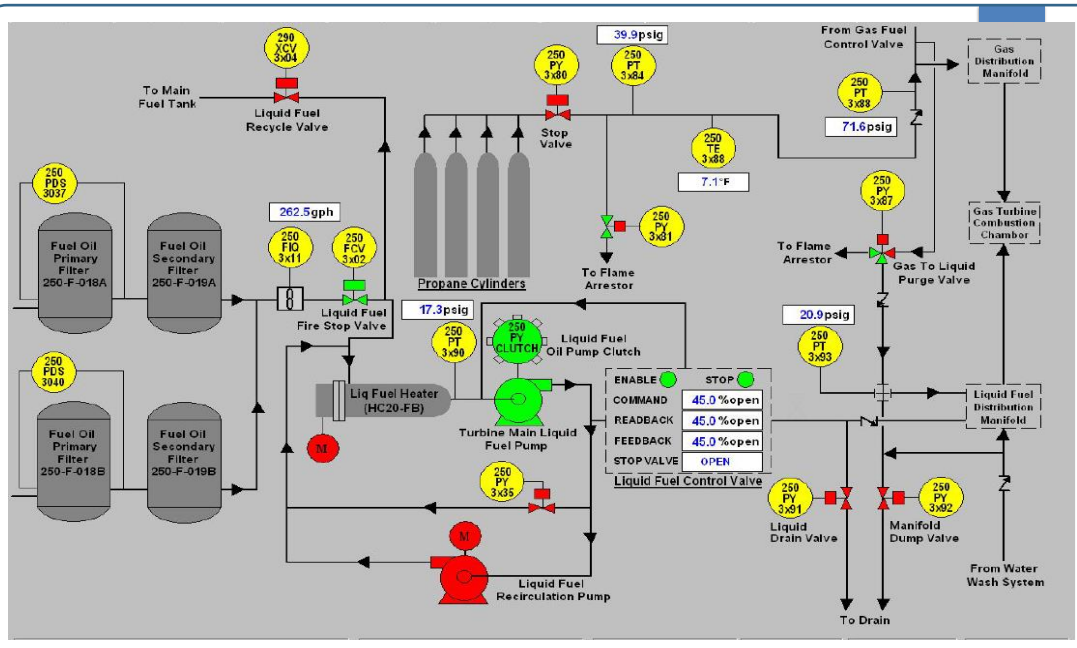




FUEL TRANSFER:

- Gas To Liquid Change over.
- Liquid to Gas Change over.


GAS FUEL LINE TRACE HEATER
FUEL GAS DEMISTER LEVEL
LAH-7002-C
FUEL GAS DEMISTER LEVEL (HIGH HIGH)
LAHH-7003-C
GAS FUEL SUPPLY TEMPERATURE
TI-7016-C
37.7 °C
FUEL GAS SUPPLY PRESSURE (PGS)
PI-7017-C
1.01 BarA [SEL]
1.01 BarA [A]
1.01 BarA [B]
VENT TO SAFE AREA
XCV-7036-C
VENTILATION OUTLET
A-100
XCV-7008-C
XCV-7009-C
GAS FUEL METERING VALVE (MAIN)
ZT-7000A-C
0.000 % [DMD]
0.000 % [FDBK]
GMV (MAIN) DMD STATUS
GAS FUEL CDP PURGE AIR DOWNSTREAM TEMP
TI-7020-C
15.0 °C
GAS FUEL SUPPLY
XCV-1606-C
XV-1137-C
DEMISTER V-031
GAS VENT
GAS FUEL DEMISTER TEMPERATURE
TI-7013-C
37.7 °C
XCV-7004A-C
XCV-7004B-C
FCV-7000A
XCV-7001-C
XCV-7099-C
GAS FUEL METERING VALVE (LIQUID PURGE)
ZT-7000B-C
0.000 % [DMD]
0.000 % [FDBK]
GMV (SEC) DMD STATUS
XCV-7010-C
GAS FUEL MANIFOLD PRESSURE
PI-7016-C
8.90 BarG
HYDROCARBON LOCAL VENT
ATM. VENT. TO SAFE AREA
FCV-7000B
LIQUID FUEL PRIMARY MANIFOLD TEMP
TI-7014-C
37.9 °C
LIQUID FUEL SECONDARY MANIFOLD TEMP
TI-7015-C
37.9 °C
LIQUID FUEL PRIMARY MANIFOLD PRESSURE
PI-7007-C
26.7 BarG
LIQUID FUEL SECONDARY MANIFOLD PRESSURE
PI-7014-C
9.54 BarG
FUEL LIQUID COALESCER FILTER LEVEL
LAH-7010-C
FUEL LIQUID PUMP SUCTION PR
PAL-7026-C
LIQUID FUEL METERING VALVE
ZT-7003-C
28.8 % [DMD]
28.8 % [FDBK]
LMV DEMAND STATUS
DIESEL FUEL SUPPLY
XCV-7029-C
XCV-3304-C
COALESCER V-032
XCV-7005-C
V-037
PM-037-C
FCV-7003-C
XCV-7023-C
DIESEL BLEED
FUEL LIQUID COALESCER FILTER DP
PDAH-7060-C
FUEL LIQUID SUPPLY FILTER DP
PDAH-7023-C
LIQUID FUEL PUMP DISCHARGE PR
PI-7030-C
72.5 BarG
XCV-7011A-C
XCV-7011B-C
TO LIQUID FUEL BURNER DRAIN

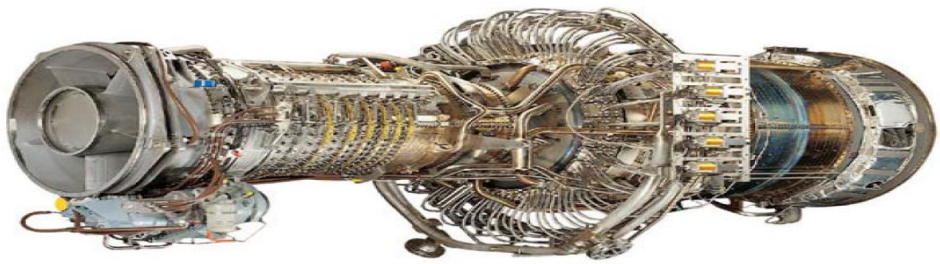

290 XCV 3x04
To Main Fuel Tank
Liquid Fuel Recycle Valve
250 PY 3x80
Stop Valve
39.9psig
250 PT 3x84
From Gas Fuel Control Valve
Gas Distribution Manifold
250 PT 3x88
71.6psig
250 TE 3x86
7.1°F
250 PY 3x87
Gas Turbine Combustion Chamber
250 PDS 3037
Fuel Oil Primary Filter 250-F-018A
Fuel Oil Secondary Filter 250-F-019A
262.5gph
250 FIO 3x11
250 FCV 3x02
Liquid Fuel Fire Stop Valve
Propane Cylinders
250 PY 3x81
To Flame Arrestor
To Flame Arrestor
Gas To Liquid Purge Valve
17.3psig
250 PT 3x90
250 PY CLUTCH
Liquid Fuel Oil Pump Clutch
20.9psig
250 PT 3x93
250 PDS 3040
Liq Fuel Heater (HC20-FB)
Turbine Main Liquid Fuel Pump
ENABLE
STOP
COMMAND
45.0 %open
READBACK
45.0 %open
FEEDBACK
45.0 %open
STOP VALVE
OPEN
Liquid Fuel Control Valve
Liquid Fuel Distribution Manifold
Fuel Oil Primary Filter 250-F-018B
Fuel Oil Secondary Filter 250-F-019B
M
250 PY 3x35
250 PY 3x91
Liquid Drain Valve
250 PY 3x92
Manifold Dump Valve
From Water Wash System
M
Liquid Fuel Recirculation Pump
To Drain

Stop Sequence:

- Normal Stop.
- Emergency Stop\Trip.

Video

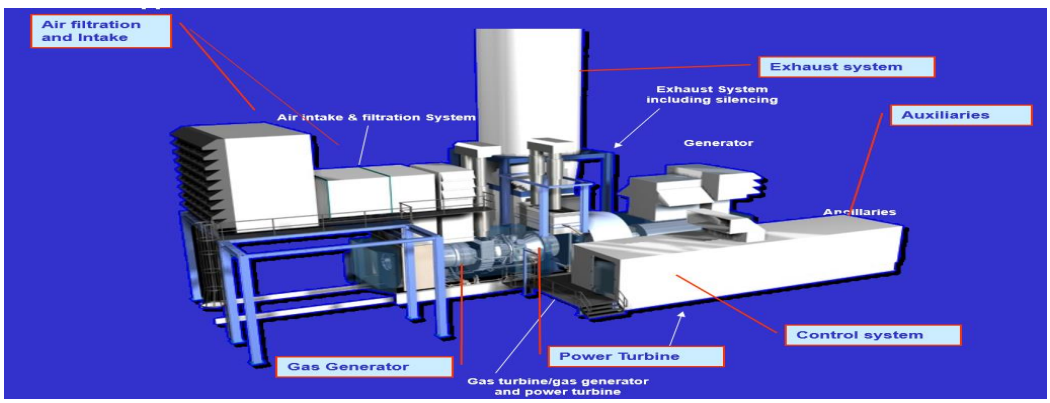
- 3D animation of industrial gas turbine working principle-2.mp4



Gas Turbine Control

- Instrumentation.
- Redundancy.
- Control loops.
- The Governor.
- IGV, VSV, , VB, VBV
- Protections.
- Communication.

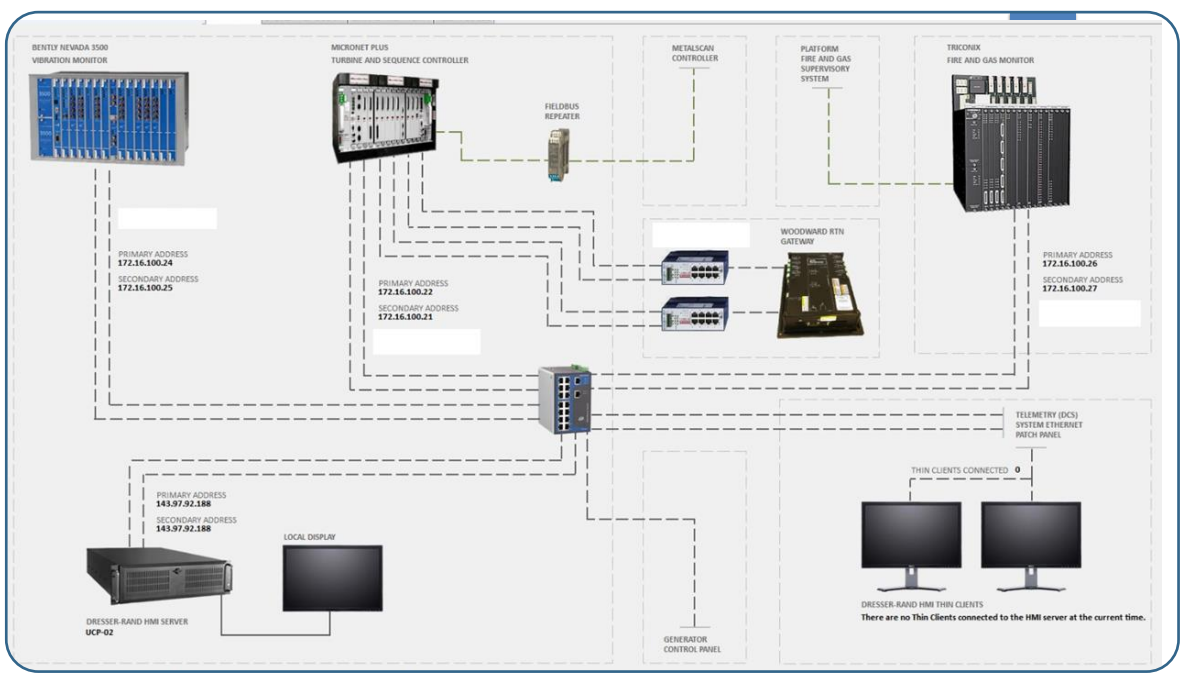
Local Control Room

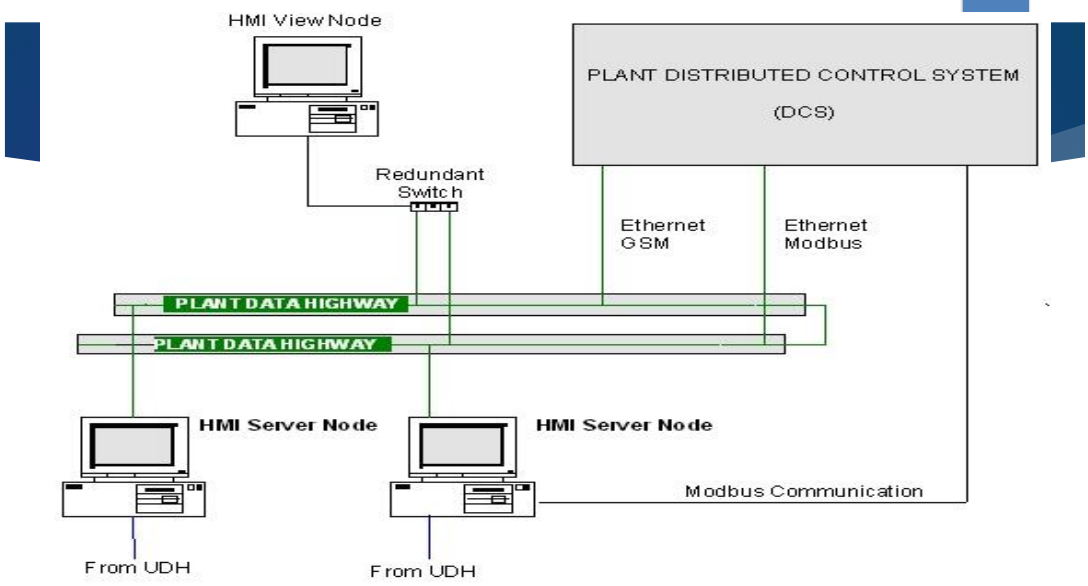


Each Gas Turbine Has a Local Control Room.

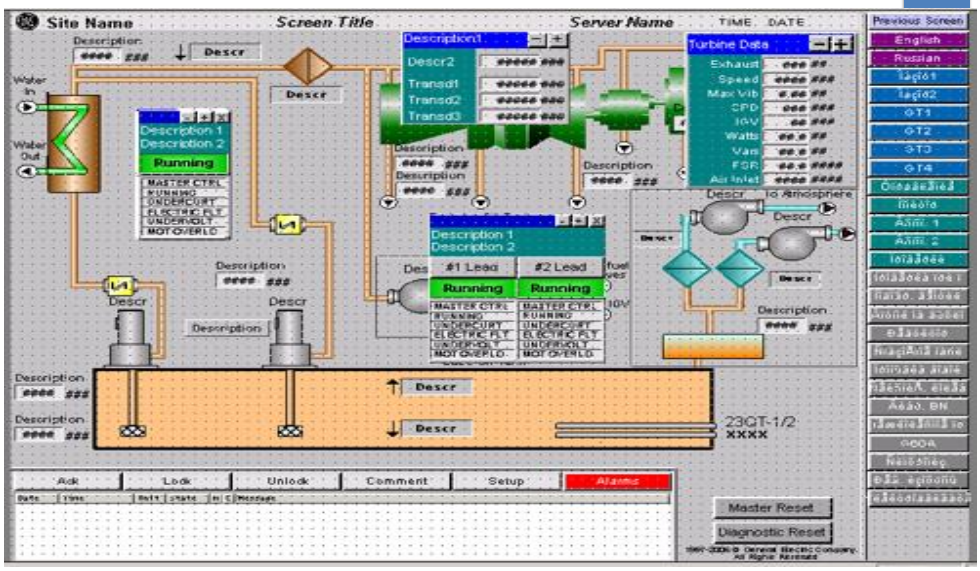
In each local control room you will find the following:

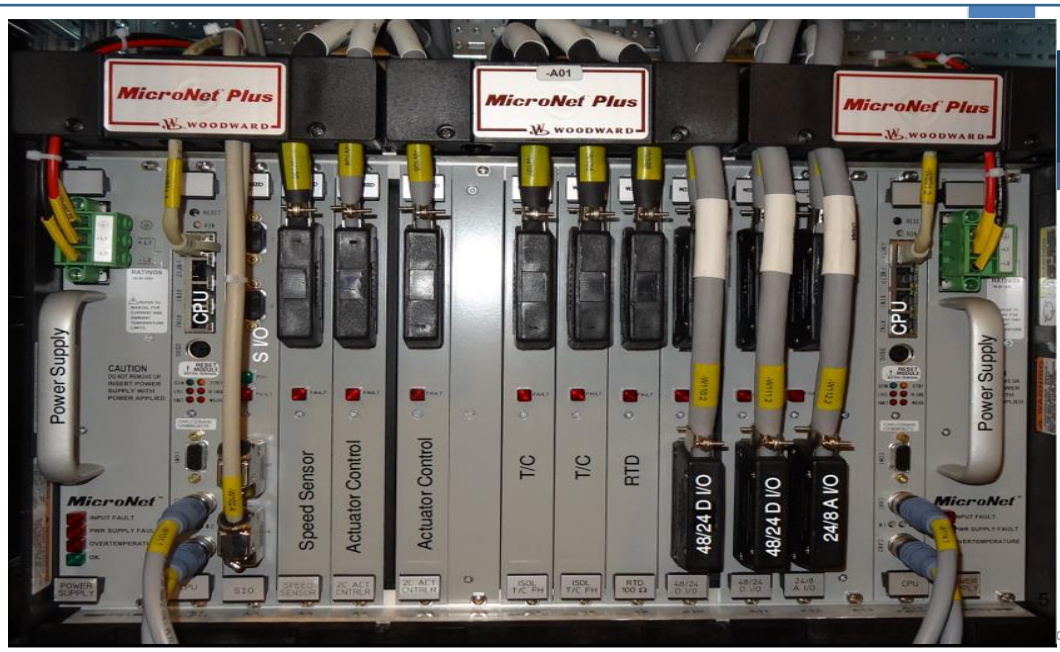
1. **HMI (Human Machine Interface).**
2. **Unit Controllers.**
3. **MCC (Motor Control Center).**
4. **Vibration Monitor Panel.**
5. **F&G Panel.**
6. **Battery Charger.**
7. **In case of PGP, you will find a Generator Protection Panel, exciter, and synchronizer.**

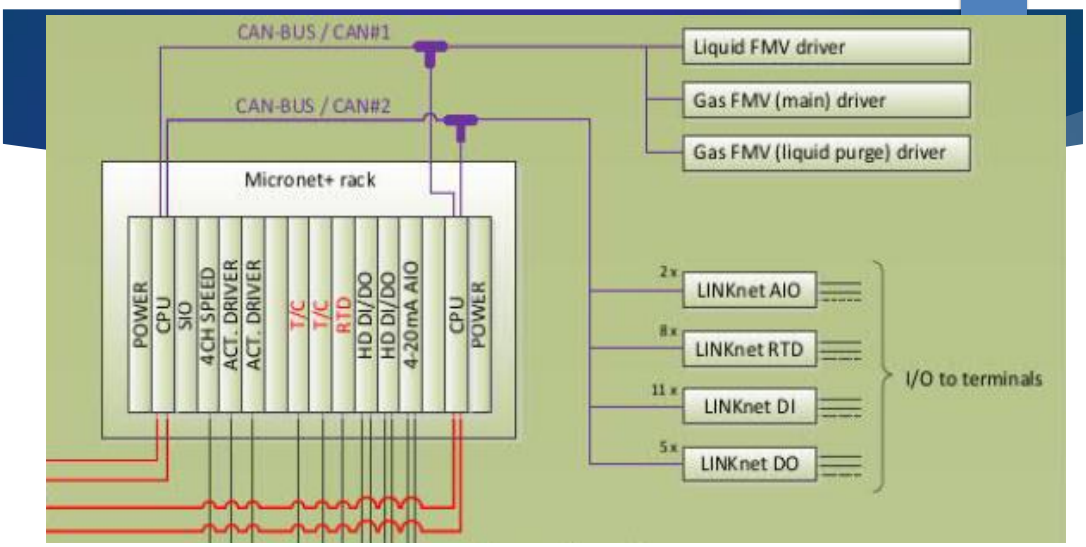



HMI View Node
PLANT DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM
(DCS)
Redundant
Switch
Ethernet
GSM
Ethernet
Modbus
PLANT DATA HIGHWAY
PLANT DATA HIGHWAY
HMI Server Node
HMI Server Node
Modbus Communication
From UDH
From UDH

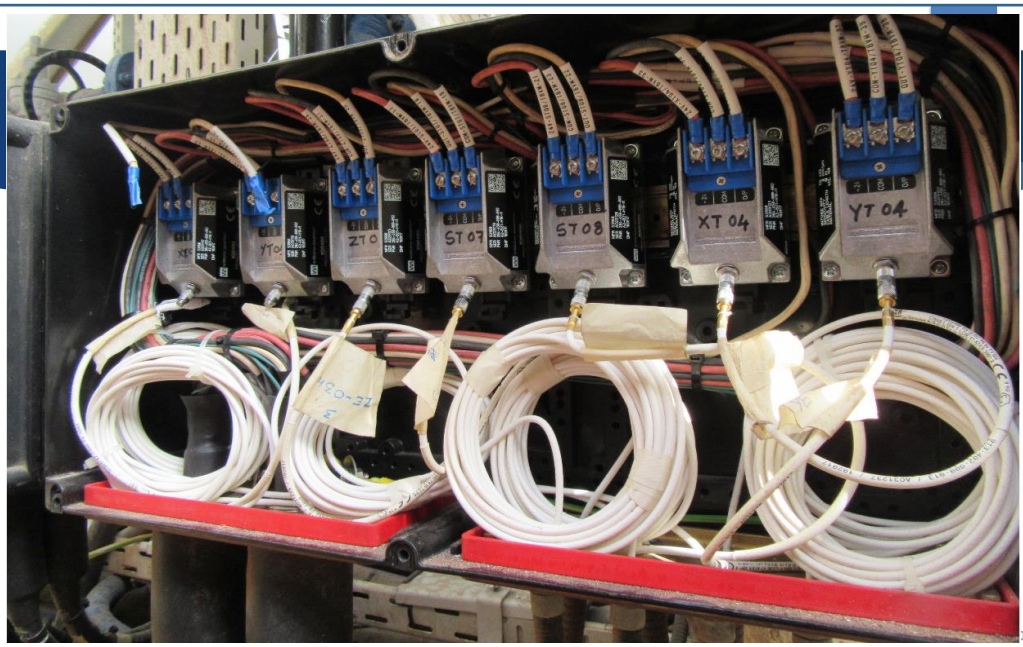


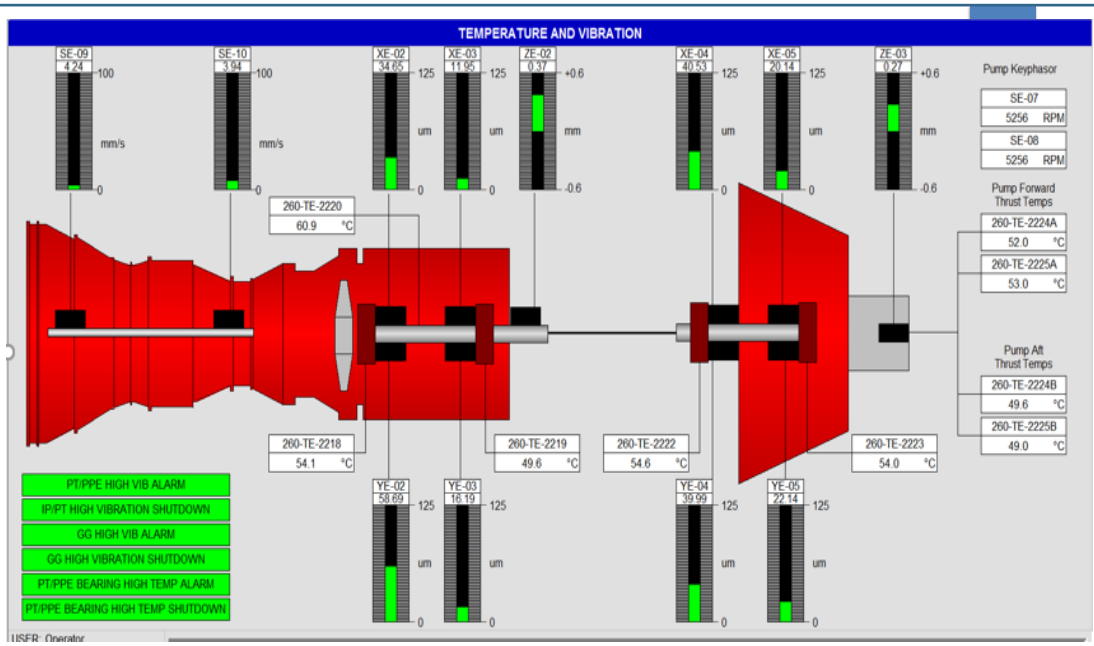

Site Name
Screen Title
Server Name
TIME
DATE
Description
Descr
Water In
Water Out
Description 1
Description 2
Running
MASTER CTRL
RUNNING
OVERCURRT
ELECTRIC FLT
UNDERVOLT
MOT OVERLD
Description1
Descr2
Transd1
Transd2
Transd3
Turbine Data
Exhaust
Speed
Max Vib
CPD
IGV
Watts
Vam
FSR
Air Inlet
To Atmosphere
#1 Lead
#2 Lead
23GT-1/2
XXXX
Ack
Lock
Unlock
Comment
Setup
Alarms
Master Reset
Diagnostic Reset
Previous Screen
English
Russian
GT1
GT2
GT3
GT4


MicroNet Plus
WOODWARD
-A01
CPU
S I/O
Power Supply
CAUTION
MicroNet
Speed Sensor
Actuator Control
Actuator Control
T/C
T/C
RTD
48/24 D I/O
48/24 D I/O
24/8 A I/O


CAN-BUS / CAN#1
CAN-BUS / CAN#2
Micronet+ rack
POWER
CPU
SIO
4CH SPEED
ACT. DRIVER
ACT. DRIVER
T/C
T/C
RTD
HD DI/DO
HD DI/DO
4-20mA AIO
CPU
POWER
Liquid FMV driver
Gas FMV (main) driver
Gas FMV (liquid purge) driver
2 x
LINKnet AIO
8 x
LINKnet RTD
11 x
LINKnet DI
5 x
LINKnet DO
I/O to terminals

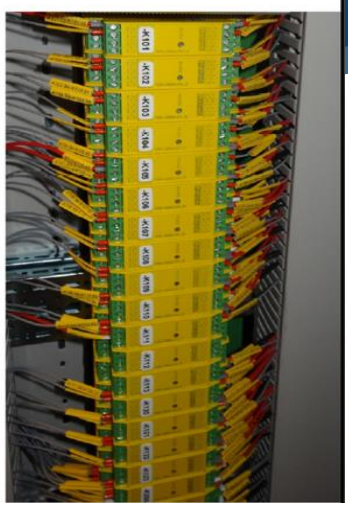

3500
3500


ST 07
ST 08
XT 04
YT 04


TEMPERATURE AND VIBRATION
SE-09
4.24
SE-10
3.94
XE-02
34.65
XE-03
11.95
ZE-02
0.37
XE-04
40.53
XE-05
20.14
ZE-03
0.27
mm/s
um
mm
Pump Keyphasor
SE-07
5256 RPM
SE-08
5256 RPM
Pump Forward Thrust Temps
260-TE-2224A
52.0 °C
260-TE-2225A
53.0 °C
Pump Aft Thrust Temps
260-TE-2224B
49.6 °C
260-TE-2225B
49.0 °C
260-TE-2220
60.9 °C
260-TE-2218
54.1 °C
260-TE-2219
49.6 °C
260-TE-2222
54.6 °C
260-TE-2223
54.0 °C
YE-02
58.69
YE-03
16.19
YE-04
39.99
YE-05
22.14
PT/PPE HIGH VIB ALARM
IP/PT HIGH VIBRATION SHUTDOWN
GG HIGH VIB ALARM
GG HIGH VIBRATION SHUTDOWN
PT/PPE BEARING HIGH TEMP ALARM
PT/PPE BEARING HIGH TEMP SHUTDOWN
USER: Operator

Backup relay logic

If any of the relays are de-energized, the fuel shutoff valves are immediately closed as they are tied directly into the relay logic, and the unit shuts down



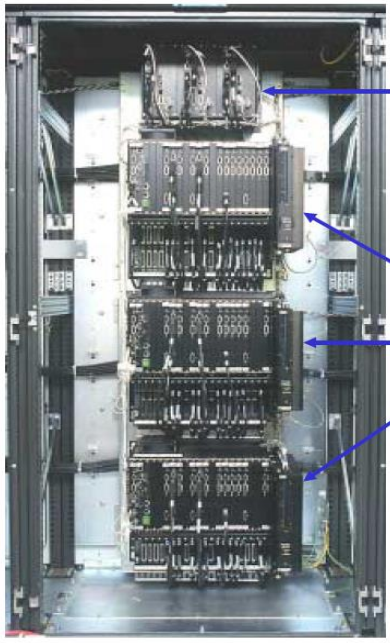
The relay logic will electrically isolate the following signals when activated:

- Shutdown command to Fuel Controller (failsafe)
- Gas Fuel Primary Shutoff Valve (XCV-7004A) open command
- Gas Fuel Secondary Shutoff Valve (XCV-7004B) open command
- Liquid Fuel Primary Shutoff Valve (FCV-7003) open command
- Liquid Fuel Secondary Shutoff Valve (XCV-7023) open command

The following shutdown signals are wired directly to the relay logic, guaranteeing immediate fuel cut-off to the turbine independently of control system actions:

- Fuel Controller shutdown
- ESD (from platform systems)
- UCP local unit shutdown push-button
- PMS shutdown push-button
- Turbine enclosure shutdown push-buttons (2)
- Generator enclosure shutdown push-buttons (2)
- N25 and NSD backup overspeed shutdowns
- Fire and Gas shutdown from F&G Panel
- Vibration shutdown from Vibration Monitor

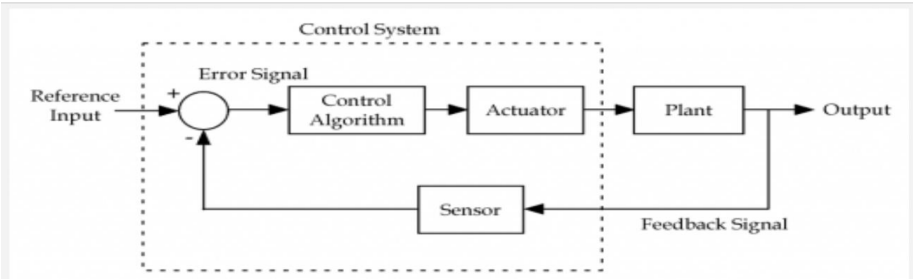




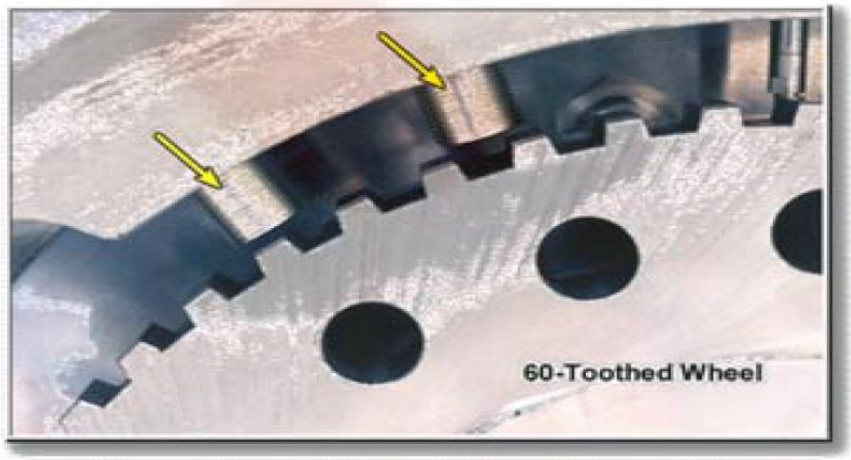
Protection Module
3 Independent Sections

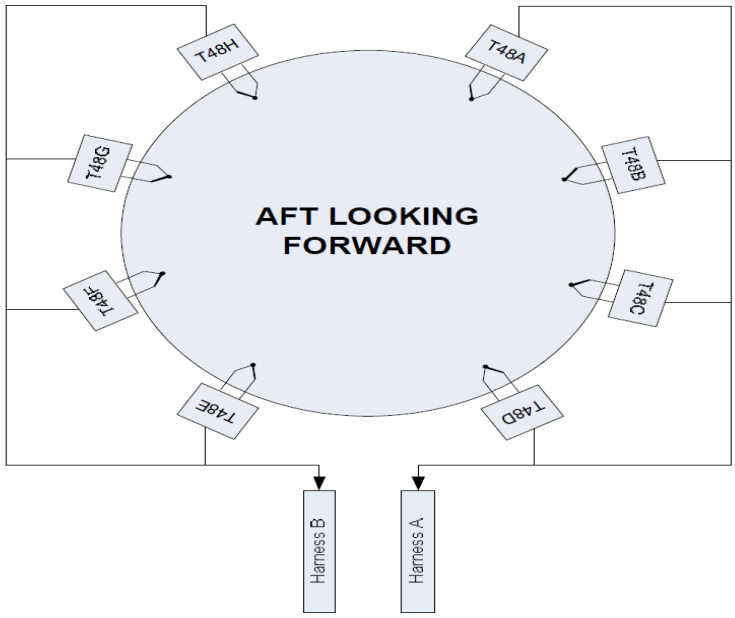
3 Control Modules

The Governor.



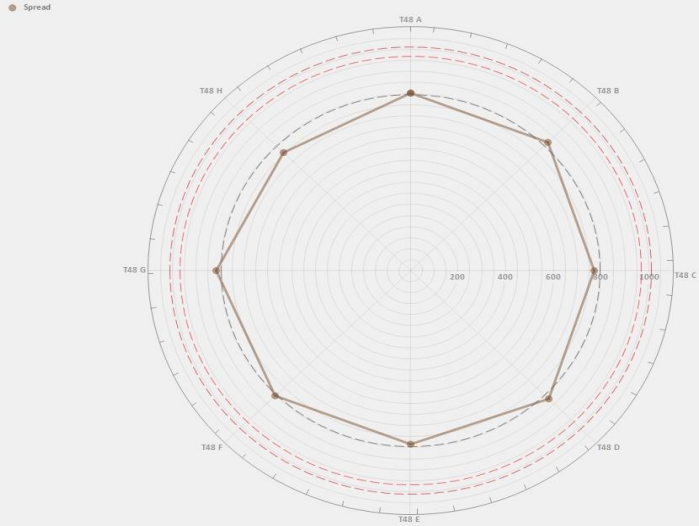
Magnetic Speed Pickups



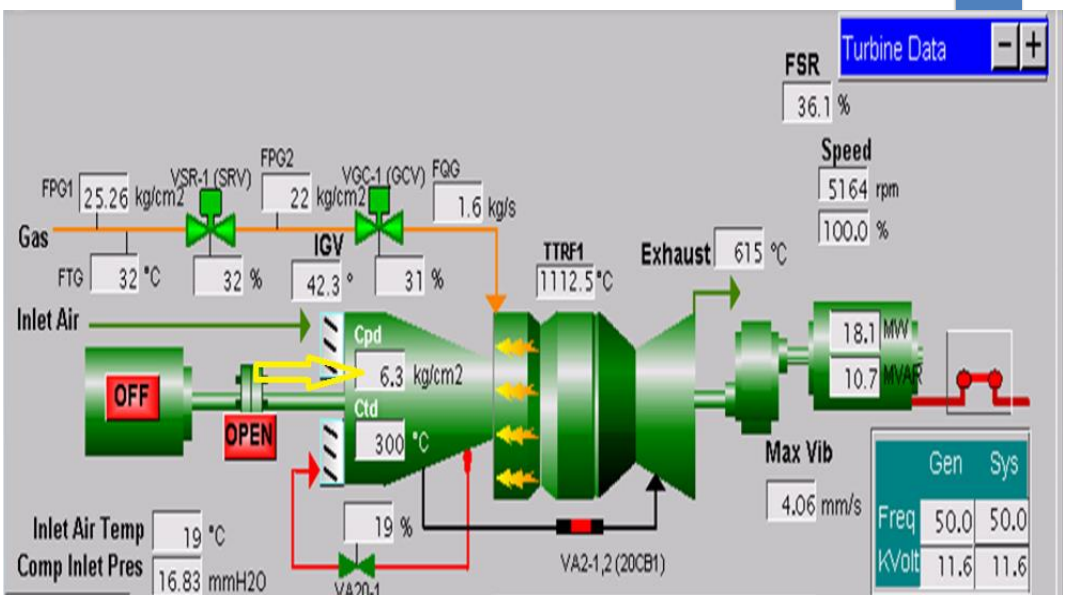


T48 AVG. VALUE	T48 HIGH VALUE	T48 LOW VALUE	T48 SPREAD VALUE	MEGAWATT (MW) SENSOR READING
794 °C [AVG]	818 °C [HIGH]	749 °C [LOW]	69.1 °C [SPREAD]	18.2 MW

Low Pressure Turbine (LPT) Inlet Temperature (T48) Spread Plot



Spread	
T48 A	799
T48 B	818
T48 C	771
T48 D	818
T48 E	783
T48 F	801
T48 G	813
T48 H	749



Woodward Fuel Valves

3103 / EM35MR Gas Valve



GS16DR Gas Valve

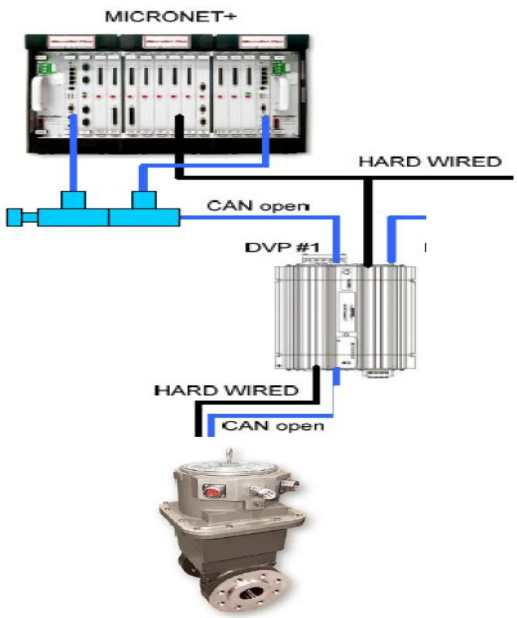


LQ 50 (Liquid)

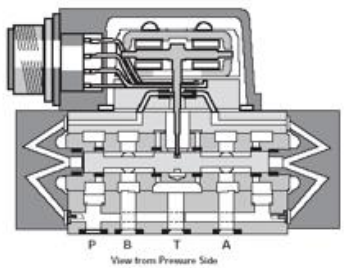


DIGITAL DRIVER DVP

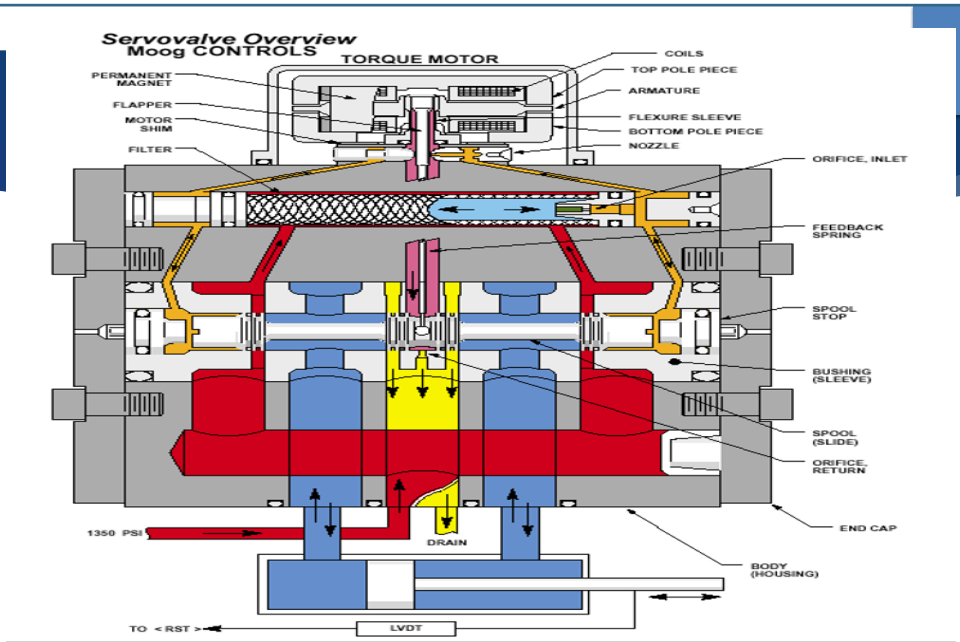








Port P - pressure supply port
Port A - control port
Port B – control port
Port T – Tank (return) port



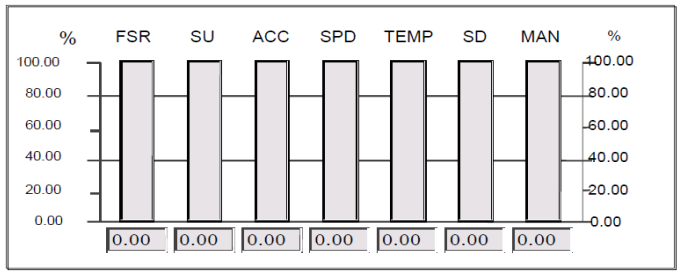
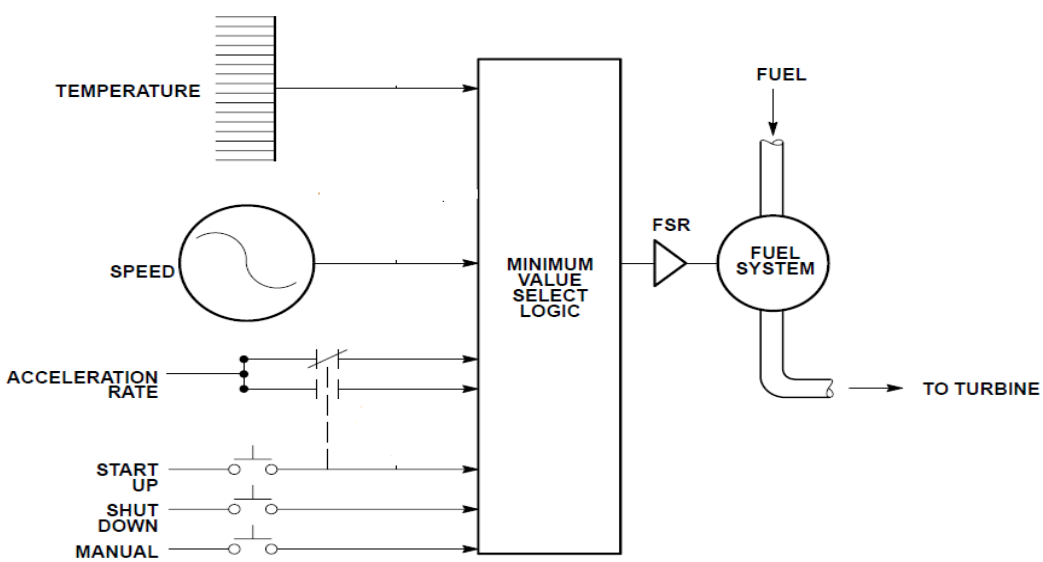
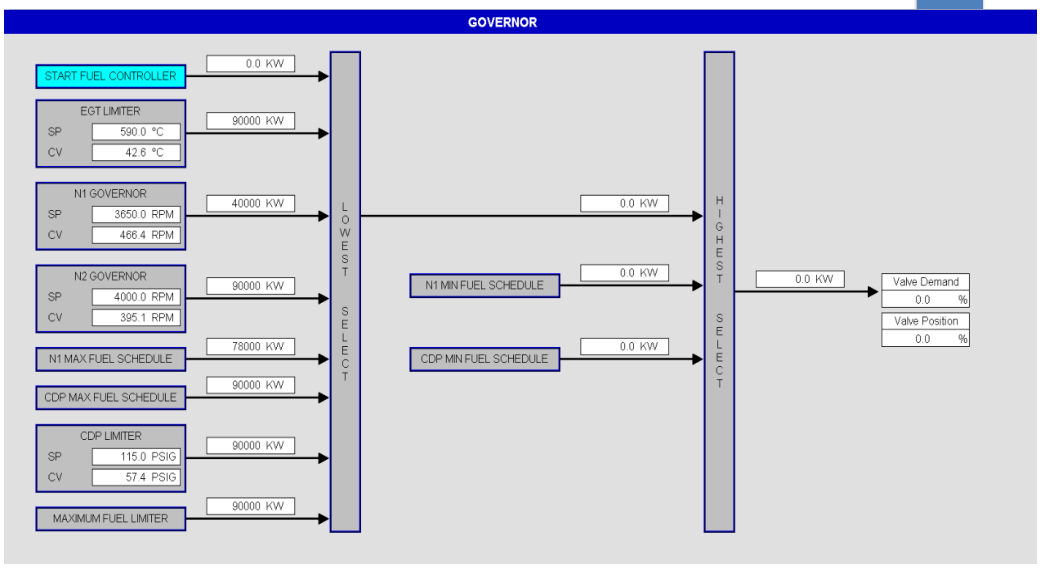


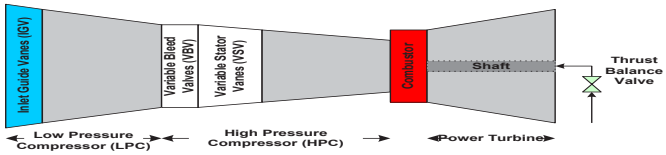
Figure 1.3-1 FSR Control

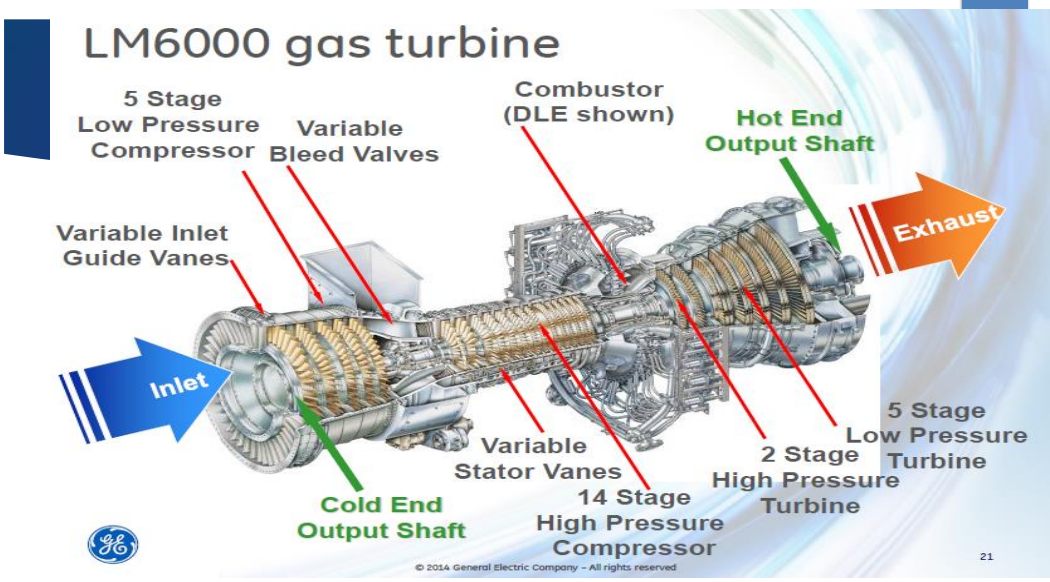
Item	*Control*	*Signal*	*Description*
FSR	FSR	FSR	Actual Fuel Stroke Reference value
SU	Startup	FSRSU	FSR value from the startup control circuit
ACC	Accelerate	FSRACC	FSR value from the acceleration controller
SPD	Speed	FSRN	FSR value from the speed/load controller
TEMP	Temperature	FSRT	FSR value from the temperature controller
SD	Shutdown	FSRSD	FSR value from the shutdown controller
MAN	Manual	FSRMAN	FSR value from the manual FSR controller

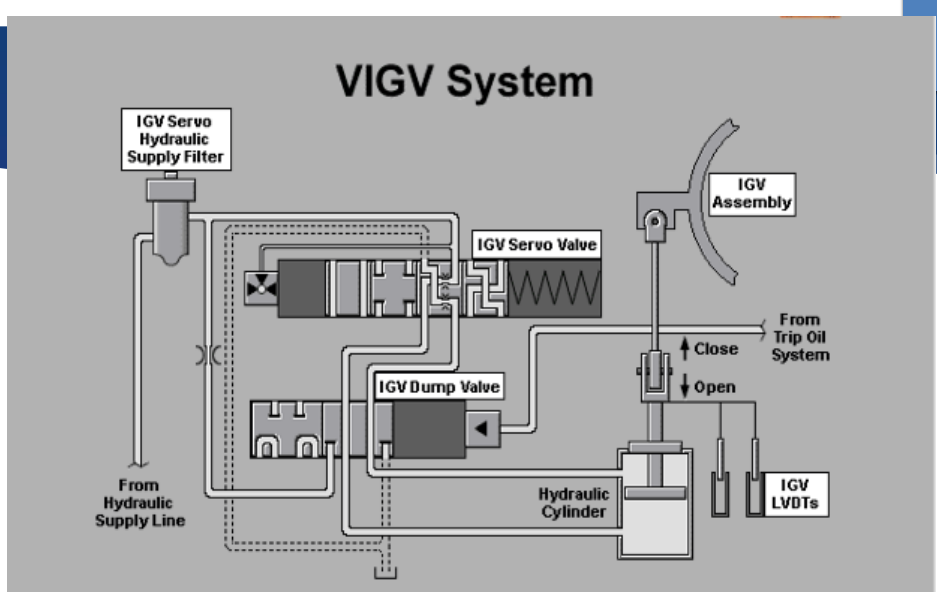




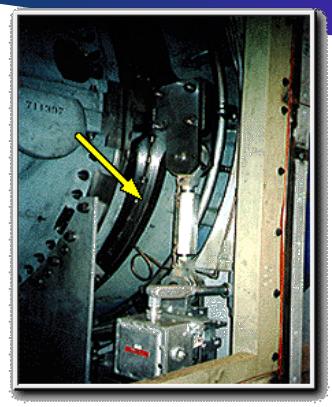
IGV, VSV, , VB, VBV




LM6000 gas turbine
5 Stage
Low Pressure
Compressor
Variable
Bleed Valves
Combustor
(DLE shown)
Hot End
Output Shaft
Exhaust
Variable Inlet
Guide Vanes
Inlet
Variable
Stator Vanes
Cold End
Output Shaft
14 Stage
High Pressure
Compressor
2 Stage
High Pressure
Turbine
5 Stage
Low Pressure
Turbine
© 2014 General Electric Company – All rights reserved
21

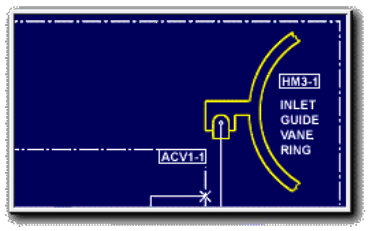

VIGV System
IGV Servo
Hydraulic
Supply Filter
IGV
Assembly
IGV Servo Valve
From
Trip Oil
System
Close
Open
IGV Dump Valve
From
Hydraulic
Supply Line
Hydraulic
Cylinder
IGV
LVDTs

Inlet Guide Vane Ring:

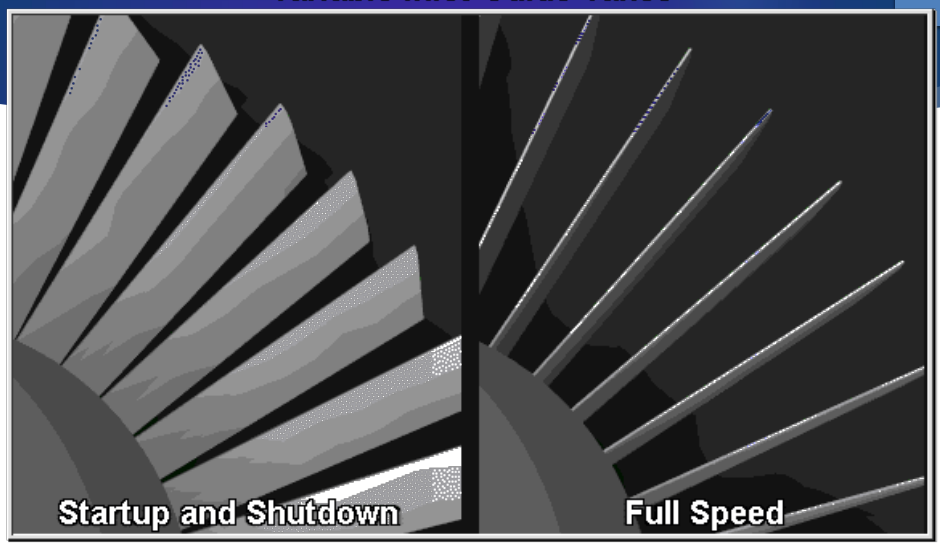


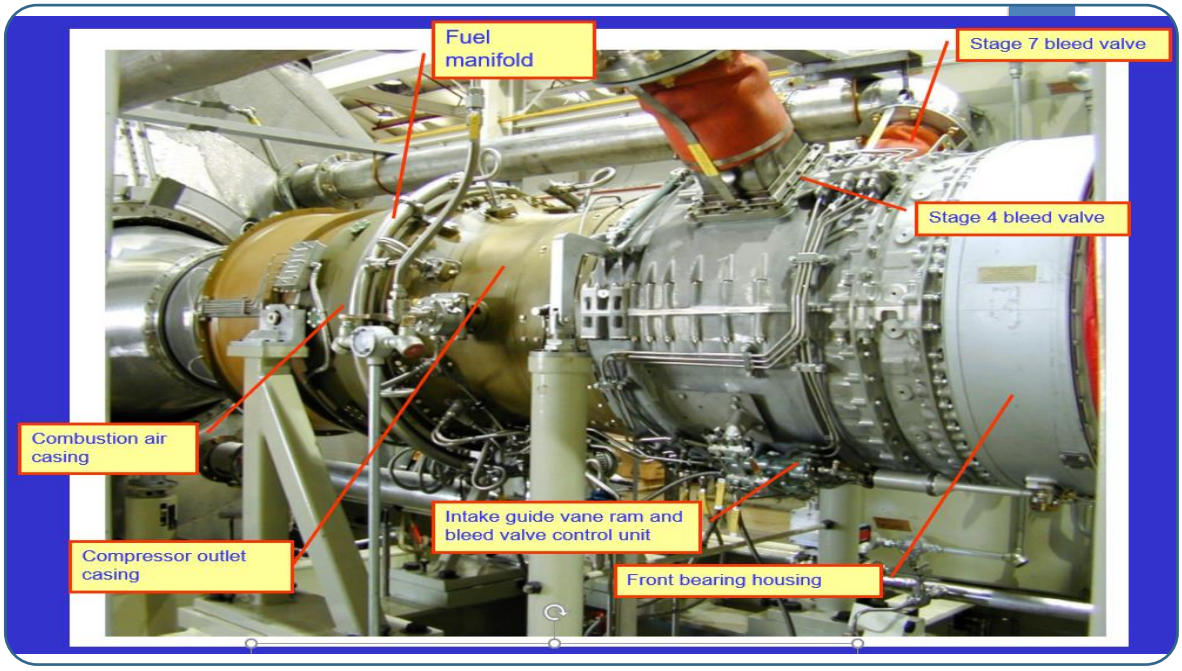
HM3-1

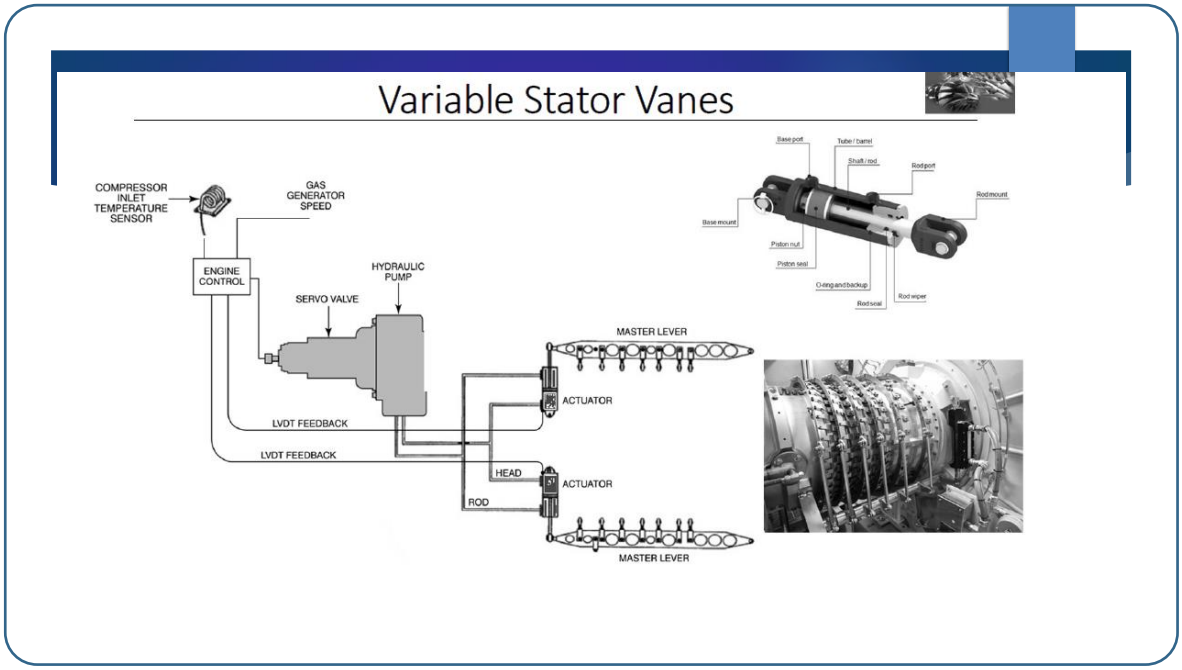
- Encircles the compressor inlet casing near the VIGVs
- Actuated by a double-acting hydraulic cylinder



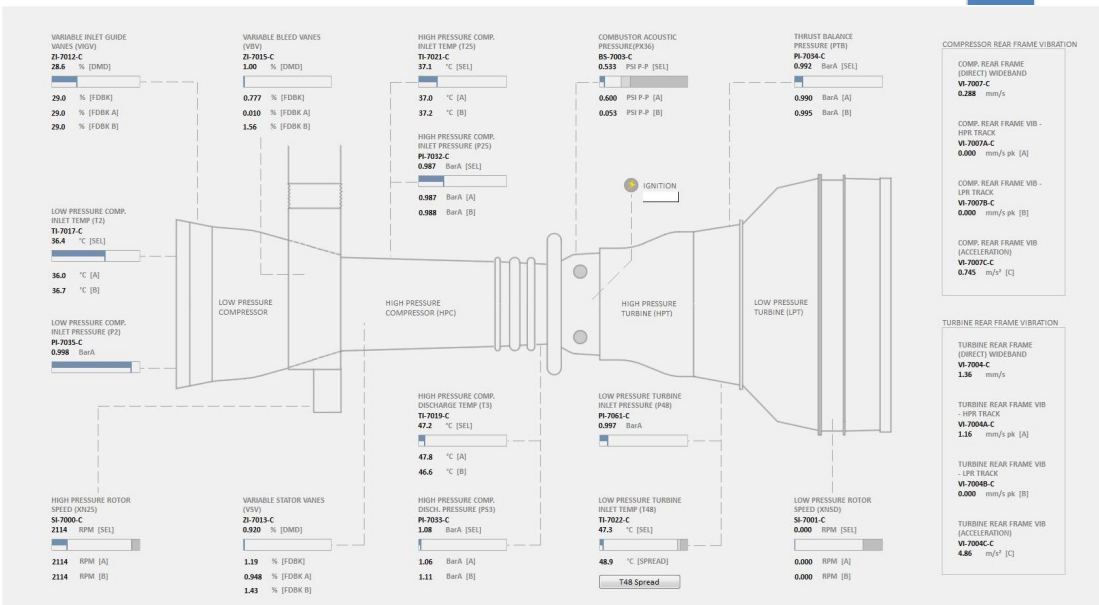
Variable Inlet Guide Vanes




Fuel manifold
Stage 7 bleed valve
Stage 4 bleed valve
Combustion air casing
Intake guide vane ram and bleed valve control unit
Compressor outlet casing
Front bearing housing


Variable Stator Vanes
COMPRESSOR INLET TEMPERATURE SENSOR
GAS GENERATOR SPEED
ENGINE CONTROL
HYDRAULIC PUMP
SERVO VALVE
MASTER LEVER
ACTUATOR
LVDT FEEDBACK
LVDT FEEDBACK
HEAD
ROD
ACTUATOR
MASTER LEVER

Parameter	Core Idle	Synchronous Idle	Maximum Base Power
VIGV Position (percent of stroke)	29	29	93
VSV Position (percent of stroke)	34	44	87
VBV Position (percent of stroke)	90	88	0



Governor Main Tests

- Load Rejection Test.
- Load Acceptance Test.
- Base Load test.

Redundancy

- Redundancy Level

  - Field Devices (Simplex, Dual, TMR)
  - Controllers (Simplex, Dual, TMR)
  - IO Network (Single, Dual, Triple)
  - IO Pack (Single, Dual, Triple)

Control System Software

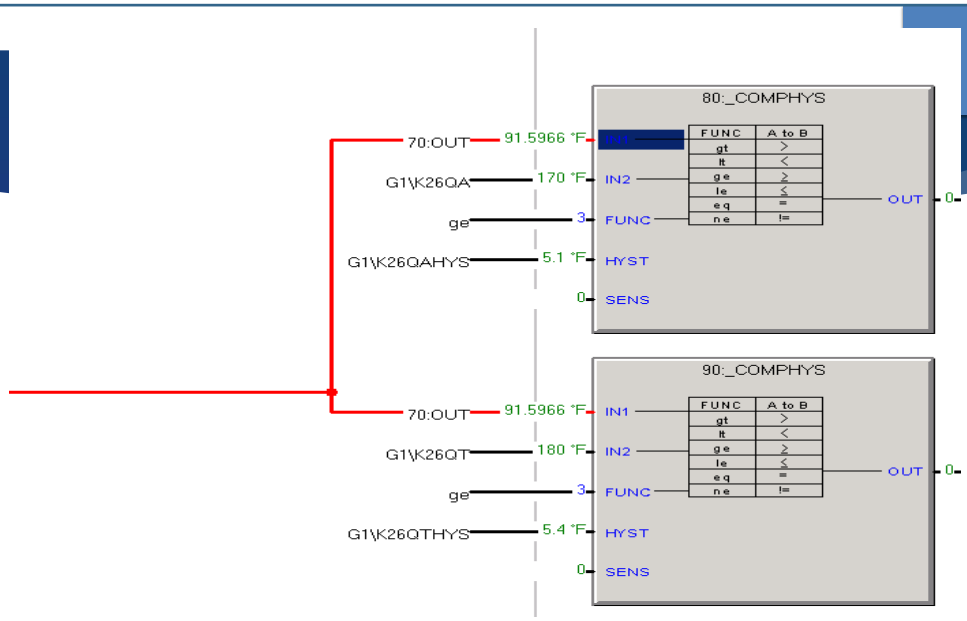
Software tool used for programming and viewing the control logic.

EXAMPLES:

1-

2-

3-



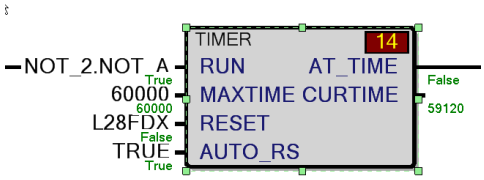
HSS High Signal Select

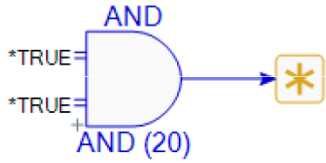
LSS Low Signal Select

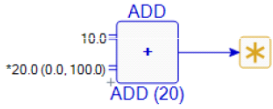


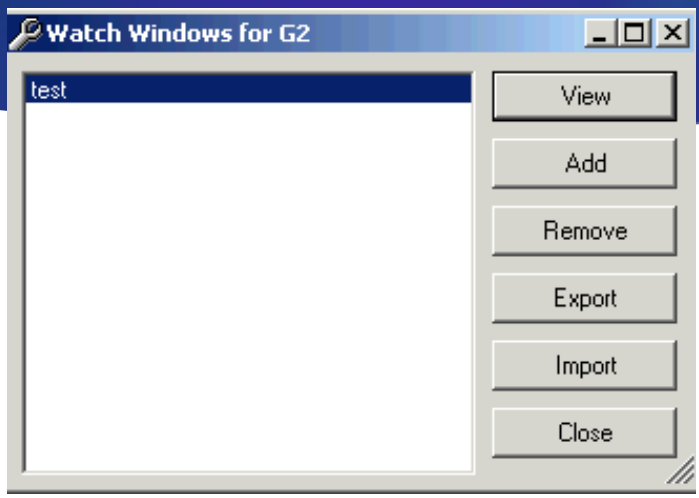
All inputs compared & the lowest will be the output

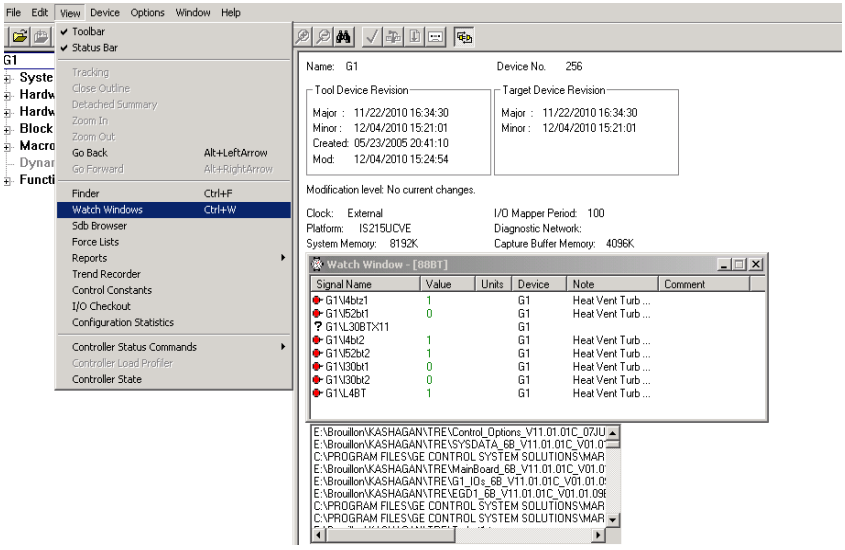
All inputs compared & the highest will be the output

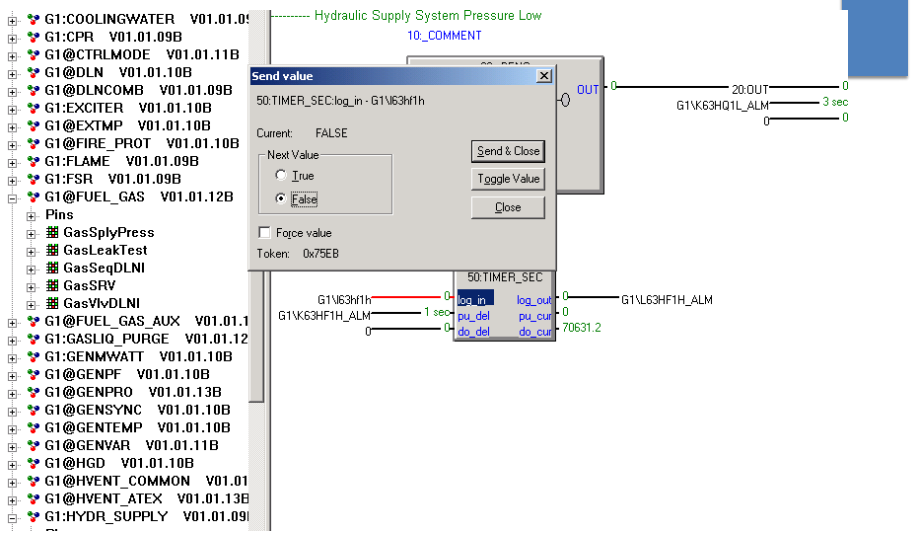


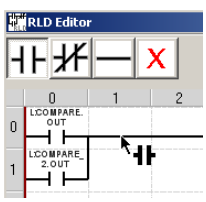


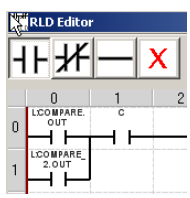


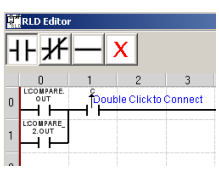

Watch Windows for G2
test
View
Add
Remove
Export
Import
Close

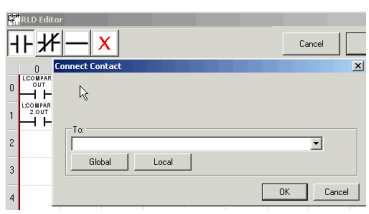

File Edit View Device Options Window Help
Toolbar
Status Bar
Tracking
Close Outline
Detached Summary
Zoom In
Zoom Out
Go Back Alt+LeftArrow
Go Forward Alt+RightArrow
Finder Ctrl+F
Watch Windows Ctrl+W
Sdb Browser
Force Lists
Reports
Trend Recorder
Control Constants
I/O Checkout
Configuration Statistics
Controller Status Commands
Controller Load Profiler
Controller State
Name: G1
Device No. 256
Tool Device Revision
Major : 11/22/2010 16:34:30
Minor : 12/04/2010 15:21:01
Created: 05/23/2005 20:41:10
Mod: 12/04/2010 15:24:54
Target Device Revision
Major : 11/22/2010 16:34:30
Minor : 12/04/2010 15:21:01
Modification level: No current changes.
Clock: External
Platform: IS215UCVE
System Memory: 8192K
I/O Mapper Period: 100
Diagnostic Network:
Capture Buffer Memory: 4096K
Watch Window - [88BT]
Signal Name Value Units Device Note Comment
G1\I4btz1 1 G1 Heat Vent Turb ...
G1\I52bt1 0 G1 Heat Vent Turb ...
G1\L30BTX11 G1
G1\I4bt2 1 G1 Heat Vent Turb ...
G1\I52bt2 1 G1 Heat Vent Turb ...
G1\I30bt1 0 G1 Heat Vent Turb ...
G1\I30bt2 0 G1 Heat Vent Turb ...
G1\L4BT 1 G1 Heat Vent Turb ...

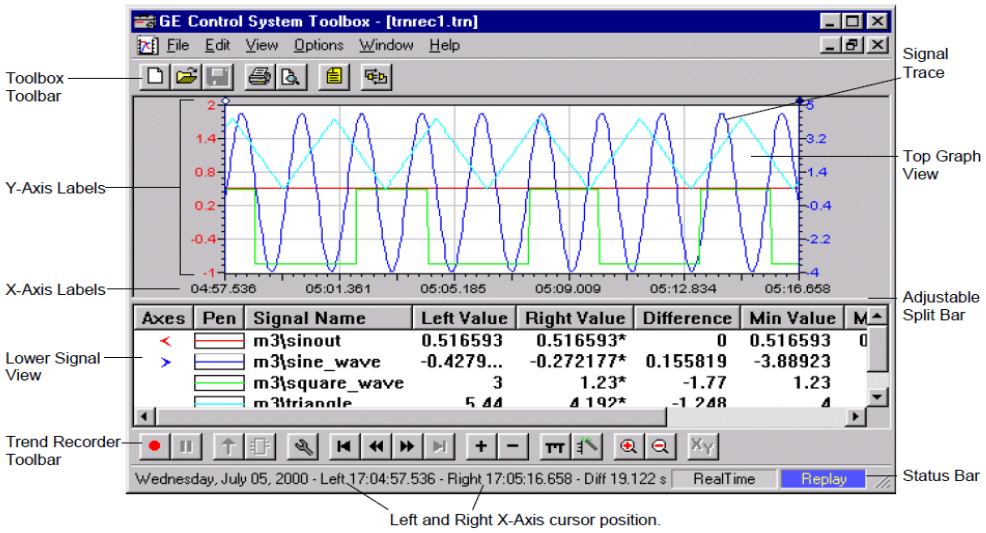

G1:COOLINGWATER V01.01.0
G1:CPR V01.01.09B
G1@CTRLMODE V01.01.11B
G1@DLN V01.01.10B
G1@DLNCOMB V01.01.09B
G1:EXCITER V01.01.10B
G1@EXTMP V01.01.10B
G1@FIRE_PROT V01.01.10B
G1:FLAME V01.01.09B
G1:FSR V01.01.09B
G1@FUEL_GAS V01.01.12B
Pins
GasSplyPress
GasLeakTest
GasSeqDLNI
GasSRV
GasVlvDLNI
G1@FUEL_GAS_AUX V01.01.1
G1:GASLIQ_PURGE V01.01.12
G1:GENMWATT V01.01.10B
G1@GENPF V01.01.10B
G1@GENPRO V01.01.13B
G1@GENSYNC V01.01.10B
G1@GENTEMP V01.01.10B
G1@GENVAR V01.01.11B
G1@HGD V01.01.10B
G1@HVENT_COMMON V01.01
G1@HVENT_ATEX V01.01.13B
G1:HYDR_SUPPLY V01.01.09
Hydraulic Supply System Pressure Low
10:_COMMENT
Send value
50:TIMER_SEC:log_in - G1\I63hf1h
Current: FALSE
Next Value
True
False
Send & Close
Toggle Value
Close
Force value
Token: 0x75EB
OUT
20:OUT
G1\K63HQ1L_ALM
3 sec
50:TIMER_SEC
G1\I63hf1h
G1\K63HF1H_ALM
1 sec
log_in
pu_del
do_del
log_out
pu_cur
do_cur
70631.2
G1\L63HF1H_ALM


RLD Editor
LCOMPARE_OUT
LCOMPARE_2.OUT

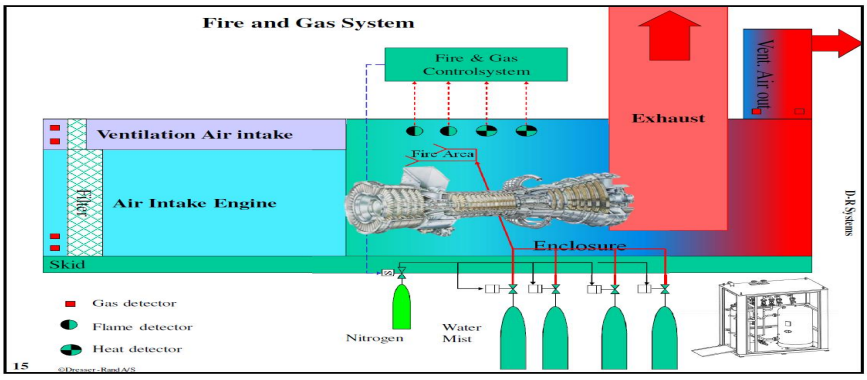

RLD Editor
LCOMPARE_OUT
C
LCOMPARE_2.OUT

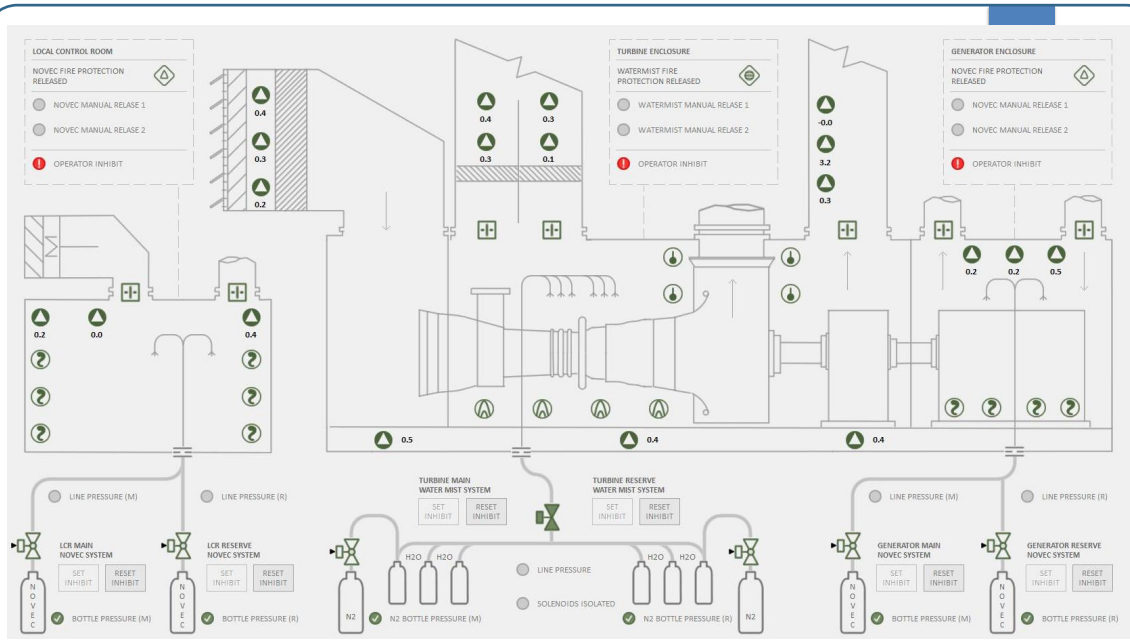

RLD Editor
LCOMPARE_OUT
Double Click to Connect
LCOMPARE_2.OUT

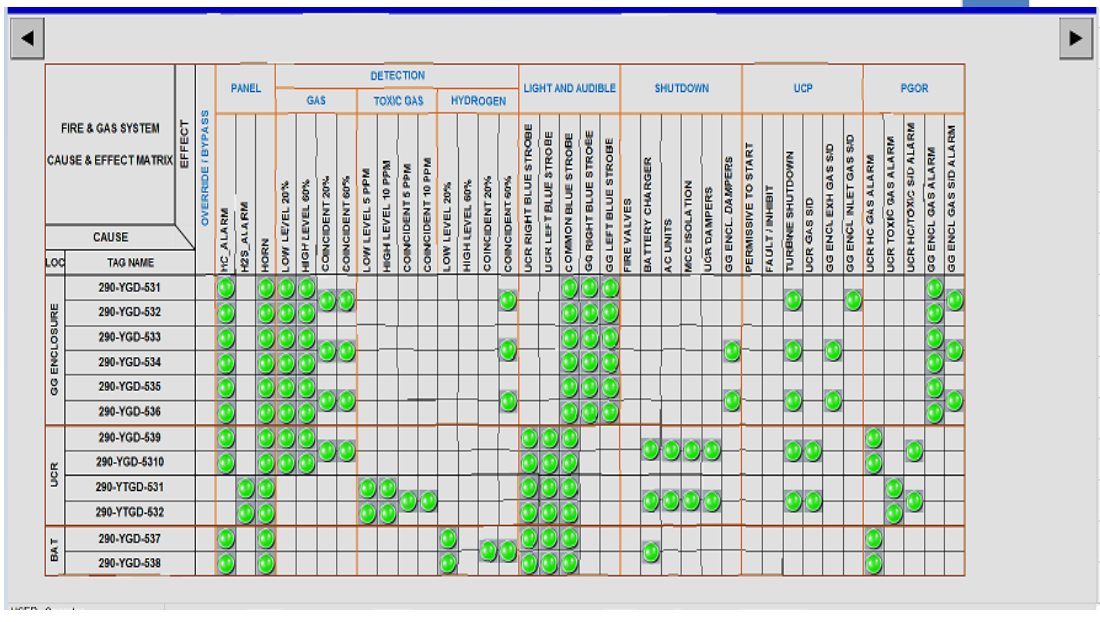

Cancel
Connect Contact
To:
Global
Local
OK
Cancel


GE Control System Toolbox - [trnrec1.trn]
File Edit View Options Window Help
Toolbox Toolbar
Signal Trace
Top Graph View
Y-Axis Labels
X-Axis Labels
04:57.536
05:01.361
05:05.185
05:09.009
05:12.834
05:16.658
Adjustable Split Bar
Axes Pen Signal Name Left Value Right Value Difference Min Value
m3\sinout 0.516593 0.516593* 0 0.516593
m3\sine_wave -0.4279... -0.272177* 0.155819 -3.88923
m3\square_wave 3 1.23* -1.77 1.23
Lower Signal View
Trend Recorder Toolbar
Wednesday, July 05, 2000 - Left 17:04:57.536 - Right 17:05:16.658 - Diff 19.122 s
RealTime
Replay
Status Bar
Left and Right X-Axis cursor position.

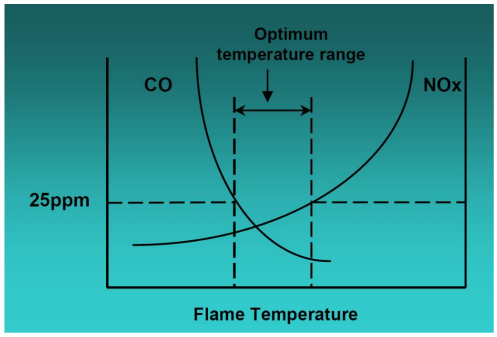
F&G System


Fire and Gas System
Fire & Gas Controlsystem
Vent. Air out
Exhaust
Ventilation Air intake
Fire Area
Air Intake Engine
Enclosure
Skid
Gas detector
Flame detector
Heat detector
Nitrogen
Water Mist
15


LOCAL CONTROL ROOM
NOVEC FIRE PROTECTION RELEASED
NOVEC MANUAL RELASE 1
NOVEC MANUAL RELASE 2
OPERATOR INHIBIT
TURBINE ENCLOSURE
WATERMIST FIRE PROTECTION RELEASED
WATERMIST MANUAL RELASE 1
WATERMIST MANUAL RELASE 2
OPERATOR INHIBIT
GENERATOR ENCLOSURE
NOVEC FIRE PROTECTION RELEASED
NOVEC MANUAL RELEASE 1
NOVEC MANUAL RELEASE 2
OPERATOR INHIBIT
LINE PRESSURE (M)
LINE PRESSURE (R)
LCR MAIN NOVEC SYSTEM
LCR RESERVE NOVEC SYSTEM
SET INHIBIT
RESET INHIBIT
BOTTLE PRESSURE (M)
BOTTLE PRESSURE (R)
TURBINE MAIN WATER MIST SYSTEM
TURBINE RESERVE WATER MIST SYSTEM
H2O
N2
LINE PRESSURE
SOLENOIDS ISOLATED
N2 BOTTLE PRESSURE (M)
N2 BOTTLE PRESSURE (R)
GENERATOR MAIN NOVEC SYSTEM
GENERATOR RESERVE NOVEC SYSTEM


FIRE & GAS SYSTEM
CAUSE & EFFECT MATRIX
EFFECT
OVERRIDE / BYPASS
CAUSE
LOC
TAG NAME
PANEL
DETECTION
GAS
TOXIC GAS
HYDROGEN
LIGHT AND AUDIBLE
SHUTDOWN
UCP
PGOR
HC_ALARM
H2S_ALARM
HORN
LOW LEVEL 20%
HIGH LEVEL 60%
COINCIDENT 20%
COINCIDENT 60%
LOW LEVEL 5 PPM
HIGH LEVEL 10 PPM
COINCIDENT 5 PPM
COINCIDENT 10 PPM
LOW LEVEL 20%
HIGH LEVEL 60%
COINCIDENT 20%
COINCIDENT 60%
UCR RIGHT BLUE STROBE
UCR LEFT BLUE STROBE
COMMON BLUE STROBE
GG RIGHT BLUE STROBE
GG LEFT BLUE STROBE
FIRE VALVES
BATTERY CHARGER
AC UNITS
MCC ISOLATION
UCR DAMPERS
GG ENCL. DAMPERS
PERMISSIVE TO START
FAULT / INHIBIT
TURBINE SHUTDOWN
UCR GAS SID
GG ENCL EXH GAS SID
GG ENCL INLET GAS SID
UCR HC GAS ALARM
UCR TOXIC GAS ALARM
UCR HC/TOXIC SID ALARM
GG ENCL GAS ALARM
GG ENCL GAS SID ALARM
GG ENCLOSURE
290-YGD-531
290-YGD-532
290-YGD-533
290-YGD-534
290-YGD-535
290-YGD-536
UCR
290-YGD-539
290-YGD-5310
290-YTGD-531
290-YTGD-532
BAT
290-YGD-537
290-YGD-538

Exhaust Emission



THANK YOU

HASHEM ALKHASAWNEH

ملحق ح: الفهرس الهجائي

فهرس المصطلحات مرتّبًا هجائيًا، ولكل مصطلح أرقام الأقسام التي يُبحث فيها. ويلي الفهرسَ العربيَّ فهرسٌ إنجليزي بالمصطلحات نفسها، لمن يبحث بالمصطلح الأجنبي كما يظهر على الشاشات والوثائق الفنية.

فهرس المصطلحات العربية

ا

آلية الدوران البطيء 87, 106, 141, 197, 198, 481

اختبار الإثبات 151, 156

إدارة التغيير 81, 89, 120, 178, 180, 185, 262, 327, 390, 509

أرقام الأجهزة 493

إزالة التغذية للقطع 159, 436

إعادة التسخين 507

أكاسيد النيتروجين 58, 71, 407

الإتاحية 330, 334, 335, 451, 454

الاحتراق الفقير المُعدّ مسبقًا 404

الاختزال الحفزي الانتقائي 72, 407

الانحباس 48, 50, 65, 67, 68, 203, 204, 206, 217, 223, 273, 320, 325, 328, 373, 445, 446, 447, 454, 458, 467, 472, 486, 489

الانحناء الحراري 106, 486

الإنسان في الحلقة 434

الانكماش والانتفاخ 379, 382, 505

الاهتزاز الليّي 79, 80

الأيزوكرونس 50, 108, 109, 192, 346, 350, 351

الإيقاف الطارئ 105, 112, 118, 148, 150, 151, 164, 168, 191, 195, 198, 231, 235, 280

البدء الأسود 50, 106, 108, 198, 342

البدء الرطب 448, 454

البدء الساخن 446, 447, 492

البدء المعلّق 447

التآكل الساخن 48, 103, 317, 411, 460

التبريد التبخيري 83, 471, 473, 477

التجمد التكاثفي 466
التحكم المتتالي 374, 377, 425, 438
التحكم ثلاثي العناصر 379, 380, 381
التحليل الطيفي 137
الترذيذ الضبابي 83, 472
الترنح الموضعي 67
التزامن 80, 137, 138, 143, 146, 196, 238, 281, 282, 293, 307, 339, 340, 341, 344, 347, 348, 375, 391, 491
التسخين بنزف الضاغط 468, 477
التشبّع التكاملي 371
التطهير 92, 101, 106, 107, 151, 195, 200, 246, 271, 487, 493
التعرية 317, 328, 458
التغذية الأمامية 374, 375, 377
التكامل مع DCS 244, 310
التوأم الرقمي 177, 178, 296, 297, 300, 426, 427
التوربين المشتق من الطيران 51
التوليد المشترك 42, 495, 502, 507
الثرموكابل 91, 92, 131, 132, 133, 162, 208, 221, 240, 241, 242, 243, 245, 282, 283, 284, 285, 286, 387, 446
الحاكم 107, 108, 109, 110, 111, 114, 118, 122, 124, 127, 128, 153, 178, 184, 189, 192, 196, 202, 287, 310, 330, 332, 340, 345, 346, 347, 349, 350, 352, 387, 433, 451, 491
الحد الأدنى للانفجار 145
الحدّ الحمضي 500, 507
الحرق الإضافي 502, 507
الحماية الاحتياطية المستقلة 141, 153, 154, 155, 260, 332, 360, 392
الحماية من الحرارة الزائدة 131
الحماية من السرعة الزائدة 109, 123, 124, 126, 127
الحوسبة الطرفية 298, 432
الدروب 107, 108, 109, 340, 342, 346, 349, 350, 390
الدورة المركبة 25, 28, 31, 38, 39, 40, 42, 43, 56, 72, 83, 88, 91, 92, 377, 408, 411, 412, 485, 495, 496, 497, 503, 505, 506, 507
الدورة المسترجعة 40
الردّية الثلاثية 264, 266, 310
الزحف 318, 320, 328
السرعات الحرجة 77, 489
السرعة الكاملة بلا حمل 490
الشغل الصافي 26, 28, 33, 34, 62, 64
الصمام المؤازر 291

الصيانة التنبؤية 166, 177, 211, 296, 428
الصيانة الوقائية 31, 50, 126, 144, 166, 167, 168, 169, 171, 174, 280
الضاغط المحوري 65, 459
الضبط الذاتي 373, 431
الضغط الخلفي 88, 90, 92, 325, 408, 445, 504
الضغط الرطب 83, 472
العزل والإقفال والوسم 178
العطل المستتر 156, 160
الفحص بالمنظار 313, 318, 324
الفشل الآمن 430
الفلتر ذاتي التنظيف 467, 468, 476
القابض ذاتي التعشيق 501, 507
القدرة الرَّدّية 111, 344, 347
القدرة العكسية 343, 344, 351, 352
القدرة الفعّالة 342
الكفاءة الحرارية 24, 27, 28, 32, 403
اللهب الانتشاري 402, 438
اللهب الكاذب 487, 493
المؤقتات 255, 272, 288
المتحكم PID 365, 369, 371
المحامل 28, 64, 75, 76, 77, 78, 79, 96, 97, 98, 117, 118, 124, 135, 136, 171, 173, 177, 181, 185, 198, 220, 276, 278, 429, 452
المخمّد المقصلي 88, 91
المراقبة عن بعد 211, 296, 297, 300, 433
المكثف 299, 500, 505, 507
المنصات البحرية 38, 46, 49, 51, 52, 432, 450
المنطق الضبابي 376, 381, 382
الموثوقية 47, 123, 151, 206, 329, 330, 332, 334, 335, 451
الناشر 83, 88, 89
الورنيش 182, 185
الوقود السائل 100, 101, 103, 116, 160, 285, 287, 288, 291, 399, 411, 484
أنابيب اللهب المتقاطعة 267, 488
انحناء العمود 197, 486
انزلاق الأمونيا 408
أول أكسيد الكربون 71, 72

ب

بطاقات الإدخال والإخراج 238, 257, 268, 331, 356
بيئة الهندسة 260

ت

تحديث أنظمة التحكم 331
تحليل الزيت 80, 177, 181, 183
تحويل الوقود 162
تسلسل بدء التشغيل 106, 109, 129, 142, 196, 204, 223, 224, 271, 287, 479
تسييل الغاز 47
تعويض الوصلة الباردة 241, 242, 245, 283
تقاسم الحمل 192, 202, 346, 350
تلوث الضاغط 50, 67, 140, 175, 273, 277
توربين القدرة الحر 62, 63, 64, 66, 442

ج

جدول التسارع 444, 489
جدولة الكسب 374, 375

ح

حزام التخميد 253, 254, 291
حسّاسات القرب 130, 136
حسّاس نقطة الصقيع 464, 469
حقن البخار 403
حقن الماء 31, 46, 48, 50, 72, 110, 401, 402, 403, 404, 411, 453, 472
حقن الماء في المكامن 46

خ

خريطة الضاغط 67, 223

د

درجة حرارة البصيلة الرطبة 83, 471
دورة برايتون 21, 25, 26, 27, 32, 54, 117, 301, 496
ديناميكيات الاحتراق 403, 406, 412, 415, 444

ر

رفض الحمل 198, 226, 368
ريش التوجيه المتغيرة 67, 205, 273
ريش التوربين 171, 378, 505

ز

زيغلر-نيكولز 373

س

ساعات التشغيل المكافئة 172, 246, 492
سجل الأحداث 149, 164, 169, 223, 274, 281, 391, 392
سرعة الإشعال 106, 487, 488, 489
سلسلة الإشارة 54, 264, 281, 355, 356, 367, 386, 398, 454, 494

ص

صمامات النزف 68, 196, 204, 223, 248, 273, 274, 445, 454, 486, 489, 490

ض

ضبط المتحكم 372

ع

علبة التروس 79, 80, 81, 126, 159, 240

غ

غرفة الاحتراق 18, 24, 25, 27, 28, 31, 40, 43, 54, 58, 62, 64, 68, 72, 73, 85, 99, 100, 102, 103, 115, 131, 142, 146, 151, 171, 172, 192, 299, 314, 326, 401, 403, 407, 410, 411, 441, 447, 448, 456, 487
غسيل الضاغط 175, 176, 427, 430, 482

ف

فارق الاقتراب 499, 507
فارق حرارة العادم 103, 161, 175, 200, 208, 221, 241, 282, 284, 290, 325, 406, 415, 428, 434, 490
فترة الإحماء 489, 493
فحص الحلقات 330, 331, 332, 333, 358, 391
فشل الاشتعال 447, 483, 488, 493
فقد الضغط عبر المدخل 477
فلسفة الحماية 122, 164, 225, 252, 311
فيضان الإنذارات 149, 264, 428

ك

كشف الشذوذ 425, 427, 428, 438
كواشف اللهب 114, 267, 291, 484

ل

لوحات الأطراف 257, 258

م

مؤشر Wobbe 407, 412, 415
محفّز أكسدة CO 408
محمل الدفع 76, 79, 130, 135, 138, 139, 140, 141
مخطط كامبل 77, 78, 81, 321, 322
مخمّد التحويل 88, 91
مراقب الاحتراق 151, 158, 161, 162, 164
مراقبة الاهتزاز 127, 130, 135, 138, 166, 177, 188, 222, 243
مرجع الطور 127, 130, 136, 137
مرجع الوقود 54, 191, 256, 291, 388
مرجل استرداد الحرارة 38, 41, 42, 83, 91, 377, 380, 383, 408, 410, 468, 487, 498
مسار حركة العمود 130, 136
مستوى الطبلة 377, 381, 382, 496, 505
مستوى تكامل السلامة 151
مضخة الزيت الطارئة 119, 292, 481
معدل الحرارة 90, 175, 332, 334, 335, 344, 353, 464, 470
مقياس التزامن 281, 340, 341
منحنى القدرة 342, 347
منظّم الجهد الآلي 111
منظومة هواء السحب 455
منع التجمد 83, 455, 456, 458, 462, 463, 465, 466, 467, 469, 477
منهجية التنصيف 292, 454
موزّع التدفق 484
مولّد الغاز 51, 126, 200, 227, 272, 288, 441, 442, 443, 444, 446, 452, 454

ن

نسبة الضغط 24, 26, 27, 30, 32, 33, 36, 40, 65, 67, 86, 87, 192, 325, 445, 470
نظام الإثارة 110, 111, 340, 344, 353
نظام التزييت 77, 96, 97, 98, 117, 225

نظام الحريق والغاز 104, 116, 118, 144, 145, 147, 195, 280
نظام زيت القطع 151, 158, 164, 266
نقطة القرص 42, 499, 507
نموذج بردو 212, 213, 234, 297

هـ

هامش الانحباس 67, 68, 206, 223, 273, 446, 467, 472
هواء التخفيف 70, 458
هواء التذرير 285, 286, 287, 288, 484, 490

و

وحدة الحماية 159, 163, 258, 259, 260, 264, 266
وصلات التمدد 83, 89, 490

هذا الكتاب مرجع عربي شامل يربط المبدأ الفيزيائي بالمكوّن، والمكوّن بنظام التحكم، ونظام التحكم بالحماية، والحماية بما يحدث فعلاً في الميدان.

يغطي الكتاب

- الأساسيات: التعريف، دورة برايتون، التطبيقات، المزايا والقيود.
- المكونات والأنظمة: الضاغط والاحتراق والتوربين والعمود، السحب والعادم، الأنظمة المساعدة.
- الحماية والسلامة: فلسفة الحماية، السرعة الزائدة، الحرارة، الاهتزاز، اللهب، الحريق والغاز، زيت القطع.
- التشغيل والصيانة والتشخيص: التشغيل والصيانة، مؤشرات الأداء، الحالات الميدانية، تلف المسار الساخن.
- التحكم والقياس: منطق التحكم، التكامل مع DCS، بنية النظام وبرمجته، سلسلة الإشارة، PID والتحكم المتقدم، تدريبات تشخيصية.
- المولد والمشروع والبيئة والمستقبل: المولد والشبكة، التشغيل التجريبي، الانبعاثات، الذكاء الاصطناعي، التوربينات المشتقة من الطيران، هواء السحب، البدء، الدورة المركبة.

هاشم حسين الخصاونة

Hashem Hussein Al-Khasawneh