وثيقة توصيف وتحليل النظام البرمجي

نظام التحكم البرمجي

Programming Control System

ضمن مشروع

Smart Multi Ripping Machine

آلة النشر الطولي المتعدّدة الشفرات

محتوى الوثيقة

توصيف كامل للمنظومة البرمجية المرافقة للآلة : غرضها، وأصحاب مصلحتها، ونطاقها، ومتطلّباتها الوظيفية، ومعماريتها، وقاعدة بياناتها، ولوحة مراقبتها، ونظام محاكاتها، ومنظومة صيانتها التنبؤية، وتكاملها مع Gmail، مع مخطّطات UML ولقطات من واجهات التطبيق.

تُصنَّف كل وظيفة في هذه الوثيقة صراحةً بأنّها **IMPLEMENTED** أو **SIMULATED** أو **FUTURE**، وقد جرى التحقّق من كل تصنيف بالرجوع إلى الشيفرة المصدرية الفعلية للمشروع.

إصدار التطبيق الموثَّق: 2.0 Alpha

تاريخ الإصدار: 28 آب / أغسطس 2026

المحتويات

قائمة الأشكال

مخطّط حالات الاستخدام (Use Case Diagram) لنظام مراقبة الصيانة	الشكل 1–7
معمارية النظام (System Architecture) وعلاقة طبقاته بالأنظمة الخارجية	الشكل 1–8
تدفّق بيانات المحاكاة (Simulation Data Flow) من المؤقّت إلى المستخدم	الشكل 1–10
دورة حياة تتبّع العمر التشغيلي وعلاقتها بأزرار التحكّم بالآلة	الشكل 1–13
مخطّط تسلسل (Sequence Diagram) عملية ربط حساب Gmail	الشكل 1–15
مخطّط الكيانات والعلاقات (ER Diagram) لقاعدة بيانات النظام	الشكل 1–16
سير عملية الإنتاج الكاملة من اختيار الخشب حتى حفظ النتائج	الشكل 1–17
مخطّط نشاط (Activity Diagram) لتسجيل عملية صيانة أو استبدال	الشكل 1–18
مخطّط تسلسل (Sequence Diagram) للكشف عن نهاية العمر وإرسال الإشعار	الشكل 1–19
الصفحة الرئيسة (Home Page) بعد تنفيذ الأمر Calculate Forces	الشكل 1–20
لوحة المراقبة (Monitoring Panel) أثناء التشغيل — جميع القيم بيانات محاكاة	الشكل 2–20
صفحة سجلّ العمليات (History Page) ومؤشّراتها التجميعية	الشكل 3–20
لوحة تفاصيل العملية (Process Detail Drawer) مع جدول سجلّ العمليات	الشكل 4–20
صفحة الصيانة (Maintenance Page) وجدول الحالة الصحية للمكوّنات	الشكل 5–20
لوحة تسجيل الصيانة (Record Maintenance Drawer)	الشكل 6–20
تنبيه العطل (Failure Alert Overlay)	الشكل 7–20

قائمة الجداول

تصنيفات حالة الوظائف المعتمدة في هذا المستند	الجدول 1–1
أهداف النظام وحالة تحقّقها	الجدول 1–3
أصحاب المصلحة وتفاعلهم مع النظام	الجدول 1–4
نطاق وظائف النظام وحالتها الحالية	الجدول 1–5
المتطلبات الوظيفية لمجال التحليل والإنتاج	الجدول 1–6

المتطلبات الوظيفية لمجال المراقبة	الجدول 6–2
المتطلبات الوظيفية لمجال الصيانة التنبؤية	الجدول 6–3
حالة الاستخدام UC–4 — مراجعة الحالة الصحية للمكوّنات	الجدول 7–1
حالة الاستخدام UC–5 — تسجيل عملية صيانة أو استبدال	الجدول 7–2
حالة الاستخدام UC–6 — كشف نهاية العمر والإشعار	الجدول 7–3
حالة الاستخدام UC–1 — تحليل القطع وبدء الإنتاج	الجدول 7–4
صفحات التطبيق ومفاتيح التنقّل إليها	الجدول 8–1
مناطق لوحة المراقبة ومحتوياتها	الجدول 9–1
مصدر كل قيمة معروضة على لوحة المراقبة	الجدول 9–2
بارامترات إشارات المحاكاة كما وردت في الشيفرة	الجدول 10–1
البارامترات الزمنية لنظام المحاكاة	الجدول 10–2
العناصر الفيزيائية المراقَبة في الآلة	الجدول 12–1
الأصول الرقمية المرتبطة بالعناصر	الجدول 12–2
معدّلات استهلاك العمر التشغيلي بحسب مجموعة القيادة	الجدول 13–1
سلوك حفظ العمر التشغيلي بحسب إجراء المستخدم	الجدول 13–2
تصنيف الحالة الصحية للعناصر	الجدول 13–3
محتوى رسالة تنبيه العطل	الجدول 14–1
خصائص تكامل Gmail كما هي منفَّذة	الجدول 15–1
جداول منظومة الصيانة وغرض كلٍّ منها	الجدول 16–1
جداول منظومة الإنتاج والتحليل	الجدول 16–2
صفحات التطبيق ووظيفة كلٍّ منها	الجدول 20–1
مجالات التحقّق ونتائجها ومستوى الإثبات	الجدول 21–1
القيود المتعلّقة بالعتاد	الجدول 22–1
مصادر السرعة حالياً ومستقبلاً	الجدول 23–1
مقترحات التطوير المستقبلي ومسوّغاتها	الجدول 23–2

1. مقدمة (Introduction)

تُمثّل الآلة Smart Multi Ripping Machine آلةً صناعيةً لنشر الخشب طولياً بوساطة مجموعة من الشفرات الدائرية المتوازية المركّبة على عمودَي قطع، وتُغذّى القطعة الخشبية إليها عبر أربعة أعمدة تغذية تُدار من المحرّك بوساطة سيور من النوع A46. وقد اقتضى تطوير هذه الآلة، إلى جانب التصميم الميكانيكي، إنجازَ منظومة برمجية مرافقة تتولّى الجانب التحليلي والتشغيلي والصياني للمشروع.

يتناول هذا المستند المنظومة البرمجية المسمّاة **نظام التحكم البرمجي (Programming control System)**، وهي تطبيق مكتبي (Desktop Application) مبني بلغة C# على إطار العمل NET 9. باستخدام تقنية واجهات المستخدم WPF، ويعتمد في تخزين بياناته على قاعدة بيانات SQL Server عبر Entity Framework Core 9.جاءت الحاجة إلى هذا النظام من ملاحظة هندسية بسيطة: إنّ الأعطال في آلات النشر لا تقع عشوائياً في معظم الحالات، بل هي نتيجة تراكمٍ تدريجي لاستهلاك العمر التشغيلي لعناصر محدّدة ومعروفة مسبقاً — وهي في حالة الآلة SMRM ستةَ عشرَ عنصراً تتوزّع بين محامل (Bearings) وسيور (V-Belts). ومن ثمّ فإنّ تتبّع الاستهلاك المتراكم لكل عنصر على حدة يتيح الانتقال من الصيانة التصحيحية (Corrective Maintenance) التي تلي وقوع العطل، إلى صيانةٍ تنبؤية (Predictive Maintenance) تسبقه.

العلاقة بين الآلة الفيزيائية والبرمجية في المرحلة الحالية علاقةُ **نمذجة (Modelling) لا قياس (Measurement)**؛ إذ يحسب النظام العمر المستهلك انطلاقاً من نموذجٍ حركي (Kinematic Model) للآلة مضروباً بزمن التشغيل الحقيقي، ولا يقرأ أيّ قيمة من حسّاس (Sensor) أو من وحدة تحكّم منطقية قابلة للبرمجة (PLC).

> **تنويه أساسي — تصنيف الحالة**
>
> يستخدم هذا المستند ثلاثة تصنيفات صريحة لحالة كل وظيفة، وقد تمّ التحقّق من كل تصنيف بالرجوع إلى الشيفرة المصدرية الفعلية للمشروع لا إلى التوثيق وحده:
>
> **IMPLEMENTED** — وظيفة منفَّذة فعلياً وتعمل في التطبيق الحالي وتؤثّر في بيانات حقيقية.

SIMULATED — وظيفة قائمة بوصفها محاكاةً برمجية (Simulation) لغرض العرض والتحقّق من المفهوم، ولا تمثّل قياساً فيزيائياً.

FUTURE — وظيفة غير منفَّذة حالياً وتتطلّب تطويراً لاحقاً أو ربطاً مع عتاد (Hardware).

الجدول 1-1: تصنيفات حالة الوظائف المعتمدة في هذا المستند

أمثلة من النظام	الدلالة	التصنيف
تتبّع العمر التشغيلي، تسجيل الصيانة، إرسال التنبيه عبر Gmail API	منفَّذة وتعمل، وبياناتها تُخزَّن أو تُرسَل فعلياً	IMPLEMENTED
لوحة المراقبة (Monitoring Panel) بكامل إشاراتها التسع	قيم مولَّدة برمجياً لغرض العرض، لا تمثّل قياساً	SIMULATED
ربط الحسّاسات، تكامل PLC، المراقبة بالكاميرا	غير منفَّذة، تحتاج عتاداً أو تطويراً لاحقاً	FUTURE

ينقسم هذا المستند إلى أربعةٍ وعشرين فصلاً تتدرّج من الغرض العام للنظام وأصحاب المصلحة، مروراً بالمعمارية البرمجية وقاعدة البيانات ولوحة المراقبة ونظام المحاكاة والتكامل مع Gmail، وصولاً إلى القيود الحالية وآفاق التطوير المستقبلي.

2. هدف النظام (System Purpose)

الغرض المركزي من نظام مراقبة الصيانة هو **تحويل زمن تشغيل الآلة إلى معرفةٍ هندسية قابلة للتصرّف بها.** فبدلاً من أن يبقى العمر المتبقّي لكل محملٍ وسيرٍ في الآلة مجهولاً حتى لحظة العطل، يحوّل النظام كل ثانية تشغيل فعلية إلى مقدارٍ محسوبٍ من الاستهلاك يُضاف إلى عدّاد دائم خاص بكل عنصر، ويُخزَّن في قاعدة البيانات ليبقى بعد إغلاق التطبيق.

2.1 إدارة الصيانة (Maintenance Management)

يوفّر النظام سجلّاً مركزياً لعمليات الصيانة المنفَّذة على الآلة. تُسجَّل كل عملية باسم منفّذها وتاريخها وتكاليفها الثلاث (تكلفة الخدمة، سعر العنصر المستبدَل، تكلفة التوقّف)، وتبقى محفوظة على نحوٍ دائم؛ إذ لا يتضمّن التطبيق أيّ مسارٍ لحذف سجلّ صيانة أو تعديله. **[IMPLEMENTED]**

2.2 تتبّع المكوّنات (Component Tracking)

تُمثَّل العناصر الستةَ عشرَ في قاعدة البيانات بوصفها كياناتٍ مستقلّة، لكلٍّ منها موقعُه على الآلة (OrderOfElementAtMachine من 1 إلى 16) وعمرُه المستهلك وسجلُّ صيانته الخاص. وهذا يعني أنّ استبدال محملٍ واحد من مجموعةٍ متطابقة لا يؤثّر في عدّادات بقيّة المحامل. **[IMPLEMENTED]**

2.3 مراقبة العمر التشغيلي (Service-Life Monitoring)

يحسب النظام العمر المستهلك بواحداتٍ فيزيائية صحيحة: **الدورات (Revolutions)** للمحامل و**المرّات (Passes)** للسيور، ولا يخلط بينهما. ويقارن الاستهلاك المتراكم بالعمر الاسمي المأخوذ من كتالوجات المُصنّع، ليشتقّ منه نسبةَ الاستهلاك والحالةَ الصحية للعنصر. **[IMPLEMENTED]**

2.4 تتبّع التكاليف (Cost Tracking)

تُجمَع التكاليف الثلاث لكل عملية صيانة في قيمةٍ إجمالية (`TotalCost`) تُحسَب برمجياً ولا تُخزَّن عموداً في قاعدة البيانات، ويعرض النظام مجموع تكاليف الصيانة على مستوى الآلة كاملةً في بطاقةٍ إحصائية على شاشة الصيانة. **[IMPLEMENTED]**

2.5 التنبيهات الصيانية (Maintenance Notifications)

عند بلوغ أيّ عنصرٍ عمرَه الاسمي، يوقف النظام الآلة تلقائياً عبر مسار الإيقاف البرمجي القائم، ويُظهر تنبيهاً على الشاشة، ويُرسل رسالةً إلكترونية ثنائية اللغة (إنكليزية وعربية) عبر Gmail API تتضمّن كتالوج العنصر المُعطِل وصورته. **[IMPLEMENTED]**

2.6 التمثيل البصري للمراقبة (Monitoring Visualization)

توفّر لوحة المراقبة (Monitoring Panel) عرضاً بصرياً حياً لأربعة مخطّطات وإحصاءات لحظية، بهدف تمثيل تجربة المراقبة التشغيلية المستهدفة وإثبات جاهزية البنية البرمجية لاستقبال قيمٍ حقيقية لاحقاً.

2.7 التحليل الإنتاجي وسجلّ العمليات

إلى جانب مجال الصيانة، يؤدّي النظام وظيفةً إنتاجية وتحليلية كاملة سبقت منظومة الصيانة زمنياً وبقيت جزءاً أصيلاً منه: فهو يحسب زوايا القطع وسماكة الرايش وسبع مركّبات للقوى وعزم عمود القطع انطلاقاً من خواصّ الخشب وهندسة الشفرة، ويخزّن كل عملية إنتاج مكتملة بشروطها وقيمها الحرجة، ويتيح استعراض السجلّ ومؤشّراته وتصدير تقرير PDF لأيّ عملية. ويُفصَّل هذا المجال في الفصول 6 و17 و20. **[IMPLEMENTED]**

ومن المهمّ إدراك أنّ المجالين متّصلان في موضعٍ واحد بالتحديد: **سرعة عمود القطع** المحسوبة في التحليل الإنتاجي هي نفسها التي تُغذّي حساب استهلاك عمر محامل عمود القطع. وفيما عدا ذلك يعمل كلٌّ منهما مستقلاً عن الآخر.

حالة لوحة المراقبة

تعتمد لوحة المراقبة (Monitoring Panel) في المرحلة الحالية على بيانات محاكاة (Simulated Monitoring Data) بهدف تمثيل آلية المراقبة المقترحة وإظهار كيفية تعامل النظام مع حالات التشغيل والإيقاف والاستئناف.

لا يستقبل النظام في وضعه الراهن أيّ قياسٍ من حسّاسات الآلة، ولا يتضمّن المشروع أيّ شيفرة اتصال بـ PLC أو Modbus أو OPC-UA أو منفذ تسلسلي.

3. أهداف النظام (System Objectives)

تُعرَض في ما يأتي أهداف النظام كما تدعمها الشيفرة المصدرية فعلياً، مع تصنيف حالة كلٍّ منها. وقد استُبعدت أيّ أهدافٍ لا يمكن التحقّق منها في المشروع القائم.

الجدول 1–3: أهداف النظام وحالة تحقّقها

#	الهدف	الحالة	التحقّق في المشروع
1	مركزة معلومات الصيانة في مصدر واحد	IMPLEMENTED	جداول Elements و ElementsInformation و Maintenance في قاعدة بيانات واحدة
2	تتبّع كل مكوّن فيزيائي على حدة	IMPLEMENTED	ستة عشر سجلاً في Elements بفهرس فريد على موقع العنصر
3	تسجيل أعمال الصيانة وحفظ تاريخها	IMPLEMENTED	MaintenanceCRUD.RecordMaintenance ضمن معاملة (Transaction) واحدة
4	قياس العمر التشغيلي المستهلك لكل عنصر	IMPLEMENTED	ElementLifeMonitoringService بمعدّلٍ زمنيّ حقيقي
5	دعم قرار الصيانة بحدود إنذارٍ واضحة	IMPLEMENTED	عتبتا 80% و95% في MaintenanceSettings
6	الإيقاف التلقائي عند بلوغ نهاية العمر	IMPLEMENTED	DetectEndOfLife ثم استدعاء مسار StopMachine() القائم
7	إشعار المسؤول بالبريد الإلكتروني	IMPLEMENTED	MaintenanceEmailService عبر Gmail API
8	توفير تمثيل بصري لحالة التشغيل	SIMULATED	SimulationManager — تسع إشارات مولَّدة برمجياً
9	عرض المفهوم المستقبلي للمراقبة اللحظية	SIMULATED	لوحة المراقبة تُظهر تنويهاً صريحاً بأنّ القيم محاكاة
10	القياس الفعلي من حسّاسات الآلة	FUTURE	لا توجد أيّ شيفرة استحواذ بيانات في المشروع
11	التحكّم الكهربائي الفعلي بالآلة	FUTURE	أزرار التشغيل تغيّر حالةً برمجية فقط

ملاحظة منهجية

الأهداف من 1 إلى 7 محقّقة بالمعنى الهندسي الكامل: بياناتها دائمة، وحساباتها قائمة على زمنٍ حقيقي، ونتائجها قابلة للتدقيق في قاعدة البيانات.

الهدفان 8 و9 محقّقان بوصفهما محاكاةً فقط، والهدفان 10 و11 لم يُنفَّذا ويُصنَّفان ضمن التطوير المستقبلي (Future Work).

4. أصحاب المصلحة والمستخدمون (Stakeholders and Users)

لا يتضمّن النظام في وضعه الراهن أيّ آلية مصادقة (Authentication) أو حسابات مستخدمين أو صلاحيات (Roles)؛ فكل من يصل إلى التطبيق يصل إلى جميع شاشاته. ومن ثمّ فإنّ الأدوار المذكورة أدناه هي **أدوار وظيفية (Functional Roles)** تصف كيفية استعمال النظام عملياً، لا حساباتٍ منفصلة داخل البرنامج.

الجدول 1–4: أصحاب المصلحة وتفاعلهم مع النظام

التفاعل الرئيسي مع النظام	الحاجة الأساسية	الدور
اختيار نوع الخشب، تنفيذ **Calculate Forces**، ثم **Start** و**Stop** و**End Process**؛ ومتابعة لوحة المراقبة **[SIMULATED]** وتلقّي تنبيه العطل	تشغيل الآلة وإيقافها ومتابعة سير عملية النشر	مشغّل الآلة (Machine Operator)
مراجعة شاشة الصيانة وجدول الحالة الصحية للعناصر الستة عشر، وتسجيل عملية صيانة أو استبدال عبر الزرّ **Maintain**	معرفة أيّ العناصر يقترب من نهاية عمره، وتوثيق ما نُفِّذ	مهندس الصيانة (Maintenance Engineer)
صفحة **History** ومؤشّراتها، وتصدير تقرير PDF لأيّ عملية، ومجموع تكاليف الصيانة على شاشة الصيانة	متابعة إنتاجية الآلة وكلفة صيانتها	مشرف الإنتاج (Production Supervisor)
وضع ملف عميل OAuth في مساره الآمن ثم ربط الحساب. **ملاحظة:** واجهة الربط غير موجودة في هذه النسخة، والوظيفة متاحة في طبقة الخدمات فقط (انظر الفصل 15)	تهيئة إرسال التنبيهات وربط حساب البريد	مسؤول النظام (System Administrator)
مراجعة هذا المستند، والتمييز الصريح فيه بين المنفَّذ والمُحاكى والمستقبلي	تقويم الجانب البرمجي من المشروع	المشرف الأكاديمي والممتحن (Supervisor / Examiner)

5. نطاق النظام (System Scope)

يوضّح هذا الفصل حدود النظام الحالية على نحوٍ دقيق: ما هو داخل النطاق ومنفَّذ فعلاً، وما هو داخل النطاق لكنّه محاكاة، وما هو خارج النطاق كلياً في هذه المرحلة.

الجدول 1-5: نطاق وظائف النظام وحالتها الحالية

المجال	الحالة	الوصف
Maintenance Management	IMPLEMENTED	تسجيل عمليات الصيانة والاستبدال مع تكاليفها، وعرض سجلّها كاملاً مرتّباً زمنياً. السجلّات لا تُحذف ولا تُعدَّل.
Component Management	IMPLEMENTED	ستة عشر عنصراً مُعرَّفاً مسبقاً في قاعدة البيانات مع عمرها الاسمي وسعرها وكتالوجها. لا توجد واجهة لإضافة عنصر أو حذفه.
Service-Life Monitoring	IMPLEMENTED	تراكم العمر المستهلك بمعدّل يعتمد على النموذج الحركي مضروباً بالزمن الحقيقي، ويُخزَّن عند انتهاء عملية الإنتاج.
End-of-Life Detection	IMPLEMENTED	كشف بلوغ العمر الاسمي مرّةً واحدة لكل عنصر، مع إيقاف الآلة برمجياً وتثبيت العَلَم FailureDetected في قاعدة البيانات.
Cutting-Force Analysis	IMPLEMENTED	حساب الزوايا وسماكة الرايش وسبع مركّبات للقوى، وتخزين كل عملية إنتاج مكتملة في OperationsProcesses.
& Production History Reports	IMPLEMENTED	صفحة **History** مع مؤشّراتها ومخطّطاتها، وتصدير تقرير PDF لأيّ عملية عبر مكتبة QuestPDF.
Gmail Integration	IMPLEMENTED	إرسال فعلي عبر Gmail API بمصادقة OAuth 2.0 ونطاق gmail.send حصراً. **تنبيه:** واجهة **Connect Gmail** غير موجودة في هذه النسخة؛ الوظيفة متاحة في طبقة الخدمات فقط.
Monitoring Panel	SIMULATED	تسع إشارات مولَّدة برمجياً ونموذج إنتاج، تُعرَض على أربعة مخطّطات حيّة. لا تتضمّن اللوحة أيّ عتبات أو إنذارات، ولا تُخزَّن أيّ من قيمها.
Camera Monitoring	FUTURE	لوحة العرض موجودة في الواجهة بوصفها عنصراً ثابتاً يحمل الحالة **OFFLINE**، ولا ترتبط بأيّ مصدر صورة.

المجال	الحالة	الوصف
Physical Sensors	FUTURE	لا توجد حسّاسات موصولة ولا شيفرة قراءة منها في أيّ موضع من المشروع.
PLC Integration	FUTURE	لا يوجد اتصال بوحدة تحكّم منطقية قابلة للبرمجة؛ الإشارة الوحيدة إلى PLC في المشروع هي نصّ التنويه المعروض على لوحة المراقبة.
Real Machine Control	FUTURE	أزرار **Start** و**Stop** و**End Process** تغيّر حالةً برمجية فقط، ولا تُشغّل محرّكاً ولا تفصل قاطعاً كهربائياً.
Authentication & Roles	FUTURE	لا توجد حسابات مستخدمين ولا صلاحيات؛ سجلّات الصيانة تُنسَب إلى نصٍّ يكتبه المستخدم في الحقل DoneBy.

6. المتطلبات الوظيفية (Functional Requirements)

تُصاغ المتطلبات الآتية من منظور المستخدم: ماذا يستطيع أن يفعل، وماذا يوفّر له النظام. وقد قُسِّمت في ثلاثة جداول بحسب المجال الوظيفي، ورُمِّزت بالبادئة FR لتسهيل الإحالة.

6.1 متطلبات التحليل والإنتاج

الجدول 6-1: المتطلبات الوظيفية لمجال التحليل والإنتاج

الرمز	المتطلب	الحالة
FR-01	يستطيع المستخدم اختيار نوع الخشب من قائمة تُقرأ من قاعدة البيانات، فيعرض النظام خواصّه الميكانيكية (إجهاد الخضوع بالقص، الشغل النوعي، معامل الاحتكاك).	IMPLEMENTED
FR-02	يستطيع المستخدم تنفيذ الأمر **Calculate Forces** فيحسب النظام زوايا القطع وسماكة الرايش وسبع مركّبات للقوى وعزم عمود القطع، ويعرضها في جدولين ومخطّطين.	IMPLEMENTED
FR-03	يستطيع المستخدم بدء عملية إنتاج بالأمر **Start**، وإيقافها مؤقتاً بـ **Stop**، واستئنافها، وإنهائها بـ **End Process**.	IMPLEMENTED

الحالة	المتطلب	الرمز
IMPLEMENTED	يوفّر النظام مؤقّتاً لزمن التشغيل يستثني فترات التوقّف من الزمن المحتسَب.	04-FR
IMPLEMENTED	يخزّن النظام عند إنهاء العملية سجلّاً كاملاً يضمّ شروط الإنتاج وشروط التشغيل والقيم الحرجة ونوع الخشب وزمنَي البدء والانتهاء.	05-FR
IMPLEMENTED	يستطيع المستخدم استعراض سجلّ العمليات السابقة ومؤشّراتها ومخطّطاتها، وفتح تفاصيل أيّ عملية في لوحة جانبية.	06-FR
IMPLEMENTED	يستطيع المستخدم تصدير تقرير PDF لأيّ عملية إنتاج مسجّلة.	07-FR

6.2 متطلبات المراقبة

الجدول 6-2: المتطلبات الوظيفية لمجال المراقبة

الحالة	المتطلب	الرمز
SIMULATED	يعرض النظام لوحة مراقبة تتضمّن أربعة مخطّطات حيّة: عزم عمودَي القطع، معدّل الإنتاج التراكمي، سرعة سيرَي النقل، وعزم أعمدة التغذية الأربعة.	08-FR
SIMULATED	يعرض النظام لكل إشارة قيمتَها اللحظية وقيمتها العظمى ومتوسّطها وحالتها.	09-FR
SIMULATED	يعرض النظام شارة حالة الآلة (RUNNING / PAUSED / STANDBY) وزمن التشغيل ومعدّل التغذية الثابت.	10-FR
SIMULATED	تستجيب لوحة المراقبة لأزرار التشغيل في الصفحة الرئيسة: **Start** يبدأ أو يستأنف، و**Stop** يجمّد القيم من دون فقدانها، و**End Process** يعيد اللوحة إلى حالتها الابتدائية.	11-FR
FUTURE	يعرض النظام لوحة مخصّصة للمراقبة بالكاميرا.	12-FR

6.3 متطلبات الصيانة التنبؤية

الجدول 6-3: المتطلبات الوظيفية لمجال الصيانة التنبؤية

الحالة	المتطلب	الرمز
IMPLEMENTED	يتتبّع النظام العمر المستهلك لكل عنصر من العناصر الستة عشر على حدة، بواحدة	13-FR

الحالة	المتطلب	الرمز
	العنصر نفسه (دورات أو مرّات).	
IMPLEMENTED	يحفظ النظام العمر المتراكم بعد كل عملية إنتاج مكتملة، فيستأنف التشغيل التالي من حيث انتهى السابق.	14-FR
IMPLEMENTED	يعرض النظام لكل عنصر: عمره المستهلك، وعمره الاسمي، والمتبقّي، ونسبة الاستهلاك، وحالته الصحية، وتاريخ آخر صيانة، وسعره.	15-FR
IMPLEMENTED	يصنّف النظام الحالة الصحية إلى Normal / Warning / Critical / Failed وفق عتبتَي 80% و95%.	16-FR
IMPLEMENTED	يستطيع مهندس الصيانة تسجيل عملية صيانة لعنصرٍ محدّد مع اسم المنفّذ والتكاليف الثلاث، مع خيار الإشارة إلى أنّ العنصر استُبدل.	17-FR
IMPLEMENTED	عند الإشارة إلى الاستبدال، يصفّر النظام العمر المستهلك للعنصر ويمسح علامة العطل، مع الإبقاء على سجلّ الصيانة كاملاً.	18-FR
IMPLEMENTED	يستطيع المستخدم استعراض سجلّ الصيانة كاملاً مع تكاليفه ومجموعها.	19-FR
IMPLEMENTED	يكشف النظام بلوغ العنصر عمرَه الاسمي مرّةً واحدة فقط، ويوقف الآلة برمجياً، ويثبّت العطل في قاعدة البيانات.	20-FR
IMPLEMENTED	يعرض النظام تنبيه عطلٍ ملء الشاشة يتضمّن بيانات العنصر وحالة الآلة لحظة العطل والعناصر الأخرى القريبة من العتبة.	21-FR
IMPLEMENTED	يرسل النظام رسالة تنبيه ثنائية اللغة عبر Gmail API مرفقةً بكتالوج العنصر وصورته، من دون تدخّل المستخدم.	22-FR
IMPLEMENTED	إذا تعذّر الإرسال، يحفظ النظام نسخة HTML من التنبيه على القرص ويُظهر سبب الإخفاق، من دون أن يُلغي كشف العطل أو إيقاف الآلة.	23-FR
FUTURE	يستطيع مسؤول النظام ربط حساب Gmail أو فصله من داخل التطبيق.	24-FR

توضيح بخصوص المتطلب 24-FR

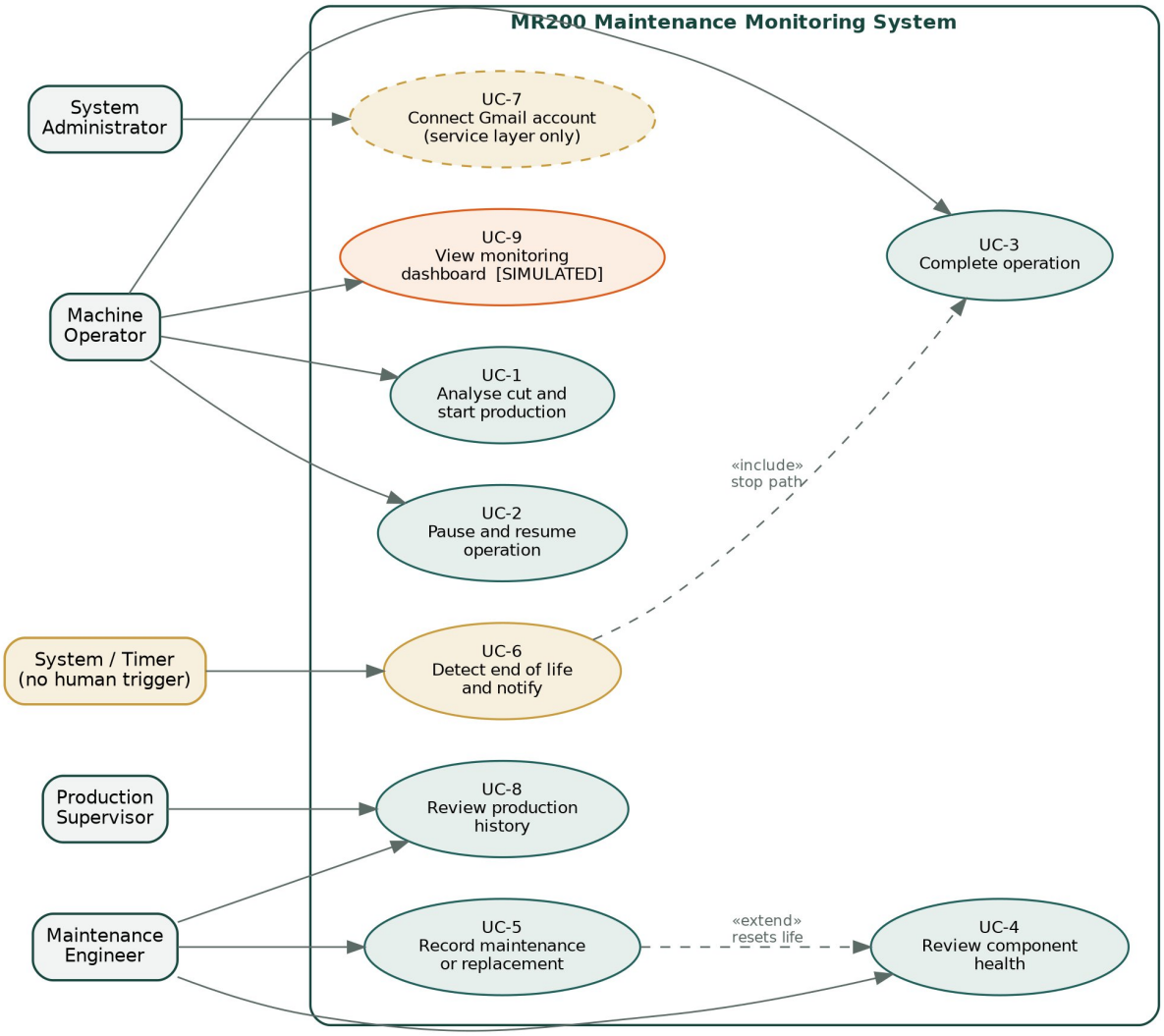
توجد في طبقة الخدمات الدالّتان ConnectGmailAccountAsync و DisconnectGmailAccountAsync وتعملان على نحوٍ

صحيح، غير أنّ هذه النسخة **لا تتضمّن أيّ زرّ أو أمر (Command) في الواجهة يستدعيهما**؛ إذ لا يوجد ConnectGmailCommand ولا DisconnectGmailCommand في MainViewModel، ولا ترد كلمة Gmail في ملف MainWindow.xaml مطلقاً. لذلك صُنِّف المتطلب على أنّه مستقبلي من منظور المستخدم النهائي، مع كون طبقة الخدمة جاهزة.

7. تحليل حالات الاستخدام (Use Case Analysis)

7.1 مخطّط حالات الاستخدام (Use Case Diagram)

يوضّح المخطّط الآتي الفاعلين (Actors) وحالات الاستخدام الرئيسة المستخلَصة من الوظائف المنفَّذة فعلياً في التطبيق. وقد مُيِّزت حالة الاستخدام المعتمدة على المحاكاة بلونٍ مختلف، كما مُيِّزت حالة ربط Gmail بخطٍّ متقطّع للدلالة على أنّها متاحة في طبقة الخدمات دون واجهة.



الشكل 1-7: مخطّط حالات الاستخدام (Use Case Diagram) لنظام مراقبة الصيانة

7.2 وصف حالات الاستخدام (Use Case Descriptions)

تُوصَف في ما يأتي حالات الاستخدام الأكثر أهمية وصفاً تفصيلياً، مع الاكتفاء بالإشارة إلى الحالات الثانوية.

الجدول 1-7: حالة الاستخدام UC-4 — مراجعة الحالة الصحية للمكوّنات

UC-4: مراجعة الحالة الصحية للمكوّنات (Review Component Health)	حالة الاستخدام
مهندس الصيانة (Maintenance Engineer)	الفاعل
الاطّلاع على نسبة العمر المستهلك لكل عنصر من العناصر الستة عشر، وتحديد ما يقترب منها من نهاية عمره	الغرض
تشغيل التطبيق واتصاله بقاعدة البيانات؛ لا يُشترط أن تكون الآلة قيد التشغيل	الشروط المسبقة
1) ينتقل المستخدم إلى صفحة **Maintenance**. 2) يستدعي النظام LoadMaintenance() التي تقرأ العناصر وسجلّ الصيانة من قاعدة البيانات. 3) إن كانت هناك عملية إنتاج جارية، يعرض النظام العدّادات الحيّة من الذاكرة بدلاً من القيم المخزَّنة، فتظهر الزيادة اللحظية في الاستهلاك. 4) يعرض النظام جدولاً من ستة عشر سطراً يضمّ لكل عنصر: العمر المستهلك والاسمي والمتبقّي ونسبة الاستهلاك والحالة الصحية وتاريخ آخر صيانة والسعر. 5) يعرض النظام بطاقات إحصائية: عدد العناصر المراقَبة، وعدد ما هو في حالة Warning وCritical وFailed، وأفضل العناصر حالاً وأسوأها.	المسار الرئيس
في حال إخفاق القراءة من قاعدة البيانات، يعرض النظام رسالة في حقل MaintenanceStatusMessage ولا يُسقط التطبيق	المسار البديل
صورة كاملة ومحدَّثة عن الحالة الصحية للآلة تُمكّن من ترتيب أولويات الصيانة	النتيجة

الجدول 2-7: حالة الاستخدام UC-5 — تسجيل عملية صيانة أو استبدال

UC-5: تسجيل عملية صيانة أو استبدال (Record Maintenance or Replacement)	حالة الاستخدام
مهندس الصيانة (Maintenance Engineer)	الفاعل
توثيق عمل صيانةٍ نُفِّذ على عنصر، وتصفير عمره المستهلك إن كان قد استُبدل	الغرض
عرض صفحة **Maintenance** وتحديد العنصر المقصود	الشروط المسبقة
1) يضغط المستخدم الزرّ **Maintain** في سطر العنصر. 2) تُفتح لوحة جانبية مملوءة مسبقاً باسم العنصر وموقعه وسعره الكتالوجي.	المسار الرئيس

	3) يُدخل المستخدم اسم المنفّذ (`DoneBy`) وتكلفة الخدمة وسعر العنصر وتكلفة التوقّف. 4) يحدّد المستخدم ما إذا كان العنصر قد استُبدل فعلياً. 5) يفتح النظام معاملة (Transaction) ويُدرج سجلّ الصيانة، وإن كان العنصر مستبدَلاً يستدعي ResetLifeAfterReplacement() التي تصفّر ConsumedLife وتمسح FailureDetected، ثم يُثبّت المعاملة. 6) يُبطل النظام الجلسة القائمة في الذاكرة عبر InvalidateSession() كي يعيد التشغيل التالي تحميل القيم المصحّحة. 7) تُعاد تعبئة الشاشة بالبيانات الجديدة.
المسار البديل	أ) إذا تُرك حقل اسم المنفّذ فارغاً، يبقى زرّ الحفظ معطَّلاً وتظهر رسالة تنبيه. ب) إذا كانت إحدى قيم التكلفة غير رقمية، تظهر رسالة "**Costs must be numeric values**" ولا يُحفظ شيء. ج) في حال إخفاق المعاملة، تُلغى بالكامل (Rollback) ولا يُكتب سجلّ ناقص.
النتيجة	سجلّ صيانة دائم لا يُحذف، وعدّاد عمرٍ مصحَّح، وحالة صحية محدَّثة للعنصر

الجدول 3-7: حالة الاستخدام UC-6 — كشف نهاية العمر والإشعار

حالة الاستخدام	**UC-6:** كشف بلوغ نهاية العمر والإشعار (Detect End of Life and Notify)
الفاعل	النظام نفسه (System / Timer) — لا يبدأها مستخدم
الغرض	منع تشغيل الآلة بعنصرٍ استنفد عمره الاسمي، وإبلاغ المسؤول فوراً
الشروط المسبقة	وجود عملية إنتاج جارية، وبلوغ العمر المتراكم لأحد العناصر عمرَه الاسمي
المسار الرئيس	1) تكتشف DetectEndOfLife() أوّل عنصرٍ بلغ DefaultLife. 2) يُثبّت العَلَم MarkFailed() **قبل** إطلاق الحدث، ثم يُوقف التراكم. 3) يُطلَق الحدث ElementFailed فيلتقطه MainViewModel. 4) يوقف النظام الآلة عبر مسار StopMachine() القائم نفسه. 5) يحفظ النظام العمر المتراكم وعَلَم العطل في قاعدة البيانات فوراً. 6) يلتقط النظام صورةً عن حالة الآلة (CaptureMachineState()).

7) يُعرَض تنبيه ملء الشاشة. 8) تُجمَع في الخلفية بيانات الصيانة خلال الثلاثين يوماً الماضية، ويُبنى نصّ الرسالة ثنائي اللغة ويُرسَل عبر Gmail API. 9) تُحدَّث حالة الإرسال على التنبيه المعروض.	
أ) إذا لم يكن حساب البريد مربوطاً، تُحفَظ نسخة HTML من التنبيه في مجلّد على سطح المكتب ويُعرَض السبب. ب) إذا أخفق الإرسال لأيّ سبب، **لا يُلغى كشف العطل ولا إيقاف الآلة**؛ الإخفاق يُبلَّغ فقط.	المسار البديل
آلة متوقّفة، وعطل مثبَّت في قاعدة البيانات لا يتكرّر بعد إعادة التشغيل، ورسالة تنبيه تتضمّن كتالوج العنصر وصورته	النتيجة

الجدول 4-7: حالة الاستخدام UC-1 — تحليل القطع وبدء الإنتاج

UC-1: تحليل القطع وبدء عملية إنتاج (Analyse Cut and Start Production)	حالة الاستخدام
مشغّل الآلة (Machine Operator)	الفاعل
حساب قوى القطع لنوع الخشب المختار ثم تشغيل الآلة	الغرض
توفّر أنواع الخشب في قاعدة البيانات	الشروط المسبقة
1) يختار المستخدم نوع الخشب فتُحمَّل خواصّه. 2) ينفّذ **Calculate Forces** فتُحسَب سرعة عمود القطع بالدورة في الدقيقة والزوايا والقوى. 3) يضغط **Start**، فيبدأ مؤقّت الآلة، وتبدأ لوحة المراقبة **[SIMULATED]**، ويبدأ تتبّع العمر التشغيلي بتمرير سرعة عمود القطع المحسوبة إلى BeginRun. 4) تُقرأ العناصر الستة عشر وعدّاداتها الدائمة من قاعدة البيانات **مرّةً واحدة**.	المسار الرئيس
إذا لم يُنفَّذ **Calculate Forces**، يبقى زرّ **Start** معطَّلاً	المسار البديل
آلة في حالة تشغيل، وعدّادات عمرٍ تتراكم بمعدّلٍ يوافق سرعة الأعمدة الفعلية المحسوبة	النتيجة

أمّا حالات الاستخدام الأخرى — **UC–2** (الإيقاف المؤقّت والاستئناف)، و**UC–3** (إنهاء العملية وحفظها)، و**UC–8** (مراجعة سجلّ الإنتاج وتصدير تقرير PDF)، و**UC–9** (استعراض لوحة المراقبة) — فقد استُغني عن تفصيلها اكتفاءً بشرح مساراتها في الفصول 9 و10 و17.

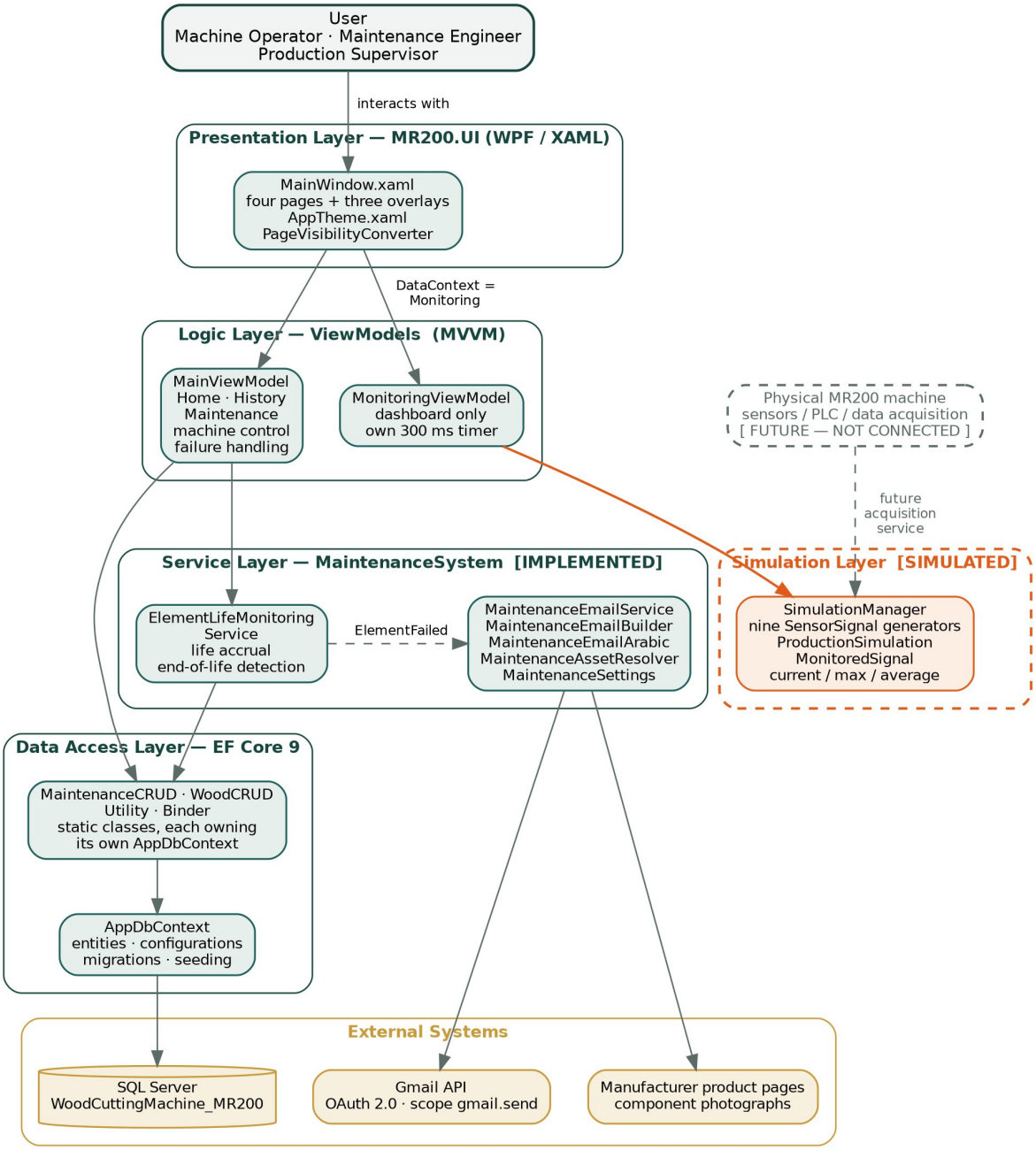
8. معمارية النظام (System Architecture)

بُني النظام وفق نمط **MVVM (Model – View – ViewModel)**، وهو النمط المعياري لتطبيقات WPF.

8.1 شرح موجز للمفاهيم

- **العرض (View):** ملفّ XAML يصف ما يراه المستخدم من عناصر ومخطّطات وجداول، ولا يتضمّن منطقاً حسابياً.
- **نموذج العرض (ViewModel):** صنف بلغة C# يحتفظ بالحالة المعروضة وبالأوامر (Commands)، ويُبلّغ الواجهةَ بكل تغيير عبر الآلية INotifyPropertyChanged. هو حلقة الوصل بين الواجهة ومنطق العمل.
- **النموذج (Model):** الكيانات التي تمثّل معطيات المجال، مثل Element وMaintenance وWoodType.
- **الأمر (Command):** كائن يربط ضغطة زرّ في الواجهة بدالّةٍ في نموذج العرض، ويحدّد متى يكون الزرّ مفعَّلاً. النظام يستعمل صنفاً خاصاً باسم RelayCommand.
- **الخدمة (Service):** صنف مستقلّ يؤدّي مهمّة محدّدة خارج نموذج العرض، مثل ElementLifeMonitoringService لتتبّع العمر وMaintenanceEmailService لإرسال التنبيه.

8.2 المخطّط المعماري



الشكل 1–8: معمارية النظام (System Architecture) وعلاقة طبقاته بالأنظمة الخارجية

8.3 خصائص معمارية مهمّة

ثمّة أربع خصائص في هذه المعمارية ينبغي إدراكها لفهم سلوك النظام:

1. **فصل تامّ بين المحاكاة والصيانة.** لا يشترك نظام المحاكاة ونظام الصيانة في أيّ معطى؛ فالصنف SimulationManager لا يحمل أيّ مرجع إلى عنصرٍ فيزيائي، والصنف ElementLifeMonitoringService

لا يقرأ أيّ إشارة مُحاكاة. وهذا يعني أنّ القيم المعروضة على لوحة المراقبة **لا تدخل في حساب العمر التشغيلي إطلاقاً**.

2. **مؤقّتان منفصلان.** يمتلك كلٌّ من MainViewModel وMonitoringViewModel مؤقّتَه الخاص (`DispatcherTimer`) بفاصل 300 ميلي ثانية. الأول يقود تراكم العمر التشغيلي، والثاني يقود المحاكاة.
3. **لا حقن تبعيات (No Dependency Injection).** لا يوجد في المشروع حاوية تبعيات؛ إذ يُنشأ MainViewModel تصريحياً داخل ملف XAML نفسه، وتُنشأ الخدمات إمّا بوصفها أصنافاً ساكنة (Static) وإمّا بالإنشاء المباشر.
4. **وصول ساكن إلى البيانات.** لا توجد مستودعات (Repositories) ولا واجهات تجريدية؛ فكل صنف وصولٍ إلى البيانات — MaintenanceCRUD وWoodCRUD وUtility وBinder — صنف ساكن ينشئ سياق AppDbContext خاصاً به ويتخلّص منه عند انتهاء العملية.

8.4 التنقّل بين الصفحات (Navigation)

لا يستعمل النظام إطار تنقّلٍ جاهزاً. تحتفظ الخاصية CurrentPage في MainViewModel باسم الصفحة الحالية بوصفه نصّاً، وكل صفحة عبارة عن Grid تُضبَط رؤيتُه عبر المحوّل PageVisibilityConverter بمقارنة اسمها بالقيمة الحالية. وعليه فإنّ الصفحات الأربع محمَّلة في الذاكرة دائماً ولا يتغيّر سوى إظهارها وإخفائها.

الجدول 1–8: صفحات التطبيق ومفاتيح التنقّل إليها

ملاحظة	مفتاح الصفحة	التسمية في الشريط الجانبي
صفحة التحليل والتحكّم بالآلة	Home	Home
التسمية تختلف عن المفتاح. يعرض شريط العنوان قيمة CurrentPage مباشرةً، فتظهر فيه كلمة Charts عند فتح صفحة المراقبة	Charts	Monitoring
الانتقال إليها يستدعي LoadHistory() لتحديث البيانات	History	History
الانتقال إليها يستدعي LoadMaintenance()	Maintenance	Maintenance

9. لوحة المراقبة (Monitoring Panel)

تصنيف الفصل

جميع القيم العددية المعروضة في لوحة المراقبة **مولَّدة برمجياً** عبر الصنف SimulationManager. ولا يشارك في إنتاجها أيّ حسّاس أو مرمّز دوران (Encoder) أو PLC أو ناقل حقلي (Fieldbus).

وتُصرّح اللوحة بذلك عن نفسها؛ إذ يظهر أسفل عنوانها في الواجهة النصّ: "Live operator view — all sensor values are simulated until PLC integration".

9.1 الغرض من اللوحة

تؤدّي لوحة المراقبة وظيفتين في المرحلة الحالية: أولاهما **عرض تصوّر تجربة المشغّل** المستهدفة في النسخة الموصولة بالعتاد، وثانيتهما **إثبات جاهزية البنية البرمجية** لاستقبال قيمٍ حقيقية؛ إذ صُمّمت نقطة الوصل ضيّقةً على نحوٍ متعمَّد بحيث يكفي تغذية الكائنات MonitoredSignal بقيمٍ مقروءة من العتاد ليصبح العرض حقيقياً من دون تعديل أيّ مخطّط أو محور أو ملف XAML.

9.2 مناطق اللوحة

الجدول 9-1: مناطق لوحة المراقبة ومحتوياتها

الحالة	المحتوى	المنطقة
SIMULATED	العنوان، وتنويه المحاكاة، وزمن التشغيل، وشارة الحالة الملوّنة	ترويسة اللوحة
SIMULATED	مخطّط خطّي بمنحنيين، ومحور شاقولي ثابت من 0 إلى 140 نيوتن·متر، وإحصاءات لكل عمود	عزم عمودَي القطع (Cutting Shaft Torque)
SIMULATED	مخطّط تراكمي بمساحة مظلّلة، ومعدّل لحظي، وإجمالي، ومتوسّط	معدّل الإنتاج (Production Rate)
SIMULATED	مخطّط بمنحنيَي دخل وخرج، ومحور شاقولي مركزه معدّل التغذية ±4	سرعة سيور النقل (Conveyor Belt Speed)

الحالة	المحتوى	المنطقة
SIMULATED	مخطّط بأربعة منحنيات، ومحور شاقولي ثابت من 0 إلى 60 نيوتن·متر	عزم أعمدة التغذية (Feed Shaft Torque)
FUTURE	لوحة ثابتة تحمل النصّ **OFFLINE** وتوضيحاً بأنّ المراقبة ستُفعَّل لاحقاً	المراقبة بالكاميرا (Camera Monitoring)
SIMULATED	الحالة الحالية، وزمن التشغيل، ومعدّل التغذية، وإجمالي الإنتاج، والمعدّل اللحظي	حالة الآلة (Machine Status)

9.3 مصدر كل قيمة معروضة

يُفصّل الجدول الآتي مصدر كل قيمة على اللوحة، وهو الجدول الأهمّ في هذا الفصل من حيث الدقّة الأكاديمية.

الجدول 2-9: مصدر كل قيمة معروضة على لوحة المراقبة

التصنيف	مصدرها في الشيفرة	القيمة المعروضة
SIMULATED	MonitoredSignal.Current الناتجة عن SensorSignal.Tick(dt)	عزم أعمدة القطع والتغذية، وسرعة السيور
SIMULATED	ProductionSimulation — نموذج رياضي بحت	معدّل الإنتاج وإجماليه ومتوسّطه
SIMULATED	تراكم إحصائي داخل MonitoredSignal	القيمة العظمى والمتوسّط لكل إشارة
SIMULATED	ElapsedSeconds += 0.30 عند كل نبضة — **عدّ نبضات لا ساعة جدارية**	زمن التشغيل المعروض على اللوحة
IMPLEMENTED	SimulationManager.State — حالة برمجية حقيقية يضبطها المستخدم بالأزرار	شارة الحالة RUNNING / PAUSED / STANDBY
IMPLEMENTED	المفتاح FeedVelocity من ملف App.config — قيمة إعدادات حقيقية	معدّل التغذية الثابت المعروض
SIMULATED	SensorSignal.Enabled وهي دائماً true	حالة "Online" بجانب كل إشارة

التصنيف	مصدرها في الشيفرة	القيمة المعروضة
FUTURE	لا مصدر — عنصر ثابت في XAML	لوحة الكاميرا

9.4 غياب العتبات والإنذارات

نقطة جوهرية للدقّة الأكاديمية

لا تتضمّن لوحة المراقبة أيّ عتبات (Thresholds) ولا تُطلق أيّ إنذار (Alarm). فالحالة المعروضة بجانب كل إشارة تُشتقّ من حالة الآلة (تعمل / متوقّفة مؤقّتاً / بانتظار) لا من قيمة الإشارة نفسها.

أمّا الحالة Fault المعرَّفة في الشيفرة فهي **غير قابلة للبلوغ** في النسخة الحالية، لأنّ لا موضع في المشروع يضبط SensorSignal.Enabled = false.

كلّ منطق العتبات والإنذار في هذا النظام يقع في منظومة الصيانة التنبؤية لا في لوحة المراقبة، ويعتمد على العتبتين PredictiveMaintenanceWarningThreshold (80%) و PredictiveMaintenanceCriticalThreshold (95%).

9.5 سلوك المخطّطات

تُنشأ سلاسل المخطّطات (Series) مرّةً واحدة عند إقلاع نموذج العرض، ولا يتغيّر بعدها سوى محتوى مخازن النقاط، ما يجعل التحديث تدريجياً لا إعادةَ بناءٍ كاملة. ولكل مخطّط محاوره الخاصة به — إذ إنّ مشاركة كائن محورٍ واحد بين مخطّطين تُسبّب خللاً في العرض في مكتبة LiveCharts. ويُحدَّد المحور الأفقي بنافذة زمنية منزلقة عرضها عشرون ثانية تتقدّم مع كل نبضة، ويُحفَظ في كل مخزنٍ مئةٌ وأربعون نقطة كحدٍّ أقصى. أمّا المحاور الشاقولية فثابتة المدى عمداً، منعاً لاهتزاز التخطيط الناتج عن إعادة ترتيب البطاقات عند التحجيم التلقائي.

10. نظام المحاكاة (Simulation System)

يُخصَّص هذا الفصل لتوصيف نظام المحاكاة توصيفاً كاملاً، لأنّه المكوّن الذي يَسهُل الالتباس في شأنه أكثر من غيره.

10.1 ما الذي يُحاكى بالضبط

يولّد النظام تسع إشارات مستقلّة إضافةً إلى نموذج إنتاج: عمودا قطع، وأربعة أعمدة تغذية، وسيرا نقل (دخل وخرج)، ثم معدّل الإنتاج. وجميعها تُنشأ في بانية الصنف SimulationManager.

10.2 آلية توليد القيم

لا تُولَّد القيم بوصفها أعداداً عشوائية مستقلّة عند كل نبضة، بل تتبع **عملية ارتداد إلى المتوسّط (Mean Reverting Process)** من نوع Ornstein–Uhlenbeck مضافاً إليها قفزات حملٍ عابرة تتلاشى أُسّياً. وهذا يمنح الإشارة عطالةً وسلوكاً بصرياً قريباً من سلوك حسّاس صناعي حقيقي:

```
value  +=  theta * (mean − value) * dt   +   sigma * sqrt(dt) * N(0,1)
value  clamped to [ min , max ]


if  rng.NextDouble() < spikeChancePerSecond * dt :
        spike += spikeMagnitude * ( 0.5 + U(0,1) )
spike  *=  exp( −2.5 * dt )                    // exponential decay


reading = value + spike ,  clamped to [ min , max * 1.35 ]
```

حيث theta سرعة الارتداد إلى القيمة الوسطى، وsigma شدّة التقلّب، وdt الفاصل الزمني بالثواني. ويُولَّد المتغيّر العشوائي الطبيعي N(0,1) بطريقة Box–Muller. وتُنشَأ كل إشارة ببذرةٍ عددية ثابتة (Fixed Seed)، ما يجعل سلوك المحاكاة **قابلاً لإعادة الإنتاج** في كل تشغيل — وهي خاصية مقصودة تخدم العرض والتوثيق.

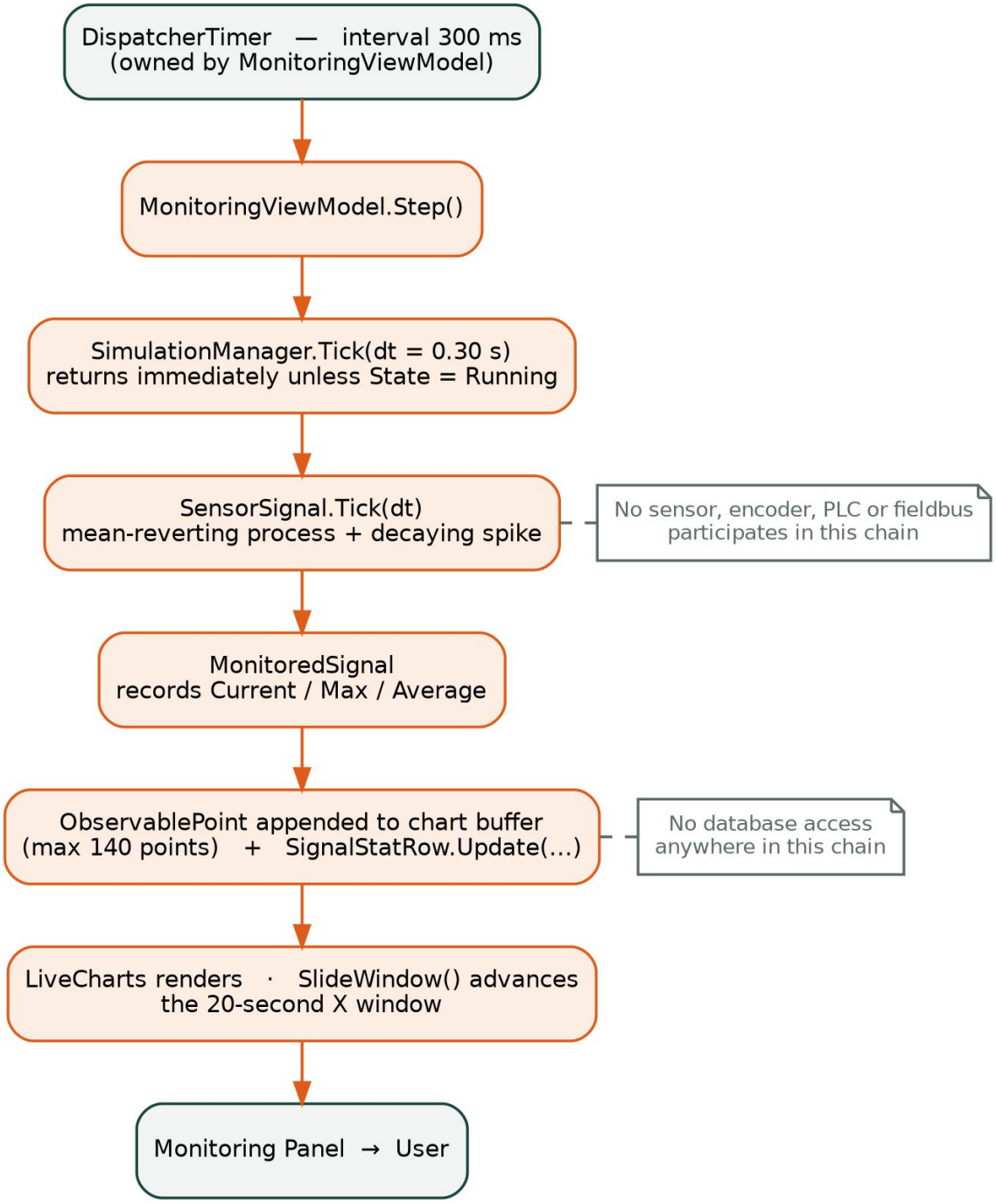
10.3 بارامترات الإشارات

الجدول 1–10: بارامترات إشارات المحاكاة كما وردت في الشيفرة

البذرة	احتمال القفزة/ثا	الحدّ الأعلى	الحدّ الأدنى	σ	θ	المتوسّط	الإشارة
101	0.07	90	30	6.5	0.9	55 N·m	Cutting Shaft A
202	0.06	95	32	7.0	0.8	58 N·m	Cutting Shaft B
311	0.05	40	12	3.0	1.0	22 N·m	1 Feed Shaft
322	0.05	44	14	3.4	0.9	25 N·m	2 Feed Shaft
333	0.04	38	11	2.8	1.1	20 N·m	3 Feed Shaft
344	0.05	42	13	3.2	0.95	24 N·m	4 Feed Shaft
411	0.015	1.2 + F	1.2 − F	0.25	1.4	F	Input Conveyor
422	0.015	1.4 + F	1.0 − F	0.28	1.3	1.02 × F	Output Conveyor
511	0.02	%115	%75	%6 من المتوسّط	0.6	0.2 ÷ F	Production Rate

حيث F هو معدّل التغذية المقروء من المفتاح FeedVelocity في ملف App.config وقيمته 11 متراً في الدقيقة. أمّا طول القطعة المنتجة المستعمَل في اشتقاق معدّل الإنتاج الاسمي فمُثبَّت في الشيفرة بقيمة 0.2 متر، ما يعطي معدّلاً اسمياً مقداره 55 شريحة في الدقيقة.

10.4 تدفّق بيانات المحاكاة



الشكل 10–1: تدفّق بيانات المحاكاة (Simulation Data Flow) من المؤقّت إلى المستخدم

يُلاحَظ في المخطّط أعلاه أمران جوهريان: أنّ السلسلة **لا تمرّ بأيّ حسّاس**، وأنّها **لا تلمس قاعدة البيانات في أيّ خطوة**. فقيم المحاكاة تُولَّد وتُعرَض ثم تُنسى عند إنهاء العملية.

10.5 المؤقّت وتواتر التحديث

الجدول 2–10: البارامترات الزمنية لنظام المحاكاة

البارامتر	القيمة	الأثر
فاصل المؤقّت	300 ms	DispatcherTimer داخل MonitoringViewModel يعمل على خيط الواجهة
الخطوة الزمنية Dt	0.30 s	تُمرَّر إلى SimulationManager.Tick(dt) وتُستعمل في معادلات التوليد
نافذة العرض	20 s	عرض المحور الأفقي المنزلق
الحدّ الأقصى للنقاط	140	يُحذَف أقدم نقطة عند تجاوز الحدّ
زمن حركة المخطّط	320 ms	لجعل الحركة انسيابية

10.6 تحكّم المستخدم بالمحاكاة ودورة حياتها

تُدار المحاكاة من أزرار الصفحة الرئيسة نفسها التي تدير الآلة، وليس من داخل لوحة المراقبة:

- **Start** → SimulationManager.Start() يضبط الحالة على Running ويشغّل المؤقّت. إن كانت اللوحة متوقّفة مؤقّتاً فهي **تستأنف** من قيمها الحالية ولا تبدأ من الصفر.
- **Stop** → Pause() يوقف المؤقّت ويضبط الحالة على Paused. **تُجمَّد جميع القيم والمخطّطات والإحصاءات ولا يُفقَد شيء.**
- **End Process** → Reset() يمسح مخازن النقاط ويصفّر الإحصاءات وزمن التشغيل ويعيد النافذة الزمنية إلى موضعها الابتدائي والحالة إلى Standby.

10.7 محاكاة إضافية في الصفحة الرئيسة

> **ملاحظة دقيقة مستخلَصة من الشيفرة**
>
> إلى جانب نظام المحاكاة الموصوف أعلاه، تتضمّن **الصفحة الرئيسة (Home)** محاكاةً ثانية مستقلّة تماماً، مكتوبة مباشرةً داخل

الدالّة Timer_Tick في MainViewModel:

منحنى عزمٍ يُولَّد بالعلاقة torque = 50 + 10·sin(t) + noise، ومنحنى إنتاجٍ يُولَّد بالعلاقة elapsed·(11/3600).

هذه المحاكاة لا صلة لها بالصنف SimulationManager، وهي أيضاً **[SIMULATED]**. وقد ذُكرت هنا لأنّ أيّ عملٍ مستقبلي يستبدل المحاكاة ببيانات حقيقية سيتعيّن عليه معالجة الموضعين معاً لا موضعاً واحداً.

11. إدارة الصيانة (Maintenance Management)

تمثّل إدارة الصيانة الجانب الأكثر نضجاً في النظام؛ فهي منفَّذة بالكامل وتعمل على بياناتٍ حقيقية دائمة.

[IMPLEMENTED]

11.1 بنية سجلّ الصيانة

تُمثَّل كل عملية صيانة بسجلٍّ واحد في الجدول Maintenance يضمّ الحقول الآتية:

- DoneBy — اسم منفّذ العمل، حقل نصّي إلزامي لا يُقبَل فارغاً.
- Cost — تكلفة الخدمة أو اليد العاملة.
- ElementPrice — سعر العنصر المستبدَل.
- StoppingTimeCost — التكلفة الناجمة عن توقّف الآلة.
- MaintenanceDate — تاريخ العملية ووقتها، وعليه فهرس (Index) لتسريع الترتيب الزمني.
- ElementId — مفتاح خارجي يربط السجلّ بالعنصر الفيزيائي المعني.

أمّا التكلفة الإجمالية TotalCost فهي **خاصية محسوبة برمجياً** بجمع الحقول الثلاثة، وليست عموداً في قاعدة البيانات؛ إذ استُبعدت صراحةً من التخطيط عبر التعليمة builder.Ignore(x => x.TotalCost). وهذا اختيار تصميمي يضمن أنّ الإجمالي لا يمكن أن يتعارض مع مكوّناته.

11.2 تفاعل المستخدم مع سجلّات الصيانة

يجري التفاعل عبر لوحة جانبية (Drawer) تُفتَح بالضغط على الزرّ **Maintain** في سطر العنصر المعني ضمن جدول الحالة الصحية. وتُملأ اللوحة مسبقاً باسم العنصر وموقعه وسعره الكتالوجي، فلا يبقى على المستخدم سوى إدخال اسم المنفّذ والتكاليف.

يشترط النظام أمرين قبل الحفظ: ألّا يكون حقل اسم المنفّذ فارغاً — وإلّا بقي زرّ الحفظ معطَّلاً — وأن تكون قيم التكلفة رقمية، وإلّا ظهرت رسالة خطأ ولم يُحفَظ شيء.

11.3 الترابط بين الصيانة والعمر التشغيلي

تتضمّن لوحة تسجيل الصيانة خانة اختيار تحدّد ما إذا كان العنصر قد **استُبدل فعلياً**. وهي مفعَّلة افتراضياً، لأنّ الحالة الغالبة في هذه الآلة هي استبدال المحمل أو السير لا إصلاحه.

ما الذي يحدث عند تأشير الاستبدال

تُنفَّذ الخطوات الآتية جميعُها ضمن **معاملة واحدة (Transaction)** فإمّا أن تنجح كلّها أو تُلغى كلّها:

1) يُدرَج سجلّ الصيانة الجديد في الجدول Maintenance.

2) يُستدعى التابع ()ResetLifeAfterReplacement فيضبط ConsumedLife = 0 ويمسح العَلَم FailureDetected، فيصبح العنصر مؤهّلاً لإطلاق تنبيه عطلٍ جديد مستقبلاً.

3) تُثبَّت المعاملة (Commit).

4) تُبطَل الجلسة القائمة في الذاكرة عبر ()InvalidateSession منعاً لكتابة عدّاداتٍ قديمة فوق القيم المصحَّحة.

سجلّات الصيانة السابقة تبقى كما هي ولا يُحذف منها شيء؛ فالعنصر يستأنف عمره من الصفر بينما يحتفظ بتاريخه كاملاً.

11.4 عرض سجلّ الصيانة

تعرض شاشة الصيانة جدولاً يضمّ جميع عمليات الصيانة مرتّبةً من الأحدث إلى الأقدم، ويبيّن لكل عملية: اسم العنصر ونوعه وموقعه على الآلة، وتاريخ العملية، ومنفّذها، وتكاليفها الثلاث، وإجماليها. وتُعرض فوق الجدول بطاقتان إحصائيتان: عدد عمليات الصيانة المسجَّلة، ومجموع تكاليفها على مستوى الآلة كاملةً.

12. إدارة العناصر والمكوّنات (Component / Element Management)

يميّز النظام بين مستويين من التمثيل: **العنصر الفيزيائي** الذي يشغل موقعاً محدّداً على الآلة، و**البيانات الكتالوجية** التي تصف نوعه. وتربط بينهما علاقة واحد إلى واحد (One-to-One) صارمة.

12.1 العنصر الفيزيائي (Element)

يحمل الكيان Element هوية العنصر بوصفه قطعةً مركّبة في مكانٍ بعينه:

- Id — المفتاح الأساسي.
- Description — وصف نصّي لموضع العنصر، مثل: "Feeding shaft 1 (first from right) — bearing at the end of the shaft".
- OrderOfElementAtMachine — رقم الموقع على الآلة من 1 إلى 16، وعليه **فهرس فريد (Unique Index)** يضمن ألّا يشغل عنصران الموقع نفسه. وهو الرقم الذي يستدلّ به الفنّي على القطعة فيزيائياً.
- ConsumedLife — العمر المستهلك التراكمي بواحدة العنصر نفسه. قيمة **دائمة** لا تُصفَّر عند إغلاق التطبيق.
- FailureDetected — علم منطقي يُثبَّت مرّةً واحدة عند بلوغ العنصر عمره الاسمي، ويمنع تكرار التنبيه حتى بعد إعادة تشغيل التطبيق.
- ImageOfElementAtMachine — حقل مخصّص لصورة تبيّن موضع العنصر داخل الآلة. **هذا الحقل فارغ في جميع السجلّات حالياً** وقد تُرك عمداً لمرحلةٍ لاحقة. **[FUTURE]**

12.2 البيانات الكتالوجية (ElementInformation)

يحمل الكيان ElementInformation وصف النوع كما يرد في كتالوج المُصنّع:

- Name — اسم النوع، مثل Bearing 16009 أو A46 V-Belt.
- DefaultLife — العمر الاسمي المتوقّع بواحدة العنصر.

- LifeUnit — واحدة العمر، وتُخزَّن **نصّاً** لا رقماً عبر محوّل قيم، وتأخذ إحدى القيمتين Revolution أو Pass.
- Price — سعر العنصر، يُستعمل في التعبئة المسبقة للوحة الصيانة وفي رسالة التنبيه.
- Image — مرجع صورة العنصر.
- Catalog — اسم ملف الكتالوج الفنّي المرفق برسالة التنبيه.

> **لماذا علاقة واحد إلى واحد لا واحد إلى متعدّد؟**
>
> توجد في قاعدة البيانات **ستة عشر سجلاً** في الجدول ElementsInformation لا أربعة، رغم أنّ الأنواع أربعة فقط. والسبب أنّ العلاقة صُمّمت 1:1 ويفرضها مفتاح خارجي فريد.
>
> الفائدة الهندسية: يمكن إعادة تقدير العمر الاسمي لمحملٍ بعينه، أو تعديل سعره، أو إسناد صورة موضعٍ خاصة به، من دون التأثير في نظرائه المطابقين له نوعاً.
>
> المقابل: التعديل على مستوى النوع كلّه — كتصحيح سعر جميع محامل 16009 — يستلزم تعديل عدّة سجلّات لا سجلاً واحداً.

12.3 العناصر الستة عشر المراقَبة

الجدول 1-12: العناصر الفيزيائية المراقَبة في الآلة

السعر	الواحدة	العمر الاسمي	الموضع على الآلة	النوع	الموقع
47	Revolution	4,492,100,000	عمود التغذية 1 — المحمل الطرفي	16009 Bearing	1
47	Revolution	4,492,100,000	عمود التغذية 1 — المحمل المجاور	16009 Bearing	2
47	Revolution	4,492,100,000	عمود التغذية 2 — المحمل الطرفي	16009 Bearing	3
47	Revolution	4,492,100,000	عمود التغذية 2 — المحمل المجاور	16009 Bearing	4
47	Revolution	4,492,100,000	عمود التغذية 3 — المحمل الطرفي	16009 Bearing	5
47	Revolution	4,492,100,000	عمود التغذية 3 — المحمل المجاور	16009 Bearing	6
47	Revolution	4,492,100,000	عمود التغذية 4 — المحمل الطرفي	16009 Bearing	7
47	Revolution	4,492,100,000	عمود التغذية 4 — المحمل المجاور	16009 Bearing	8

السعر	الواحدة	العمر الاسمي	الموضع على الآلة	النوع	الموقع
31	Revolution	2,197,000,000	عمود القطع العلوي	16007 Bearing	9
36	Revolution	2,628,100,000	عمود القطع العلوي	16008 Bearing	10
31	Revolution	2,197,000,000	عمود القطع السفلي	16007 Bearing	11
36	Revolution	2,628,100,000	عمود القطع السفلي	16008 Bearing	12
10	Pass	288,000,000	سير إدارة عمود التغذية 1	A46 V-Belt	13
10	Pass	288,000,000	سير إدارة عمود التغذية 2	A46 V-Belt	14
10	Pass	288,000,000	سير إدارة عمود التغذية 3	A46 V-Belt	15
10	Pass	288,000,000	سير إدارة عمود التغذية 4	A46 V-Belt	16

تُزرَع هذه السجلّات في قاعدة البيانات عند أوّل تشغيل للتطبيق عبر الصنف MaintenanceSeedData، وبشرطٍ صريح ألّا يكون الجدول Elements يحوي بيانات، فلا تتكرّر الزراعة عند التشغيلات اللاحقة.

12.4 الأصول المرفقة بالعناصر

الجدول 2-12: الأصول الرقمية المرتبطة بالعناصر

الحالة	الموضع	الأصل
IMPLEMENTED	أربعة ملفات PDF من SKF تُنشَر مع التطبيق في المجلّد MaintenanceAssets\Catalogs، ويُشار إليها باسم الملف فقط في العمود Catalog	كتالوجات المُصنّع
IMPLEMENTED	روابط صفحات منتجات لدى مصنّعين وموزّعين، تُحلَّل عند الإرسال لاستخراج الصورة من وسوم Open Graph	صور العناصر
FUTURE	الحقل ImageOfElementAtMachine فارغ في جميع السجلّات	صور مواضع العناصر على الآلة

ملاحظة عملية بشأن الصور

يبحث النظام أوّلاً عن نسخة محلّية من الصورة في المجلّد MaintenanceAssets\Images، ولا يلجأ إلى الإنترنت إلّا عند عدم وجودها. وهذا المجلّد **لا يحوي حالياً سوى ملف توضيحي**، أي أنّ الصور الأربع تُجلَب عبر الشبكة عند كل إرسال.

وقد تبيّن أنّ موقعين من المواقع الأربعة يرفضان الطلبات الآلية، فلا تُجلَب صورتاهما. ووضع أربعة ملفات صور في المجلّد المذكور يكفي لجعل جميع الصور متاحة من دون اعتمادٍ على الشبكة.

13. مراقبة العمر التشغيلي (Service-Life Monitoring)

هذا الفصل هو جوهر المنظومة التنبؤية، وهو المكان الذي تلتقي فيه الميكانيك بالبرمجيات في هذا المشروع.

[IMPLEMENTED]

13.1 المبدأ الأساسي

لا يقيس النظام تآكل المحمل ولا اهتزازه، بل يحسب **مقدار العمل الذي أدّاه** كلُّ عنصر: عدد الدورات التي دارها المحمل، وعدد الدورات الكاملة التي قطعها السير حول حلقته. ثم يقارن هذا المقدار المتراكم بالعمر الاسمي الذي يقرّره المُصنّع.

```
LifeConsumedPerSecond   =   f ( drive group ,  shaft speed )        [ rev/s   or   pass/s ]

dLife                   =   LifeConsumedPerSecond  ×  dt_real       [ rev     or   pass   ]

ConsumedLife            =   Σ  dLife        over all running seconds, across all runs

LifeUsedPercentage      =   ConsumedLife / DefaultLife  ×  100
RemainingLife           =   max( 0 , DefaultLife − ConsumedLife )
```

والنقطة الحاسمة هي أنّ dt_real هو **زمنٌ حقيقي مقيسٌ بالساعة الجدارية** بين نبضتين متتاليتين، لا عدد نبضات مضروباً بفاصل ثابت. وبذلك يبقى الحساب صحيحاً بصرف النظر عن سرعة الحاسوب أو انشغال واجهة المستخدم. وتُهمَل أيّ فترةٍ سالبة أو تتجاوز ستّين ثانية، وقايةً من قفزةٍ زائفة ناتجة عن تغيير ساعة النظام أو عن تجمّدٍ طويل.

13.2 معدّلات الاستهلاك

تُقسَّم العناصر الستة عشر إلى ثلاث مجموعات قيادة (Drive Groups) بحسب موقعها، ولكل مجموعة معدّل استهلاك خاص:

الجدول 1–13: معدّلات استهلاك العمر التشغيلي بحسب مجموعة القيادة

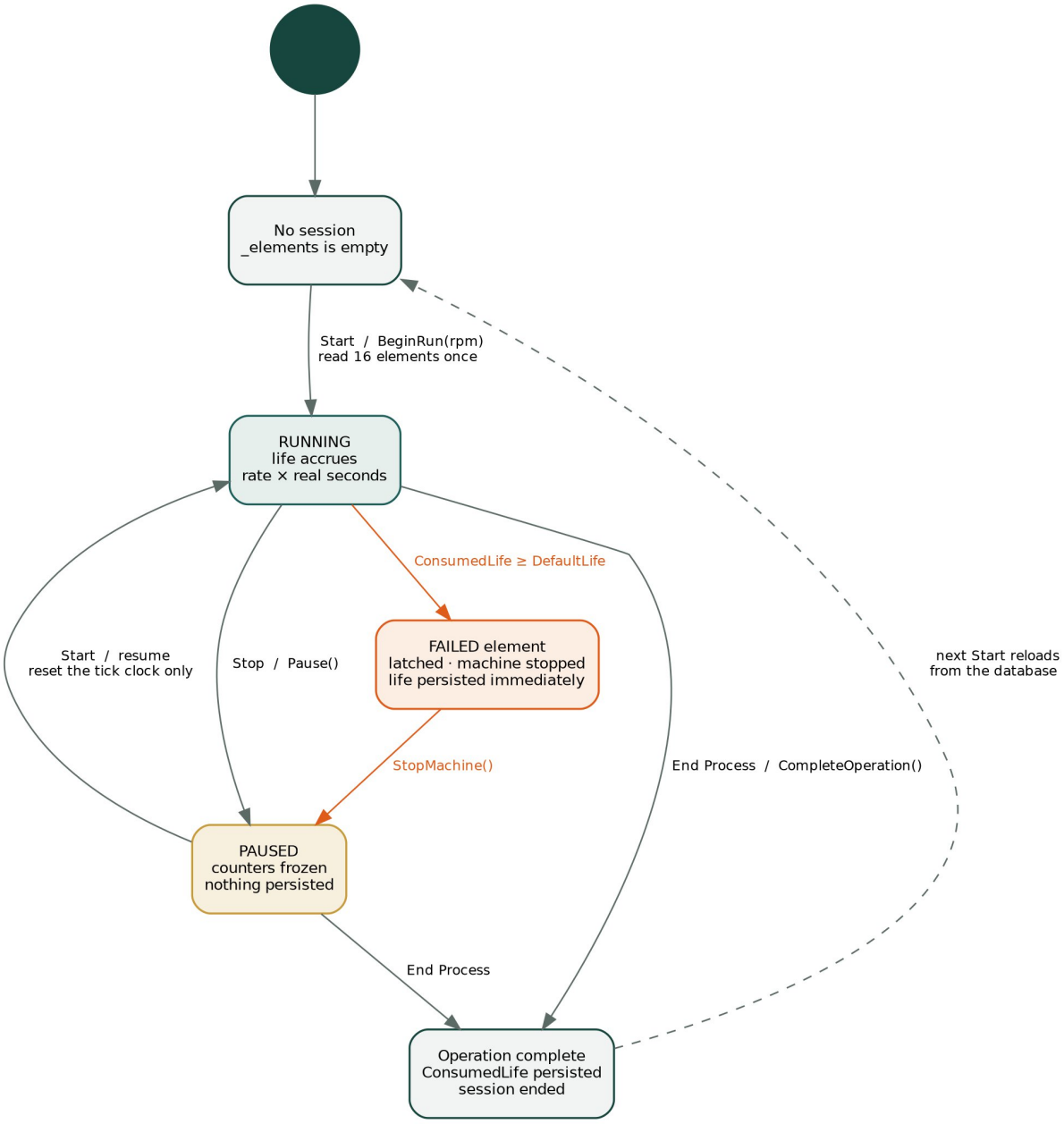
مصدر السرعة	القيمة الحالية	المعادلة	المواقع	المجموعة
المفتاح FeedShaftSpeedRPM = 25 دورة/د من ملف الإعدادات	0.41667 rev/s	RPM ÷ 60	1 – 8	FeedingShaft
تُمرَّر لحظياً من حساب clsMainEquations.NumberOfRotations_Unit_RPM — غير مثبّتة في الشيفرة	≈ 58.2 rev/s	RPM ÷ 60	9 – 12	CuttingShaft
السرعة الخطّية 0.371 م/ثا مقسومة على طول حلقة السير 1.2 م	0.30917 pass/s	L ÷ v	13 – 16	VBelt

نقطة تصميمية جديرة بالذكر

سرعة عمود القطع **ليست قيمةً ثابتة في ملف الإعدادات**، بل تُؤخذ من الحساب الذي تجريه الآلة نفسها عند تنفيذ **Calculate Forces**، ثم تُمرَّر إلى التابع BeginRun عند الضغط على **Start**.

وهذا يضمن أنّ استهلاك محامل عمود القطع يتبع شروط القطع الفعلية المختارة، ولا ينفصل عن حسابات الآلة.

13.3 دورة حياة التتبّع



الشكل 1-13: دورة حياة تتبّع العمر التشغيلي وعلاقتها بأزرار التحكّم بالآلة

تُقرأ العناصر من قاعدة البيانات **مرّةً واحدة** عند أوّل ضغطٍ على **Start**، ويُحتفَظ بها في الذاكرة طوال عملية الإنتاج. ويُفصَل داخلياً بين قيمتين لكل عنصر: PersistedConsumedLife وهي القيمة المقروءة من قاعدة البيانات، وRuntimeAccumulatedLife وهي ما أضافته العملية الجارية ولم يُحفَظ بعد. ولا تُدمَج الثانية في الأولى إلّا بعد نجاح الكتابة فعلاً.

13.4 متى تُكتَب البيانات ومتى لا تُكتَب

الجدول 13–2: سلوك حفظ العمر التشغيلي بحسب إجراء المستخدم

الكتابة في قاعدة البيانات	أثره على العدّادات	الإجراء
قراءة واحدة فقط	قراءة العناصر وعدّاداتها، وبدء التراكم	**Start** (بدء جديد)
لا شيء	متابعة التراكم من حيث توقّف	**Start** (استئناف)
لا شيء إطلاقاً	تجميد العدّادات مع الاحتفاظ بها	**Stop**
كتابة واحدة ضمن معاملة	دمج المتراكم في العدّاد الدائم	**End Process**
كتابة فورية للعمر ولعَلَم العطل	تثبيت العطل وإيقاف التراكم	بلوغ نهاية العمر
كتابة ضمن معاملة	تصفير العدّاد ومسح علم العطل	تسجيل استبدال
لا شيء — لا يُستعلَم عن قاعدة البيانات داخل الحلقة	زيادة العدّاد في الذاكرة	نبضة المؤقّت أثناء التشغيل

13.5 الحالة الصحية للعنصر

تُشتقّ الحالة الصحية من نسبة الاستهلاك ومن علم العطل، وفق عتباتٍ مقروءة من ملف الإعدادات لا مبعثرة في الشيفرة:

الجدول 13–3: تصنيف الحالة الصحية للعناصر

لون العرض	الدلالة الهندسية	الشرط	الحالة
أخضر	العنصر ضمن عمره التشغيلي الطبيعي	نسبة الاستهلاك < 80%	Normal
ذهبي	يُدرَج العنصر في خطّة الصيانة القادمة ويُوصى بتأمين قطعة بديلة	80% ≤ النسبة < 95%	Warning
برتقالي	الاستبدال وشيك ويُفضَّل جدولته في أقرب توقّف مخطّط	95% ≤ النسبة < 100%	Critical
أحمر	استُنفد العمر الاسمي؛ أوقف النظام الآلة برمجياً	النسبة ≥ 100% أو	Failed

لون العرض	الدلالة الهندسية	الشرط	الحالة
		FailureDetected مثبَّت	

ويمكن معاينة هذا التصنيف مطبَّقاً على الحالة الفعلية للآلة في لقطة الشاشة المدرجة في **الشكل 5–20**، حيث تظهر العناصر الستة عشر مع نسب استهلاكها وحالاتها الصحية وتواريخ آخر صيانةٍ لها.

13.6 التمييز بين البيانات المخزَّنة وبيانات المحاكاة

تمييز جوهري

العمر التشغيلي بيانات حقيقية مخزَّنة: يُشتقّ من نموذجٍ حركي مضروبٍ بزمن تشغيلٍ فعلي، ويُكتَب في قاعدة البيانات ضمن معاملات، ويبقى بعد إغلاق التطبيق، ويمكن تدقيقه في الجدول Elements.

قيم لوحة المراقبة بيانات محاكاة: تُولَّد رياضياً، ولا تُخزَّن، وتُمحى عند إنهاء العملية.

المنظومتان لا تتبادلان أيّ معطى. فلو أُلغيت المحاكاة كلّياً لبقي تتبّع العمر التشغيلي يعمل كما هو دون أيّ تغيير.

غير أنّ ما يبقى صحيحاً أكاديمياً هو أنّ العمر المحسوب **تقدير قائم على نموذج (Model-Based Estimate)** لا قياسٌ مباشر لحالة المحمل؛ فهو لا يأخذ في الحسبان الحمل الفعلي ولا درجة الحرارة ولا كفاية التشحيم ولا الاهتزاز.

14. التنبيهات والإشعارات (Alerts and Notifications)

14.1 شرط إطلاق التنبيه

يوجد في النظام **شرط واحد فقط** يُطلق تنبيهاً، وهو: بلوغ العمر المتراكم لأحد العناصر الستة عشر عمرَه الاسمي DefaultLife. ولا توجد أيّ تنبيهات أخرى — لا على قيم لوحة المراقبة، ولا على الحرارة أو الاهتزاز، ولا عند بلوغ عتبتَي 80% أو 95%؛ فهاتان العتبتان تُلوّنان الحالة في الجدول وتُدرَجان في متن الرسالة، لكنّهما لا تطلقان إشعاراً مستقلاً. **[IMPLEMENTED]**

14.2 التنبيه على الشاشة

يظهر التنبيه بوصفه طبقةً ملء الشاشة تعرض:

- اسم العنصر ونوعه ورقم موقعه على الآلة ووصف موضعه.
- عمره الاسمي، وعمره المستهلك لحظة العطل، والمتبقّي، ونسبة الاستهلاك، وسعره.
- حالة الآلة لحظة العطل: زمن التشغيل، وسرعة عمود القطع، وكمية الإنتاج، والطاقة المحتسَبة، ونوع الخشب.
- ملخّصاً بعدد العناصر الأخرى التي تجاوزت عتبة الإنذار 80%، مع أسوئها حالاً.
- سطر حالةٍ لعملية إرسال البريد يتغيّر لونه ونصّه تبعاً للنتيجة.

ويتيح التنبيه إجراءين: إغلاقه، أو الانتقال المباشر إلى شاشة الصيانة لتسجيل عملية الاستبدال.

14.3 الإشعار بالبريد الإلكتروني

نعم، يُرسَل البريد تلقائياً — وقد جرى التحقّق من ذلك في الشيفرة. فبعد إظهار التنبيه مباشرةً تُستدعى الدالّة SendFailureAlertAsync في مهمّةٍ خلفية لا تُجمّد الواجهة، وتُبنى الرسالة وتُرسَل عبر Gmail API من دون أيّ تدخّل من المستخدم ومن دون فتح متصفّح.

الجدول 1-14: محتوى رسالة تنبيه العطل

المحتوى	القسم
يتضمّن اسم العنصر المُعطِل وموقعه على الآلة	الموضوع
نصّ بلغتين — إنكليزي ثم عربي بترتيبٍ من اليمين إلى اليسار — يضمّ بيانات العنصر وحالة الآلة والعناصر القريبة من العتبة وسجلّ الصيانة خلال الثلاثين يوماً الماضية وآخر صيانة عامّة	المتن
صورة العنصر تُعرَض داخل المتن، وتُرفَق أيضاً ملفاً مستقلاً لعملاء البريد التي تحجب الصور المضمَّنة	صورة مضمَّنة
كتالوج المُصنّع (~PDF~) الخاص بالعنصر المُعطِل **وحده** دون بقيّة الكتالوجات	مرفق

14.4 سلوك النظام عند تعذّر الإرسال

مبدأ تصميمي: الإشعار لا يُبطل الأمان

الدالّة SendFailureAlertAsync **لا ترمي استثناءً إطلاقاً**، بل تعيد نتيجةً تصف ما حدث. فإذا كان الإرسال معطَّلاً في الإعدادات، أو لم يكن الحساب مربوطاً، أو أخفق الاتصال بالخادم:

1) تُحفَظ نسخة HTML كاملة من التنبيه في المجلّد Desktop\Reports\MaintenanceAlerts باسمٍ يتضمّن التاريخ والوقت، فلا يضيع البلاغ.

2) يُعرَض سبب الإخفاق ومسار النسخة المحفوظة على التنبيه.

3) **لا يُلغى كشف العطل، ولا يُلغى إيقاف الآلة، ولا يُمحى ما كُتب في قاعدة البيانات.**

أي أنّ إخفاق البريد حدثٌ ثانوي لا يمسّ الوظيفة الوقائية للنظام.

15. التكامل مع Gmail (Gmail Integration)

15.1 لماذا Gmail؟

الغاية من هذا التكامل أن يصل بلاغ العطل إلى المسؤول عن الصيانة **حتى لو لم يكن أحدٌ أمام شاشة الآلة.**

وقد اختير Gmail API بدلاً من بروتوكول SMTP التقليدي لسببٍ أمني جوهري: إرسال البريد عبر SMTP يستلزم تخزين كلمة مرور الحساب في التطبيق أو في ملفّ إعداداته، في حين يعتمد Gmail API على تفويضٍ محدود النطاق عبر OAuth 2.0.

> **مبدأ أمني**
>
> **لا توجد كلمة مرور بريدٍ في أيّ موضع من هذا النظام** — لا في الشيفرة، ولا في ملف الإعدادات، ولا في قاعدة البيانات، ولا في المستودع.
>
> تُدخَل كلمة المرور على صفحة Google نفسها داخل المتصفّح، ولا يراها التطبيق إطلاقاً. وما يستلمه التطبيق هو رمز تفويض (Token) محدود الصلاحية.

15.2 خصائص التكامل

الجدول 15-1: خصائص تكامل Gmail كما هي منفَّذة

الجانب	التنفيذ الفعلي
نوع عميل OAuth	تطبيق مكتبي (Desktop / Installed App). استعمال عميلٍ من نوع تطبيق ويب يؤدّي إلى إخفاق التفويض
النطاق المطلوب	gmail.send **حصراً** — وهو أضيق نطاقٍ يتيح الإرسال. لا يسمح بقراءة البريد ولا بالبحث فيه ولا بحذفه
إعادة التوجيه	خادم محلّي مؤقّت على العنوان 127.0.0.1 بمنفذٍ حرّ، وهو المسار الذي تفرضه Google للتطبيقات المكتبية
ملف عميل OAuth	يُحفَظ خارج مجلّد المشروع في مسارٍ خاص بالمستخدم ضمن بيانات التطبيق المحلّية، ويمكن تجاوزه بمتغيّر بيئة

التنفيذ الفعلي	الجانب
الصنف DpapiDataStore يشفّر الرمز بآلية DPAPI على نطاق المستخدم الحالي، ويكتبه كتابةً ذرّية عبر ملفٍ مؤقّت ثم إعادة تسمية	تخزين رمز التفويض
بناء رسالة MIME عبر مكتبة MimeKit ثم ترميزها وإرسالها بالتابع users.messages.send	الإرسال
ملف .gitignore يستبعد صراحةً ملفات الاعتماد ومجلّد الرموز	حماية المستودع

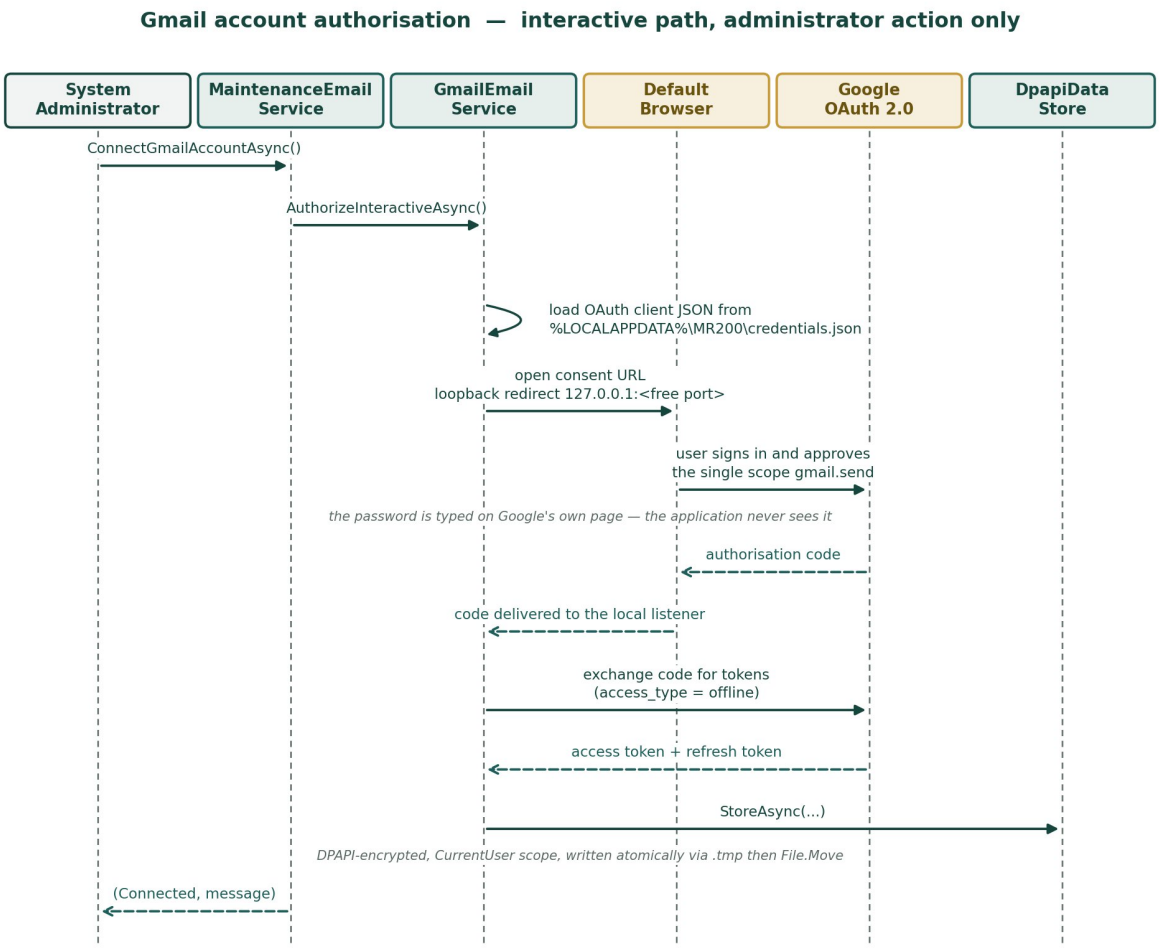
15.3 مساران للتفويض

يفصل النظام فصلاً حاسماً بين مسارين:

1. **المسار التفاعلي** AuthorizeInteractiveAsync — يفتح متصفّحاً ويعرض شاشة موافقة Google. يُنفَّذ **مرّةً واحدة** بقرارٍ من مسؤول النظام.
2. **المسار الصامت** TryGetCredentialAsync — لا يفتح متصفّحاً إطلاقاً، بل يقرأ الرمز المخزَّن ويجدّده تلقائياً عند انتهاء صلاحيته. **وهو المسار الوحيد الذي يستعمله تنبيه العطل التلقائي.**

والسبب في هذا الفصل واضح هندسياً: لو استُدعي المسار التفاعلي من مسار التنبيه التلقائي لتوقّف الإرسال في انتظار متصفّحٍ لا أحد أمامه، وربّما وقع ذلك في الثالثة فجراً.

15.4 مخطّط التسلسل لعملية الربط



الشكل 15–1: مخطّط تسلسل (Sequence Diagram) عملية ربط حساب Gmail

15.5 الحالة الفعلية لواجهة الربط في هذه النسخة

تنويه مهمّ للدقّة

توجد في طبقة الخدمات الدالّتان ConnectGmailAccountAsync وDisconnectGmailAccountAsync في الصنف MaintenanceEmailService، وهما منفَّذتان تنفيذاً كاملاً وتعملان.

غير أنّ **هذه النسخة من التطبيق لا تتضمّن أيّ زرّ أو أمر (Command) في واجهة المستخدم يستدعيهما**. فلا يوجد ConnectGmailCommand ولا DisconnectGmailCommand في MainViewModel، ولا ترد كلمة Gmail في ملف MainWindow.xaml مطلقاً.

ولذلك يُربَط الحساب في الوضع الحالي بوسائل خارجية عن التطبيق. وتُذكَر هذه الحقيقة هنا التزاماً بالدقّة الأكاديمية؛ إذ لا

يجوز توثيق زرٍّ غير موجود.

استعادة هذه الواجهة عملٌ صغير: أمران في MainViewModel يستدعيان الدالّتين القائمتين، وزرّان في صفحة الصيانة. أمّا طبقة الخدمة فجاهزة ولا تحتاج تعديلاً.

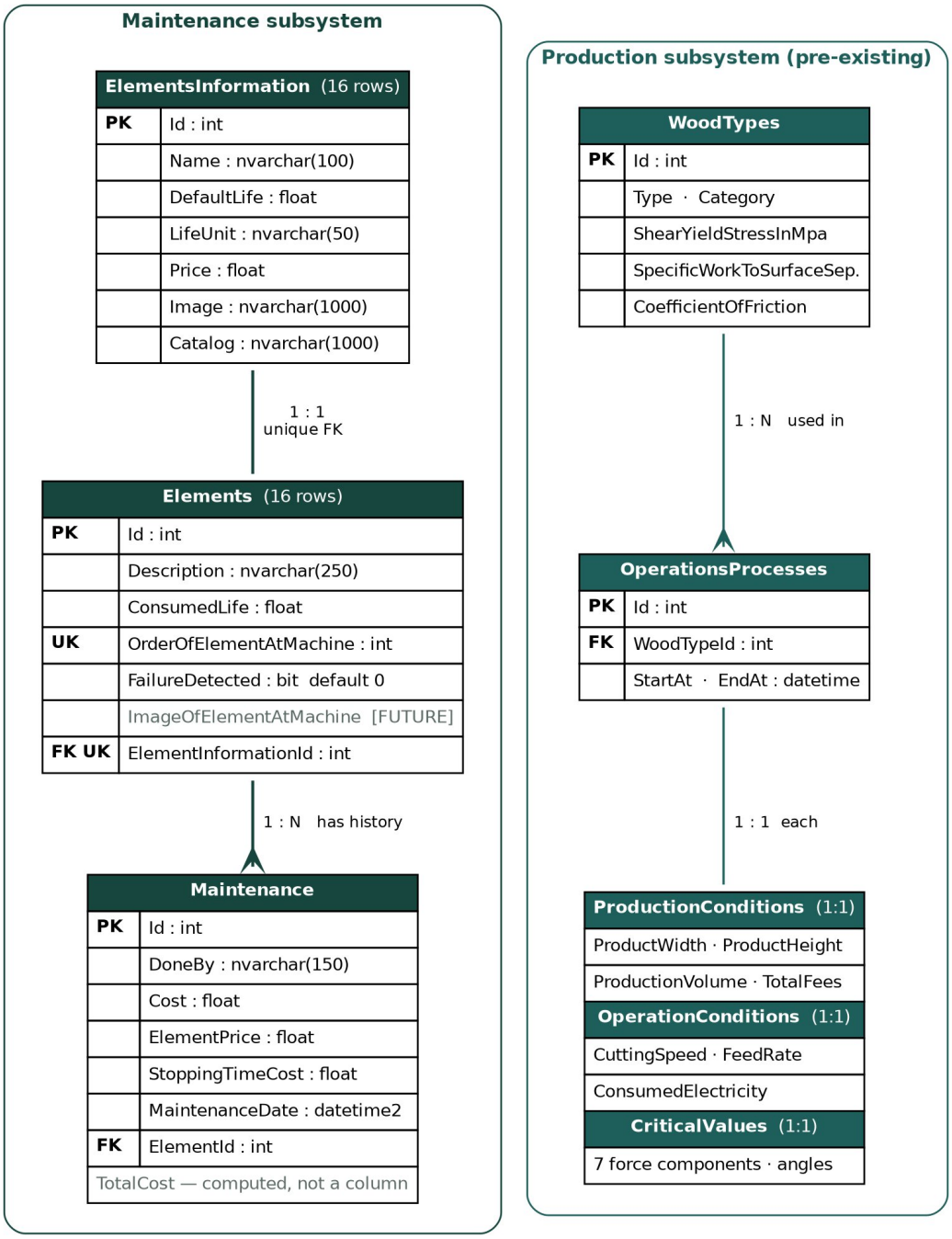
15.6 ضبط عنوان المُرسِل

يوضَع الترويس From **فقط** إذا كان عنوان المُرسِل مضبوطاً في الإعدادات وصالحاً نحوياً؛ وإلّا تُرك فارغاً لتضع Gmail عنوان الحساب المفوَّض نفسه. والسبب فنّي دقيق: وضع عنوان مُرسِلٍ لا يطابق الحساب المفوَّض يجعل الرسالة تجتاز نداء الواجهة البرمجية بنجاح ظاهري، ثم تُسقَط صامتةً عند المستقبِل لإخفاقها في فحص DMARC.

16. تصميم قاعدة البيانات (Database Design)

تعتمد المنظومة قاعدة بيانات SQL Server واحدة باسم WoodCuttingMachine_يُنشئها التطبيق ويحدّثها تلقائياً عند الإقلاع بأسلوب **الشيفرة أوّلاً (Code-First)** عبر Entity Framework Core 9. وتنقسم جداولها إلى مجموعتين: مجموعة الإنتاج التي سبقت منظومة الصيانة، ومجموعة الصيانة التي أُضيفت لاحقاً.

16.1 المخطّط العلائقي



الشكل 1–16: مخطّط الكيانات والعلاقات (ER Diagram) لقاعدة بيانات النظام

16.2 جداول منظومة الصيانة

الجدول 1–16: جداول منظومة الصيانة وغرض كلٍّ منها

الجدول	الغرض	المفاتيح والقيود
Elements	العناصر الفيزيائية الستة عشر، لكلٍّ منها عمره المستهلك وموقعه على الآلة	مفتاح أساسي Id؛ فهرس فريد على OrderOfElementAtMachine؛ مفتاح خارجي فريد إلى ElementsInformation
ElementsInformation	البيانات الكتالوجية: النوع والعمر الاسمي والواحدة والسعر والصورة والكتالوج	مفتاح أساسي Id؛ الحقل LifeUnit مخزَّن نصّاً عبر محوّل قيم
Maintenance	سجلّ عمليات الصيانة والاستبدال بتكاليفها	مفتاح أساسي Id؛ مفتاح خارجي ElementId؛ فهرس على MaintenanceDate

16.3 جداول منظومة الإنتاج

الجدول 2–16: جداول منظومة الإنتاج والتحليل

الجدول	الغرض
WoodTypes	أنواع الخشب وخواصّها الميكانيكية: إجهاد الخضوع بالقص، والشغل النوعي لفصل السطح، ومعامل الاحتكاك
OperationsProcesses	سجلّ عملية إنتاج مكتملة: نوع الخشب وزمنا البدء والانتهاء
ProductionConditions	أبعاد المنتج، والحجم المُنتَج، والأجور الإجمالية — علاقة واحد إلى واحد مع عملية الإنتاج
OperationConditions	سرعة القطع ومعدّل التغذية وسرعة العمود والطاقة المحتسَبة
CriticalValues	الزوايا وسبع مركّبات للقوى وعزم القطع للعملية المسجَّلة
ConstantValues	ثوابت التكلفة: سعر الكيلوواط الساعي، والأجر لكل متر مكعّب

16.4 العلاقات

- Elements ← ElementsInformation : علاقة **واحد إلى واحد** يفرضها مفتاح خارجي فريد على الطرف التابع.
- Maintenance ← Elements : علاقة **واحد إلى متعدّد**؛ للعنصر الواحد سجلّ صيانةٍ كامل.
- OperationsProcesses ← WoodTypes : علاقة **واحد إلى متعدّد**.
- OperationsProcesses ← الجداول الثلاثة التابعة : علاقة **واحد إلى واحد** لكلٍّ منها، وتُدرَج تلقائياً مع عملية الإنتاج.

وقد ضُبط سلوك الحذف في علاقات منظومة الصيانة على NoAction، أي أنّ حذف عنصرٍ له سجلّ صيانة ممنوعٌ على مستوى قاعدة البيانات — وهو ما يتّسق مع مبدأ عدم إتلاف التاريخ.

16.5 انضباط القراءة والكتابة

اعتُمد مبدأ صارم: **تُقرَأ قاعدة البيانات مرّةً واحدة عند بدء عملية الإنتاج، وتُكتَب مرّةً واحدة عند إنهائها،** إضافةً إلى كتابةٍ فورية عند اكتشاف عطل. ولا يوجد أيّ استعلامٍ داخل حلقة المؤقّت؛ إذ إنّ الاستعلام عن ستة عشر عنصراً بمعدّل ثلاث مرّات في الثانية كان سيُثقل الخادم ويُجمّد الواجهة.

> **ملاحظة عن الترحيلات (Migrations)**
>
> أُضيفت جداول الصيانة الثلاثة عبر الترحيل AddMaintenanceSystem، وهو ترحيل **إضافي بحت**: ثلاثة أوامر إنشاء جدول وأربعة أوامر إنشاء فهرس، **من دون أيّ تعديل على جدولٍ قائم**. أي أنّ جداول الإنتاج السابقة لم تُمَسّ.
>
> أمّا سلسلة الاتصال بقاعدة البيانات فمثبَّتة حالياً داخل الشيفرة في التابع OnConfiguring، ولا تُقرَأ من ملف إعدادات، وهذا قيدٌ يُذكَر في الفصل 22.

17. سير العمليات الرئيسية (Main System Workflows)

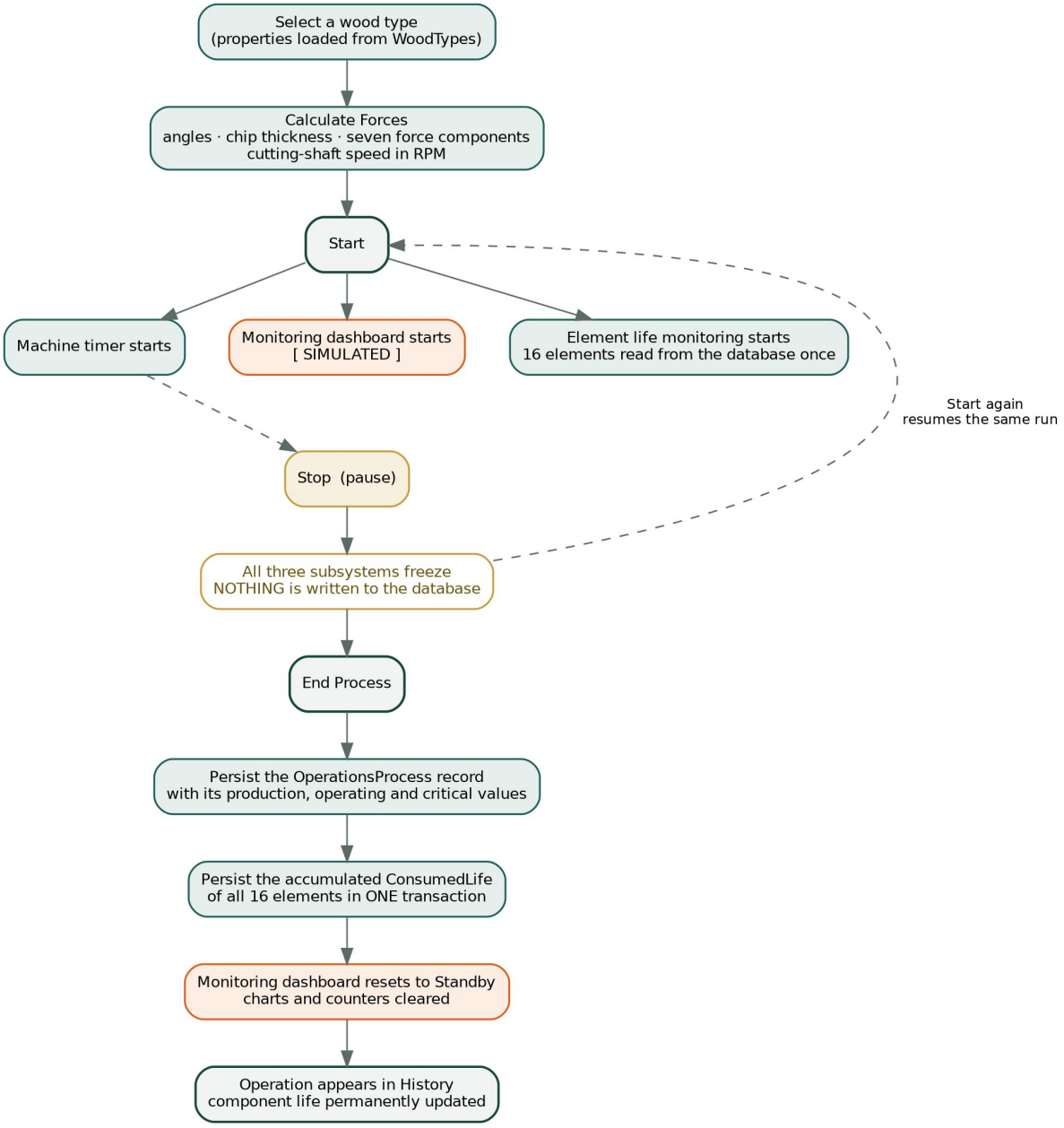
17.1 خطّ التحليل الحسابي لقوى القطع

قبل تشغيل الآلة، ينفّذ النظام سلسلةً حسابية كاملة تبدأ من خواصّ الخشب وهندسة الشفرة وتنتهي بالقوى وعزم العمود. وتُقرأ البارامترات الهندسية من ملف الإعدادات: سرعة التغذية، والسرعة القصوى للقطع، وعمق القطع، وزاوية المِنسَل، وعدد الأسنان، وقطر الشفرة، وسماكة الشقّ، وعدد الشفرات. **[IMPLEMENTED]**

```
Wood properties  +  blade geometry
        ↓
Feed per tooth        →   Cutting shaft speed  [RPM]  ──────────────────────┐
        ↓                                                                    |
Friction angle  →  Shear angle  →  Friction correction coefficient  |
        ↓                                                                    |
Entry / exit / centre angles   →   Mean chip thickness              |
        ↓                                                                    |
Cutting force  →  active, thrust, shear, normal-to-shear,           |
                  normal-to-rake, friction-on-rake   (7 components) |
        ↓                                                                    |
Shaft torque   =   force × number of blades × blade radius          |
                                                                     |
                    this same RPM feeds the life model  ──────────────┘
```

ويُلاحَظ في المخطّط أعلاه أنّ سرعة عمود القطع المحسوبة تُستعمل في موضعين: في حساب العزم المعروض للمستخدم، وفي حساب معدّل استهلاك عمر محامل عمود القطع. وهذا ما يجعل المنظومتين متّسقتين ولا تتباعدان.

17.2 سير عملية الإنتاج الكاملة



الشكل 1-17: سير عملية الإنتاج الكاملة من اختيار الخشب حتى حفظ النتائج

المبدأ الحاكم لهذا السير هو: **الإيقاف يُجمّد، والتشغيل يستأنف، والإنهاء وحده يحفظ.** وتنطبق هذه القاعدة على المنظومات الثلاث معاً — مؤقّت الآلة، ولوحة المراقبة، وتتبّع العمر التشغيلي — على نحوٍ متّسق.

ويحقّق مؤقّت الآلة هذا السلوك بإزاحة زمنَي المرجع إلى الأمام بمقدار مدّة التوقّف، فيبقى الزمن المسجَّل في قاعدة البيانات معبّراً عن زمن التشغيل الفعلي وحده.

17.3 سير تسجيل الصيانة

```
Maintenance Engineer
        ↓
Open the Maintenance page          →  16 elements + history loaded
        ↓
Review component health            →  consumed / remaining / status
        ↓
Press  Maintain  on one component  →  drawer opens, pre-filled
        ↓
Enter Done By and the three costs  →  mark 'replaced' if applicable
        ↓
Save                               →  BEGIN TRANSACTION
                                      insert Maintenance row
                                      reset ConsumedLife if replaced
                                      COMMIT
        ↓
Invalidate in-memory session       →  next run reloads corrected values
        ↓
History updated — no record is ever deleted
```

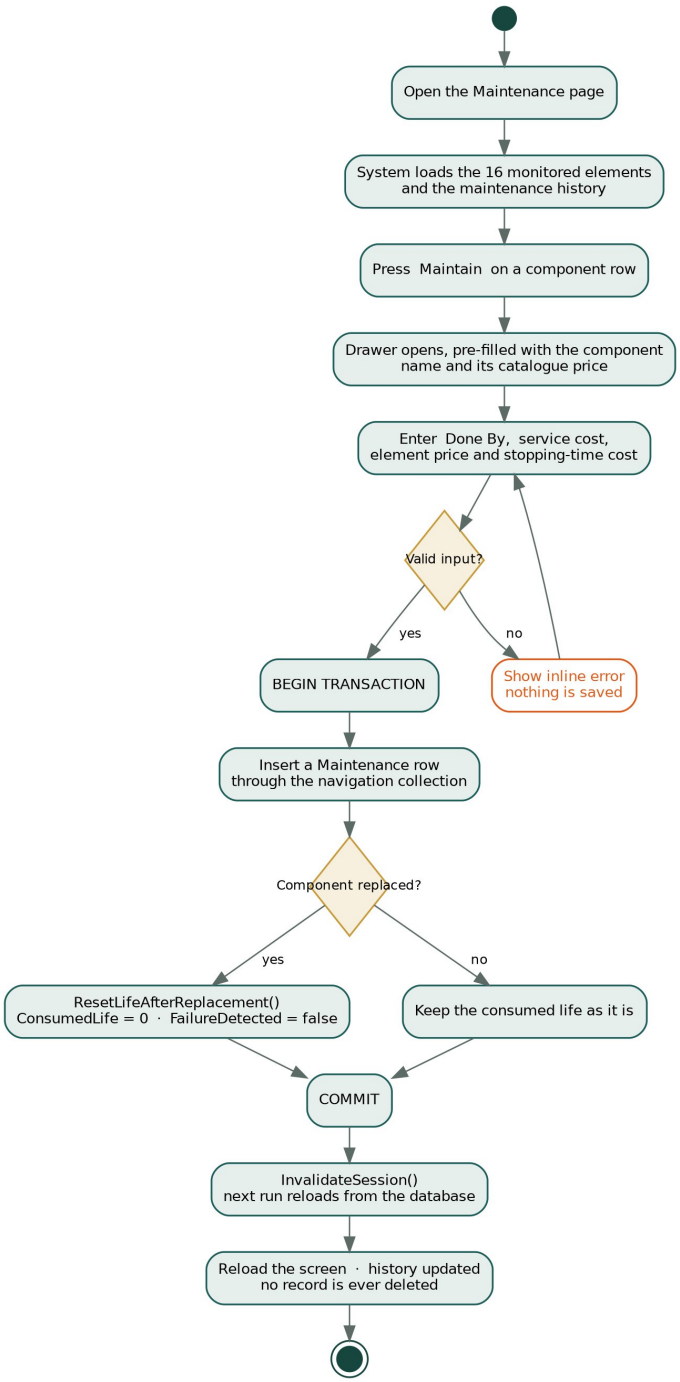
17.4 سير الإشعار بالعطل

يبدأ هذا السير من دون تدخّل بشري، ويُفصَّل في الشكل 1–19 في الفصل التاسع عشر. وخلاصته: كشفٌ يقع مرّةً واحدة، ثم إيقافٌ برمجي للآلة، ثم كتابةٌ فورية في قاعدة البيانات، ثم تنبيهٌ على الشاشة، ثم إرسالٌ خلفي للرسالة.

18. مخطّطات النشاط (Activity Diagrams)

18.1 نشاط تسجيل عملية صيانة

يوضّح المخطّط الآتي مسار تسجيل عملية صيانة كاملاً، بما فيه نقطتا القرار: التحقّق من صحّة المُدخَلات، وتحديد ما إذا كان العنصر قد استُبدل.



الشكل 1-18: مخطّط نشاط (Activity Diagram) لتسجيل عملية صيانة أو استبدال

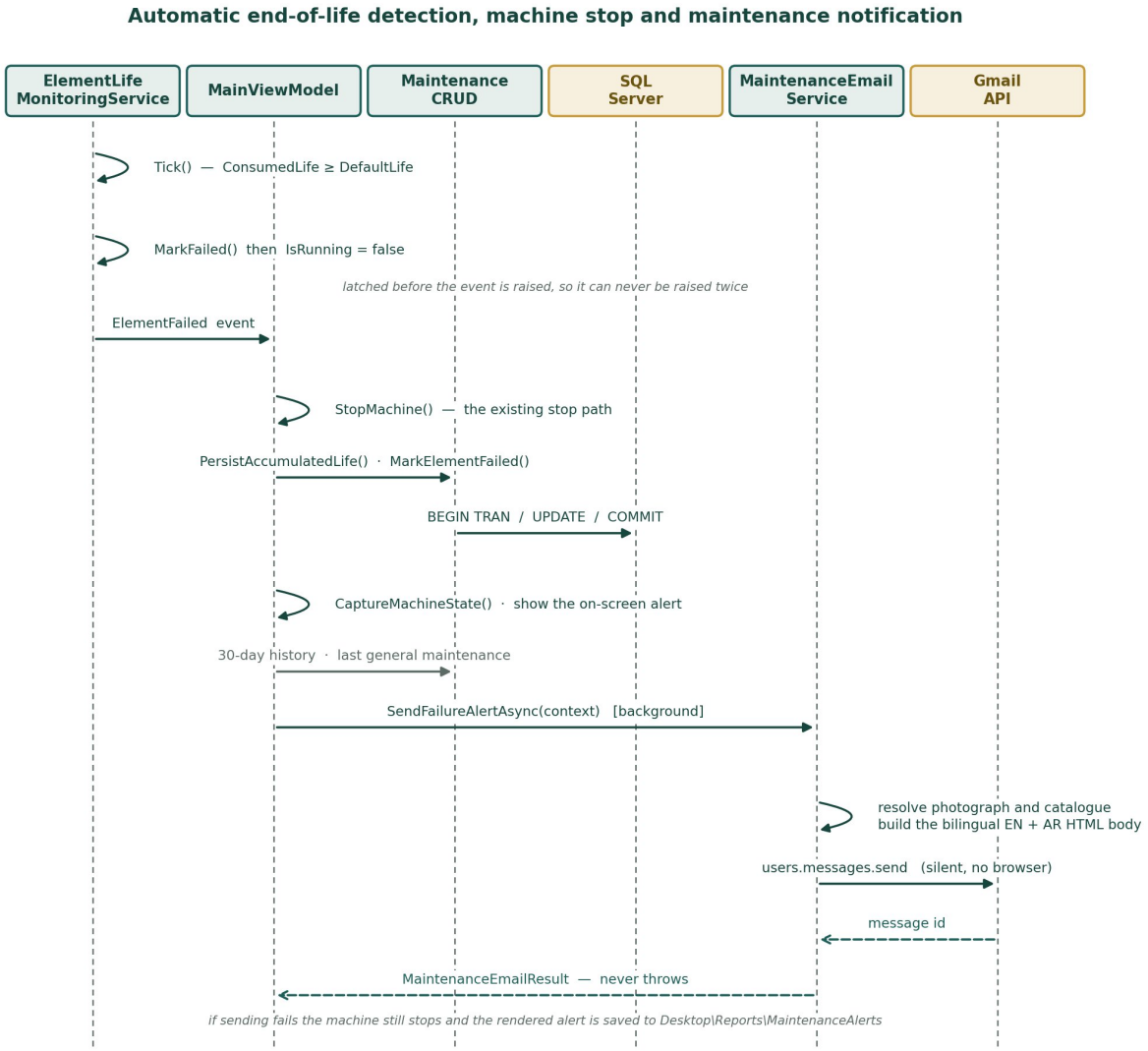
18.2 نشاط مراقبة حالة المكوّنات

يمثّل هذا النشاط دورة حياة تتبّع العمر التشغيلي الموضّحة في الشكل 1–13، وهي المخطّط الحالي (State Diagram) الذي يحكم انتقال المنظومة بين حالات: لا جلسة، وتشغيل، وتوقّف مؤقّت، وعطل، وإنجاز.

19. مخطّطات التسلسل (Sequence Diagrams)

19.1 تسلسل الكشف عن العطل والإشعار

يُظهر المخطّط الآتي الترتيب الزمني الدقيق للأحداث من لحظة بلوغ العنصر عمره الاسمي حتى وصول الرسالة، ويبيّن على وجه الخصوص أنّ تثبيت العَلَم يسبق إطلاق الحدث، وأنّ الكتابة في قاعدة البيانات تسبق محاولة الإرسال.



الشكل 1–19: مخطّط تسلسل (Sequence Diagram) للكشف عن نهاية العمر وإرسال الإشعار

19.2 تسلسل ربط حساب Gmail

سبق عرض مخطّط تسلسل عملية الربط في الشكل 1–15 ضمن الفصل الخامس عشر، ويُشار إليه هنا تجنّباً للتكرار. والنقطة الجديرة بالتأكيد فيه أنّ كلمة المرور تُدخَل على صفحة Google حصراً، وأنّ ما يصل التطبيق هو رمز تفويضٍ يُشفَّر قبل حفظه.

20. واجهة المستخدم (User Interface)

يتألّف التطبيق من نافذةٍ واحدة ذات إطارٍ مخصّص، تضمّ شريطاً جانبياً ثابتاً وأربع صفحات وثلاث طبقات عرضٍ إضافية. وتُبنى الواجهة كلّها في ملف MainWindow.xaml، وتُعرَّف ألوانها وأنماطها المشتركة في ملف Themes\AppTheme.xaml.

الجدول 1–20: صفحات التطبيق ووظيفة كلٍّ منها

الصفحة	الوظيفة	أهمّ عناصر التحكّم
Home	اختيار الخشب، وحساب القوى، والتحكّم بالآلة	قائمة أنواع الخشب، **Calculate Forces**، **Start**، **Stop**، **End Process**، مؤقّت الآلة، مخطّطان، جدولان
Monitoring	لوحة المراقبة التشغيلية **[SIMULATED]**	أربعة مخطّطات حيّة، إحصاءات لحظية، شارة الحالة، لوحة الكاميرا **[FUTURE]**
History	استعراض العمليات السابقة	بطاقات مؤشّرات، مخطّط اتّجاه، مخطّط دائري، مخطّط مقارنة القوى، جدول بزرّي **View** و**PDF**
Maintenance	الحالة الصحية للمكوّنات وسجلّ الصيانة	بطاقات عدّ، جدول من 16 سطراً بزرّ **Maintain**، جدول سجلّ الصيانة

20.1 طبقات العرض الإضافية

- **لوحة تفاصيل العملية** — تُفتَح بالضغط على **View** في سطر عملية إنتاج، وتعرض شروط العملية وأشرطة نسبية للقوى.
- **لوحة تسجيل الصيانة** — تُفتَح بالضغط على **Maintain**، وتضمّ حقول اسم المنفّذ والتكاليف وخانة الاستبدال.
- **تنبيه العطل** — طبقة ملء الشاشة تظهر تلقائياً عند بلوغ عنصرٍ نهاية عمره.

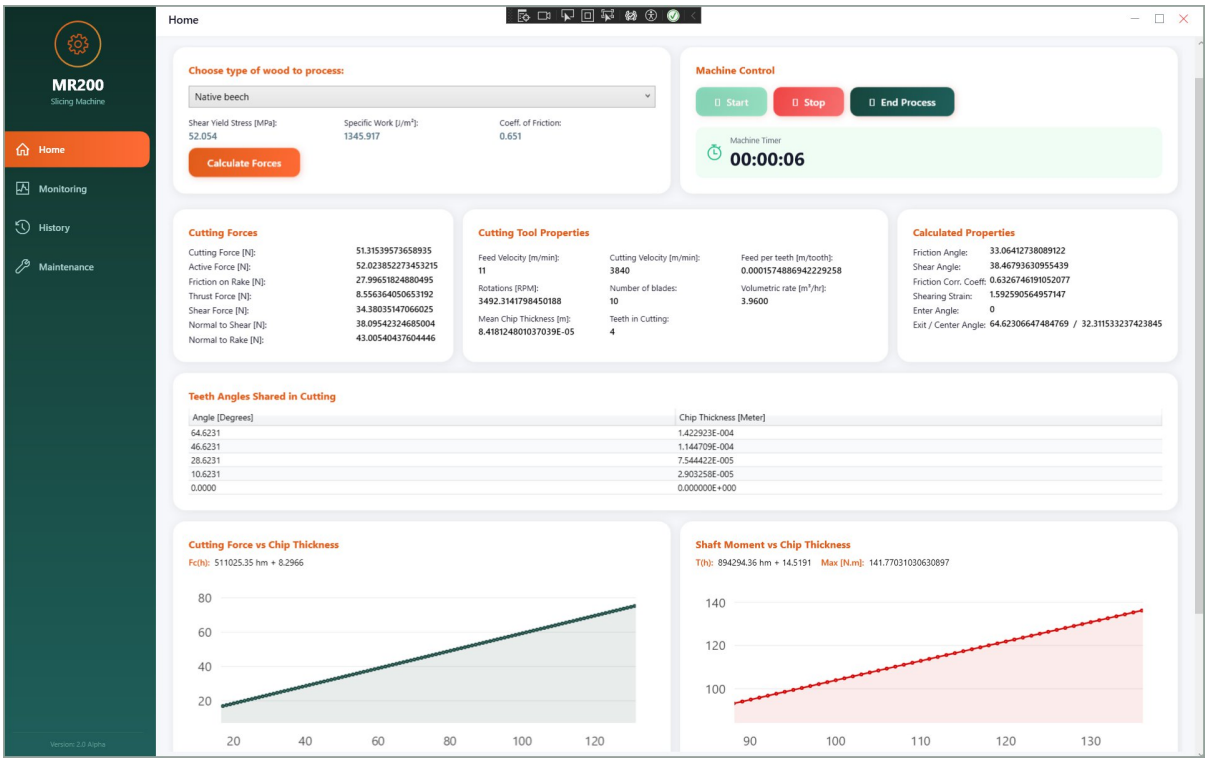
20.2 صور الواجهات

الصور الواردة أدناه **لقطات شاشة حقيقية** مأخوذة من التطبيق أثناء تشغيله، ولم يُجرَ عليها أيّ تعديل. ويظهر في أعلى بعضها شريط أداة تسجيل الشاشة الخاص بنظام التشغيل، وهو خارج عن التطبيق.

20.2.1 الصفحة الرئيسة (Home Page)

الغرض: تحليل شروط القطع لنوع الخشب المختار، والتحكّم بتشغيل الآلة.

تُقسَم الصفحة إلى بطاقات وظيفية: بطاقة اختيار الخشب وتعرض خواصّه الثلاث المقروءة من قاعدة البيانات، وبطاقة **Machine Control** وتضمّ أزرار **Start** و**Stop** و**End Process** ومؤقّت الآلة، ثمّ ثلاث بطاقات نتائج تعرض القوى السبع وخواصّ أداة القطع والخواصّ المحسوبة، ثمّ جدول زوايا الأسنان المشاركة في القطع مع سماكة الرايش عند كلٍّ منها، وأخيراً مخطّطا قوّة القطع وعزم العمود بدلالة سماكة الرايش مع إظهار معادلة كلٍّ منهما.



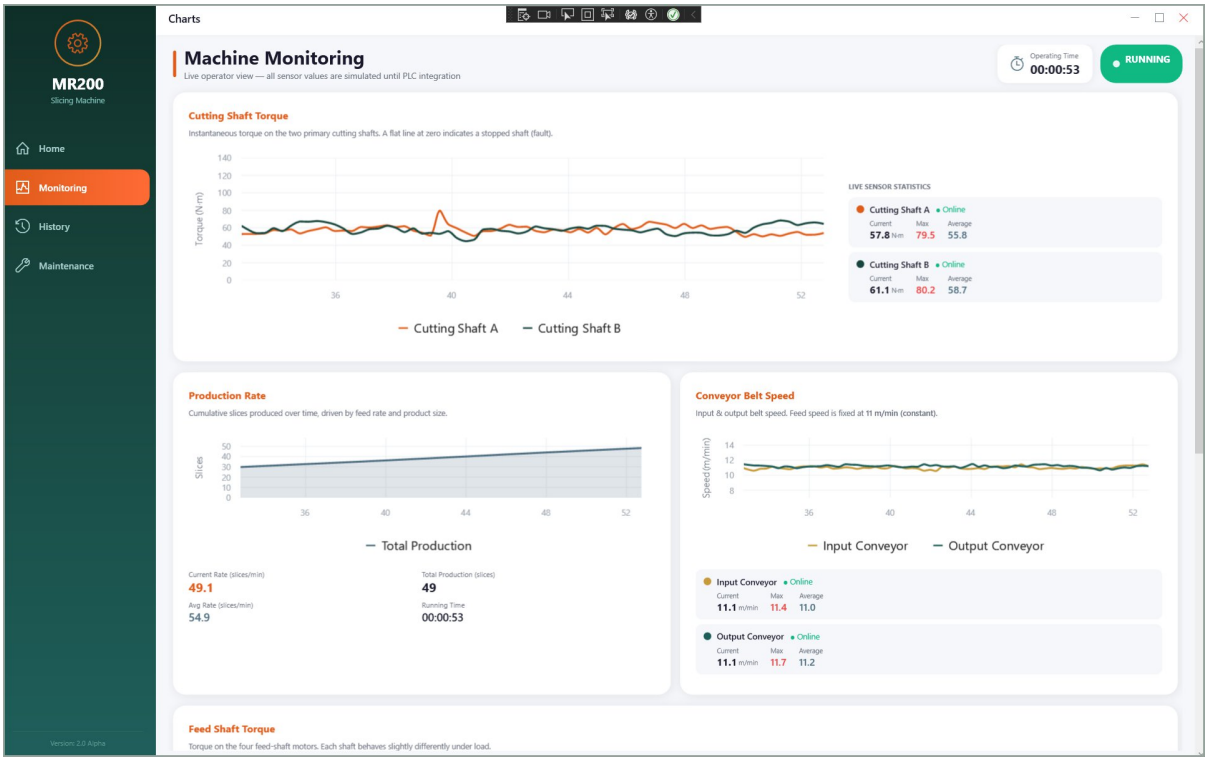
الشكل 20-1: الصفحة الرئيسة (Home Page) بعد تنفيذ الأمر Calculate Forces على خشب Native beech

20.2.2 لوحة المراقبة (Monitoring Panel)

الغرض: عرض تجربة المراقبة التشغيلية المستهدفة بالاعتماد على بيانات محاكاة. **[SIMULATED]**

يُلاحَظ في الصورة أمران يوثّقان ما ورد في الفصلين التاسع والعاشر: **أوّلهما** التنويه المعروض أسفل العنوان مباشرةً ونصّه "Live operator view — all sensor values are simulated until PLC integration"، وهو تصريح اللوحة عن نفسها بأنّ قيمها محاكاة؛ **وثانيهما** أنّ عنوان النافذة في أعلى الشاشة يعرض كلمة Charts لا Monitoring، وهو ما شُرح في الجدول 1–8 من اختلاف تسمية الصفحة عن مفتاحها البرمجي.

وتظهر في الصورة شارة الحالة **RUNNING** وزمن التشغيل، ومخطّط عزم عمودَي القطع مع بطاقات الإحصاءات اللحظية (القيمة الحالية والعظمى والمتوسّط لكل عمود)، ومخطّط معدّل الإنتاج التراكمي، ومخطّط سرعة سيرَي النقل الذي يبيّن ثبات سرعة التغذية عند 11 متراً في الدقيقة، ثمّ مخطّط عزم أعمدة التغذية الأربعة.

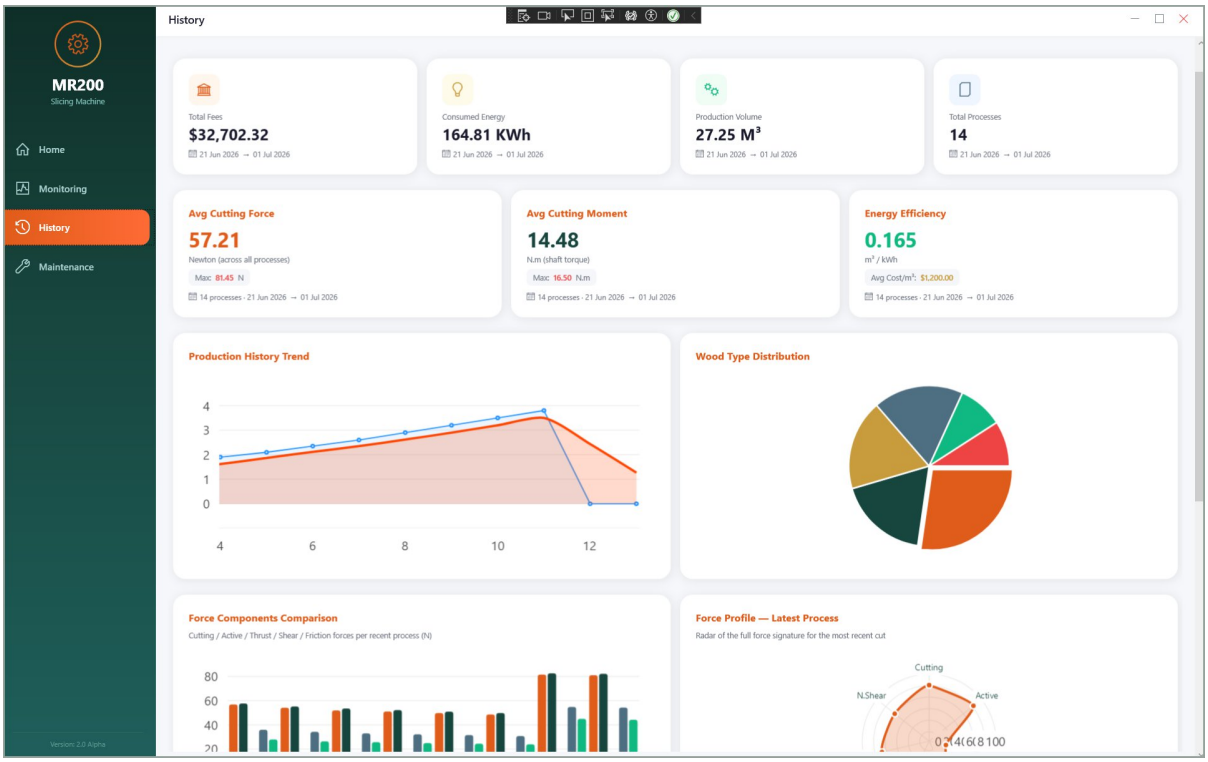


الشكل 2–20: لوحة المراقبة (Monitoring Panel) أثناء التشغيل — جميع القيم المعروضة بيانات محاكاة

20.2.3 صفحة سجلّ العمليات (History Page)

الغرض: استعراض عمليات الإنتاج المسجَّلة ومؤشّراتها التجميعية.

تعرض الصفحة في أعلاها أربع بطاقات مؤشّرات: إجمالي الأجور، والطاقة المستهلكة، وحجم الإنتاج، وعدد العمليات، مع المدى الزمني المشمول. تليها ثلاث بطاقات تحليلية: متوسّط قوّة القطع وأعظميّتها، ومتوسّط عزم القطع، وكفاءة الطاقة بالمتر المكعّب لكل كيلوواط ساعي. ثمّ مخطّط اتّجاه الإنتاج التاريخي، ومخطّط دائري لتوزّع أنواع الخشب، ومخطّط مقارنة مركّبات القوى بين العمليات، ومخطّط رادار لبصمة القوى في آخر عملية.

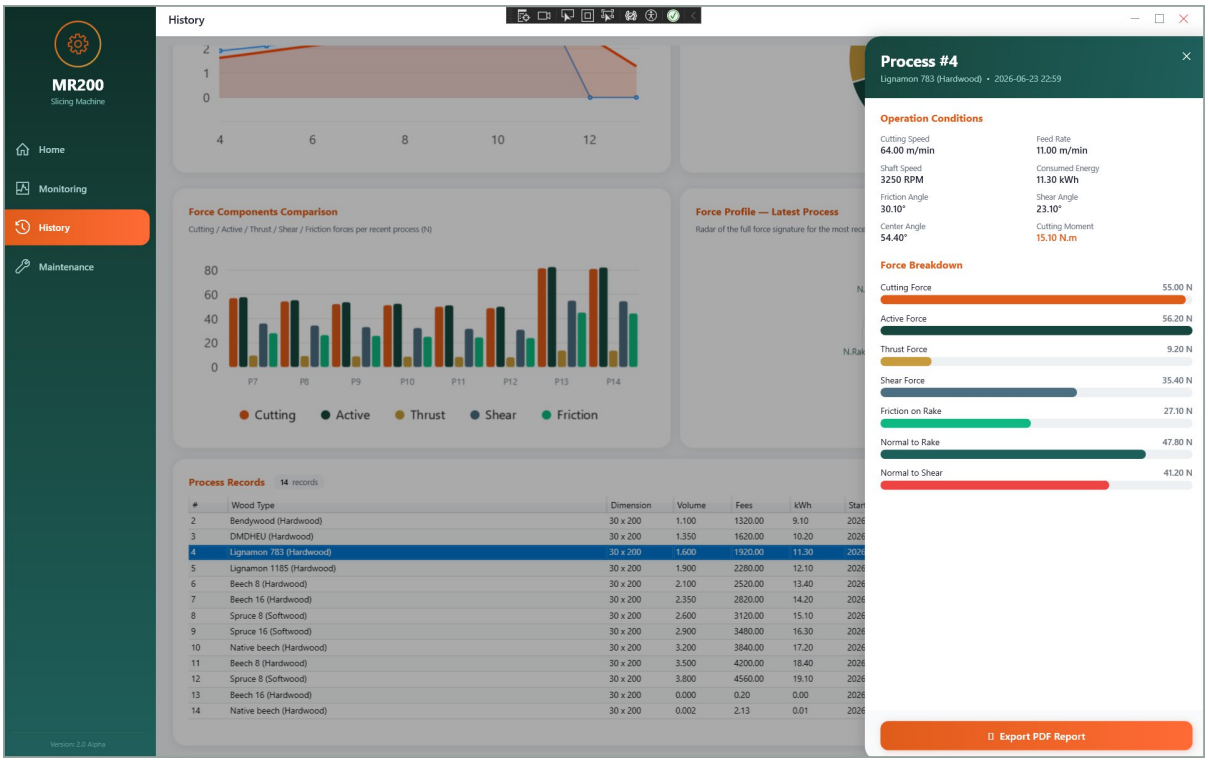


الشكل 3-20: صفحة سجلّ العمليات (History Page) ومؤشّراتها التجميعية

20.2.4 لوحة تفاصيل العملية (Process Detail Drawer)

الغرض: عرض التفاصيل الكاملة لعملية إنتاجٍ مسجَّلة، وتصدير تقريرها.

تُفتَح هذه اللوحة بالضغط على الزرّ **View** في سطر العملية ضمن جدول **Process Records**. وتعرض شروط التشغيل المخزَّنة — سرعة القطع، ومعدّل التغذية، وسرعة العمود، والطاقة المستهلكة، وزاويتَي الاحتكاك والقص، وزاوية المركز، وعزم القطع — ثمّ تفصيلاً بصرياً لمركّبات القوى السبع بأشرطة نسبية تُقارن كلّ مركّبة بأكبرها. ويتيح الزرّ **Export PDF Report** في أسفل اللوحة تصدير تقرير العملية.



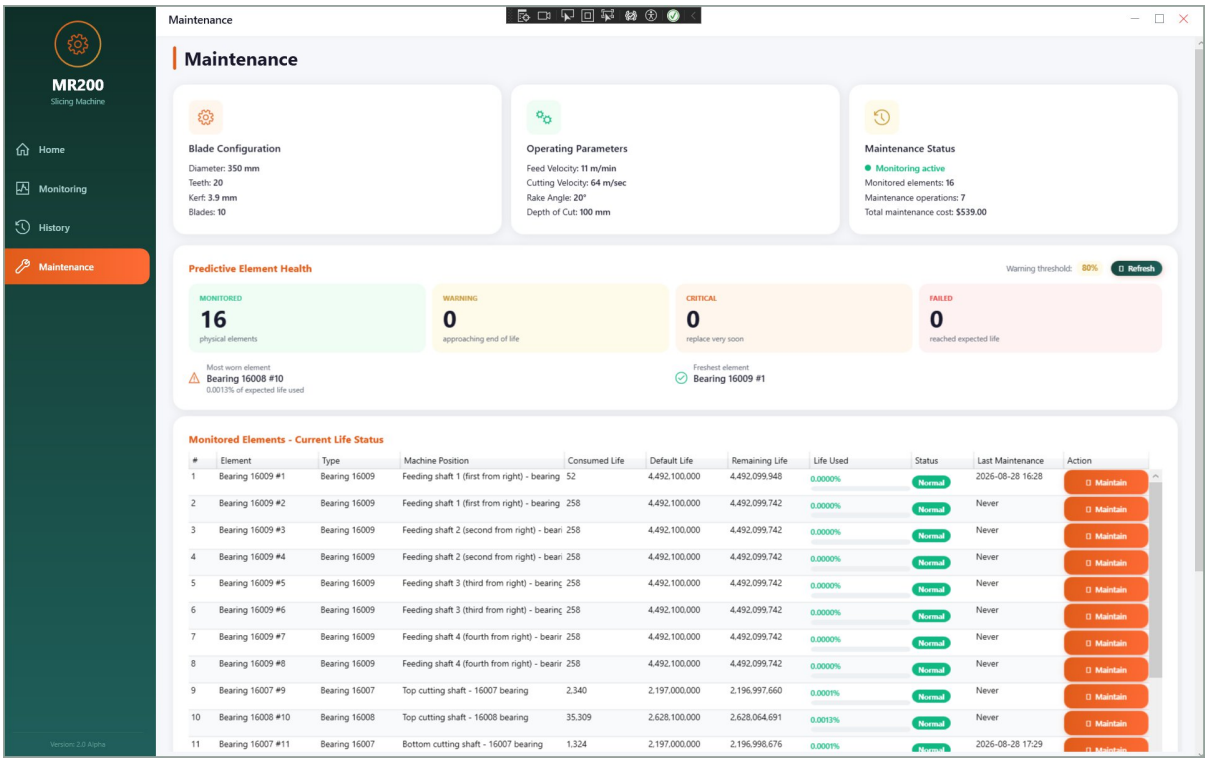
الشكل 4–20: لوحة تفاصيل العملية (Process Detail Drawer) مع جدول سجلّ العمليات

20.2.5 صفحة الصيانة (Maintenance Page)

الغرض: متابعة الحالة الصحية للمكوّنات الستة عشر وتسجيل أعمال الصيانة.

تعرض الصفحة في أعلاها ثلاث بطاقات سياقية: **Blade Configuration** وتضمّ قطر الشفرة وعدد الأسنان وسماكة الشقّ وعدد الشفرات؛ و**Operating Parameters** وتضمّ سرعة التغذية وسرعة القطع وزاوية المِنسَل وعمق القطع؛ و**Maintenance Status** وتبيّن أنّ المراقبة فعّالة، وعدد العناصر المراقَبة، وعدد عمليات الصيانة المسجَّلة، ومجموع تكاليفها.

تليها بطاقات **Predictive Element Health** الأربع التي تَعُدّ العناصر بحسب حالتها (MONITORED / WARNING / CRITICAL / FAILED) مع إظهار عتبة الإنذار المعتمدة (80%)، ثمّ سطرٌ يبيّن أكثر العناصر استهلاكاً وأقلّها. وأخيراً جدول **Monitored Elements – Current Life Status** المؤلَّف من ستة عشر سطراً، ويعرض لكل عنصر: اسمه ونوعه وموقعه على الآلة، وعمره المستهلك والاسمي والمتبقّي، ونسبة الاستهلاك بشريطٍ بصري، وحالته الصحية بشارة ملوّنة، وتاريخ آخر صيانة، وزرّ **Maintain**.



الشكل 5–20: صفحة الصيانة (Maintenance Page) وجدول الحالة الصحية للمكوّنات الستة عشر

قراءة هندسية للأرقام الظاهرة في الشكل 5–20

تُظهر اللقطة قيماً حقيقية مقروءة من قاعدة البيانات وقت التصوير: ستة عشر عنصراً مراقَباً، ولا عنصر في حالة Warning أو Critical أو Failed، وسبع عمليات صيانة مسجَّلة بمجموع تكلفة قدره 539 وحدة نقدية.

وأكثر العناصر استهلاكاً هو Bearing 16008 #10 على عمود القطع العلوي بنسبة **%0.0013** من عمره الاسمي، وهي نسبة ضئيلة متوقّعة لآلةٍ في طور التطوير لم تُشغَّل إنتاجياً لساعاتٍ طويلة.

ويُلاحَظ الفارق الكبير بين العمر المستهلك لمحامل عمود القطع (35,309 دورة) ومحامل التغذية (258 دورة) في التشغيل نفسه، وهو انعكاس مباشر لنسبة السرعات بين العمودين كما شُرح في الفصل الثالث عشر.

20.2.6 لوحة تسجيل الصيانة وتنبيه العطل

لم تتوفّر لقطتا شاشة لهاتين الطبقتين، إذ تظهر الأولى عند الضغط على **Maintain** وتظهر الثانية عند بلوغ عنصرٍ نهاية عمره فعلياً. وقد خُصّص لهما موضعان مرقّمان أدناه يمكن إدراج اللقطتين فيهما لاحقاً من دون تغيير أرقام الأشكال.

لوحة تسجيل الصيانة (Record Maintenance Drawer) — تعرض اسم العنصر وموقعه للقراءة فقط، وحقل اسم المنفّذ، وحقول التكاليف الثلاثة معبّأً منها سعر العنصر مسبقاً، وخانة الإشارة إلى الاستبدال، ورسالة الخطأ عند إدخالٍ غير صالح، وزرّي الحفظ والإلغاء.

موضع مخصّص للقطة شاشة Record Maintenance Drawer

يُدرَج هنا تصوير الشاشة الفعلي عند الضغط على الزرّ Maintain

الشكل 6–20: لوحة تسجيل الصيانة (Record Maintenance Drawer)

تنبيه العطل (Failure Alert Overlay) — طبقة ملء الشاشة تعرض اسم العنصر ورقم موقعه، وعمره الاسمي والمستهلك والمتبقّي ونسبة الاستهلاك وسعره، وحالة الآلة لحظة العطل، وملخّص العناصر الأخرى فوق عتبة الإنذار، وسطر حالة إرسال البريد، وزرّي الإغلاق والانتقال إلى شاشة الصيانة.

موضع مخصّص للقطة شاشة Failure Alert Overlay

يُدرَج هنا تصوير الشاشة الفعلي عند بلوغ أحد العناصر نهاية عمره التشغيلي

الشكل 7–20: تنبيه العطل (Failure Alert Overlay)

21. اختبار النظام (System Testing)

تحديد مستوى الإثبات

لا يتضمّن المستودع مشروع اختبارات آلية (Automated Test Project)؛ لا اختبارات وحدة ولا اختبارات تكامل.

والتحقّق الوارد أدناه من نوعين: **تحقّق ساكن** أجرَته مراجعةُ الشيفرة المصدرية بالكامل قبل إعداد هذا المستند، و**تحقّق تشغيلي** أُجري أثناء التطوير عبر أدوات خارجية مقابل قاعدة البيانات الفعلية وحساب البريد الفعلي كما هو موثَّق في مواصفة النظام.

وقد مُيِّز النوعان في العمود الأخير من الجدول التزاماً بألّا يُنسَب إلى المشروع اختبارٌ لا يسنده دليل.

الجدول 21-1: مجالات التحقّق ونتائجها ومستوى الإثبات

مستوى الإثبات	النتيجة	ما جرى التحقّق منه	المجال
تحقّق ساكن + تشغيلي	مطابق	ستة عشر عنصراً، علاقة 1:1 فريدة، أعمار وأسعار وواحدات صحيحة، وعدم المساس بالجداول السابقة	بنية قاعدة البيانات
تحقّق ساكن	مطابق	الترحيل AddMaintenanceSystem إضافي بحت ولا يعدّل جدولاً قائماً	الترحيلات
تحقّق ساكن + تشغيلي	مطابق	0.41667 دورة/ثا للتغذية، RPM÷60 للقطع، 0.30917 مرّة/ثا للسيور، والحساب زمني لا نبضي	معدّلات العمر
تحقّق تشغيلي	مطابق	التراكم أثناء التشغيل، وعدم الحفظ عند الإيقاف، والحفظ عند الإنهاء، والاستئناف الصحيح	دورة التشغيل والإيقاف والإنهاء
تحقّق تشغيلي	مطابق	الكشف مرّةً واحدة، وإيقاف الآلة، وتثبيت العَلَم، وعدم تكرار الحدث	كشف نهاية العمر
تحقّق تشغيلي	مطابق	إنشاء السجلّ، وتصفير العمر، ومسح العَلَم، والإبقاء على التاريخ	تسجيل الصيانة والاستبدال
تحقّق تشغيلي	مطابق	التجميد والاستئناف واستثناء مدّة التوقّف والتصفير بعد الإنهاء	مؤقّت الآلة
تحقّق تشغيلي	مطابق	اكتمال الأقسام، وثنائية اللغة، وسلامة البنية بعد الترميز	محتوى رسالة التنبيه
تحقّق تشغيلي	مطابق	إرسال حقيقي مع رقم رسالة، وإرفاق الكتالوج	الإرسال الفعلي

مستوى الإثبات	النتيجة	ما جرى التحقّق منه	المجال
		والصورة	
تحقّق تشغيلي	مطابق	التشفير، والتجديد المتكرّر، وسلامة الملف بعد التجديد	تخزين رمز التفويض
تحقّق ساكن + تشغيلي	مطابق	خلوّ المستودع من أيّ سرّ، وتشفير الرمز، ووقوع المسارات خارج المشروع	أمن الاعتمادات
تحقّق ساكن + تشغيلي	مطابق	توفّر الملفات الأربعة، ورفض محاولات الخروج من المجلّد	الكتالوجات
تحقّق ساكن	لا وجود لأيّ ربط	بحث نصّي كامل عن PLC وModbus وOPC-UA والمنافذ التسلسلية في كل ملفات المشروع	غياب أيّ ربطٍ عتادي
لم يُختبَر	غير موجود	وجود مشروع اختبارات في المستودع	اختبارات آلية
لم يُختبَر	غير موجود	أدوات اختبار واجهة	اختبار واجهة آلي
تحقّق ساكن	غير موجودة	وجود أمرٍ في الواجهة يستدعي دالّتي الربط والفصل	واجهة ربط Gmail

21.1 ملاحظة ميدانية

سجّلت إحدى عمليات التشغيل الفعلية زياداتٍ في العمر مقدارها 136.67 دورة لمحامل التغذية، و19,092 دورة لمحامل القطع، و101.4 مرّة للسيور. وتعطي هذه القيم نسبةً بين محامل القطع ومحامل التغذية مقدارها **139.693** مقابل قيمةٍ نظرية مقدارها 139.696، ونسبةً بين السيور ومحامل التغذية مقدارها **0.742** مطابقةً للقيمة النظرية. وهذا اتّساق يؤكّد أنّ النموذج الحركي مطبَّق تطبيقاً صحيحاً في التشغيل الفعلي.

22. القيود الحالية (Current Limitations)

يُعَدّ هذا الفصل من أهمّ فصول المستند من حيث الدقّة الأكاديمية، إذ يحدّد بوضوح ما لا يفعله النظام.

22.1 قيود عتادية

الجدول 1-22: القيود المتعلّقة بالعتاد

التوضيح	القيد
لا يوجد في المشروع أيّ PLC ولا ناقل حقلي ولا منفذ تسلسلي ولا OPC-UA ولا أيّ مدخل حسّاس. وقد جرى التحقّق من ذلك ببحثٍ نصّي شامل في جميع ملفات الشيفرة والإعدادات، ولم يظهر سوى نصّ التنويه المعروض على الواجهة	**لا اتصال بالآلة الفيزيائية**
لا تمثّل قيم لوحة المراقبة أيّ قياسٍ فيزيائي، ولا تحمل دلالةً تشخيصية	**جميع قيم المراقبة مولَّدة برمجياً**
الضغط على **Start** أو **Stop** أو **End Process** لا يُشغّل محرّكاً ولا يفصل قاطعاً كهربائياً. وبالتالي فإنّ الإيقاف التلقائي عند العطل **إيقاف برمجي** لا تعشيق أمان كهربائي (Interlock)	**أزرار التشغيل تتحكّم بحالةٍ برمجية فقط**
لوحة الكاميرا عنصر ثابت في الواجهة يحمل الحالة **OFFLINE**	**المراقبة بالكاميرا غير مفعَّلة**

22.2 قيود المحاكاة

- قيم المحاكاة عشوائية الطابع وقابلة لإعادة الإنتاج من بذورٍ ثابتة، ولا تحمل معنى تشخيصياً.
- لا تتضمّن لوحة المراقبة أيّ عتبات ولا تطلق أيّ إنذار.
- الحالة Fault معرَّفة في النموذج لكنّها غير قابلة للبلوغ عملياً.
- الساعة المعروضة على لوحة المراقبة تَعُدّ النبضات لا الزمن الجداري، فقد تنحرف إن انشغل خيط الواجهة.

22.3 قيود النمذجة

- سرعات الأعمدة المستعمَلة في حساب العمر **ثوابت إعدادية ومعادلات مشتقّة، لا قياسات.**
- لا يأخذ الحساب في الحسبان الحمل الفعلي، ولا درجة الحرارة، ولا كفاية التشحيم، ولا الاهتزاز.

- يعتمد عمر المحامل على التصنيف الاسمي L10 وحده، من دون أيّ تخفيضٍ تبعاً للحمل (Load-Dependent Derating).

22.4 قيود برمجية

- **لا مصادقة ولا حسابات مستخدمين ولا صلاحيات**؛ فأيّ مستخدم يستطيع تسجيل عملية صيانة، وتُنسَب العملية إلى نصٍّ يكتبه بنفسه.
- **سلسلة الاتصال بقاعدة البيانات مثبَّتة في الشيفرة** ولا تُقرَأ من ملف إعدادات، ما يعيق النشر على أكثر من جهاز.
- **لا إطار تسجيل أحداث (Logging)**، وتوجد كتل التقاطٍ صامتة تبتلع الاستثناءات في بعض المسارات.
- **لا مشروع اختبارات** في المستودع.
- لا يمكن تعديل سجلّات الصيانة أو حذفها، ولا إضافة عنصرٍ جديد أو إزالته من الواجهة.
- لا توجد إمكانية بحثٍ أو ترشيحٍ أو فرزٍ في أيّ جدول.
- **واجهة ربط Gmail غير موجودة في هذه النسخة**، رغم جاهزية طبقة الخدمة.
- رابطان من روابط صور المكوّنات محجوبان بحماية المواقع ضدّ الطلبات الآلية.
- النظام أحادي الآلة وأحادي المستخدم، ويعمل على نظام Windows حصراً مع قاعدة بيانات محلّية.

23. التطوير المستقبلي (Future Development)

تصنيف الفصل

كلّ ما يرد في هذا الفصل مصنَّف **[FUTURE]** ويُعرَض بوصفه عملاً مستقبلياً مقترحاً، لا وظيفةً قائمة.

23.1 استبدال المحاكاة باستحواذٍ حقيقي للبيانات

صُمّمت نقطة الوصل بين المحاكاة والعرض ضيّقةً على نحوٍ متعمَّد، ما يجعل هذا الانتقال محدود الأثر:

```
CURRENT :  DispatcherTimer → SimulationManager.Tick(dt) → SensorSignal.Tick(dt)
                                → MonitoredSignal → charts

FUTURE  :  PLC / OPC-UA / Modbus client → acquired reading
                                → MonitoredSignal → charts
```

والخطوات المطلوبة أربع: إضافة خدمة استحواذ بيانات، ومنح الصنف MonitoredSignal تابعاً يقبل قراءةً خارجية، واستبدال متن SimulationManager.Tick بقراءة القيم المستحوَذة، وربط كل وسم (Tag) بالإشارة المقابلة. أمّا المخطّطات والمحاور والإحصاءات وملفات XAML فتبقى من دون تغيير. **ويجب الانتباه** إلى أنّ المحاكاة الثانية في الصفحة الرئيسة تحتاج معالجةً مستقلّة.

23.2 الانتقال من النمذجة إلى القياس في تتبّع العمر

الجدول 23-1: مصادر السرعة حالياً ومستقبلاً

المصدر المستقبلي المقترح	المصدر الحالي	البارامتر
مرمّز دوران (Encoder) أو مقياس سرعة على عمود التغذية	ثابت إعدادي = 25 دورة/د	سرعة أعمدة التغذية
مرمّز دوران على عمود القطع	معادلة محسوبة من شروط القطع	سرعة عمود القطع
حسّاس سرعة للسير، أو اشتقاقها من مرمّز	ثابت إعدادي = 0.371 م/ثا	السرعة الخطّية للسير

المصدر المستقبلي المقترح	المصدر الحالي	البارامتر
البكرة		

والجدير بالذكر أنّ هذا التحويل يمسّ **مدخلات** التابع LifeConsumedPerSecond وحدها؛ أمّا منطق التراكم والتخزين والعتبات والتنبيه فيعمل أصلاً على زمنٍ حقيقي ولا يحتاج أيّ تعديل.

23.3 خطوات أخرى مقترحة للنشر الصناعي

الجدول 2-23: مقترحات التطوير المستقبلي ومسوّغاتها

المسوّغ الهندسي	المقترح
الإيقاف التلقائي عند العطل برمجي فقط؛ ويجب أن يفصل قاطعاً فعلياً ليؤدّي وظيفته الوقائية	تعشيق إيقافٍ كهربائي حقيقي
سجلّات الصيانة غير منسوبة إلى هوية موثّقة حالياً	مصادقة وصلاحيات المستخدمين
لتمكين النشر على أكثر من جهاز من دون إعادة بناء التطبيق	إخراج سلسلة الاتصال إلى ملف الإعدادات
لاستبدال كتل الالتقاط الصامتة وتمكين تشخيص الأعطال	إطار تسجيل أحداث منظّم
للانتقال من صيانةٍ قائمة على دورة التشغيل إلى صيانةٍ قائمة على الحالة الفعلية (Condition-Based Maintenance)	استشعار الاهتزاز ودرجة الحرارة
اللوحة مهيّأة في الواجهة وتنتظر مصدر صورة	تفعيل المراقبة بالكاميرا
لتحسين دقّة التنبؤ بالعمر مقارنةً بالاعتماد على التصنيف الاسمي وحده	تخفيض عمر المحامل تبعاً للحمل
لضمان عدم انكسار السلوك القائم عند التوسّع	مجموعة اختبارات آلية
إضافة قنوات أخرى إلى جانب البريد، وإشعارات عند بلوغ عتبتَي 80% و95% لا عند العطل وحده	توسيع آليات الإشعار
طبقة الخدمة جاهزة، وينقصها أمران في نموذج العرض وزرّان في الواجهة	استعادة واجهة ربط Gmail

24. الخلاصة (Conclusion)

يقدّم نظام مراقبة الصيانة الخاص بالآلة Smart Multi Ripping Machine منظومةً برمجية مكتبية تجمع ثلاثة مجالات وظيفية متمايزة في نضجها، والتمييز بينها أهمّ ما ينبغي أن يُحمَل من هذا المستند.

المجال الأول — التحليل الإنتاجي وسجلّه: منفَّذ بالكامل. يحسب النظام زوايا القطع وسماكة الرايش وسبع مركّبات للقوى وعزم عمود القطع انطلاقاً من خواصّ الخشب وهندسة الشفرة، ويخزّن كل عملية إنتاج مكتملة بشروطها وقيمها الحرجة، ويتيح استعراضها وتصدير تقاريرها. **[IMPLEMENTED]**

المجال الثاني — الصيانة التنبؤية: منفَّذ بالكامل وهو الإسهام الجوهري للمشروع. يتتبّع النظام ستةَ عشرَ مكوّناً فيزيائياً كلاًّ على حدة، ويراكم عمرها المستهلك من **زمن التشغيل الحقيقي** مضروباً بنموذجٍ حركي مضبوط، ويخزّنه تخزيناً معامَلاتياً دائماً، ويكشف بلوغ نهاية العمر مرّةً واحدة بالضبط، ويوقف الآلة عبر مسار الإيقاف البرمجي القائم، ثم يرسل رسالة تنبيه حقيقية ثنائية اللغة عبر Gmail API مرفقةً بالكتالوج الصحيح وصورة العنصر. **[IMPLEMENTED]**

المجال الثالث — لوحة المراقبة: محاكاة بالكامل. تسع إشارات ونموذج إنتاج تولّدها عملية ارتدادٍ إلى المتوسّط ببذورٍ ثابتة. لا يشارك في إنتاجها حسّاس ولا PLC ولا آلة فيزيائية، ولا تتضمّن اللوحة عتبات ولا تطلق إنذارات، وتُصرّح بذلك عن نفسها على الشاشة. **[SIMULATED]**

24.1 في جدوى مرحلة المحاكاة

قد يُتساءل عن جدوى لوحةٍ لا تعرض قياساتٍ حقيقية. والجواب الهندسي أنّ المحاكاة أدّت ثلاث وظائف ملموسة: **أولاها** التحقّق من أنّ بنية العرض قادرة على استيعاب تسع إشارات متزامنة بتواتر ثلاث مرّات في الثانية من دون تدهور في الأداء أو اهتزازٍ في التخطيط؛ **وثانيتها** تثبيت نقطة الوصل مع مصدر البيانات في موضعٍ واحد ضيّق يسهل استبداله؛ **وثالثتها** تمكين أصحاب المصلحة من تقويم تجربة المشغّل المستهدفة قبل إنفاق أيّ كلفةٍ على العتاد.

24.2 الموقف الأكاديمي الدقيق

الخلاصة في جملة واحدة

ذكاء الصيانة في هذا النظام برمجيّة حقيقية تعمل على آلةٍ ممثَّلة بنموذج، ولوحة المراقبة محاكاةٌ للتجربة التشغيلية المستهدفة بعد الربط بالعتاد.

وقد صُمّم الجانبان بحيث يكفي إحلال قيمٍ حقيقية مستحوَذة — في الكائنات MonitoredSignal بالنسبة إلى اللوحة، وفي مدخلات LifeConsumedPerSecond بالنسبة إلى تتبّع العمر — ليصبح النظام موصولاً بالعتاد من دون إعادة تصميم البنية المحيطة بهما.

وبهذا يكون المشروع قد أنجز الجزء البرمجي من منظومة صيانةٍ تنبؤية متكاملة، وترك المسافة الفاصلة عن التطبيق الصناعي محدّدةً بدقّة وقابلةً للقياس: خدمة استحواذ بيانات، ومجموعة حسّاسات، وتعشيق أمانٍ كهربائي، ومنظومة صلاحيات.