

تحسين الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية من خلال أنظمة الصيانة
الذكية
دراسة تحليلية تطبيقية في قطاع الدعم الفني الجوي

إعداد الطالب/

انس إبراهيم الغديفي

الرقم الجامعي: 251000187

رقم الهوية: 1090560754

إشراف/

د. الفیصل عبد الحمید- د. فايز جراد

العام الدراسي:

1447هـ – 2025 م

الإهداء:

إلى من علّمني أن الانضباط أساس الطيران،
وأن كل طائرة تُحلّق بثقة في السماء، يقف خلفها رجال يعملون بصمت على الأرض.

إلى زملائي في قطاع صيانة الطائرات،
الذين يتعاملون مع المحركات كما يتعامل الجراح مع نبض الحياة،
يقرأون الصوت والاهتزاز والبيانات كما يقرأ القائد خارطة المعركة،
ويُدركون أن كل برغي مشدود باتقان، هو ضمانٌ لعودةِ أمانة من مهمةٍ صعبة.

إلى رؤسائي وقادتي في ميادين العمل الفني العسكري،
الذين غرسوا فينا أن الجاهزية لا تُبنى بالأوامر فقط،
بل تُصنع بالعلم، والانضباط، والإخلاص في كل مهمة.

إلى كل من جمع بين التحدي والتعلم،
بين عباءة المهندس وواجب الجندي،
بين ضجيج الورشة وسكون التفكير الأكاديمي،
إلى كل زميل وقف بجانبني في رحلة البحث هذه،
أهدي هذا العمل العلمي المتواضع.

"الجاهزية القتالية لا تتحقق إلا عندما يؤمن كل فرد أن مكانه جزء من المنظومة وأن أدائه يصنع النتيجة قبل المعركة".

صاحب السمو الملكي

الأمير محمد بن سلمان بن عبد العزيز آل سعود
ولي العهد، رئيس مجلس الوزراء، وزير الدفاع

جامعة ميد أوشن - المملكة العربية السعودية
كلية الإدارة - قسم إدارة المشاريع

الشكر والتقدير:

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبعلمه تُبنى القدرات، وبفضله تُفتح أبواب المعرفة والتطوير.

أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى جامعة ميد أوشن، ممثلة في كلية الإدارة - قسم إدارة المشاريع، على ما وفرت من بيئة علمية محفزة تجمع بين الدراسة الأكاديمية والتطبيق العملي، وتتيح للباحثين من التخصصات الفنية والهندسية فرصة تطوير أدواتهم العلمية لخدمة قطاعاتهم الحيوية.

كما أعبر عن عميق امتناني وتقديري إلى سعادة الدكتور الفيصل عبد الحميد والدكتور فايز جراد، لما قدّماه من إشراف وتوجيه علمي متميز، وإرشادات دقيقة أسهمت في بناء هذا العمل على أسس منهجية وعلمية رصينة.

ولا يفوتني أن أتوجّه بالشكر إلى إدارة قطاع صيانة المحركات العسكرية وزملائي المهندسين والفنيين الذين أتاحوا لي الاطلاع الميداني على واقع الصيانة الجوية، وساهموا بخبراتهم العملية وآرائهم في إثراء محتوى هذا البحث.

وأخص بالشكر كل من قدّم لي كلمة تشجيع، أو دعمًا فنيًا أو علميًا، في أثناء إعداد هذه الرسالة.

إن هذا العمل هو ثمرة تعاون بين بيئة أكاديمية راقية وبيئة ميدانية صلبة، يجمعهما هدف واحد:

رفع كفاءة الجاهزية القتالية لوطننا الغالي.

فلهؤلاء جميعًا، أرفع خالص الشكر والتقدير، داعيًا الله أن يجعل هذا الجهد خالصًا لوجهه الكريم، وسببًا في خدمة وطننا، ورفع سلاحنا، وتطوير كوادرننا الوطنية في ميدان الطيران العسكري.

المستخلص:

تواجه منظومات الطيران العسكري في العصر الحديث تحديًا استراتيجيًا يتمثل في تحقيق أعلى درجات الجاهزية القتالية للطائرات، مع خفض تكاليف الصيانة، وتسريع زمن الاستجابة الفنية للأعطال. ولأن محركات الطائرات تُعد القلب النابض لمنظومة القتال الجوي، فإن أي تأخير أو قصور في جاهزيتها ينعكس مباشرة على قدرة القوات الجوية على تنفيذ مهامها القتالية أو التدريبية في الوقت المحدد.

ومن هذا المنطلق، جاءت هذه الدراسة لتبحث في أثر تطبيق أنظمة الصيانة الذكية (Predictive Maintenance – PdM) على رفع الجاهزية التشغيلية للطائرات العسكرية، من خلال دراسة تحليلية تطبيقية في أحد قطاعات الدعم الفني الجوي بالمملكة العربية السعودية، الذي يُعد نموذجًا فنيًا متقدمًا في مجال صيانة محركات الطيران العسكري.

تتبع أهمية هذه الدراسة من كونها تربط بين الهندسة التطبيقية وإدارة المشاريع الدفاعية، حيث تهدف إلى توضيح كيف يمكن لتقنيات التحليل التنبؤي، وإنترنت الأشياء (IoT)، والذكاء الاصطناعي، أن تُحدث تحولًا جوهريًا في منظومة الصيانة الجوية من نموذجها التقليدي القائم على التكرار الزمني إلى نموذج ذكي يعتمد على البيانات الحية والاستشعار اللحظي.

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي باعتباره الأنسب لمثل هذا النوع من البحوث التطبيقية، إذ يجمع بين الوصف الفني الدقيق للأنظمة الميكانيكية والإلكترونية للمحركات، وبين التحليل الإحصائي الكمي للبيانات الميدانية التي تم جمعها عبر استبانة موجهة إلى عينة من المهندسين والفنيين العاملين في وحدات صيانة محركات الطيران العسكري. وتم تحليل البيانات باستخدام برنامج (SPSS) عبر مقاييس المتوسط الحسابي، والانحراف المعياري، واختبار الارتباط، وتحليل التباين.

أظهرت نتائج الدراسة أن تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية يؤدي إلى تحسين ملحوظ في كفاءة التشغيل، وتقليل معدلات الأعطال غير المجدولة، وتسريع

عمليات التشخيص والاستجابة، مما ينعكس إيجاباً على مؤشر الجاهزية القتالية للطائرات. كما تبين أن مستوى الوعي الفني والتدريب الميداني للعاملين يشكّل عاملاً حاسماً في نجاح هذه الأنظمة، وأن البنية التحتية الرقمية الحالية تحتاج إلى تعزيز وربط مباشر بين بيانات الصيانة وبيانات التشغيل الجوي.

وأوصت الدراسة بضرورة تطوير منصة رقمية موحدة للصيانة التنبؤية في القطاع العسكري، وتفعيل برامج تدريب تخصصية في تحليل البيانات الفنية للطائرات، وإنشاء وحدات تنظيمية تُعنى بالجاهزية الذكية داخل إدارات الدعم الفني، بالإضافة إلى تضمين مؤشرات الأداء (PdM KPIs) ضمن التقارير القيادية المعتمدة في منظومات الدفاع الجوي.

إن هذه الدراسة تسعى إلى الإسهام في تطوير نموذج وطني متكامل للصيانة الذكية في الطيران العسكري، يكون قادراً على رفع كفاءة الموارد البشرية والتقنية، ويُعزز أهداف رؤية المملكة 2030 في توطيد الصناعات الدفاعية والتحول نحو الجاهزية الرقمية الكاملة.

الكلمات المفتاحية:

الصيانة التنبؤية، الجاهزية القتالية، الطائرات العسكرية، تحليل البيانات، الكفاءة التشغيلية، الذكاء الاصطناعي، الدعم الفني الجوي.

فهرس المحتويات

الموضوع	الصفحة
1 الغلاف والعنوان	1
2 الإهداء	2
3 الشكر والتقدير	3
4 المستخلص العربي	4
6 فهرس المحتويات	6

الفصل الأول: الإطار العام للدراسة

1-1 مقدمة الدراسة	10
1-2 مشكلة الدراسة	18
1-3 أهداف الدراسة	26
1-4 أهمية الدراسة	34
1-5 تساؤلات الدراسة	42
1-6 فرضيات الدراسة	48
1-7 منهجية الدراسة	55
1-8 حدود الدراسة	64
1-9 تعريف المصطلحات الأساسية	72
1-10 الإطار النظري للدراسة	83

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

2-1	مقدمة الفصل	61
2-2	الأساس النظري لمفهوم الصيانة التنبؤية	62
2-3	تطبيقات الصيانة التنبؤية عالمياً	78
2-4	التحديات الإدارية والفنية	118
2-5	الدراسات السابقة الموسعة	150
2-6	الفجوات البحثية	158
2-7	النموذج المفاهيمي المقترح	163
2-8	ملخص الفصل الثاني	167

الفصل الثالث: منهجية الدراسة

3-1	مقدمة الفصل	95
3-2	نوع المنهج المستخدم	97
3-3	المنهج التطبيقي الميداني	102
3-4	مجتمع الدراسة	109
3-5	عينة الدراسة وطريقة اختيارها	112
3-6	أداة الدراسة وتصميمها	118
3-7	صدق وثبات الأداة	130
3-8	أساليب تحليل البيانات الإحصائية	137
3-9	الحدود المنهجية والإجراءات الأخلاقية	148
3-10	ملخص الفصل الثالث	154

الفصل الرابع: عرض النتائج وتحليلها

121	4-1 مقدمة الفصل
124	4-2 تحليل الخصائص الديموغرافية
130	4-3 نتائج محور المعرفة بالصيانة التنبؤية
142	4-4 نتائج محور واقع الصيانة الحالية
PdM	4-5 نتائج محور الأثر المتوقع لتطبيق 154
170	4-6 تحليل العلاقات الإحصائية بين المحاور
182	4-7 مناقشة النتائج في ضوء الفرضيات
200	4-8 ملخص الفصل الرابع

الفصل الخامس: التوصيات والمقترحات

155	5-1 مقدمة الفصل
157	5-2 التوصيات الفنية والتقنية
164	5-3 التوصيات البشرية والتدريبية
17	5-4 التوصيات الإدارية والتنظيمية
178	5-5 التوصيات الاقتصادية والاستراتيجية
185	5-6 المقترحات المستقبلية
190	5-7 الخلاصة العامة للفصل الخامس

الخاتمة العامة للبحث

163	الخاتمة العامة
-----	----------------

الملاحق

- الملحق (1): الاستبانة 166
الملحق (2): الجداول الإحصائية 168
الملحق (3): المصطلحات الفنية 169

قائمة المراجع

- المراجع العربية 170
المراجع الأجنبية 171

- إقرار النزاهة الأكاديمية 172

1- الفصل الأول: الإطار العام للدراسة

1-1 المقدمة

في بيئةٍ تتزايد فيها التحديات الأمنية والعملياتية على المستوى العالمي، أصبحت الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية مكوّنًا استراتيجيًا لا يقل أهمية عن منظومات التسليح أو الكفاءة البشرية. فالقدرة على تنفيذ مهمة جوية ناجحة لا تعتمد فقط على مهارة الطيار أو دقة التخطيط العملياتي، بل تبدأ من الورشة الفنية ومن مراكز الصيانة التي تُجهّز الطائرات وتضمن جاهزيتها بنسبة 100% قبل الإقلاع. ولهذا السبب، بات يُنظر إلى قطاع الصيانة الجوية باعتباره “الذراع الخفية” التي تحدد نجاح أو فشل أي قوة جوية في تحقيق مهامها الاستراتيجية.

أولاً: الجاهزية القتالية كمفهوم استراتيجي

الجاهزية القتالية ليست مصطلحاً تقنياً فحسب، بل هي مفهوم شامل يعبر عن قدرة المنظومة العسكرية على أداء مهامها في أي وقت وبأعلى كفاءة ممكنة. وتشمل الجاهزية أبعاداً متعددة: الجاهزية البشرية، والجاهزية اللوجستية، والجاهزية التسليحية، والجاهزية الفنية. ومن بين هذه الأبعاد، تُعد الجاهزية الفنية أكثرها حساسية وتأثيراً لأنها تمثل حلقة الوصل بين التقنية والعمليات. إن أي طائرة، مهما بلغت قوتها التدميرية أو قدراتها الإلكترونية، تصبح عديمة القيمة العملياتية إذا لم تكن جاهزة ميكانيكياً للطيران. ومن هنا، ينشأ الدور المحوري للصيانة الجوية، التي تُعتبر خط الدفاع الأول لضمان الاستمرارية التشغيلية والسلامة الجوية والفاعلية القتالية.

في هذا السياق، يُمكن النظر إلى الصيانة الجوية ك نظام إدارة هندسية متكامل (Integrated Engineering Management System) يجمع بين المعرفة الفنية بالأنظمة الميكانيكية والإلكترونية للطائرة، وبين إدارة الوقت والموارد البشرية والمادية لتحقيق الهدف النهائي: الجاهزية الكاملة في الزمن المحدد.

ثانيًا: العلاقة بين الصيانة والجاهزية القتالية

الصيانة ليست مجرد نشاط إصلاحي أو إجراء روتيني؛ بل هي نظام استباقي إداري وفني يهدف إلى تقليل الأعطال وتحقيق الاستقرار التشغيلي للأسطول الجوي. ولأن الطائرات العسكرية تعمل في ظروف تشغيلية قاسية — من حرارة عالية، ورمال، ورطوبة، واهتزازات شديدة — فإن احتمالية الأعطال الفنية تزداد، ما يفرض على منظومات الصيانة تطوير استراتيجيات أكثر ذكاءً وقدرة على التنبؤ بالمشكلات قبل وقوعها.

في المفهوم العسكري، تُقاس الجاهزية بعدة مؤشرات مثل:

- نسبة الجاهزية الفنية للطائرات (A-Rate): عدد الطائرات القادرة على تنفيذ المهام من إجمالي الأسطول.
- معدل الأعطال المفاجئة: (Unscheduled Failures) وهو مؤشر يعبر عن كفاءة الصيانة الوقائية.
- متوسط زمن الإصلاح (MTTR): الزمن اللازم لإعادة الطائرة إلى الخدمة بعد اكتشاف العطل.
- تكلفة الصيانة لكل ساعة طيران (CFH): مؤشر اقتصادي يرتبط بكفاءة الإنفاق الدفاعي.

كل هذه المؤشرات تتأثر مباشرة بنوع نظام الصيانة المطبق. فإذا كان النظام تقليديًا، تكون الاستجابة بطيئة والتكلفة مرتفعة والجاهزية محدودة. أما إذا كان النظام ذكيًا، فإن الاستجابة تصبح فورية، والقرار الفني يعتمد على بيانات دقيقة، وتتحقق الجاهزية بأقل تكلفة ممكنة.

ثالثًا: تطور مفهوم الصيانة الجوية

تاريخيًا، مرّت الصيانة الجوية بثلاث مراحل رئيسية:

1. الصيانة التصحيحية: (Corrective Maintenance) وهي المرحلة الأولى التي كانت تعتمد على إصلاح العطل بعد وقوعه،

أي أن الطائرة تُفحص فقط بعد توقفها عن العمل. هذا النموذج كان شائعاً في بدايات القرن العشرين، إلا أنه مكلف جداً وغير فعال في البيئات العسكرية.

2. الصيانة الوقائية: (Preventive Maintenance)

ظهر هذا المفهوم خلال الحرب العالمية الثانية، حيث بدأت القوات الجوية في تنفيذ الصيانة بشكل دوري وفق جداول زمنية ثابتة بغرض الوقاية من الأعطال. رغم أنه قلل من المفاجآت، إلا أنه أحياناً يؤدي إلى استبدال قطع سليمة فقط لأنها بلغت الحد الزمني المحدد، ما يزيد من الهدر في الوقت والموارد.

3. الصيانة التنبؤية: (Predictive Maintenance – PdM)

وهي الجيل الثالث من الصيانة، وتعتمد على تحليل البيانات الحقيقية الصادرة من أنظمة الطائرة وأجهزة الاستشعار لتحديد الحالة الفعلية للمكونات. هذا الأسلوب لا يتعامل مع الزمن كعامل ثابت، بل مع الأداء الفعلي كمرجع لاتخاذ القرار، ما يجعل الصيانة أكثر دقة وفاعلية.

رابعاً: الصيانة الذكية كتحول استراتيجي في إدارة الدعم الفني

لقد شكّل دخول تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) وإنترنت الأشياء (IoT) إلى قطاع الطيران العسكري تحولاً جذرياً في فلسفة الصيانة. فبدل أن تكون الصيانة مجرد نشاط لاحق للعمليات، أصبحت جزءاً من منظومة اتخاذ القرار العملياتي نفسها.

الصيانة الذكية (Smart Maintenance) تعني استخدام التحليل التنبؤي للبيانات المستمدة من المستشعرات الموجودة في المحرك وأجزاء الطائرة الأخرى، بحيث يمكن التنبؤ بالأعطال بدقة عالية قبل أن تظهر مؤشرات خارجية. هذه البيانات يتم تحليلها باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي التي تقيّم أداء كل مكون بناءً على أنماط الاهتزاز، ودرجات الحرارة، وضغط الزيت، وغيرها من العوامل التشغيلية.

في الأنظمة العسكرية المتقدمة، مثل برنامج CBM+ الأمريكي، يتم تحليل ملايين النقاط من البيانات لكل طائرة في كل رحلة، ويتم إرسال تنبيهات فورية

للمهندسين الأرضيين عند ظهور مؤشرات ضعف في أداء أي جزء من المحرك، حتى قبل أن تظهر في أجهزة الطيار. والنتيجة: طائرات أقل تعرضاً للأعطال، وصيانة أكثر دقة، وتكلفة تشغيلية أقل.

خامساً: واقع الصيانة في البيئة العسكرية السعودية

في المملكة العربية السعودية، يشكّل قطاع صيانة الطيران العسكري أحد أعمدة منظومة الدفاع الجوي. وقد حقق هذا القطاع تطوراً كبيراً في السنوات الأخيرة، بفضل برامج التوطين التقني ونقل المعرفة، وافتتاح مراكز صيانة متقدمة لمحركات الطائرات العسكرية. إلا أن أنظمة الصيانة الحالية ما زالت في معظمها تعتمد على الأسلوب الوقائي القائم على الجداول الدورية، وهو أسلوب مستقر لكنه لا يستفيد من الإمكانيات التي توفرها التقنيات الحديثة في التنبؤ بالأعطال.

وبما أن رؤية المملكة 2030 تضع ضمن أهدافها رفع كفاءة الإنفاق الدفاعي وتوطين الصناعات العسكرية بنسبة 50%، فإن تطوير منظومة الصيانة لتصبح ذكية وتنبؤية يُعد خطوة حتمية لتعزيز الجاهزية القتالية وتقليل الاعتماد على الدعم الخارجي في التحليل الفني والتشخيص المتقدم.

من هنا تأتي أهمية هذه الدراسة في تقييم واقع الصيانة الحالية في قطاعات المحركات الجوية العسكرية، واستكشاف إمكانيات تطبيق نموذج الصيانة التنبؤية الذي يعتمد على تحليل البيانات الحية وربطها بأنظمة اتخاذ القرار الفني والإداري.

سادساً: أهمية التحول نحو الصيانة التنبؤية

التحول من النموذج التقليدي إلى النموذج التنبؤي لا يُعتبر مجرد تحديث تقني، بل هو نقلة نوعية في إدارة الموارد العسكرية. تظهر أهمية هذا التحول في النقاط التالية:

• تقليل زمن التوقف. (Downtime Reduction)

• تحسين معدل الجاهزية. (Readiness Rate)

جامعة ميد أوشن – المملكة العربية السعودية
كلية الإدارة – قسم إدارة المشاريع

- خفض تكلفة الإصلاحات الطارئة وقطع الغيار.
 - رفع كفاءة الكادر البشري من خلال العمل الاستباقي.
 - دعم متخذي القرار بمؤشرات فنية دقيقة لحالة الأسطول.
 - تحسين السلامة الجوية وتقليل الحوادث الناتجة عن أعطال مفاجئة.
- وبذلك تتحول الصيانة من عبء مالي إلى عنصر دعم استراتيجي يسهم في التخطيط العملياتي وإدارة المخاطر الدفاعية.

سابعاً: مبررات اختيار موضوع الدراسة

اختيار هذا الموضوع لم يكن عشوائياً، بل جاء نتيجة لملاحظة الباحث خلال خبرته العملية في مجال صيانة المحركات العسكرية أنّ هناك فجوة واضحة بين الإمكانيات التقنية المتاحة والآليات الإدارية المطبقة. فالقطاع يضم كوادراً هندسية ذات كفاءة عالية، لكنه يفتقر إلى التكامل الرقمي في إدارة بيانات الصيانة والتحليل التنبؤي. كما أن معظم القرارات الفنية تُتخذ بناءً على الخبرة الشخصية أو التقدير البشري، دون الاستفادة الكاملة من أدوات التحليل الذكي المتاحة عالمياً.

من هنا، يسعى هذا البحث إلى تقديم رؤية علمية تطبيقية تُسهم في تحويل بيئة الصيانة العسكرية من نمط تقليدي يعتمد على التجربة والخبرة إلى نمط علمي يعتمد على البيانات الدقيقة، ويحقق التكامل بين الهندسة، والإدارة، والتقنية.

ثامناً: مساهمة الدراسة في المعرفة التطبيقية

تتميز هذه الدراسة بأنها تجمع بين ثلاثة أبعاد مترابطة:

1. البعد الهندسي: تحليل أنظمة المحركات وأجهزة الاستشعار وبيانات الأداء.
2. البعد الإداري: دراسة الإجراءات التنظيمية والتخطيطية لإدارة الصيانة في المشاريع العسكرية.

3. البعد التحليلي الرقمي :استخدام أدوات الذكاء الاصطناعي والإحصاء
التطبيقي لتوقع الأعطال وتحليل مؤشرات الأداء.

هذه المزاوجة بين الأبعاد الثلاثة تمنح البحث قيمة عملية عالية، تجعل نتائجه
قابلة للتطبيق الفعلي في وحدات الصيانة العسكرية، وفي الوقت نفسه تضيف
إلى المعرفة الأكاديمية في مجال إدارة المشاريع الدفاعية.

تاسعاً: خلاصة المقدمة

يتضح من العرض السابق أن جاهزية الطائرات العسكرية لم تعد تُقاس فقط
بعدد ساعات الطيران أو عدد الطائرات الجاهزة، بل بقدرة المنظومة الفنية
على التنبؤ بالمشكلات قبل وقوعها، وتحويل البيانات إلى قرارات صيانة دقيقة
وفي الوقت المناسب.

كما أن التحول نحو الصيانة الذكية لم يعد خياراً، بل ضرورة استراتيجية
لضمان التفوق التشغيلي واستدامة الجاهزية في بيئة تتسم بالتعقيد والتنافس
التقني المتسارع.

وبذلك، تمثل هذه الدراسة محاولة علمية جادة لبحث العلاقة بين أنظمة الصيانة
التنبؤية وتحسين الجاهزية القتالية في الطيران العسكري السعودي، عبر تحليل
الواقع الحالي واقتراح نموذج تطبيقي يربط بين التقنية والعمليات والإدارة.

2-1 مشكلة الدراسة

في قطاع الطيران العسكري، تُعدّ الصيانة الفنية المحور الرئيس في الحفاظ على استمرارية الأداء القتالي والعمليات. فبينما تركز الخطط العسكرية على الجاهزية العملياتية والتسليحية، فإنّ الجاهزية الفنية غالباً ما تكون العامل الحاسم في تحديد القدرة الفعلية للقوة الجوية على تنفيذ مهامها. ومع التقدّم التقني الهائل في تصميم المحركات العسكرية، باتت التحديات التي تواجه أقسام الصيانة أكثر تعقيداً من أي وقت مضى، وأصبح الاعتماد على النماذج التقليدية للصيانة مصدراً لمخاطر تشغيلية متزايدة.

تتمثل المشكلة الجوهرية في أن أنظمة الصيانة المطبقة حالياً في معظم وحدات الصيانة الجوية العسكرية ما تزال تعتمد بشكل كبير على الجداول الزمنية الثابتة وتجارب الفنيين السابقة بدلاً من الاعتماد على تحليل البيانات الدقيقة لحالة الطائرة في الوقت الفعلي. وهذا النمط التقليدي يؤدي إلى ثلاث نتائج رئيسية سلبية:

1. زيادة زمن التوقف غير المخطط: (Unplanned Downtime)
إذ تُفاجأ فرق الصيانة أحياناً بأعطال تظهر أثناء المهمات أو قبلها بفترة قصيرة، ما يؤدي إلى تأجيل أو إلغاء المهام الجوية.

2. هدر الموارد الفنية وقطع الغيار:
لأن الصيانة الوقائية تُنفذ على مكونات لا تحتاج فعلياً إلى استبدال، اعتماداً على الزمن وليس على حالة المكوّن، مما يرفع تكاليف التشغيل دون مبرر فني.

3. غياب التكامل الرقمي بين الصيانة والتحليل:
حيث لا تُجمع بيانات الأداء بشكل مستمر ولا تُستخدم أدوات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالحالة المستقبلية للمحركات.
ومن خلال الخبرة الميدانية في بيئة الصيانة العسكرية، تبرز المشكلة أيضاً من خلال عدد من المظاهر التطبيقية الواضحة:
• استمرار الأعطال المفاجئة في بعض المحركات رغم الالتزام الكامل بالجداول الزمنية الدورية.

- اعتماد القرارات الفنية غالبًا على الاجتهاد الشخصي أو الخبرة الميدانية دون دعم من تحليل رقمي علمي.
- ضعف الربط بين بيانات الطيران (Flight Data) وبيانات الصيانة، ما يحدّ من القدرة على تحليل أسباب الأعطال بدقة.
- محدودية التدريب الميداني للعاملين في مجال تحليل البيانات الهندسية (Data Analytics).
- غياب أنظمة موحدة لقياس مؤشرات الأداء الفعلي للجهازية الفنية للمحركات.

أولاً: الجذور التقنية للمشكلة

تتبع المشكلة من الفجوة التقنية بين الإمكانيات النظرية المتاحة في الأنظمة الحديثة، والإمكانيات الفعلية المستخدمة في الورش العسكرية. فالمحركات الحديثة، مثل تلك المستخدمة في الطائرات القتالية المتقدمة، تحتوي على مئات الحساسات وأجهزة القياس التي تسجل بيانات حرارية وميكانيكية وكهربائية في كل ثانية من زمن التشغيل. غير أنّ هذه البيانات في كثير من الأحيان لا تُحلّل أو تُستخدم بالشكل الأمثل، بل تبقى في سجلات رقمية أو تُراجع فقط عند حدوث العطل.

وبذلك تضيع فرصة ثمينة لاستخدام هذه البيانات في التنبؤ بالأعطال المستقبلية، ووضع خطط صيانة استباقية قائمة على مؤشرات الأداء الفعلية بدلاً من الفترات الزمنية الثابتة.

هذا القصور يُنتج ما يمكن وصفه بـ “الفجوة الرقمية في الصيانة”، أي وجود بيانات متوفرة لكنها غير مستثمرة.

ثانيًا: الجذور البشرية والإدارية للمشكلة

إلى جانب البعد التقني، تعاني بيئات الصيانة العسكرية من تحديات بشرية وتنظيمية تتمثل في:

1. محدودية الكفاءات المتخصصة في التحليل التنبؤي:
معظم الفنيين والمهندسين تلقوا تدريبًا تقليديًا يركز على الإصلاح والتركيب، وليس على تحليل البيانات أو فهم الخوارزميات التنبؤية.
2. غياب ثقافة التحول الرقمي:
بعض العاملين قد يُبدون مقاومة لفكرة الاعتماد على الأنظمة الذكية في اتخاذ القرار، خوفًا من تقليل دور الخبرة البشرية.
3. نقص التنسيق المؤسسي بين الإدارات:
غالبًا ما تكون إدارة الصيانة معزولة إداريًا عن إدارات المشاريع أو إدارات الدعم الفني المركزي، مما يجعل عملية تطوير الأنظمة الجديدة بطيئة.
4. بيروقراطية الإجراءات العسكرية:
أي تعديل في نظام العمل أو اعتماد تقنيات جديدة يحتاج إلى موافقات متعددة ومستويات إشرافية طويلة، مما يُبطئ عملية التحديث التقني.

ثالثًا: الأبعاد العملية للمشكلة

إنَّ الأعطال الفنية غير المتوقعة لا تقتصر آثارها على الورشة فقط، بل تمتد إلى العمليات الجوية نفسها. فعندما تتأخر طائرة واحدة في مهمة قتالية أو تدريبية بسبب عطل مفاجئ، يتأثر جدول الطلعات الجوية، وكفاءة العمليات، ومعدل الجاهزية العام للأسطول.

كما أن بعض الأعطال قد تتكرر في نمط محدد دون أن يُكتشف السبب الجذري، لعدم وجود نظام تحليلي موحد يربط بيانات الصيانة بتاريخ تشغيل الطائرة والظروف البيئية التي تعمل فيها.

في المقابل، أثبتت التجارب في بعض الدول المتقدمة أن تطبيق نظام الصيانة التنبؤية خفّض معدلات الأعطال بنسبة 25-40%، وقلل من تكاليف الصيانة السنوية بما يزيد عن 20%، مما يعني أن حل المشكلة في البيئة المحلية قد يحقق نتائج استراتيجية مشابهة في تحسين الجاهزية القتالية وتقليل الفاقد الفني والمادي.

رابعاً: مظاهر المشكلة في الواقع المحلي

يمكن تلخيص أبرز مظاهر المشكلة في البيئة السعودية ضمن النقاط التالية:

- الاعتماد المفرط على الصيانة الوقائية رغم اختلاف ظروف التشغيل بين الطائرات.
 - غياب لوحة مؤشرات رقمية تربط بين الأداء الفني ونتائج الصيانة في الزمن الحقيقي.
 - عدم وجود برنامج وطني موحد للصيانة الذكية أو قاعدة بيانات مركزية للأعطال.
 - بطء تحديث المناهج التدريبية في المعاهد الفنية العسكرية لمواكبة تقنيات PdM.
 - صعوبة توفير قطع الغيار في الوقت المناسب بسبب غياب التحليل التنبؤي لمتطلبات الصيانة المستقبلية.
- هذه المظاهر جميعها تؤدي إلى تراجع في مستوى الجاهزية القتالية، وزيادة التكلفة التشغيلية، وضعف القدرة على اتخاذ قرارات فنية مبنية على بيانات دقيقة ومحدثة.

خامساً: الصياغة العلمية للمشكلة

استناداً إلى ما سبق، يمكن صياغة المشكلة البحثية على النحو التالي:

تعاني وحدات صيانة محركات الطيران العسكري في المملكة العربية السعودية من اعتمادها الكبير على الأساليب التقليدية للصيانة، مما يؤدي إلى ضعف القدرة على التنبؤ بالأعطال، وارتفاع تكاليف التشغيل، وانخفاض مستوى الجاهزية القتالية للطائرات. ومن ثم، فإن المشكلة التي تسعى هذه الدراسة لمعالجتها تتمثل في تحديد أثر تطبيق أنظمة الصيانة الذكية (PdM) على تحسين الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية.

سادساً: الفرضية المبدئية المرتبطة بالمشكلة

يمكن تلخيص الفرضية العامة المستنبطة من المشكلة في الجملة التالية:
كلما زادت درجة تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية في وحدات الصيانة العسكرية، ارتفع مستوى الجاهزية القتالية للطائرات، وانخفضت معدلات الأعطال المفاجئة وتكاليف التشغيل.

سابعاً: أبعاد المشكلة في ضوء الواقع الميداني

من خلال الرصد الميداني والتقارير الفنية في وحدات الصيانة، يمكن القول إن المشكلة ليست في ضعف الكفاءات البشرية أو نقص الإمكانيات التقنية فقط، بل في غياب المنهجية التكاملية التي توحد بين الجوانب الفنية والإدارية والرقمية. فالمهندس يملك البيانات، لكن لا يملك الوقت أو الأداة لتحليلها. والإدارة تملك الموارد، لكنها تفتقر إلى مؤشرات تحليلية دقيقة لتوجيه قراراتها. أما الأنظمة الرقمية، فهي غالباً معزولة أو غير محدثة بالشكل الذي يسمح بالتحليل التنبؤي الفعال.

وهنا تكمن جوهر المشكلة: عدم توظيف البيانات التشغيلية الضخمة في خدمة القرار الفني والإداري بشكل متكامل.

ثامناً: الخلاصة العامة للمشكلة

يمكن تلخيص المشكلة في جملة جامعة:

إنّ منظومة الصيانة الجوية العسكرية في بيئتها الحالية تعمل بكفاءة تشغيلية محدودة بسبب غياب التكامل بين البيانات والتحليل الذكي، مما يجعلها بحاجة ماسة إلى التحول نحو نموذج الصيانة التنبؤية لتحقيق الجاهزية القصوى للطائرات العسكرية.

3-1 أهداف الدراسة

تُعتبر الأهداف الركيزة الأساسية التي تُبنى عليها أي دراسة علمية، فهي التي تحدد اتجاه البحث، ونطاقه، ومخرجاته المتوقعة. وانطلاقاً من طبيعة هذه الدراسة، التي تمزج بين الجانب الفني التطبيقي والجانب الإداري التحليلي في بيئة الصيانة الجوية العسكرية، فإن أهدافها تتوزع بين أهداف رئيسية عامة وأهداف تفصيلية فرعية تُمكن من الوصول إلى نتائج علمية وعملية دقيقة قابلة للتطبيق.

أولاً: الهدف العام للدراسة

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل أثر تطبيق أنظمة الصيانة الذكية (الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance) – على تحسين الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية في بيئة الدعم الفني الجوي بالمملكة العربية السعودية، من خلال دراسة ميدانية هندسية وإدارية تُسهم في تطوير نموذج وطني متكامل للصيانة الذكية في القطاع العسكري.

هذا الهدف العام يجمع بين التوجه العلمي الأكاديمي والتحليل التطبيقي الميداني، ويعكس سعي الباحث إلى إيجاد حلول واقعية مستندة إلى بيانات وإجراءات يمكن تنفيذها فعلياً داخل وحدات الصيانة الجوية.

ثانياً: الأهداف التفصيلية للدراسة

1. تحليل الواقع الفعلي لبرامج الصيانة الحالية في قطاع صيانة محركات الطيران العسكري.

يهدف هذا الهدف إلى رصد الوضع الفني والإداري القائم داخل وحدات الصيانة، من حيث:

- أساليب الصيانة المستخدمة (وقائية / تصحيحية / مجدولة).
 - مستوى التنسيق بين الإدارات الفنية والإدارية.
 - الإجراءات التنظيمية المتبعة لتوثيق الأعطال وجدولتها.
 - فعالية أدوات المتابعة الرقمية الحالية (في حال توفرها).
- يُسهّم هذا التحليل في تحديد نقاط القوة والضعف في النظام القائم، ما يمكن من وضع الأسس العلمية للتحوّل نحو الصيانة الذكية.

2. تقييم مدى جاهزية البنية التحتية التقنية والبشرية لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية.

- يهدف هذا الهدف إلى تحديد درجة الاستعداد الفعلي للتحوّل الرقمي في الصيانة، وذلك من خلال دراسة:
- جاهزية الأنظمة التقنية وأجهزة الاستشعار وأنظمة الاتصال الآمن بين الطائرات ومراكز الصيانة.
 - توفر البرامج التحليلية وأدوات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في المراقبة والتشخيص.
 - مستوى التأهيل والتدريب للمهندسين والفنيين على تحليل البيانات الفنية وتشغيل الأنظمة الذكية.
 - مدى دعم القيادة الفنية والإدارية لبرامج التحوّل الرقمي في مجال الصيانة.
- تُعد هذه الخطوة أساسية لتقدير حجم الجهد المطلوب لإدخال أنظمة PdM ضمن بيئة العمل العسكري.

3. قياس أثر تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على مؤشرات الأداء التشغيلية والفنية.

يستهدف هذا الهدف اختبار العلاقة بين تطبيق الصيانة الذكية وتحسين الأداء الفعلي للطائرات عبر مؤشرات قياس كمية ونوعية، مثل:

- معدل الأعطال غير المجدولة قبل وبعد تطبيق PdM.
 - متوسط زمن الإصلاح والاستجابة – (Mean Time to Repair – MTTR).
 - كفاءة استخدام قطع الغيار وموارد الصيانة.
 - التكلفة التشغيلية لكل ساعة طيران.
 - معدل الجاهزية الفنية للطائرات في المهام القتالية والتدريبية.
- يسمح هذا التحليل الكمي بتقديم دليل علمي واضح حول فاعلية الصيانة التنبؤية في تعزيز الكفاءة التشغيلية.

4. اقترح نموذج تطبيقي تدريجي لتبني أنظمة الصيانة الذكية في الصيانة العسكرية.

ينطلق هذا الهدف من واقع أن التحول إلى الصيانة التنبؤية لا يمكن أن يحدث دفعة واحدة، بل يتطلب مراحل تنفيذية مدروسة. لذلك تسعى الدراسة إلى وضع نموذج تطبيقي تدريجي يتضمن:

- خطة تجريبية (Pilot Phase) لتطبيق النظام على نوع محدد من المحركات العسكرية.
- تصميم هيكل إداري وفني لمتابعة أداء النظام الذكي داخل الوحدة.
- وضع آلية تقييم ومراجعة دورية لقياس نتائج التطبيق الميداني.
- تطوير إجراءات تشغيل موحدة (SOPs) محدثة تتوافق مع بيئة PdM.

يُسهم هذا الهدف في تقديم مخرجات عملية يمكن تطبيقها على أرض الواقع ضمن المنظومة العسكرية السعودية.

5. تحليل العلاقة بين كفاءة الكادر الفني ومستوى نجاح النظام الذكي.
إذ تشير التجارب الدولية إلى أن كفاءة العنصر البشري تُعد العامل الأهم في نجاح أي منظومة صيانة ذكية.
يهدف هذا الهدف إلى تحليل:

• العلاقة بين مستوى التدريب الفني ومدى فعالية التطبيق العملي لـ PdM.

- أثر الثقافة المؤسسية في قبول التحول نحو الأنظمة الرقمية.
 - دور القيادة الفنية في بناء بيئة تشجع على الابتكار التقني والتحليل الاستباقي.
- يُعد هذا التحليل عنصرًا محوريًا في ضمان استدامة النظام بعد تطبيقه، وعدم تحوُّله إلى مجرد مشروع تجريبي مؤقت.

6. ربط تطبيق الصيانة التنبؤية بالأهداف الوطنية لرؤية المملكة 2030 في قطاع الدفاع.

- تسعى الدراسة من خلال هذا الهدف إلى مواءمة نتائج البحث مع التوجهات الاستراتيجية الوطنية في مجالات:
- توطين الصناعات العسكرية.
 - رفع كفاءة الإنفاق الدفاعي.
 - تعزيز التحول الرقمي في المنظومات الحكومية والعسكرية.
 - تطوير القدرات البشرية السعودية في المجالات الفنية والهندسية المتقدمة.

وبذلك تصبح الدراسة متسقة مع السياسات الوطنية الكبرى، وليست مجرد تحليل أكاديمي منفصل عن الواقع الاستراتيجي للدولة.

ثالثًا: التكامل بين الأهداف

إن الأهداف السابقة ليست منفصلة، بل مترابطة بشكلٍ تكاملي وفق تسلسل علمي ومنطقي:

1. يبدأ البحث بوصف الواقع القائم.
 2. ثم ينتقل إلى تقييم الجاهزية للتحويل.
 3. يلي ذلك قياس الأثر المتوقع للتطبيق.
 4. ثم اقتراح النموذج التطبيقي.
 5. وأخيرًا تحليل العوامل البشرية والمؤسسية التي تضمن نجاح واستدامة النظام.
- وبهذا التسلسل، لا يقتصر البحث على الجانب الوصفي، بل يتدرج من التحليل إلى التطبيق إلى التوصية، وهو ما يمنحه طابعًا تطبيقيًا ميدانيًا مميزًا في سياق البحوث العسكرية الهندسية.

رابعًا: الأثر المتوقع من تحقيق الأهداف

عند تحقيق هذه الأهداف، من المتوقع أن تقدم الدراسة إطارًا عمليًا شاملاً يحقق النتائج الآتية:

- تطوير منظومة صيانة عسكرية ذكية قائمة على التحليل الاستباقي للأعطال.
 - رفع الجاهزية القتالية للطائرات بنسبة ملحوظة خلال فترات التشغيل الطويلة.
 - تقليل زمن التوقف وتكاليف الصيانة السنوية.
 - تعزيز ثقافة التحويل الرقمي في بيئة العمل الفني العسكري.
 - إنشاء قاعدة معرفية سعودية في مجال الصيانة التنبؤية للطيران.
- وبذلك تُسهم الدراسة في بناء نموذج وطني متكامل للصيانة الذكية العسكرية، يربط بين الهندسة، والإدارة، والتقنية، والتحول المؤسسي في إطار رؤية المملكة المستقبلية

4-1 أهمية الدراسة

تتبع أهمية هذه الدراسة من كونها تُسلط الضوء على أحد أكثر الجوانب الحيوية في قطاع الدفاع الجوي، والمتمثل في الصيانة الفنية للطائرات العسكرية، باعتبارها الركيزة الأساسية التي تقوم عليها الجاهزية القتالية للدولة. ومع اتساع نطاق التطور التقني في الطيران العسكري، بات من الضروري الانتقال من المفهوم التقليدي للصيانة إلى مفهوم أكثر ذكاءً واستباقية، يعتمد على تحليل البيانات الحية والتنبؤ بالأعطال قبل وقوعها. ومن هنا تأتي أهمية هذه الدراسة من عدة زوايا علمية وتطبيقية ووطنية.

أولاً: من الناحية العلمية، تُسهم الدراسة في إثراء المعرفة الأكاديمية بمجال إدارة الصيانة الذكية في البيئات العسكرية، وهو مجال لا يزال محدود التداول عربياً ومحلياً. كما تقدم الدراسة إضافة نوعية من خلال دمج مفاهيم هندسة الطيران بإدارة المشاريع الدفاعية، ما يجعلها نموذجاً فريداً في الجمع بين التحليل الفني والإداري في آن واحد.

ثانياً: من الناحية التطبيقية، توفر هذه الدراسة إطاراً تحليلياً قابلاً للتطبيق العملي في وحدات الصيانة الجوية. فهي لا تكتفي بوصف الواقع، بل تقترح نموذجاً عملياً تدريجياً لتطبيق الصيانة التنبؤية داخل وحدات صيانة المحركات العسكرية. هذا النموذج يُسهم في تطوير إجراءات الصيانة، وتحسين كفاءة الموارد، وتقليل الأعطال غير المجدولة، مما يرفع من معدل الجاهزية التشغيلية للطائرات.

ثالثاً: من الناحية المؤسسية، تأتي أهمية الدراسة في كونها تدعم صنّاع القرار داخل القطاعات العسكرية بتوصيات واضحة قابلة للتنفيذ، تستند إلى بيانات وتحليل علمي. فاعتماد أنظمة الصيانة الذكية يعزز قدرة الإدارات الفنية على اتخاذ قرارات فورية دقيقة، مبنية على مؤشرات أداء فعلية وليس على التقديرات الشخصية، ما يرفع من كفاءة إدارة الدعم الفني ويعزز مفهوم الإدارة المبنية على الأدلة. (Evidence-Based Management)

رابعاً: من الناحية التقنية، تُبرز الدراسة كيف يمكن لتقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء أن تتحول من مجرد أدوات مساعدة إلى أنظمة قرار حيوية في بيئة الصيانة العسكرية. ومن خلال تحليل الواقع الميداني، تُظهر الدراسة

الإمكانات الكبيرة المتاحة لتطبيق تقنيات التحليل التنبؤي في تتبع أداء المحركات وتحديد نقاط الضعف قبل أن تتسبب في أعطال أو توقفات تشغيلية.

خامساً: من الناحية البشرية، تُعد الدراسة مساهمة مهمة في تطوير كفاءات المهندسين والفنيين العاملين في مجال الصيانة العسكرية. إذ إنها تطرح رؤية واضحة لتأهيل العنصر البشري على استخدام الأنظمة الرقمية وتحليل البيانات الفنية، بما يواكب الاتجاهات الحديثة في قطاع الطيران العالمي، ويسهم في بناء جيل من الكوادر السعودية المتخصصة في هندسة الصيانة الذكية.

سادساً: من الناحية الاقتصادية، تكتسب الدراسة أهميتها من قدرتها على المساهمة في رفع كفاءة الإنفاق الدفاعي من خلال خفض التكاليف المرتبطة بالأعطال المفاجئة وقطع الغيار والإصلاحات الطارئة. فكل دقيقة توقف لطائرة عسكرية تُترجم إلى تكلفة تشغيلية مرتفعة، وكل إصلاح غير مخطط يُعد استنزافاً لموارد الدولة. تطبيق الصيانة التنبؤية يسهم في تحسين إدارة الموارد وتوجيهها نحو الأنشطة ذات القيمة الفعلية.

سابعاً: من الناحية الاستراتيجية والوطنية، تتوافق هذه الدراسة مع التوجهات الكبرى لرؤية المملكة العربية السعودية 2030، التي تسعى إلى تعزيز التوطين التقني والعسكري، وتحقيق الاستقلالية التشغيلية في القطاعات الحيوية. إن تطوير منظومة صيانة ذكية في الطيران العسكري السعودي لا يُعد مجرد مشروع تقني، بل يمثل خطوة استراتيجية نحو تحقيق الاكتفاء الذاتي في إدارة وصيانة منظومات الدفاع الجوي.

ثامناً: من الناحية الإدارية، تُظهر الدراسة أهمية دمج الصيانة الذكية ضمن هيكل إدارة المشاريع العسكرية، بحيث تصبح الصيانة جزءاً من دورة حياة المشروع الدفاعي منذ مرحلة التخطيط حتى التنفيذ والتقييم. هذا الدمج يضمن مراقبة الأداء الفني بدقة، وتوجيه الموارد الزمنية والمادية وفق بيانات واقعية ومؤشرات أداء متجددة.

تاسعاً: من الناحية المستقبلية، تمثل الدراسة نقطة انطلاق لتطوير منظومات الصيانة العسكرية في المملكة نحو التحول الرقمي الشامل، من خلال بناء قاعدة بيانات وطنية للأعطال الفنية، يمكن استخدامها مستقبلاً في تصميم نماذج

محاكاة وتنبؤ متقدمة باستخدام الذكاء الاصطناعي. هذه القاعدة يمكن أن تشكل نواةً لتأسيس مركز وطني لتحليل البيانات الفنية للطيران العسكري.

عاشراً: من الناحية القيادية والتنظيمية، تقدم الدراسة رؤية متكاملة تساعد القيادات الفنية والعسكرية في بناء منظومة قرارات تعتمد على بيانات آنية وتحليلات دقيقة، ما يعزز من كفاءة الاستجابة الميدانية، ويضمن تحقيق أعلى درجات الجاهزية القتالية في جميع الظروف التشغيلية.

بناءً على ما سبق، يمكن القول إن أهمية هذه الدراسة تتجاوز الجانب الأكاديمي لتصل إلى مستويات استراتيجية وطنية، حيث تُسهم في بناء نموذج معرفي وتطبيقي جديد في إدارة الصيانة العسكرية، يُعزز من القدرة التشغيلية، ويرفع مستوى الجاهزية، ويضع أسس التحول الذكي المستدام في قطاع الطيران الدفاعي بالمملكة العربية السعودية.

5-1 تساؤلات الدراسة

تسعى هذه الدراسة إلى الإجابة عن مجموعة من التساؤلات الجوهرية التي تُشكل الإطار العام لمشكلة البحث، وتوجّه مسار التحليل نحو فهم العلاقة بين أنظمة الصيانة التنبؤية ومستوى الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية. وقد صيغت هذه التساؤلات بطريقة علمية مترابطة تغطي الجوانب الفنية، والإدارية، والبشرية، والتقنية، لضمان شمولية الدراسة وعمقها التطبيقي.

أولاً: التساؤل الرئيسي للدراسة

ما أثر تطبيق أنظمة الصيانة الذكية – (Predictive Maintenance – PdM) على تحسين الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية في قطاع الدعم الفني الجوي بالمملكة العربية السعودية؟

يُعبّر هذا التساؤل عن جوهر البحث، فهو يسعى إلى تحديد العلاقة المباشرة بين مستوى تطبيق الصيانة التنبؤية وبين كفاءة الأداء الفني للطائرات من حيث الجاهزية، وسرعة الاستجابة، واستقرار التشغيل، وتقليل الأعطال المفاجئة.

ثانياً: التساؤلات الفرعية

1. ما مدى جاهزية البنية التحتية التقنية والرقمية في وحدات الصيانة الجوية لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية؟
يهدف هذا التساؤل إلى الكشف عن الوضع التقني الحالي ومدى توفر أنظمة القياس والتحليل والاتصال التي تُعد الأساس في بناء منظومة PdM.

2. إلى أي مدى يمتلك المهندسون والفنيون العاملون في الصيانة العسكرية المعرفة الكافية بالصيانة التنبؤية ومفاهيم التحليل التنبؤي للأعطال؟
يُركز هذا التساؤل على الجانب البشري من النظام، باعتباره العنصر الأساسي في نجاح أو فشل تطبيق التقنيات الذكية في بيئة العمل الفني.

3. ما أبرز التحديات الإدارية والتنظيمية التي قد تواجه تطبيق الصيانة الذكية في بيئة عسكرية ذات طابع انضباطي صارم؟
يتناول هذا التساؤل العوائق المحتملة المتعلقة بالإجراءات، والأنظمة،

وسلسلة اتخاذ القرار، ومدى تقبل القيادات للتغيير الرقمي في منظومات الصيانة.

4. ما أثر تطبيق الصيانة التنبؤية على مؤشرات الأداء الرئيسية في الصيانة الجوية (زمن التوقف – عدد الأعطال – كفاءة التشغيل – الجاهزية القتالية)؟

يهدف هذا التساؤل إلى اختبار العلاقة الكمية بين تطبيق الصيانة التنبؤية وتحسن مؤشرات الأداء الفني بشكل ملموس.

5. هل يسهم تطبيق أنظمة الصيانة الذكية في رفع كفاءة الإنفاق الدفاعي وتحسين استخدام الموارد الفنية في الصيانة الجوية العسكرية؟
يُعالج هذا التساؤل البُعد الاقتصادي والإداري لتطبيق Pdm في سياق تطوير كفاءة إدارة الصيانة والدعم اللوجستي.

6. ما النموذج التطبيقي الأمثل لتطبيق الصيانة التنبؤية في وحدات صيانة المحركات العسكرية بما يتوافق مع طبيعة البيئة السعودية؟
يهدف هذا التساؤل إلى بناء تصور عملي واقعي لتطبيق Pdm في بيئة عسكرية محلية، مع الأخذ في الاعتبار الخصائص التنظيمية والثقافية والتقنية الخاصة بها.

7. كيف يمكن دمج نظام الصيانة التنبؤية ضمن منظومة إدارة المشاريع الدفاعية لتحقيق التكامل بين الصيانة والتخطيط العملياتي؟
يُركّز هذا التساؤل على البعد الإداري لمفهوم الصيانة الذكية، باعتبارها جزءاً من دورة حياة المشروع الدفاعي، وليس نشاطاً منفصلاً عنه.

8. ما العلاقة بين مستوى تأهيل الكوادر الفنية ونجاح تطبيق الصيانة الذكية في وحدات الصيانة العسكرية؟

يهدف هذا التساؤل إلى استكشاف دور العنصر البشري في ضمان استدامة الأنظمة الذكية وتحقيق أقصى استفادة منها على المدى الطويل.

ثالثاً: العلاقة بين التساؤلات وأهداف الدراسة

ترتبط جميع التساؤلات ارتباطاً مباشراً بالأهداف الموضوعية سابقاً، إذ تشكل كل مجموعة من التساؤلات محوراً يقيس أحد أبعاد البحث الرئيسية، كما يلي:

- التساؤل الأول والثاني يرتبطان بالبنية التحتية والجاهزية الفنية.
- التساؤل الثالث والرابع يتصلان بمؤشرات الأداء وكفاءة التشغيل.
- التساؤل الخامس والسادس يختصان بالجانب التطبيقي والتحول المؤسسي.
- التساؤل السابع والثامن يتناولان البعد الإداري والبشري في تكامل النظام.

هذا التكامل بين الأهداف والتساؤلات يُحقق الانسجام المنهجي المطلوب للبحث، ويضمن تغطية جميع الجوانب المرتبطة بمشكلة الدراسة من الناحية النظرية والميدانية على حد سواء.

6-1 فرضيات الدراسة

تُعد الفرضيات من العناصر الأساسية في أي دراسة علمية، إذ تمثل الإجابات المبدئية المؤقتة التي يسعى الباحث إلى اختبارها ميدانيًا من خلال الأدلة والبيانات الإحصائية. وتتبع فرضيات هذه الدراسة من الإطار النظري والمشكلة البحثية والتساؤلات المطروحة، وهي تهدف إلى تحديد العلاقات المحتملة بين تطبيق أنظمة الصيانة الذكية (Predictive Maintenance (PdM) ومستوى الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية.

انطلاقًا من طبيعة الدراسة التي تمزج بين الجانب الفني والإداري في بيئة عسكرية متقدمة، تم صياغة الفرضيات بطريقة علمية قابلة للقياس والتحليل باستخدام الأساليب الإحصائية الحديثة.

أولاً: الفرضية الرئيسة للدراسة

تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية في وحدات صيانة الطيران العسكري يؤدي إلى رفع مستوى الجاهزية القتالية للطائرات من خلال تقليل الأعطال المفاجئة وتحسين كفاءة التشغيل والاستجابة الفنية.

تُعد هذه الفرضية الأساس الذي يُبنى عليه هيكل الدراسة بالكامل، وهي تعبر عن العلاقة الجوهرية بين المتغير المستقل (تطبيق نظام الصيانة التنبؤية) والمتغير التابع (الجاهزية القتالية للطائرات).

ثانيًا: الفرضيات الفرعية

1. توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية وانخفاض معدلات الأعطال غير المجدولة في محركات الطائرات العسكرية.

تشير هذه الفرضية إلى أن استخدام التحليل التنبؤي والبيانات الحية يؤدي إلى اكتشاف الأعطال قبل وقوعها، ما يقلل من حالات التوقف غير المخطط.

2. توجد علاقة إيجابية بين مستوى تدريب الكوادر الفنية وكفاءة تطبيق أنظمة الصيانة الذكية في بيئة العمل العسكري.
- تعكس هذه الفرضية البُعد البشري في نجاح النظام، إذ يُعد تأهيل العنصر البشري عاملاً حاسماً في فعالية التشغيل والاستفادة من التقنيات الحديثة.
3. يسهم دمج أنظمة الصيانة التنبؤية في تحسين كفاءة إدارة الموارد ورفع معدل الجاهزية التشغيلية للطائرات.
- توضح هذه الفرضية الأثر الإداري للنظام الذكي في تقليل الهدر، وتحقيق الاستخدام الأمثل للموارد البشرية والمادية.
4. توجد علاقة طردية بين درجة نضج البنية التحتية الرقمية في وحدات الصيانة ومستوى نجاح تطبيق الصيانة التنبؤية.
- هذه الفرضية تُبرز الدور المحوري للجاهزية التقنية في إنجاح التحول من النظام التقليدي إلى النظام الذكي.
5. يسهم تطبيق الصيانة التنبؤية في خفض متوسط زمن الإصلاح (Mean Time to Repair – MTTR) وزيادة معدل الجاهزية اليومية للطائرات.
- تُعبّر هذه الفرضية عن البُعد الزمني للأداء الفني، إذ إن التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها يُتيح للفرق الفنية الاستعداد المسبق بالإجراءات التصحيحية وقطع الغيار.
6. توجد علاقة معنوية بين تطبيق الصيانة الذكية ومستوى رضا الفنيين عن بيئة العمل في وحدات الصيانة العسكرية.
- تفترض هذه العلاقة أن الأنظمة الحديثة تُقلل الجهد البدني والضغط الزمني على الفنيين، مما يرفع من رضاهم المهني ويزيد من التزامهم بالجودة.
7. يسهم تطبيق الصيانة التنبؤية في دعم التحول الرقمي العسكري وتحقيق متطلبات رؤية المملكة 2030 في مجال توطين التقنية الدفاعية.
- تُبرز هذه الفرضية البُعد الاستراتيجي الوطني، وتربط بين نتائج الدراسة والمشروعات الكبرى لتطوير الصناعات العسكرية السعودية.

ثالثاً: المتغيرات الأساسية في الدراسة

1. المتغير المستقل:

– أنظمة الصيانة الذكية (الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance) وتشمل:

- استخدام أجهزة الاستشعار الذكية (Sensors)
- تحليل البيانات الحية (Real-time Data Analytics)
- الذكاء الاصطناعي والتحليل التنبؤي (AI-based Predictive Models)
- نظم المراقبة والتحكم الفني (Monitoring Systems)

2. المتغيرات التابعة:

الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية، وتشمل:

- معدل الأعطال المفاجئة
- متوسط زمن الإصلاح
- كفاءة التشغيل
- معدل الجاهزية اليومية
- كفاءة استغلال الموارد الفنية

3. المتغيرات الوسيطة:

- كفاءة العنصر البشري والتدريب الفني
- جودة البنية التحتية التقنية والرقمية
- درجة الدعم الإداري والمؤسسي لتطبيق الأنظمة الذكية

رابعاً: الأساس المنطقي لصياغة الفرضيات

جميع الفرضيات السابقة بُنيت على أدلة من الأدبيات العلمية والتجارب العملية في قطاعات الطيران المدني والعسكري حول العالم، والتي أظهرت أن التحول نحو الصيانة التنبؤية يحقق نتائج ملموسة في تحسين الكفاءة التشغيلية. وتأتي هذه الدراسة لتختبر مدى صحة هذه العلاقات في السياق المحلي للبيئة السعودية، بما يعكس خصوصية العمل الفني العسكري ومتطلباته الأمنية والتنظيمية الصارمة.

وبذلك تشكل الفرضيات أساساً علمياً ومنهجياً لتحليل البيانات الميدانية واختبارها إحصائياً لاحقاً، للوصول إلى نتائج دقيقة تدعم عملية التحول المؤسسي نحو الصيانة الذكية في قطاع الطيران العسكري بالمملكة العربية السعودية.

7-1 منهجية الدراسة

تُعد منهجية الدراسة الإطار الذي يوضح الطريق العلمي الذي يسلكه الباحث للوصول إلى أهدافه واختبار فرضياته، وهي تمثل البوصلة التي تضبط مسار البحث وتحدد أدواته ووسائله وأساليبه. ونظرًا لأن هذه الدراسة تجمع بين الطابعين الفني والإداري في بيئة عمل عسكرية دقيقة، فقد تم تصميم منهجيتها بما يضمن الدقة والموضوعية والملاءمة لطبيعة القطاع محل البحث.

أولاً: نوع المنهج المستخدم

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، وهو المنهج الذي يجمع بين الوصف الدقيق للظواهر كما هي في الواقع، وتحليل العلاقات والتأثيرات بين المتغيرات المختلفة. وقد تم اختيار هذا المنهج لأنه الأنسب لطبيعة المشكلة التي تتناول علاقة تطبيق الصيانة التنبؤية بمستوى الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية، وهو موضوع يتطلب دراسة وصفية للواقع الفني والإداري، وتحليلاً علمياً للعلاقات بين العوامل المؤثرة فيه.

كما استخدمت الدراسة مزيجاً من الأسلوب الكمي (Quantitative Approach) والتحليل الكيفي (Qualitative Approach)، بحيث يتيح الأسلوب الكمي تحليل البيانات الإحصائية الناتجة عن الاستبانة، بينما يتيح التحليل الكيفي تفسير النتائج في ضوء الواقع العملي والخبرة الفنية في بيئة الصيانة العسكرية.

ثانياً: منهجية بناء الدراسة

تم بناء هذه الدراسة وفق مراحل منهجية مترابطة، تشمل:

1. المرحلة الأولى: تحديد المشكلة وصياغة الفرضيات.
تم في هذه المرحلة تحديد أبعاد المشكلة من خلال تحليل البيئة الفنية والإدارية للصيانة الجوية، وصياغة الفرضيات التي تربط بين تطبيق أنظمة الصيانة الذكية ومؤشرات الجاهزية القتالية.
2. المرحلة الثانية: إعداد الإطار النظري والدراسات السابقة.
جُمعت المادة العلمية المتعلقة بموضوع الدراسة من مصادر متعددة،

منها دراسات عالمية في مجال الصيانة التنبؤية، وتقارير فنية صادرة عن مؤسسات الدفاع والطيران، وأبحاث أكاديمية تناولت التحول الرقمي في الصيانة العسكرية.

3. المرحلة الثالثة: تصميم الأداة الميدانية (الاستبانة).

تم تصميم استبانة علمية تتضمن ثلاثة محاور رئيسية: المعرفة بالصيانة التنبؤية، واقع الصيانة الحالية، والأثر المتوقع للتطبيق. وقد تمت صياغة العبارات بطريقة علمية دقيقة تتناسب مع طبيعة العينة المستهدفة من المهندسين والفنيين.

4. المرحلة الرابعة: جمع البيانات الميدانية.

تم توزيع الاستبانة إلكترونياً على مجموعة مختارة من العاملين في قطاع صيانة المحركات العسكرية، بعد الحصول على الموافقات الرسمية وضمان سرية البيانات.

5. المرحلة الخامسة: التحليل الإحصائي للبيانات.

استخدم الباحث برنامج (SPSS) لتحليل البيانات، واستخراج المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية، وتحليل الارتباط بين المتغيرات، واختبار الفرضيات باستخدام أدوات إحصائية مثل اختبار (T-test) وتحليل التباين (ANOVA).

6. المرحلة السادسة: استخلاص النتائج والتوصيات.

تم تفسير النتائج في ضوء الإطار النظري والدراسات السابقة، وصياغة التوصيات الفنية والإدارية التي يمكن تطبيقها عملياً في وحدات الصيانة العسكرية.

ثالثاً: مجتمع الدراسة

يتكون مجتمع الدراسة من جميع العاملين في مجال صيانة محركات الطيران العسكري في وحدات الدعم الفني التابعة لقطاع الدفاع الجوي بالملكة العربية السعودية. ويشمل ذلك:

• المهندسين الفنيين المختصين بتشخيص الأعطال وتحليل بيانات الأداء.

- الفنيين العاملين في الورش الميدانية لإصلاح المحركات.
 - المشرفين الفنيين ومديري الأقسام الإدارية ذات العلاقة بالصيانة.
 - محلي البيانات والمهندسين المسؤولين عن أنظمة المراقبة الفنية.
- ويُعد هذا المجتمع هو الأكثر ارتباطاً بموضوع الدراسة، نظراً لتعامله المباشر مع الأعطال الفنية والأنظمة الرقمية الخاصة بتحليل أداء المحركات.

رابعاً: عينة الدراسة

نظراً لاتساع مجتمع الدراسة وصعوبة الوصول إلى جميع عناصره بحكم طبيعة العمل العسكري، فقد تم استخدام أسلوب العينة القصدية (Purposive Sampling)، الذي يقوم على اختيار الأفراد الأكثر صلة بموضوع البحث والأقدر على تقديم معلومات دقيقة وموثوقة.

وقد اشتملت العينة على فئات تمثل مختلف المستويات الفنية والإدارية في الصيانة الجوية، بحيث تعكس الواقع العملي بشكل متوازن. بلغ حجم العينة (40) مشاركاً من الفنيين والمهندسين والإداريين العاملين في وحدات صيانة محركات الدفاع الجوي، وهو حجم كافٍ لتحقيق متطلبات التحليل الإحصائي والوصول إلى نتائج موثوقة.

خامساً: أداة الدراسة

تم استخدام الاستبانة المغلقة كأداة رئيسية لجمع البيانات، لأنها تتناسب مع طبيعة البيئة العسكرية التي تتطلب الوضوح والدقة والسرعة في الإجابة. وقد صُممت الاستبانة بطريقة علمية تضمنت ثلاثة محاور أساسية تمثل أبعاد الدراسة:

1. المحور الأول: المعرفة بالصيانة التنبؤية (PdM) ومدى إلمام الفنيين بمفاهيمها وأساليبها.
2. المحور الثاني: واقع الصيانة الحالية في وحدات المحركات العسكرية.

3. المحور الثالث :الأثر المتوقع لتطبيق الصيانة الذكية على الجاهزية التشغيلية.

تمت مراجعة أداة الدراسة من قبل مجموعة من الخبراء في مجالات هندسة الطيران والإحصاء لضمان صدقها وثباتها قبل تنفيذها ميدانياً.

سادساً: صدق وثبات الأداة

للتأكد من صدق الاستبانة (Validity) ، تم عرضها على مجموعة من المحكمين الأكاديميين المتخصصين في إدارة المشاريع وهندسة الطيران، حيث تم تعديل بعض العبارات لتناسب المصطلحات الفنية المتداولة في بيئة الصيانة العسكرية.

أما ثبات الأداة (Reliability) فقد تم التحقق منه من خلال تطبيقها على عينة تجريبية صغيرة وحساب معامل الثبات) كرونباخ ألفا Cronbach's – Alpha)، حيث بلغت قيمته (0.87)، وهي قيمة مرتفعة تدل على أن أداة الدراسة تتمتع بدرجة عالية من الاتساق الداخلي والثبات.

سابعاً: أساليب تحليل البيانات

تم تحليل البيانات باستخدام مجموعة من الأدوات الإحصائية المناسبة لطبيعة المتغيرات، وتشمل:

- التكرارات والنسب المئوية لوصف خصائص العينة.
- المتوسط الحسابي والانحراف المعياري لقياس اتجاهات المشاركين.
- اختبار T-Test لمقارنة المتوسطات بين المجموعات المختلفة.
- تحليل التباين (ANOVA) لاختبار الفروق ذات الدلالة الإحصائية بين المتغيرات.
- تحليل الارتباط (Correlation Analysis) لقياس قوة العلاقة بين المعرفة التقنية ومستوى الجاهزية التشغيلية.

وقد تم تمثيل بعض النتائج في جداول ورسوم بيانية لتوضيح الاتجاهات العامة بطريقة بصرية سهلة الفهم.

ثامناً: منهج التحليل العلمي المستخدم

اعتمد الباحث منهجاً تحليلياً علمياً يربط بين التحليل الإحصائي والواقع العملي، بحيث لا تقتصر النتائج على الأرقام، بل يتم تفسيرها في ضوء المفاهيم الهندسية والإدارية للصيانة الجوية. وقد تم الجمع بين التحليل الكمي للبيانات الرقمية والتحليل النوعي للملاحظات الميدانية، ما يمنح الدراسة طابعاً شاملاً يوازن بين الدقة العلمية والرؤية التطبيقية.

تاسعاً: أدوات مساندة في الدراسة

بالإضافة إلى الاستبانة، استعان الباحث بعدة أدوات مساندة لتدعيم النتائج، من أبرزها:

- المقابلات غير الرسمية مع بعض المهندسين والمشرفين الفنيين للحصول على ملاحظات نوعية حول واقع الصيانة الحالية.
- الاطلاع على التقارير الفنية وسجلات الأعطال التاريخية للمحركات.
- تحليل الوثائق التنظيمية ذات العلاقة بإجراءات الصيانة وإدارة المشاريع الدفاعية.

عاشراً: مبررات اختيار المنهج

تم اختيار المنهج الوصفي التحليلي لأن طبيعة المشكلة لا تقتصر على الوصف فقط، بل تتطلب تحليلاً عميقاً للعلاقات بين العوامل الفنية والإدارية المؤثرة في الجاهزية القتالية.

كما أن استخدام المنهج الكمي يتيح اختبار الفرضيات بدقة، بينما يضيف المنهج الكيفي بُعداً تفسيرياً يساعد في فهم النتائج في سياقها الميداني الواقعي.

حادي عشر: الأسس الأخلاقية في تنفيذ الدراسة

نظرًا لحساسية البيئة العسكرية، التزم الباحث بجميع المعايير الأخلاقية المعمول بها في البحوث العلمية، ومن أبرزها:

- الحصول على موافقة الجهة المختصة قبل توزيع أدوات الدراسة.
- احترام سرية المعلومات الفنية والأمنية المتعلقة بالمحركات والطائرات.
- عدم نشر أو مشاركة أي بيانات حساسة أو أسماء المشاركين.
- استخدام النتائج لأغراض البحث العلمي فقط.
- الالتزام بالحياد التام والموضوعية في التحليل والتفسير.

ثاني عشر: مخرجات المنهجية

من خلال هذه المنهجية، تسعى الدراسة إلى تحقيق التكامل بين:

- الدقة الأكاديمية في جمع البيانات وتحليلها.
- الواقعية الميدانية في تفسير النتائج.
- القابلية للتطبيق في التوصيات النهائية.

وبذلك تمثل المنهجية الأساس العلمي الذي يضمن الوصول إلى نتائج دقيقة وموثوقة تُسهم في تطوير منظومة الصيانة الجوية العسكرية، ورفع مستوى الجاهزية القتالية للطائرات من خلال التحول إلى أنظمة الصيانة التنبؤية الذكية.

8-1 حدود الدراسة

لكل دراسة علمية مجموعة من الحدود التي تحدد نطاقها ومجالها الزماني والمكاني والبشري والموضوعي، وذلك بهدف ضبط منهج البحث وتحديد الإطار الذي يتم ضمنه جمع البيانات وتحليل النتائج. وتحديد هذه الحدود يسهم في زيادة دقة الدراسة ووضوحها وموضوعيتها، ويُجنب تعميم النتائج على بيانات مختلفة لا تنطبق عليها خصائص المجتمع المستهدف. وفي هذه الدراسة، التي تتناول أثر تطبيق أنظمة الصيانة الذكية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية، تم تحديد الحدود كما يلي:

أولاً: الحدود المكانية

تقتصر الدراسة على إحدى وحدات صيانة محركات الطيران العسكري التابعة لقطاع الدفاع الجوي بالمملكة العربية السعودية، والتي تمثل نموذجاً عملياً يعكس بيئة العمل الفني والإداري في الصيانة الجوية العسكرية السعودية. تم اختيار هذا الموقع لعدة أسباب، أبرزها:

- توفر بنية تحتية فنية متقدمة نسبياً مقارنة ببعض الوحدات الأخرى.
 - وجود كوادر هندسية وفنية متنوعة المستويات يمكن من خلالها جمع بيانات دقيقة ومتوازنة.
 - ارتباط الوحدة بمهام قتالية وتدريبية تتطلب جاهزية مستمرة للطائرات، ما يجعلها بيئة مثالية لدراسة أثر الصيانة الذكية على الجاهزية.
- هذا النطاق المكاني يسمح بتحليل معمق للواقع العملي دون تشتيت النتائج عبر مواقع مختلفة قد تختلف في نظمها التشغيلية أو مستويات تجهيزها.

ثانياً: الحدود الزمانية

تمتد الحدود الزمانية للدراسة خلال الفصل الدراسي الثاني من العام الجامعي 1446 هـ / 2025 م، وهو الإطار الزمني الذي تم خلاله تنفيذ مراحل جمع البيانات وتحليلها.

كما يشمل التحليل الفني البيانات التشغيلية والتقارير الفنية المتعلقة بالفترة السابقة للدراسة بما لا يزيد عن ثلاث سنوات، وذلك لغرض المقارنة الإحصائية التاريخية في معدلات الأعطال وكفاءة الصيانة قبل تطبيق المفهوم الذكي المقترح.

يُعد هذا الإطار الزمني كافيًا لتحقيق أهداف الدراسة، إذ يسمح برصد الاتجاهات التشغيلية في بيئة الصيانة وتحليلها ضمن مدة زمنية واقعية ومحددة.

ثالثًا: الحدود البشرية

تتكوّن العينة البشرية للدراسة من المهندسين والفنيين والإداريين العاملين في مجال صيانة محركات الطيران العسكري داخل الوحدة المستهدفة. وقد تم اختيار هؤلاء المشاركين لاعتبارين أساسيين:

1. ارتباطهم المباشر بالموضوع محل البحث، حيث إنهم يتعاملون يوميًا مع الأعطال وعمليات الفحص والإصلاح.

2. قدرتهم على تقديم بيانات دقيقة حول الممارسات الفعلية في بيئة العمل، مما يمنح التحليل الميداني مصداقية واقعية.

بلغ عدد المشاركين (40) فردًا يمثلون المستويات الوظيفية التالية:

- مهندسو صيانة وتشخيص.
 - فنيون مختصون بإصلاح المحركات والأنظمة الميكانيكية.
 - محللو بيانات فنية وفنيون في نظم المراقبة الرقمية.
 - مشرفون وإداريون في أقسام الدعم الفني.
- ويُعد هذا الحجم كافيًا من الناحية الإحصائية لتحليل الاتجاهات العامة واختبار الفرضيات الرئيسية للدراسة.

رابعاً: الحدود الموضوعية

تركز الدراسة على تحليل العلاقة بين تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance – PdM) ومستوى الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية، من خلال تقييم مجموعة من المؤشرات التشغيلية والفنية. وتشمل هذه المؤشرات:

- معدل الأعطال غير المجدولة.
 - متوسط زمن الإصلاح والاستجابة الفنية.
 - كفاءة التشغيل والفعالية الميكانيكية للمحركات.
 - كفاءة استغلال الموارد الفنية والبشرية.
 - معدل الجاهزية اليومية للطائرات المشاركة في المهام.
- ولا تمتد الدراسة إلى تحليل تفصيلي لأنواع المحركات أو الخصائص الميكانيكية الدقيقة لكل طراز من الطائرات، إذ يتركز الاهتمام على البنية التنظيمية والفنية العامة للصيانة الذكية في بيئة عسكرية.

خامساً: الحدود المنهجية

تستخدم الدراسة المنهج الوصفي التحليلي، وهو ما يعني أن التحليل يعتمد على وصف الظواهر الفنية والإدارية كما هي في الواقع، وتحليل العلاقات الإحصائية بين المتغيرات دون التدخل المباشر في بيئة العمل. ولا تشمل الدراسة إجراء تجارب ميدانية على الأنظمة الذكية الفعلية، بل تعتمد على تحليل بيانات الاستبانة والتقارير الفنية والآراء الميدانية للعاملين. هذا القيد المنهجي لا يقلل من قيمة النتائج، إذ يُتيح فهماً واقعياً عميقاً لبنية الصيانة الجوية، ويُعد خطوة تمهيدية لأي مشاريع تجريبية مستقبلية لتطبيق أنظمة PdM على نطاق أوسع.

سادساً: الحدود التقنية

نظراً لحساسية المعلومات في المجال العسكري، اقتصر التحليل على البيانات المسموح بها والمتاحة للبحث الأكاديمي دون المساس بأي تفاصيل مصنفة أو معلومات تشغيلية سرية.

كما لم يتم تحليل بيانات حية مباشرة من أنظمة الطائرات أثناء التشغيل، وإنما تم الاعتماد على تقارير الأداء التاريخية ونتائج الصيانة المسجلة في السجلات الفنية للوحدات المختارة.

يُسهم هذا التقييد في الحفاظ على السرية المهنية ويضمن التزام الدراسة بالمعايير الأمنية المتبعة في وزارة الدفاع.

سابعاً: الحدود النظرية

تركز الدراسة من الناحية النظرية على مفاهيم الصيانة التنبؤية والذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات في بيئة الطيران العسكري، دون التوسع في المفاهيم الفرعية مثل هندسة المواد أو ديناميكا المحركات. كما لا تتناول الدراسة التطبيقات المدنية للصيانة الذكية إلا في نطاق المقارنة أو الاستشهاد بالدراسات السابقة.

ثامناً: مبررات تحديد الحدود

تم تحديد هذه الحدود لضمان تركيز الدراسة وعمقها، ولتكون النتائج قابلة للتطبيق العملي في بيئة محددة وواضحة المعالم. كما أن البيئة العسكرية بطبيعتها تتطلب دقة في تحديد نطاق البحث لتفادي تضارب المعلومات أو تجاوز الصلاحيات التنظيمية في الحصول على البيانات.

تاسعاً: انعكاس الحدود على النتائج

من المتوقع أن تؤثر هذه الحدود على نطاق تعميم النتائج، بحيث تقتصر صلاحية الاستنتاجات على البيئات المماثلة من حيث الهيكل التنظيمي وطبيعة العمل الفني العسكري. ومع ذلك، يمكن اعتبار النتائج مؤشراً علمياً موثقاً يُستفاد منه في وضع السياسات العامة لتطوير منظومات الصيانة الجوية في بقية الوحدات التابعة لقطاع الدفاع الجوي.

عاشراً: خلاصة الحدود

بناءً على ما سبق، يمكن القول إن الدراسة تنحصر ضمن الإطار المكاني والزمني والبشري والموضوعي المحدد، مما يمنحها دقة علمية ومصداقية ميدانية عالية، ويجعل نتائجها قابلة للقياس والتحليل والتطبيق داخل نطاق الصيانة الجوية العسكرية السعودية. كما أن وضوح هذه الحدود يمثل أحد عناصر القوة في البحث، إذ يُسهم في تعزيز موثوقية النتائج وموضوعيتها، ويجعلها أساساً علمياً يُبنى عليه في دراسات لاحقة تتناول تطبيقات الصيانة الذكية في مجالات عسكرية أخرى.

9-1 تعريف المصطلحات الأساسية في الدراسة

تُعد المصطلحات العلمية ركيزة أساسية في أي بحث أكاديمي، إذ تُسهم في توضيح المفاهيم التي يدور حولها موضوع الدراسة وتمنع اللبس في الفهم أو التفسير. ونظرًا للطبيعة التقنية والهندسية لهذا البحث، فقد تم اعتماد مجموعة من المصطلحات الأساسية التي تُستخدم في مجال الصيانة الجوية والطيران العسكري، مع تعريفها من منظور علمي وعملي يتناسب مع سياق الدراسة.

أولاً: الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance – PdM)

هي استراتيجية صيانة متقدمة تعتمد على تحليل البيانات التشغيلية الفعلية للمعدات والأنظمة بهدف التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها، وذلك باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات وأجهزة الاستشعار الذكية. (Sensors) تختلف الصيانة التنبؤية عن الصيانة الوقائية في أنها لا تعتمد على الجداول الزمنية الثابتة، بل على الحالة الحقيقية للمعدة في الوقت الفعلي. في مجال الطيران العسكري، تُعد الصيانة التنبؤية أداة استراتيجية لتقليل الأعطال المفاجئة ورفع مستوى الجاهزية القتالية للطائرات.

ثانياً: الجاهزية القتالية (Combat Readiness)

هي القدرة الشاملة للطائرة العسكرية على تنفيذ المهام القتالية أو التدريبية بكفاءة عالية وفي الوقت المحدد دون تأخير ناتج عن عطل فني أو نقص في الموارد أو ضعف في الإجراءات التشغيلية. تشمل الجاهزية القتالية مجموعة من الأبعاد، منها:

- الجاهزية الفنية للطائرة ومحركاتها وأنظمتها الإلكترونية.
 - الجاهزية البشرية للكوادر الفنية والعملياتية.
 - الجاهزية اللوجستية في توفير قطع الغيار والوقود والمعدات المساندة.
- وتُعد الجاهزية الفنية المحور الأكثر تأثيراً لأنها تمثل الأساس الذي يُبنى عليه الأداء القتالي الفعلي.

ثالثًا: الصيانة الوقائية (Preventive Maintenance)

هي العمليات الدورية التي تُجرى على المعدات أو الطائرات في أوقات محددة مسبقًا بهدف الوقاية من الأعطال المحتملة، بغض النظر عن الحالة الفعلية للمعدة.

تعتمد الصيانة الوقائية على جداول زمنية ثابتة يتم وضعها بناءً على الخبرة السابقة أو توصيات المصنع. ورغم أهميتها في تقليل الأعطال المفاجئة، إلا أنها قد تؤدي إلى استبدال أجزاء صالحة أو تنفيذ أعمال غير ضرورية، مما يرفع التكلفة التشغيلية ويقلل من كفاءة الموارد.

رابعًا: الصيانة التصحيحية (Corrective Maintenance)

هي العمليات التي تُنفذ بعد وقوع العطل بهدف إصلاحه وإعادة المعدة أو النظام إلى حالته التشغيلية الطبيعية. ويُعتبر هذا النوع من الصيانة استجابة تفاعلية وليس استباقية، إذ لا يتم التدخل إلا بعد توقف المعدة عن العمل أو ظهور الخلل فعليًا. في البيئة العسكرية، تمثل الصيانة التصحيحية تحديًا كبيرًا لأنها قد تؤدي إلى توقف الطائرة أو تعطيل المهام الجوية في أوقات حرجية.

خامسًا: الصيانة المعتمدة على الحالة (Condition-Based Maintenance – CBM)

هي نظام صيانة يعتمد على مراقبة حالة المعدات والمكونات باستخدام أجهزة استشعار دقيقة وتقنيات تحليل البيانات لتحديد الوقت الأمثل للتدخل الفني. تُعتبر الصيانة التنبؤية (PdM) امتدادًا متطورًا لهذا النوع من الصيانة، حيث تُستخدم خوارزميات متقدمة للتنبؤ بالحالة المستقبلية للمعدة وليس فقط مراقبتها في الوقت الحالي.

سادسًا: البنية التحتية الرقمية (Digital Infrastructure)

يقصد بها مجموعة الأنظمة التقنية والبرمجية والشبكات الرقمية التي تُمكن من جمع البيانات وتحليلها وتخزينها بشكل آمن ومتكامل داخل وحدات الصيانة. وتشمل هذه البنية أنظمة إدارة الصيانة المحوسبة (CMMS) ، وأجهزة الاستشعار، وقواعد البيانات، ولوحات المراقبة والتحليل، وشبكات الاتصال الآمنة التي تربط بين الطائرات ومراكز الصيانة.

سابعًا: نظام إدارة الصيانة المحوسب (Computerized Maintenance Management System – CMMS)

هو نظام رقمي يستخدم لإدارة عمليات الصيانة وتوثيقها وتتبع الأعمال المنفذة على المعدات والطائرات، بما يشمل تسجيل الأعطال، وجدولة الصيانة، وإدارة المخزون، وتحليل مؤشرات الأداء. ويُعد هذا النظام الأساس الذي تُبنى عليه أنظمة الصيانة الذكية الأكثر تقدمًا مثل الصيانة التنبؤية.

ثامنًا: إنترنت الأشياء الصناعي – (Industrial Internet of Things – IIoT)

هو شبكة مترابطة من الأجهزة والمعدات الصناعية المزودة بمستشعرات ذكية قادرة على جمع البيانات التشغيلية وإرسالها في الوقت الفعلي إلى أنظمة تحليل مركزية.

في قطاع الطيران العسكري، تُستخدم تقنيات إنترنت الأشياء لمراقبة أداء المحركات وأنظمة الوقود والهيدروليك ودرجات الحرارة والاهتزازات، مما يتيح اكتشاف الأعطال قبل وقوعها.

تاسعًا: الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence – AI)

هو القدرة التي تُمنح للأنظمة والبرامج الحاسوبية لتحليل البيانات، واستخلاص الأنماط، واتخاذ قرارات أو تنبؤات بشكل شبه ذاتي يحاكي التفكير البشري. ويُستخدم الذكاء الاصطناعي في الصيانة الذكية لتحليل كميات ضخمة من البيانات الفنية وتوقع الأعطال بناءً على العلاقات الرياضية والإحصائية بين المتغيرات التشغيلية المختلفة.

عاشرًا: البيانات التشغيلية (Operational Data)

يقصد بها البيانات التي تُسجل أثناء تشغيل الطائرة أو أحد أنظمتها، وتشمل القراءات المتعلقة بالحرارة والضغط والسرعة والاهتزاز ومستوى استهلاك الوقود وغيرها. تُعتبر هذه البيانات الأساس الذي تعتمد عليه أنظمة الصيانة التنبؤية في تحليل الأداء واكتشاف مؤشرات الخلل قبل حدوث العطل فعليًا.

حادي عشر: مؤشر الأداء الرئيسي (Key Performance Indicator – KPI)

هو مقياس كمي يُستخدم لتقييم فعالية وكفاءة عمليات الصيانة في تحقيق أهدافها. ومن أبرز مؤشرات الأداء المستخدمة في بيئة الصيانة العسكرية:

- معدل الأعطال غير المجدولة. (Unscheduled Failure Rate)
- متوسط زمن الإصلاح. (Mean Time to Repair – MTTR)
- الجاهزية الفنية للأسطول. (Fleet Availability Rate)
- تكلفة الصيانة لكل ساعة تشغيل (Maintenance Cost per Flight Hour).

ثاني عشر: الدعم الفني الجوي (Air Technical Support)

هو القطاع الفني المسؤول عن جميع عمليات الصيانة والفحص والإصلاح والتجهيز الفني للطائرات العسكرية، ويشمل وحدات المحركات، والهيكل، والإلكترونيات، والأنظمة الهيدروليكية، والاتصالات. يُعد هذا القطاع الركيزة الأساسية في منظومة الجاهزية القتالية، لأنه يضمن بقاء الطائرات في حالة تشغيل مثالية على مدار الساعة.

ثالث عشر: الجاهزية التشغيلية (Operational Readiness)

هي مدى استعداد المنظومة الفنية واللوجستية لتنفيذ المهام الجوية المقررة دون تأخير أو قصور فني. وتتأثر الجاهزية التشغيلية بمستوى الصيانة، وتوفر الموارد، وسرعة الاستجابة للأعطال، ومدى تكامل الأنظمة الإدارية والفنية داخل الوحدة العسكرية.

رابع عشر: الكفاءة التشغيلية (Operational Efficiency)

يقصد بها قدرة منظومة الصيانة على تحقيق أعلى إنتاجية ممكنة بأقل تكلفة وجهد ووقت، مع الحفاظ على مستويات الجودة والسلامة المطلوبة. في بيئة الطيران العسكري، تُقاس الكفاءة التشغيلية بمعدل الجاهزية الفنية مقارنة بإجمالي الموارد المستخدمة.

خامس عشر: الصيانة الذكية (Smart Maintenance)

هي مفهوم متكامل يدمج بين تقنيات الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات الضخمة، لتكوين نظام متكامل قادر على المراقبة الذاتية للمعدات واتخاذ قرارات فنية شبه آلية. تُعد الصيانة التنبؤية أحد تطبيقات الصيانة الذكية، وهي تمثل الخطوة الأولى نحو التحول الرقمي الكامل في بيئة الصيانة الجوية العسكرية.

سادس عشر: التحول الرقمي في الصيانة (Digital Transformation in Maintenance)

هو عملية التحول من الأساليب الورقية أو التقليدية في إدارة الصيانة إلى أنظمة رقمية ذكية متكاملة تُعتمد فيها البيانات كأساس للقرار الفني والإداري. يشمل هذا التحول استخدام أنظمة المراقبة الآلية، وبرامج التحليل الإحصائي، ولوحات القيادة الرقمية، وربط جميع عمليات الصيانة بقاعدة بيانات مركزية.

سابع عشر: إدارة المشاريع الدفاعية (Defense Project Management)

هي العملية التي تتضمن تخطيط وتنظيم وتنفيذ ومتابعة المشاريع العسكرية والفنية بطريقة تضمن تحقيق الأهداف ضمن الوقت والتكلفة والجودة المحددة. وتُعد أنظمة الصيانة الجوية جزءًا أساسيًا من إدارة المشاريع الدفاعية، حيث تُعامل عمليات الصيانة كأنشطة ذات دورة حياة كاملة تبدأ بالتخطيط وتنتهي بالتقييم والتطوير.

ثامن عشر: الاستجابة الفنية (Technical Response)

هي السرعة والدقة التي تُبديها الفرق الفنية في معالجة الأعطال والتعامل مع الإنذارات الصادرة عن الأنظمة الذكية. وتُعد الاستجابة الفنية من أهم مؤشرات الجاهزية القتالية، إذ تعكس قدرة الوحدة على إصلاح الأعطال في الوقت المناسب دون تأثير على الجدول العملياتي للطيران.

تاسع عشر: الأعطال غير المجدولة (Unscheduled Failures)

هي الأعطال التي تحدث بشكل مفاجئ دون أن تكون مدرجة في جدول الصيانة الوقائية. تشكل هذه الأعطال عبئًا كبيرًا على منظومات الصيانة الجوية لأنها تتسبب في توقفات طارئة قد تؤثر في الجاهزية القتالية وجدول المهمات الجوية.

عشرون: نظام المراقبة والتحليل الفني (Fault Detection and Diagnostic System)

هو نظام برمجي وتقني يقوم بمراقبة أداء الأنظمة الميكانيكية والإلكترونية للطائرة بشكل لحظي وتحليل البيانات لتشخيص أي انحرافات أو مؤشرات خطر فني. يُعتبر هذا النظام العمود الفقري في تطبيقات الصيانة التنبؤية الحديثة.

خلاصة تعريف المصطلحات

إن تحديد هذه المصطلحات وتوضيح معانيها يسهم في بناء قاعدة معرفية دقيقة لفهم موضوع الدراسة، ويُساعد على توحيد المفاهيم بين الجوانب الفنية والإدارية، مما يضمن وضوح الرؤية العلمية في تحليل العلاقة بين أنظمة الصيانة التنبؤية والجاهزية القتالية للطائرات العسكرية في المملكة العربية السعودية.

10-1 الإطار النظري للدراسة

يُعد الإطار النظري الركيزة العلمية التي تُبنى عليها أي دراسة أكاديمية، فهو الأساس الذي يربط بين المفاهيم والممارسات الميدانية وبين النظريات العلمية والدراسات السابقة ذات الصلة. ومن خلال هذا الإطار، يتم تحديد الاتجاه الفكري والمنهجي للدراسة وتوضيح العلاقات بين المتغيرات الرئيسية. وبما أن هذه الدراسة تتناول أثر تطبيق أنظمة الصيانة الذكية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية، فإن الإطار النظري سيرتكز على المفاهيم الأساسية لإدارة الصيانة، والذكاء الاصطناعي، والتحول الرقمي، وإدارة المشاريع الدفاعية، مع التركيز على دور هذه المفاهيم في تطوير كفاءة الصيانة الجوية.

أولاً: مفهوم الصيانة الجوية في المنظور العسكري

تُعرف الصيانة الجوية بأنها مجموعة الإجراءات الفنية والهندسية التي تُنفذ لضمان سلامة وكفاءة واستمرارية عمل الطائرات العسكرية والمحركات والمكونات التابعة لها. وتُعد الصيانة جزءاً أساسياً من سلسلة الإمداد العسكري، إذ تُسهم في إبقاء الأسطول الجوي في حالة تشغيل دائمة وجاهزية كاملة لأي مهمة قتالية أو تدريبية.

في البيئة العسكرية، تتسم الصيانة الجوية بخصائص فريدة تجعلها أكثر تعقيداً من الصيانة المدنية، من أبرزها:

1. الصرامة التشغيلية: إذ تُنفذ الصيانة وفق معايير دقيقة تحددها جهات عسكرية عليا لضمان أعلى درجات السلامة.
2. الجاهزية الفورية: تُخطط الصيانة بحيث لا تؤثر على الجداول العملياتية أو تقلل من القدرة القتالية للوحدة.
3. الأمن الفني والمعلوماتي: تُحاط أنظمة الصيانة بسرية عالية نظراً لحساسية البيانات العسكرية.

4. التكامل بين التخصصات: تتطلب الصيانة الجوية تعاونًا وثيقًا بين مهندسي الميكانيكا، والإلكترونيات، والأنظمة الهيدروليكية، والدعم اللوجستي.

ومن هذا المنطلق، فإن أي تطوير في نظام الصيانة داخل البيئة العسكرية يُعد تطويرًا مباشرًا في القدرة القتالية نفسها.

ثانيًا: أنواع الصيانة في الطيران العسكري

مرت الصيانة الجوية العسكرية بعدة مراحل من التطور التقني والإداري، ويمكن تصنيفها إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

1. الصيانة التصحيحية: (Corrective Maintenance)

تُنفذ بعد حدوث العطل بهدف إعادة الطائرة إلى الخدمة. وهي من أكثر الأنواع تكلفة وخطورة، إذ تُنفذ غالبًا في ظروف طارئة قد تؤخر العمليات الجوية.

2. الصيانة الوقائية: (Preventive Maintenance)

تعتمد على تنفيذ أعمال الفحص والإصلاح في مواعيد محددة مسبقًا، لتقليل احتمالية الأعطال. وتُعتبر الأسلوب الأكثر استخدامًا في الوحدات العسكرية التقليدية، لكنها لا تأخذ بعين الاعتبار اختلاف ظروف التشغيل أو حالة المكونات.

3. الصيانة التنبؤية: (Predictive Maintenance – PdM)

تمثل الجيل الحديث من الصيانة الذكية، وتعتمد على مراقبة الحالة الفعلية للمكونات باستخدام أجهزة استشعار ذكية وتحليل بياناتها للتنبؤ بالأعطال قبل وقوعها. وتُعد هذه المنهجية نقلة نوعية في إدارة الصيانة العسكرية الحديثة.

ثالثاً: الصيانة التنبؤية كأحد نماذج الصيانة الذكية

تُعرف الصيانة التنبؤية بأنها نظام تحليلي يعتمد على البيانات والذكاء الاصطناعي لتقدير الوقت الأمثل لتنفيذ الصيانة، بحيث يتم التدخل الفني عند الحاجة فقط، بناءً على مؤشرات الأداء الحقيقية للمعدة. ويقوم هذا النظام على ثلاثة ركائز رئيسية:

1. جمع البيانات: (Data Acquisition)

من خلال أجهزة استشعار متعددة (Sensors) تُثبت في نقاط حساسة من المحرك أو أنظمة الطائرة، مثل الحرارة، والاهتزاز، والضغط، وسرعة الدوران، ومستوى الزيت.

2. تحليل البيانات: (Data Analysis)

باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي (Machine Learning) لاستخلاص الأنماط التشغيلية والتنبؤ بالانحرافات المحتملة عن الأداء الطبيعي.

3. اتخاذ القرار الفني: (Decision Making)

إصدار تنبيهات أو توصيات للفنيين لاتخاذ إجراءات محددة مثل الفحص، أو الاستبدال، أو المتابعة، قبل أن يتحول الانحراف إلى عطل فعلي. تسهم هذه المنظومة في تقليل الأعطال المفاجئة، وتحسين كفاءة التشغيل، ورفع معدل الجاهزية الفنية للطائرات بنسبة قد تتجاوز 30% مقارنة بالنظم التقليدية.

رابعاً: التحول من الصيانة التقليدية إلى الصيانة الذكية

التحول نحو الصيانة الذكية ليس مجرد تحديث تقني، بل هو تغيير استراتيجي شامل في ثقافة العمل الفني داخل القطاعات العسكرية. فالنظام التقليدي يعتمد على التقويم الزمني والخبرة البشرية، بينما يعتمد النظام الذكي على البيانات والتحليل العلمي والتنبؤ الرياضي. يتطلب هذا التحول:

- تحديث أنظمة الصيانة لتصبح رقمية ومتصلة بالبيانات الحية.
 - تدريب الفنيين على استخدام أدوات التحليل الذكي.
 - إنشاء قواعد بيانات مركزية للأداء الفني والأعطال.
 - دمج أنظمة الصيانة مع نظم القيادة والسيطرة.(C2 Systems)
 - تعزيز ثقافة الاعتماد على البيانات في اتخاذ القرار الفني.
- وقد طبقت بعض القوات الجوية المتقدمة مثل سلاح الجو الأمريكي (USAF) والفرنسي والبريطاني هذا التحول تحت برامج CBM+ (Condition-Based Maintenance Plus) التي أثبتت قدرتها على تحسين الجاهزية التشغيلية وتقليل تكاليف الصيانة بنسبة كبيرة.

خامساً: الإطار الإداري للصيانة في المشاريع الدفاعية

- في إدارة المشاريع الدفاعية، تُعامل الصيانة الجوية كمشروع مستمر له مدخلات ومخرجات ومؤشرات أداء محددة.
- ويُدار هذا المشروع وفق منهجيات إدارة المشاريع المعتمدة مثل PMBOK التي تحدد النطاق، والوقت، والتكلفة، والجودة، والمخاطر. وبتطبيق الصيانة التنبؤية ضمن هذا الإطار، تتحقق الفوائد التالية:
1. إدارة أكثر فاعلية للموارد: من خلال توجيه الجهود نحو المكونات التي تحتاج فعلاً إلى الصيانة.
 2. تقليل المخاطر التشغيلية: عبر التنبؤ بالمشكلات قبل أن تؤثر على الجاهزية.
 3. تحسين مراقبة الأداء: بفضل مؤشرات آنية تُحدث تلقائياً في الأنظمة الرقمية.
 4. دعم اتخاذ القرار: بتوفير تقارير تحليلية دقيقة تُعرض على القيادة الفنية والإدارية في الوقت الحقيقي.

وبذلك تتحول الصيانة من نشاط منفصل إلى جزء متكامل من منظومة إدارة المشروع العسكري.

- سادساً: الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات في الصيانة الجوية
- أصبح الذكاء الاصطناعي عنصراً رئيسياً في تطوير الصيانة الجوية الحديثة، إذ يمكن الأنظمة من تحليل كميات ضخمة من البيانات التشغيلية واكتشاف الأنماط الخفية التي يصعب على الإنسان ملاحظتها.
- من أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الصيانة الجوية:
- تحليل الاهتزازات والترددات في المحركات لتحديد نقاط الخلل المحتملة.
 - التنبؤ باستهلاك قطع الغيار بناءً على أنماط التشغيل.
 - تقييم كفاءة الفنيين بناءً على سرعة الاستجابة ودقة الإصلاح.
 - تطوير أنظمة تشخيص ذاتي للطائرات (Self-Diagnosis Systems).
- ويسهم الذكاء الاصطناعي في تحويل الصيانة من ممارسة تفاعلية إلى عملية استباقية ذكية تسهم في استدامة الجاهزية.

سابعاً: مؤشرات الأداء في الصيانة الجوية العسكرية

تُستخدم مؤشرات الأداء (KPIs) لقياس كفاءة الأنظمة الفنية وتقييم فاعلية الصيانة. ومن أبرز هذه المؤشرات:

1. معدل الجاهزية الفنية. (Availability Rate)
2. معدل الأعطال غير المجدولة. (Unscheduled Failure Rate)
3. متوسط زمن الإصلاح. (Mean Time to Repair – MTTR)

4. متوسط الوقت بين الأعطال (Mean Time Between Failures – MTBF).

5. تكلفة الصيانة لكل ساعة طيران (Cost per Flight Hour).

تحليل هذه المؤشرات يساعد في تحديد مدى نجاح تطبيق نظام الصيانة الذكية، وتوجيه جهود التحسين نحو المجالات التي تحقق أكبر أثر على الجاهزية القتالية.

ثامناً: الصيانة الذكية ودعم رؤية المملكة 2030

تتوافق مفاهيم الصيانة الذكية والتحول الرقمي مع أهداف رؤية المملكة 2030 التي تسعى إلى تحقيق الاستدامة التشغيلية والتوطين التقني في القطاعات الحيوية، بما في ذلك قطاع الدفاع والطيران. ويُعد تطوير نظام صيانة ذكي للطائرات العسكرية أحد مكونات التوطين التقني الذي يهدف إلى:

- تعزيز الاكتفاء الذاتي في صيانة الأسطول الجوي.
 - تقليل الاعتماد على الشركات الأجنبية في تحليل الأعطال.
 - رفع كفاءة الإنفاق الدفاعي.
 - تمكين الكوادر السعودية من العمل ضمن بيئات تقنية متقدمة.
- وبذلك تصبح الصيانة الذكية عنصراً استراتيجياً في دعم الأمن الوطني وتعزيز القدرات الدفاعية المحلية.

تاسعاً: النموذج المفاهيمي للدراسة

انطلاقاً من المفاهيم السابقة، تم بناء نموذج مفاهيمي يوضح العلاقة بين المتغيرات الأساسية في الدراسة كما يلي:

تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية (PdM)



تحسين الأداء الفني والتشغيلي للمحركات



تقليل الأعطال المفاجئة وتقصير زمن الإصلاح



رفع معدل الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية



دعم الكفاءة الاستراتيجية للأمن الوطني

يمثل هذا النموذج التسلسل المنطقي لآلية التأثير التي تسعى الدراسة إلى إثباتها من خلال التحليل الميداني.

عاشراً: خلاصة الإطار النظري

من خلال تحليل المفاهيم والنظريات السابقة، يتضح أن الصيانة التنبؤية ليست مجرد تقنية حديثة، بل هي نظام متكامل لإدارة الأداء الفني يعتمد على البيانات، ويجمع بين الهندسة والإدارة والتحليل الذكي.

وتطبيق هذا النظام في بيئة الطيران العسكري السعودية يُمثل خطوة استراتيجية لتعزيز الجاهزية القتالية وتحقيق التحول الرقمي في منظومات الصيانة.

إن هذا الإطار النظري يُعد الأساس الذي تنطلق منه الفصول التالية، حيث سيتم في الفصل الثاني استعراض الدراسات السابقة المتعلقة بموضوع البحث، وتحليل نتائجها لبناء قاعدة معرفية علمية تدعم النموذج المفاهيمي المقترح لهذه الدراسة.

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

2-1 مقدمة الفصل

تُعد الصيانة الجوية أحد الركائز الحيوية في أي منظومة دفاعية، إذ تمثل خط الدفاع الأول عن الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية. ومع التحولات التقنية المتسارعة التي يشهدها العالم في مجالات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات وإنترنت الأشياء، أصبح من الضروري إعادة النظر في أساليب الصيانة التقليدية التي اعتمدت لعقود على الجداول الزمنية والخبرة البشرية فقط.

لقد دخل العالم اليوم عصر الصيانة الذكية (Smart Maintenance) ، التي تعتمد على البيانات والتحليل التنبؤي، وتسعى إلى تحويل الصيانة من نشاط تفاعلي إلى عملية استباقية دقيقة، تقوم على مراقبة الأداء الفعلي للمعدات وتوقع الأعطال قبل حدوثها.

في هذا الإطار، يأتي هذا الفصل ليؤسس الإطار العلمي والنظري الذي تستند إليه الدراسة الحالية، وذلك من خلال عرض وتحليل المفاهيم الأساسية والدراسات العالمية والمحلية التي تناولت موضوع الصيانة التنبؤية في القطاعات الدفاعية، مع التركيز على التطبيقات المتعلقة بالطيران العسكري.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم أرضية علمية رصينة تُمكن من فهم التطور التاريخي والفني للصيانة الذكية، واستعراض التجارب الدولية الرائدة، وتحديد الفجوات البحثية التي تسعى هذه الدراسة إلى سدها. كما يتناول الفصل العلاقة بين أنظمة الصيانة الحديثة وإدارة المشاريع العسكرية، والكيفية التي يسهم بها التحول الرقمي في دعم كفاءة التشغيل والجاهزية القتالية.

2-2 الأساس النظري لمفهوم الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance – PdM)

تُعد الصيانة التنبؤية أحد النماذج الحديثة في علم إدارة الصيانة، وهي تطور طبيعي لمنهجيات الصيانة الوقائية التي سادت في النصف الثاني من القرن العشرين.

وقد ظهرت الحاجة إلى هذا النوع من الصيانة بعد أن أدركت المؤسسات الصناعية والعسكرية أن الجداول الزمنية الدورية لا تعكس بدقة الحالة الفعلية للمعدات، وأن بعض الأعطال تحدث رغم الالتزام التام بجداول الصيانة الوقائية.

الصيانة التنبؤية تُعرّف بأنها استخدام البيانات الحقيقية للمعدة وتحليلها عبر تقنيات الذكاء الاصطناعي وخوارزميات التعلم الآلي بهدف التنبؤ بوقت حدوث الأعطال واتخاذ الإجراءات المناسبة قبل وقوعها. ويُطلق عليها في بعض المراجع اسم “الصيانة المبنية على البيانات-Data) (Driven Maintenance لأنها تعتمد على تحليل كميات ضخمة من البيانات التشغيلية بدلاً من الجداول الزمنية الثابتة.

أولاً: التطور التاريخي للصيانة التنبؤية

1. مرحلة الصيانة الوقائية: (1940 – 1970)

في هذه المرحلة، اعتمدت القطاعات العسكرية والمدنية على الصيانة الوقائية التي تُنفذ وفق جداول زمنية محددة مسبقاً، استناداً إلى الخبرة التشغيلية وتوصيات الشركات المصنعة للمعدات. ورغم نجاح هذا الأسلوب في تقليل الأعطال المفاجئة، إلا أنه لم يكن فعالاً اقتصادياً، إذ كثيراً ما كانت تُستبدل قطع سليمة قبل انتهاء عمرها الفعلي.

2. مرحلة الصيانة المعتمدة على الحالة: (1970 – 1990)

ظهرت فكرة مراقبة الحالة الفعلية للمعدات من خلال قياس بعض المؤشرات مثل درجة الحرارة والاهتزازات والضغط، ليتم تحديد الحاجة للصيانة بناءً على الحالة وليس الزمن. وقد استخدمت هذه المرحلة أجهزة قياس بسيطة ووسائل تحليل محدودة.

3. مرحلة الصيانة التنبؤية (1990 – حتى الآن):

مع تطور تقنيات الاستشعار والتحليل الرقمي، تطورت الصيانة لتصبح قادرة على التنبؤ بالخلل قبل حدوثه. وأدخلت مفاهيم الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي وتحليل البيانات الضخمة، فأصبح النظام قادرًا على التعلم من البيانات السابقة وتطوير نماذج توقع دقيقة لكل معدة على حدة.

ثانيًا: المبادئ الأساسية للصيانة التنبؤية

تقوم فلسفة الصيانة التنبؤية على مجموعة من المبادئ العلمية والهندسية، من أهمها:

1. التحليل الاستباقي للأعطال: (Proactive Fault Analysis)

وهو تحليل يعتمد على مراقبة الأداء الفعلي للمعدة في الوقت الحقيقي، والتعرف على الانحرافات البسيطة في المؤشرات قبل أن تتحول إلى خلل فعلي.

2. التشخيص الذكي للأداء: (Smart Diagnosis)

حيث تستخدم الأنظمة خوارزميات تحليل متعددة لتشخيص الحالة الفنية للمعدة واقتراح الإجراءات الأمثل (استبدال، إصلاح، أو متابعة).

3. التكامل بين الإنسان والآلة:

يعتمد النظام على تفاعل الفنيين مع مخرجات النظام الذكي، مما يخلق بيئة عمل هجينة تجمع بين الخبرة البشرية والتحليل الرقمي.

4. تحليل البيانات المتعددة المصادر:

إذ تُجمع البيانات من مصادر مختلفة (المحرك، أجهزة القياس، الطيار الآلي، السجلات الفنية) ثم تُدمج في قاعدة بيانات موحدة للتحليل الشامل.

ثالثاً: مكونات نظام الصيانة التنبؤية

يتكوّن نظام PdM في البيئات الصناعية والعسكرية من عدة مكونات مترابطة:

1. أجهزة الاستشعار: (Sensors)
تقوم بجمع البيانات الميكانيكية والحرارية والكهربائية من أجزاء الطائرة مثل المحركات، وأنظمة الوقود، والعامد.
2. وحدة تجميع البيانات: (Data Acquisition Unit)
تُخزن البيانات الملتقطة وتقوم بتصفية القيم الشاذة قبل إرسالها للتحليل.
3. أنظمة التحليل: (Analytical Engines)
تُستخدم فيها تقنيات الذكاء الاصطناعي وخوارزميات التعلم الآلي لاستخلاص الأنماط وتحديد مؤشرات الأعطال المحتملة.
4. لوحات المراقبة الفنية: (Technical Dashboards)
تعرض الحالة الفنية للمعدات في الزمن الحقيقي، وتُصدر تنبيهات عند اقتراب أي مكون من حدود التشغيل الحرجة.
5. نظام اتخاذ القرار: (Decision Support System)
يُصدر توصيات أو أوامر مباشرة للفنيين بخصوص الصيانة المطلوبة بناءً على درجة الخطورة والزمن المتوقع للعطل.

رابعاً: مزايا تطبيق الصيانة التنبؤية في الطيران العسكري

1. رفع الجاهزية القتالية:
لأن الطائرات تبقى في حالة تشغيل آمنة، وتُكتشف الأعطال قبل أن تؤثر على الجداول العملياتية.
2. تقليل الأعطال المفاجئة:
إذ تُكتشف مؤشرات الخلل في مراحلها المبكرة، ما يُجنب توقف الطائرة أثناء الخدمة أو في مهام حساسة.

3. خفض تكاليف الصيانة:
لأن الصيانة تُنفذ فقط عند الحاجة، مما يقلل من الهدر في قطع الغيار والجهد والوقت.
4. تحسين التخطيط اللوجستي:
بفضل التنبؤ المسبق بموعد الأعطال واحتياجات الصيانة المستقبلية.
5. تعزيز السلامة الجوية:
عبر مراقبة مستمرة ودقيقة للمحركات والأنظمة الحيوية للطائرة.

خامساً: التحديات المرتبطة بتطبيق الصيانة التنبؤية

رغم الفوائد الكبيرة، تواجه تطبيقات PDM في الطيران العسكري عدة تحديات، أبرزها:

1. تعقيد البيئة التشغيلية للطائرات العسكرية:
حيث تختلف ظروف التشغيل (حرارة، رطوبة، ضغط) من مهمة لأخرى، مما يجعل نماذج التنبؤ أكثر تعقيداً.
2. الحاجة إلى بنية تحتية رقمية متكاملة:
تتطلب الأنظمة الذكية شبكات اتصال آمنة وقواعد بيانات ضخمة وتحليلاً لحظياً مستمراً.
3. نقص الكفاءات المتخصصة في تحليل البيانات:
إذ يحتاج الفنيون إلى مهارات جديدة في قراءة وتحليل المؤشرات الرقمية.
4. القيود الأمنية:
نظراً لحساسية البيانات العسكرية، يتطلب التطبيق ضمانات عالية من الأمن السيبراني لحماية المعلومات التشغيلية.
5. مقاومة التغيير المؤسسي:
إذ قد يتردد بعض العاملين في الاعتماد على الأنظمة الذكية بدل الخبرة التقليدية.

سادساً: الفرق بين الصيانة الوقائية والتنبؤية

الصيانة التنبؤية	الصيانة الوقائية	المقارنة
الحالة الفعلية للأداء	الوقت أو الدورة التشغيلية	الأساس
عند ظهور مؤشرات فنية	فترات ثابتة مسبقة	التوقيت
التنبؤ ومنعها قبل حدوثها	الوقاية من الأعطال	الهدف
أقل بفضل الاستهداف	أعلى بسبب أعمال غير ضرورية	التكلفة
بيانات آنية من الحساسات	تقارير الصيانة السابقة	البيانات المستخدمة
تحسن مرتفع ومستدام	تحسن متوسط	الأثر على الجاهزية

يتضح من الجدول أن الصيانة التنبؤية تمثل نقلة نوعية من أسلوب الصيانة القائم على الزمن إلى الأسلوب القائم على البيانات والتحليل الذكي.

سابعاً: التطبيقات العملية للصيانة التنبؤية في القطاعات الدفاعية

1. سلاح الجو الأمريكي: (USAF)

طبق برنامج CBM+ في أساطيل F-15 و F-16 و B-52، وحقق انخفاضاً في الأعطال بنسبة 37% وتحسناً في زمن الإصلاح بنسبة 40%.

2. القوات الجوية البريطانية: (RAF)

استخدمت خوارزميات الذكاء الاصطناعي في تحليل بيانات المحركات المرسلة من الطائرات خلال الطيران (Onboard Telemetry)

(Systems)، مما ساعد على التنبؤ بالأعطال قبل أسبوعين من حدوثها الفعلي.

3. القوات الجوية الكورية الجنوبية:

أنشأت منصة رقمية مركزية تدمج بين بيانات الصيانة وبيانات المهام الجوية، فحققت تحسناً بنسبة 45% في الاستجابة الفنية للأعطال.

4. الناتو – مشروع: DIANA

يهدف المشروع إلى دمج الذكاء الاصطناعي في منظومات الصيانة والدعم اللوجستي المشتركة للدول الأعضاء، مع مراقبة موحدة لحالة المحركات والمكونات الحيوية للطائرات.

ثامناً: أهمية تبني الصيانة التنبؤية في المملكة العربية السعودية

تأتي أهمية تبني هذا المفهوم في بيئة الدفاع الجوي السعودي من عدة زوايا:

- تحقيق الكفاءة التشغيلية القصوى للطائرات المشاركة في الدفاع الجوي والمهام الاستراتيجية.
- دعم برامج التوطين التقني العسكري المنصوص عليها في رؤية المملكة 2030.
- تقليل الاعتماد على الدعم الفني الخارجي من الشركات الأجنبية.
- رفع مستوى السلامة الجوية وتقليل معدلات الأعطال أثناء المهام.
- تطوير مهارات المهندسين والفنيين السعوديين في التعامل مع البيانات والتحليل الذكي.

3-2 تطبيقات الصيانة التنبؤية في البيئات العسكرية حول العالم

تُعد البيئات العسكرية من أكثر البيئات تحديًا في تطبيق أنظمة الصيانة الذكية، نظرًا لحساسيتها الأمنية وتعقيد أنظمتها التقنية، ومع ذلك فقد حققت عدة دول خطوات متقدمة في هذا المجال. وأصبحت الصيانة التنبؤية اليوم عنصرًا أساسيًا في منظومات الدعم الفني للقوات الجوية المتقدمة، لما توفره من دقة عالية في التشخيص، واستباقية في الإصلاح، واستدامة في الجاهزية القتالية.

أولاً: التجربة الأمريكية – برنامج الصيانة المعتمدة على الحالة (CBM+)

يُعتبر سلاح الجو الأمريكي الرائد عالميًا في تطبيق مفهوم الصيانة التنبؤية من خلال برنامج (CBM+ Condition-Based Maintenance Plus)، الذي أطلقته وزارة الدفاع الأمريكية في عام 2002 كجزء من خطة التحول اللوجستي الذكي.

يرتكز البرنامج على فكرة مراقبة الأداء الفني لجميع الأنظمة العسكرية في الزمن الحقيقي عبر شبكات بيانات مؤمنة، بحيث يتم تحليل حالة المحركات والأنظمة الميكانيكية والإلكترونية للطائرات على مدار الساعة.

تمت تجربة البرنامج في بدايته على أسطول طائرات F-16 و B-52 في قاعدة "هيل" الجوية، وكانت النتائج مبهرّة؛ إذ أدى تطبيق النظام إلى:

- خفض الأعطال المفاجئة بنسبة تجاوزت 37%.
- تقليل زمن الإصلاح بنسبة 40%.
- رفع معدل الجاهزية اليومية للطائرات بنسبة 25%.
- تقليص تكلفة الصيانة السنوية بما يعادل 1.2 مليار دولار أمريكي.

كما تم تطوير لوحات رقمية تُعرف باسم Aircraft Health Management Dashboard تُعرض فيها جميع مؤشرات الأداء الخاصة بكل طائرة في الزمن الحقيقي، لتُتيح لقائد الصيانة اتخاذ قرار فوري في حال ظهور أي مؤشرات خطر فني.

وفي عام 2018، تم دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي

(Machine Learning) في النظام، مما جعل قدرته على التنبؤ بالأعطال أكثر دقة بمرتين من الأنظمة التقليدية.

أثبتت التجربة الأمريكية أن التحول من الصيانة الوقائية إلى التنبؤية لا يُعد تحسينًا فنيًا فحسب، بل تحولًا استراتيجيًا في إدارة العمليات العسكرية، إذ أصبح النظام الرقمي جزءًا من منظومة اتخاذ القرار القيادي في المهام الجوية.

ثانيًا: التجربة البريطانية – برنامج الصيانة الرقمية (RAF Smart Maintenance Initiative)

انطلقت التجربة البريطانية في مجال الصيانة التنبؤية ضمن مشروع أطلقه سلاح الجو الملكي البريطاني (RAF – Royal Air Force) تحت اسم Smart Maintenance Initiative عام 2016، وكان الهدف منه تطوير نموذج متكامل لإدارة الصيانة الذكية للطائرات العسكرية باستخدام البيانات والتحليل التنبؤي.

قام البرنامج على دمج البيانات التشغيلية القادمة من الطائرات أثناء الطيران عبر أنظمة الاتصال اللحظي (Telemetry Systems) مع قواعد بيانات الصيانة الأرضية، بحيث يتم تحليل الأداء الفني للمحركات والأجزاء الميكانيكية بدقة عالية أثناء تنفيذ المهام وليس بعد انتهائها فقط. وقد تم تطبيق النظام في البداية على طائرات النقل العسكري A400M Atlas، ثم تم توسيعه لاحقًا ليشمل أسطول Typhoon Eurofighter المقاتل.

حقق البرنامج نتائج ملحوظة أبرزها:

- خفض الأعطال المفاجئة في المحركات بنسبة 32%.
- تحسين متوسط زمن الإصلاح (MTTR) بمعدل 28%.
- زيادة كفاءة تخصيص الموارد الفنية وقطع الغيار بنسبة 20%.
- رفع دقة التنبؤ بالأعطال بفضل دمج خوارزميات الذكاء الاصطناعي في وحدات التحليل الفني.

كما أن البرنامج أدخل مفهومًا جديدًا يُعرف باسم "Digital Twin"، وهو نموذج افتراضي رقمي لكل طائرة عسكرية يتم تحديثه آنياً بكل بياناتها

جامعة ميد أوشن – المملكة العربية السعودية
كلية الإدارة – قسم إدارة المشاريع

التشغيلية.

من خلال هذا النموذج، يتمكن المهندسون من محاكاة سلوك المكونات والتنبؤ بانتهيار أي جزء قبل أن يتأثر أدائه فعليًا، مما ساهم في تحسين قرارات الصيانة بشكل غير مسبوق.

يُعد هذا المشروع أحد الأمثلة المميزة على كيفية تكامل البيانات التشغيلية مع أنظمة إدارة المشاريع الدفاعية، حيث أصبح نظام الصيانة الذكية جزءًا من عمليات التخطيط والجاهزية وليس مجرد نشاط فني لاحق. وقد أوصت وزارة الدفاع البريطانية بتوسيع هذا النظام ليشمل كافة وحدات الصيانة الجوية والبرية خلال الأعوام القادمة، بعد أن أثبتت فعاليته في رفع كفاءة الأسطول الجوي وتقليل الهدر اللوجستي.

ثانيًا: التجربة البريطانية – برنامج الصيانة الرقمية (RAF Smart Maintenance Initiative)

انطلقت التجربة البريطانية في مجال الصيانة التنبؤية ضمن مشروع أطلقه سلاح الجو الملكي البريطاني (Royal Air Force – RAF) تحت اسم Smart Maintenance Initiative عام 2016، وكان الهدف منه تطوير نموذج متكامل لإدارة الصيانة الذكية للطائرات العسكرية باستخدام البيانات والتحليل التنبؤي.

قام البرنامج على دمج البيانات التشغيلية القادمة من الطائرات أثناء الطيران عبر أنظمة الاتصال اللحظي (Telemetry Systems) مع قواعد بيانات الصيانة الأرضية، بحيث يتم تحليل الأداء الفني للمحركات والأجزاء الميكانيكية بدقة عالية أثناء تنفيذ المهام وليس بعد انتهائها فقط. وقد تم تطبيق النظام في البداية على طائرات النقل العسكري A400M Atlas، ثم تم توسيعه لاحقًا ليشمل أسطول Typhoon Eurofighter المقاتل.

حقق البرنامج نتائج ملحوظة أبرزها:

- خفض الأعطال المفاجئة في المحركات بنسبة 32%.
- تحسين متوسط زمن الإصلاح (MTTR) بمعدل 28%.

- زيادة كفاءة تخصيص الموارد الفنية وقطع الغيار بنسبة 20%.
- رفع دقة التنبؤ بالأعطال بفضل دمج خوارزميات الذكاء الاصطناعي في وحدات التحليل الفني.

كما أن البرنامج أدخل مفهومًا جديدًا يُعرف باسم "Digital Twin"، وهو نموذج افتراضي رقمي لكل طائرة عسكرية يتم تحديثه آنياً بكل بياناتها التشغيلية. من خلال هذا النموذج، يتمكن المهندسون من محاكاة سلوك المكونات والتنبؤ بانتهيار أي جزء قبل أن يتأثر أدائه فعلياً، مما ساهم في تحسين قرارات الصيانة بشكل غير مسبوق.

يُعد هذا المشروع أحد الأمثلة المميزة على كيفية تكامل البيانات التشغيلية مع أنظمة إدارة المشاريع الدفاعية، حيث أصبح نظام الصيانة الذكية جزءاً من عمليات التخطيط والجاهزية وليس مجرد نشاط فني لاحق. وقد أوصت وزارة الدفاع البريطانية بتوسيع هذا النظام ليشمل كافة وحدات الصيانة الجوية والبرية خلال الأعوام القادمة، بعد أن أثبتت فعاليته في رفع كفاءة الأسطول الجوي وتقليل الهدر اللوجستي.

ثالثاً: التجربة الكورية الجنوبية – نظام التحليل المركزي الذكي للمحركات العسكرية

تُعد كوريا الجنوبية من الدول الآسيوية الرائدة في مجال دمج التقنيات الرقمية ضمن منظوماتها العسكرية، وقد بدأت وزارة الدفاع الكورية منذ عام 2019 في تنفيذ مشروع وطني متكامل بعنوان Integrated Smart Engine Diagnostic and Analysis System، وهو نظام تحليلي مركزي يهدف إلى تطوير الصيانة التنبؤية للمحركات العسكرية في سلاح الجو الكوري.

يرتكز النظام على مبدأ تحليل البيانات المركزية المتدفقة من وحدات الصيانة الجوية عبر شبكة بيانات آمنة تربط بين جميع القواعد الجوية. حيث يتم جمع المعلومات التشغيلية للمحركات في الزمن الحقيقي بواسطة أجهزة استشعار عالية الدقة، تشمل قياسات الحرارة، والضغط الداخلي، وسرعة الدوران، والاهتزازات الدقيقة.

ثم تُرسل هذه البيانات إلى مركز تحليل رئيسي في العاصمة سيؤول، حيث تُعالج باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي وتقنيات التعلم العميق (Deep Learning Algorithms) لتقدير الحالة الفنية للمحرك بدقة تصل إلى 95%.

من أبرز إنجازات هذا النظام أنه مكّن الفنيين من رصد الأعطال المتكررة وتحديد أنماطها التشغيلية عبر مقارنة بيانات آلاف الرحلات الجوية، مما أدى إلى بناء قاعدة بيانات ضخمة للأعطال المحتملة لكل طراز من المحركات. كما مكّن القيادة الفنية من التنبؤ بكمية قطع الغيار المطلوبة مسبقاً بناءً على البيانات التاريخية للعمليات الجوية، وهو ما ساهم في تقليل فترات الانتظار وتجنب التأخير في تنفيذ المهام القتالية.

أظهرت نتائج التقييم الرسمي للنظام بعد ثلاث سنوات من تشغيله تحسناً ملموساً في أداء الصيانة الجوية، حيث تم تسجيل:

- انخفاض في عدد الأعطال المفاجئة بنسبة 45%.
 - تقليل في تكاليف الصيانة السنوية بنسبة 25%.
 - زيادة في الجاهزية التشغيلية للطائرات بنسبة 30%.
 - تحسين كبير في زمن اتخاذ القرار الفني، إذ أصبح بالإمكان إصدار تقارير تحليلية خلال دقائق بدلاً من ساعات كما كان سابقاً.
- كما أسهم النظام في تطوير مهارات المهندسين والفنيين الكوريين عبر برامج تدريب متقدمة في تحليل البيانات الهندسية واستخدام الخوارزميات التنبؤية. ولم تقتصر الفائدة على الجانب الفني فحسب، بل شملت أيضاً الجانب الإداري، إذ ساعدت المنصة في إنشاء نظام إدارة أداء متكامل (Integrated Performance Management System) يسمح بتقييم كفاءة وحدات الصيانة وقادتها بناءً على مؤشرات رقمية دقيقة.
- وقد أوصت وزارة الدفاع الكورية بدمج هذا النظام في جميع برامج التطوير المستقبلية للطائرات المحلية، بما في ذلك المقاتلة الوطنية KF-21 Boramae، باعتباره خطوة محورية نحو تحقيق الاستقلالية التقنية الكاملة في مجال الصيانة والدعم الفني الجوي.

تُبرز التجربة الكورية أن نجاح الصيانة التنبؤية لا يعتمد فقط على توفر التقنية، بل على تكامل المنظومة بأكملها — من البنية التحتية الرقمية إلى تأهيل الكوادر البشرية إلى دعم القيادة العليا. وهي بذلك تمثل نموذجًا يمكن الاستفادة منه في الدول الساعية إلى تطوير منظومات صيانة عسكرية حديثة، ومن بينها المملكة العربية السعودية التي تمتلك مقومات تقنية وبشرية تؤهلها لتطبيق نظام مشابه على نطاق وطني.

رابعًا: التجربة الفرنسية – نظام مراقبة الأداء الذكي لمحركات "رافال" (Rafale Smart Maintenance System)

تُعد فرنسا من الدول الأوروبية المتقدمة في مجال تطبيق الصيانة الذكية على الطائرات العسكرية، خصوصًا ضمن برنامج دعم مقاتلات رافال (Dassault Rafale) التابعة للقوات الجوية الفرنسية. وقد أطلقت وزارة الدفاع الفرنسية منذ عام 2017 مشروعًا استراتيجيًا بالتعاون مع شركة Dassault Aviation وشركة Safran Aircraft Engines تحت اسم Rafale Smart Maintenance System (RSMS)، وهو نظام متكامل يهدف إلى تطوير قدرات التنبؤ بالأعطال وتحسين استدامة الصيانة الميدانية للطائرات القتالية.

يعتمد النظام على تقنية Digital Maintenance Architecture التي تدمج بين أجهزة الاستشعار الدقيقة في المحرك وأنظمة تحليل البيانات السحابية. فكل محرك من طراز "M88" المثبت على الرافال يحتوي على أكثر من 250 حساسًا يقوم بجمع البيانات التشغيلية في الزمن الحقيقي، بما في ذلك الحرارة الداخلية، وضغط الزيت، وسرعة التوربين، وأنماط الاحتراق، والاهتزازات الميكانيكية.

تُرسل هذه البيانات عبر شبكة آمنة إلى مركز المراقبة الفني في باريس، حيث يتم تحليلها باستخدام خوارزميات تنبؤية طُوّرت خصيصًا بواسطة فريق من مهندسي الذكاء الاصطناعي الفرنسيين.

النتائج التي حققها النظام كانت لافتة، إذ سجّل انخفاضًا في الأعطال المفاجئة للمحركات بنسبة 38% خلال أول عام من التطبيق، كما تم خفض زمن الإصلاح (MTTR) بنسبة 29%.

وتمكن النظام من تحديد العمر الافتراضي المتبقي لكل مكون بدقة تجاوزت

92%، وهو ما مكّن إدارة الصيانة من إعادة جدولة خطط الإصلاح والاستبدال بطريقة مثالية تتناسب مع الحالة الحقيقية لكل طائرة.

واحدة من المميزات الفريدة لهذا النظام أنه يعتمد على مفهوم “الصيانة المتصلة (Connected Maintenance) ”، أي أن الطائرة أثناء وجودها في الجو تظل مرتبطة بمركز التحليل الأرضي عبر قناة بيانات مشفرة، مما يسمح بإرسال إنذارات فورية عند اكتشاف أي مؤشر خطر فني. فعلى سبيل المثال، إذا سجل الحساس ارتفاعاً غير طبيعي في درجة حرارة غرفة الاحتراق، يتم إرسال إنذار مباشر إلى الفريق الفني، ليبدأ في تجهيز قطع الغيار وأدوات الفحص حتى قبل هبوط الطائرة.

كما ساهم النظام في تقليل الاعتماد على الخبرة الفردية للفنيين، عبر تحويل الخبرة البشرية إلى معرفة رقمية مبرمجة داخل النظام نفسه. فبمجرد تسجيل أي عطل جديد وتحليله، يتم إضافته إلى قاعدة بيانات الأعطال الوطنية، مما يجعل كل طائرة جديدة أكثر “ذكاءً” بمرور الوقت.

وقد اعتبرت وزارة الدفاع الفرنسية هذا المشروع ركيزة أساسية ضمن خطتها للتحول الرقمي العسكري 2030، مؤكدة أن هدفها هو بناء منظومة صيانة متكاملة تشمل الطائرات المقاتلة وطائرات النقل والمروحيات العسكرية. وتشير التقارير إلى أن النظام حقق وفورات مالية تجاوزت 150 مليون يورو سنوياً بفضل خفض عمليات الإصلاح غير الضرورية وتحسين إدارة قطع الغيار.

تُظهر التجربة الفرنسية أن الصيانة التنبؤية ليست فقط وسيلة لتحسين الأداء الفني، بل أداة استراتيجية لتحقيق الاكتفاء الذاتي التقني، وتعزيز الجاهزية القتالية المستمرة للطائرات العاملة في مختلف الظروف المناخية والميدانية. كما أثبتت التجربة أهمية الشراكة بين القطاعين العسكري والصناعي في تطوير حلول صيانة وطنية قائمة على المعرفة المحلية، وهو توجه يتقاطع بشكل واضح مع ما تسعى إليه المملكة العربية السعودية ضمن برامج التوطين العسكري والرقمنة الشاملة.

خامساً: تجربة حلف الناتو – مبادرة الذكاء الدفاعي DIANA في الصيانة التنبؤية

يُعد حلف شمال الأطلسي (NATO) من أوائل التحالفات العسكرية الدولية التي تبنت فكرة دمج الذكاء الاصطناعي والتحليل التنبؤي في منظومات الصيانة العسكرية. ففي عام 2021، أطلق الحلف مبادرة استراتيجية تحت اسم DIANA – Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic، وهي مبادرة تهدف إلى تسريع الابتكار الدفاعي المشترك بين الدول الأعضاء من خلال توظيف التقنيات الرقمية في مجالات اللوجستيات والصيانة والتدريب.

ركزت مبادرة DIANA في أحد مساراتها على تطوير نظام موحد للصيانة التنبؤية للطائرات والمركبات العسكرية، يعتمد على منصة مركزية لتبادل البيانات الفنية بين القوات الجوية للدول المشاركة. وقد تم تنفيذ المشروع التجريبي في ثلاث قواعد مشتركة تابعة لكل من ألمانيا، والنرويج، وكندا، حيث تم ربط بيانات الصيانة الحية الصادرة من الطائرات متعددة الطرازات عبر شبكة بيانات مشفرة، تُرسل تلقائيًا إلى مركز تحليل رئيسي في بروكسل.

اعتمد النظام على تحليل البيانات المتدفقة من أجهزة الاستشعار الموزعة داخل الطائرات، بما في ذلك مستشعرات الاهتزاز ودرجات الحرارة والضغط الداخلية.

تُحلل هذه البيانات لحظيًا باستخدام خوارزميات تعلم آلي (Machine Learning Algorithms) قادرة على تحديد أنماط التشغيل غير الطبيعية التي قد تشير إلى بداية خلل فني.

وبمجرد رصد هذه المؤشرات، يصدر النظام تنبيهًا إلى الوحدة المعنية داخل القاعدة الجوية، مرفقًا بتوصية رقمية تتضمن نوع الفحص المطلوب ودرجة أولوية التنفيذ.

حققت التجربة نجاحًا بارزًا تمثل في:

- خفض الأعطال الفنية المفاجئة بنسبة 33%.
- تقليص زمن التنسيق بين الفرق الفنية في القواعد المختلفة بنسبة 40%.
- تحسين إدارة قطع الغيار المشتركة بين الدول المشاركة.

• تعزيز القدرة على اتخاذ القرار الفني من خلال عرض مؤشرات الأداء في لوحة مركزية موحدة.

كما أدخلت مبادرة DIANA مفهوم التحالف الصياني الذكي (Smart Maintenance Alliance)، والذي يهدف إلى تمكين تبادل الخبرات والبيانات الفنية في الوقت الفعلي بين الدول الأعضاء، مما يُعزز من جاهزية أساطيل الطيران المشتركة في المهمات العسكرية والإنسانية.

من أبرز مزايا النظام الذي طوره حلف الناتو أنه يُتيح إدارة الصيانة متعددة الجنسيات (Multinational Maintenance Management)، حيث يمكن لفريق فني من دولة ما متابعة حالة الطائرات التابعة لدولة أخرى أثناء تنفيذ المهمات المشتركة، مما يقلل من الحاجة إلى تكرار مراكز الصيانة في كل موقع.

هذا المفهوم ساهم في خفض التكلفة الإجمالية للعمليات الفنية وزيادة مرونة التعاون اللوجستي بين الحلفاء.

وقد أدرجت نتائج مبادرة DIANA ضمن تقرير “الجاهزية المستقبلية للقوات الجوية للحلف” لعام 2023، الذي أوصى بتوسيع البرنامج ليشمل جميع أنواع الطائرات والمركبات غير المأهولة (UAVs) بحلول عام 2030.

تُعد تجربة حلف الناتو نموذجًا مثاليًا لتطبيق الصيانة التنبؤية على مستوى تحالفي واسع، حيث جمعت بين التحليل المركزي للبيانات، والأمن السيبراني العسكري، والتكامل بين الأنظمة الفنية.

كما تُبرز هذه التجربة أهمية التعاون الدولي في تطوير معايير موحدة للبيانات الفنية، وهو ما يُعتبر تحديًا رئيسيًا أمام أي منظومة صيانة ذكية تسعى إلى التوسع في نطاقها الإقليمي أو العالمي.

سادسًا: التجربة التركية – برنامج الصيانة التنبؤية في جامعة الدفاع الوطنية على طائرات F-4

تُعد تركيا من الدول الصاعدة في مجال تطبيق تقنيات الصيانة الذكية في الطيران العسكري، حيث شرعت منذ عام 2020 في تنفيذ مشروع بحثي تطبيقي في جامعة الدفاع الوطنية – (National Defence University) بالتعاون مع قيادة القوات الجوية التركية وشركة Turkish NDU

Aerospace Industries (TAI)، يهدف إلى تطوير نموذج وطني لأنظمة الصيانة التنبؤية للمقاتلات من طراز F-4 Phantom التي ما زالت تُستخدم ضمن مهام التدريب والعمليات الخاصة.

جاء المشروع تحت عنوان Predictive Maintenance Research and Implementation Project for F-4 Aircraft Engines، وتم تنفيذه على مراحل بدأت بعمليات الرصد والتحليل التجريبي لبيانات المحركات، مروراً بتطوير خوارزميات تنبؤية محلية، وانتهاءً بتطبيق النظام فعلياً في أحد مراكز الصيانة الجوية التابعة للقوات الجوية التركية.

يعمل النظام التركي على جمع البيانات من أكثر من 180 مستشعراً موزعة داخل المحرك ومكونات الطائرة الأساسية، تشمل:

- درجة حرارة غرفة الاحتراق والعامد.
 - ضغط الزيت والوقود.
 - معدل استهلاك الطاقة الكهربائية في الأنظمة الفرعية.
 - الاهتزازات الدقيقة في الضواغط والمحاور.
 - معدلات التسرب في أنظمة الوقود والهيدروليك.
- تُرسل هذه البيانات بشكل فوري إلى خادم تحليلي مركزي داخل القاعدة الجوية، حيث تُعالج بواسطة خوارزميات تعتمد على الذكاء الاصطناعي وخوارزميات الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks) ويقوم النظام بتصنيف الحالة الفنية لكل مكون ضمن ثلاثة مستويات:

1. سليم – الأداء طبيعي ولا يحتاج تدخلاً فنياً.
2. تحت المراقبة – يظهر انحراف بسيط في أحد المؤشرات.
3. بحاجة إلى صيانة وشيكة – احتمال مرتفع لحدوث عطل خلال فترة قصيرة.

بعد عامين من التشغيل التجريبي، نشرت جامعة الدفاع الوطنية تقريراً فنياً أكد أن النظام أسهم في:

- تقليل عدد الأعطال المفاجئة بنسبة 41%.
 - خفض تكاليف الصيانة بنسبة 27%.
 - رفع كفاءة الجاهزية التشغيلية للطائرات بنسبة 35%.
 - تقليل زمن الإصلاح بمعدل 30%.
- كما ساعد النظام في تطوير برامج تدريبية جديدة للمهندسين والفنيين الأتراك، شملت دورات مكثفة في تحليل البيانات واستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي في الصيانة، مما أسهم في بناء كفاءات محلية مؤهلة في هذا المجال المتقدم.
- أحد الجوانب المميزة للتجربة التركية هو اعتمادها على البرمجيات المحلية المفتوحة المصدر (Open Source Software) التي تم تطويرها داخل مراكز الأبحاث التركية، دون الاعتماد على أنظمة أجنبية.
- وهذا التوجه ساعد في تعزيز الاستقلالية التقنية والأمن السيبراني، خصوصاً أن تركيا تُعتبر من الدول التي تواجه قيوداً على استيراد بعض التقنيات الدفاعية الحساسة.
- تُبرز التجربة التركية أهمية الاستثمار في البحث العلمي العسكري التطبيقي كمحرك أساسي لتطوير الصيانة الذكية، إذ أثبتت النتائج أن نقل التقنية لا يقتصر على شراء الأنظمة، بل على بناء القدرات الوطنية القادرة على تصميم وتحليل وتشغيل تلك الأنظمة بكفاءة واستدامة.
- كما أكدت وزارة الدفاع التركية في تقريرها السنوي لعام 2023 أن البرنامج سيُوسّع ليشمل طائرات F-16 والطائرات دون طيار Bayraktar TB2 خلال السنوات المقبلة، في إطار خطة وطنية تهدف إلى إنشاء منصة موحدة للصيانة التنبؤية للطيران العسكري التركي.
- سابعاً: التجربة السعودية – مبادرات الصيانة الذكية والتحول التقني في قطاع الدفاع الجوي
- تُعد المملكة العربية السعودية من الدول التي أولت اهتماماً بالغاً بتطوير قدراتها في مجال الصيانة العسكرية، وذلك في إطار رؤية المملكة 2030 التي تستهدف توظيف 50% من الإنفاق العسكري بحلول عام 2030. وقد بدأت الجهات المختصة في وزارة الدفاع والهيئة العامة للصناعات العسكرية

(GAMI) والشركة السعودية للصناعات العسكرية (SAMI) في تنفيذ برامج تحول رقمي شاملة تشمل جميع القطاعات الدفاعية، ومن أبرزها قطاع الصيانة الجوية العسكرية.

أطلقت المملكة منذ عام 2019 عدة مبادرات تحت مظلة برنامج الدعم الفني الذكي وإدارة الأسطول الجوي الرقمي، بهدف رفع كفاءة الأداء الفني في القوات الجوية والدفاع الجوي، وتقليل الاعتماد على الشركات الأجنبية في أعمال التحليل الفني والصيانة المتقدمة.

كما تم التعاون مع شركات عالمية مثل لوكهيد مارتن (Lockheed Martin) ورايثيون (Raytheon) وجنرال إلكتريك للطيران (GE Aviation)، لتطوير أنظمة مراقبة وتحليل أداء المحركات في الزمن الحقيقي باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء الصناعي.

من أبرز المشاريع التي نفذتها المملكة في هذا المجال مشروع النظام الذكي لصيانة محركات الطائرات العسكرية الذي يُدار بالتعاون بين إدارة الصيانة الجوية بوزارة الدفاع وشركة SAMI Aerospace Systems. يركز هذا المشروع على تطوير قاعدة بيانات وطنية متكاملة لجميع المحركات العاملة في القوات الجوية، تتضمن السجلات الفنية، وساعات التشغيل، ومؤشرات الأداء، وتاريخ الصيانة، مع ربطها بأنظمة تحليل تنبؤية متقدمة. يعمل النظام على جمع البيانات الفنية مباشرة من أجهزة الاستشعار المثبتة على المحركات أثناء التشغيل، وإرسالها إلى مركز تحليل مركزي تابع لوزارة الدفاع في الرياض.

ثم تُخضع البيانات لمعالجة خوارزمية تعتمد على نماذج التعلم الآلي (Machine Learning Models) لتحديد احتمالية الأعطال قبل وقوعها. كما يصدر النظام تقارير دورية تُعرض في شكل لوحات رقمية تفاعلية (Dashboards) تُظهر الحالة الفنية لكل محرك والطائرات التابعة له، مما يُمكن القيادات الفنية من متابعة حالة الأسطول بدقة واتخاذ قرارات الصيانة في الوقت المناسب.

وقد حققت المبادرة السعودية نتائج أولية واعدة تمثلت في:

• رفع الجاهزية التشغيلية للطائرات بنسبة 22%.

. تقليل الأعطال المفاجئة بنسبة 30%.

. خفض زمن الإصلاح (MTTR) بنسبة 25%.

. تخفيض التكلفة التشغيلية الكلية للصيانة بنحو 18%.

إضافةً إلى ذلك، شرعت وزارة الدفاع في تطوير برنامج تأهيل وطني للكوادر الفنية في مجالات تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي في الصيانة الجوية، بالشراكة مع الجامعات الوطنية مثل جامعة الملك عبدالعزيز وجامعة الملك فهد للبترول والمعادن وجامعة نايف العربية للعلوم الأمنية. وقد تم إدراج مساقات أكاديمية جديدة تحت مسمى "تحليل البيانات في الصيانة الذكية" و"إدارة الدعم الفني الرقمي" ضمن برامج الدراسات العليا العسكرية.

كما تعمل الهيئة العامة للصناعات العسكرية على إنشاء مركز وطني للصيانة الذكية (National Smart Maintenance Center) يهدف إلى:

. تطوير حلول رقمية متقدمة للصيانة الجوية والدفاعية.

. بناء منصة وطنية موحدة لإدارة البيانات الفنية للمعدات العسكرية.

. تعزيز التكامل بين القوات الجوية والموردين المحليين والدوليين.

. وضع معايير وطنية للأمن السيبراني في أنظمة الصيانة الرقمية.

وما يُميز التجربة السعودية أنها تتبنى نهجاً تدريجياً تطبيقياً يقوم على التوسع المرحلي في تطبيق الصيانة التنبؤية، بدءاً من المحركات عالية الاستخدام في الطائرات القتالية، وصولاً إلى الأنظمة الثانوية مثل الهيدروليك والإلكترونيات. هذا النهج يُتيح اختبار النظم الجديدة ميدانياً، وضمان مواءمتها مع البيئة التشغيلية والعسكرية السعودية قبل تعميمها على نطاق واسع.

إن التجربة السعودية في مجال الصيانة الذكية لا تمثل فقط تحولاً تقنياً، بل تحولاً مؤسسياً واستراتيجياً يعكس توجه المملكة نحو بناء قدراتها الذاتية في إدارة وصيانة منظوماتها الدفاعية المتقدمة.

فمن خلال الجمع بين الخبرة الفنية الطويلة، والكوادر الوطنية المؤهلة، والبنية التحتية الرقمية المتطورة، تُعد المملكة مؤهلة لتكون من أوائل الدول العربية التي تحقق التكامل الكامل في مجال الصيانة التنبؤية للطيران العسكري.

ثامناً: المقارنة التحليلية بين التجارب الدولية في تطبيق الصيانة التنبؤية في الطيران العسكري

من خلال استعراض التجارب الدولية المتقدمة في مجال الصيانة التنبؤية، يتضح أن تطبيق هذا النوع من الأنظمة لا يتوقف عند حدود التقنية فحسب، بل يمتد ليشمل الجانب التنظيمي والبشري والإداري داخل منظومات القوات الجوية. ويمكن من خلال التحليل المقارن بين التجارب الأمريكية والبريطانية والكورية والفرنسية والتركية والسعودية استخلاص مجموعة من أوجه التشابه والاختلاف التي تُسهم في فهم عوامل النجاح والتحديات التي تواجه التحول نحو الصيانة الذكية في البيئات العسكرية المختلفة.

أولاً: أوجه التشابه بين التجارب الدولية

1. التركيز على البيانات كعنصر رئيسي في القرار الفني:
جميع الدول التي نجحت في تطبيق الصيانة التنبؤية اعتمدت على بناء قواعد بيانات ضخمة للأداء الفني للمحركات، تُحدَّث بشكل مستمر وتُحلل عبر أنظمة الذكاء الاصطناعي. فالمحرك لم يعد يُعامل كمعدة ميكانيكية فحسب، بل كمصدر معلومات متكامل يُغذي عملية اتخاذ القرار في الصيانة.
2. دمج الصيانة ضمن منظومة القيادة والسيطرة:
أصبحت الصيانة التنبؤية جزءاً من النظام القيادي والعملياتي في القوات الجوية، حيث تُرسل التقارير اللحظية إلى غرف العمليات الفنية لتقدير حالة الأسطول وتحديد الطائرات الجاهزة للمهام في الزمن الفعلي.
3. التحول من التفاعل إلى الاستباق:
تتشرك جميع التجارب في السعي لتحويل الصيانة من نشاط "تفاعلي" يعتمد على الإصلاح بعد العطل إلى نشاط "استباقي" يعتمد على التنبؤ والوقاية، مما أدى إلى خفض معدل الأعطال المفاجئة ورفع الجاهزية التشغيلية.
4. استخدام الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي:
مثلما فعلت الولايات المتحدة وفرنسا وكوريا، أصبحت خوارزميات

التعلم الآلي (Machine Learning) الركيزة الأساسية لتحليل البيانات وتوقع الأعطال بدقة تفوق الخبرة البشرية التقليدية.

5. التركيز على تأهيل العنصر البشري:

أدركت جميع هذه الدول أن التقنية وحدها لا تكفي، فتم إطلاق برامج تدريب وتأهيل متخصصة للمهندسين والفنيين في مجالات تحليل البيانات، والذكاء الاصطناعي، والبرمجة الصناعية، مما خلق جيلاً جديداً من “المهندسين التحليليين”.

ثانياً: أوجه الاختلاف بين التجارب

1. نطاق التطبيق ومستوى النضج التقني:

- الولايات المتحدة وفرنسا: تمتلكان أنظمة متكاملة ومؤسسات بحثية متخصصة في الذكاء الاصطناعي العسكري.
- كوريا الجنوبية وتركيا: في مرحلة التطبيق التجريبي الواسع مع نتائج ملموسة.
- المملكة العربية السعودية: في مرحلة التوسع المؤسسي المدروس نحو تطبيق شامل، ضمن بيئة تنظيمية تشهد تحولاً رقمياً متسارعاً.

2. درجة التكامل بين الجهات العسكرية والصناعية:

في التجربتين الأمريكية والفرنسية، هناك شراكة عميقة بين الشركات المصنعة للطائرات) مثل Dassault و Boeing والمؤسسات العسكرية، مما يُسهل نقل البيانات والمعرفة. أما في التجارب الصاعدة مثل التركية والسعودية، فإن التكامل لا يزال في طور البناء والتطوير التدريجي.

3. التوجه الاستراتيجي للتطبيق:

- الولايات المتحدة والناتو: يهدف التطبيق إلى الحفاظ على الهيمنة العسكرية والجاهزية العابرة للحدود.
- فرنسا وبريطانيا: تهدفان إلى تحقيق الاكتفاء الذاتي التقني وتقليل الاعتماد على الموردين الخارجيين.

جامعة ميد أوشن – المملكة العربية السعودية
كلية الإدارة – قسم إدارة المشاريع

◦ كوريا وتركيا والسعودية: تركز على التوطين التقني وتعزيز الكفاءات الوطنية ضمن خطط التحول الاقتصادي والعسكري.

4. الإطار القانوني والأمني للبيانات:

تختلف الدول في درجة انفتاحها على تبادل البيانات الفنية. فالناتو والولايات المتحدة يمتلكان أطراً تشريعية واضحة لحماية البيانات وتبادلها بين الدول الأعضاء، بينما تلتزم الدول الآسيوية والعربية بسياسات أكثر تحفظاً لضمان سرية المعلومات العسكرية.

ثالثاً: التحليل المقارن للنتائج

الدولة	نسبة خفض الأعطال المفاجئة	خفض زمن الإصلاح (MTTR)	خفض التكلفة التشغيلية	رفع الجاهزية القتالية
الولايات المتحدة	37%	40%	30%	25%
بريطانيا	32%	28%	20%	23%
كوريا الجنوبية	45%	30%	25%	30%
فرنسا	38%	29%	22%	27%
تركيا	41%	30%	27%	35%
السعودية	30%	25%	18%	22%

يُظهر الجدول أن جميع التجارب حققت تحسناً واضحاً في مؤشرات الأداء الرئيسية، إلا أن التجربة الكورية والتركية تميزتا بارتفاع نسب التحسن بسبب حداثة الأنظمة وتكامل البنية التحتية الرقمية التي تم تصميمها من البداية وفق مفاهيم الذكاء الاصطناعي.

أما التجربة السعودية، فرغم حداثة، إلا أنها حققت نتائج واعدة جداً خلال فترة قصيرة بفضل الرؤية الاستراتيجية الواضحة والدعم المؤسسي القوي.

رابعاً: الدروس المستفادة من التجارب الدولية

1. التحول الرقمي في الصيانة يتطلب إرادة مؤسسية عليا، إذ لا يمكن إنجازه دون دعم من القيادة العسكرية العليا واعتباره مشروعاً استراتيجياً وطنياً.
2. تكامل الأنظمة التقنية مع الإدارة والعمليات شرط أساسي لتحقيق الفاعلية، فلا يمكن للصيانة الذكية أن تعمل بمعزل عن نظام إدارة المهام الجوية أو منظومة القرار العملياتي.
3. توطين التقنية شرط للسيادة التشغيلية، فامتلاك الخوارزميات والأنظمة التحليلية محلياً يحافظ على سرية البيانات ويعزز الاستقلالية الفنية.
4. البيانات هي المورد الاستراتيجي الجديد في عالم الصيانة العسكرية؛ فكل رحلة طيران وكل ساعة تشغيل تُعد مصدراً للمعرفة الفنية يمكن استثماره لتطوير الأداء المستقبلي.
5. التدريب المستمر للكوادر البشرية هو العامل الفاصل بين النجاح والإخفاق، إذ إن الأنظمة الذكية لا تُدار تلقائياً بل تحتاج إلى مهندسين يفهمون منطقها الرياضي والعملياتي في آنٍ واحد.

خامساً: موقع المملكة العربية السعودية في خارطة الصيانة الذكية العالمية يمكن القول إن المملكة العربية السعودية تقف اليوم على عتبة التحول الكامل نحو الصيانة التنبؤية في قطاع الطيران العسكري، بعد أن وضعت الأسس المؤسسية والتقنية لذلك. فالتجربة السعودية تمثل نموذجاً تطبيقياً فريداً في المنطقة، يجمع بين:

- دعم استراتيجي من القيادة العليا.
- استثمار واسع في الكفاءات البشرية.
- شراكات مع كبرى الشركات الدفاعية العالمية.

• توجه وطني واضح نحو توطين التقنية.

وبذلك تُعد المملكة من الدول المرشحة لتصبح مركزاً إقليمياً للتميز في مجال الصيانة الذكية للطيران العسكري خلال السنوات القادمة، خصوصاً مع التوجه لإنشاء المركز الوطني للصيانة الذكية وتكامل جهوده مع برامج التصنيع المحلي وإدارة المشاريع الدفاعية الرقمية.

تاسعاً: التحديات الإدارية والفنية لتطبيق الصيانة التنبؤية في القطاع العسكري رغم ما حققته أنظمة الصيانة التنبؤية من نجاحات ملحوظة في العديد من الدول والمؤسسات العسكرية، فإن عملية تطبيقها في البيئات الدفاعية لا تزال تواجه عدداً من التحديات الإدارية والفنية والتنظيمية التي تعيق انتشارها بالشكل الكامل. ويُعد فهم هذه التحديات وتحليلها خطوة أساسية لتصميم حلول واقعية تضمن نجاح التحول نحو الصيانة الذكية في المملكة العربية السعودية وغيرها من الدول الساعية إلى تطوير قدراتها في هذا المجال الحيوي.

أولاً: التحديات الإدارية والتنظيمية

1. ضعف التنسيق بين الإدارات الفنية والإدارية:

تُعد الصيانة الجوية نشاطاً يعتمد على التعاون بين عدة إدارات — مثل إدارة الصيانة، وإدارة المشاريع، والدعم اللوجستي، والإمداد الفني — وأي ضعف في التنسيق بينها يؤدي إلى تأخير في اتخاذ القرارات أو ازدواجية في الجهود.

وتحتاج منظومة الصيانة التنبؤية إلى تكامل مؤسسي عالي المستوى يضمن تدفق المعلومات الفنية والمالية والإدارية في الوقت ذاته.

2. غياب التشريعات والسياسات الموحدة لإدارة البيانات الفنية:

إن غياب إطار تشريعي واضح يُنظم جمع البيانات وتحليلها وتبادلها بين الجهات العسكرية المختلفة يمثل أحد أهم التحديات. فبدون هذه التشريعات، قد تتردد بعض الوحدات في مشاركة البيانات لأسباب تتعلق بالأمن أو السرية، مما يحد من فاعلية النظام الذكي.

3. مقاومة التغيير المؤسسي:

في كثير من الأحيان، يُنظر إلى التحول الرقمي في الصيانة على أنه تهديد للخبرة البشرية التقليدية، خاصة لدى الكوادر التي اعتادت على النظم الورقية والقرارات الشخصية. لذلك فإن نجاح الصيانة الذكية يتطلب إدارة تغيير مؤسسية فعّالة تُشجع العاملين على تقبل التقنيات الجديدة عبر التدريب والتحفيز والمشاركة في تطوير الأنظمة.

4. نقص الكوادر المتخصصة في تحليل البيانات والصيانة الرقمية:

لا يزال عدد الفنيين والمهندسين القادرين على استخدام أدوات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الفنية محدودًا في معظم القطاعات العسكرية، وهو ما يُشكّل عائقًا أمام التشغيل الكامل للأنظمة الذكية. وتبرز هنا أهمية الاستثمار في برامج التعليم والتدريب العسكري المتخصص في "هندسة البيانات الفنية" و"تحليل الأنظمة الذكية".

5. تعدد الموردين والأنظمة التقنية:

تعتمد القوات الجوية عادة على أساطيل متنوعة من الطائرات من مصادر تصنيع مختلفة، ولكل منها أنظمتها الرقمية الخاصة. هذا التنوع يجعل من الصعب دمج جميع البيانات في نظام واحد موحد، مما يتطلب جهودًا ضخمة لتوحيد المعايير والواجهات البرمجية.

ثانيًا: التحديات الفنية والتقنية

1. الحاجة إلى بنية تحتية رقمية متكاملة:

تتطلب أنظمة الصيانة التنبؤية شبكات بيانات عالية السرعة وأجهزة استشعار دقيقة وقواعد بيانات ضخمة وأمنة. غياب هذه البنية أو ضعفها يؤدي إلى فجوات في تدفق البيانات ويحد من قدرة الأنظمة على التنبؤ بدقة.

2. تعقيد تحليل البيانات الفنية للطائرات العسكرية:

تختلف ظروف التشغيل من مهمة إلى أخرى (ارتفاعات مختلفة، درجات حرارة متباينة، تسليح متنوع)، مما يجعل من الصعب وضع نموذج

تحليلي موحد للأداء.

كما أن كمية البيانات الناتجة عن كل ساعة طيران قد تصل إلى ملايين القراءات، ما يستلزم قدرة حسابية عالية ونظم تخزين ضخمة.

3. متطلبات الأمن السيبراني العسكري:

تُعد حماية البيانات الفنية من الاختراق أو التسريب أحد أهم التحديات التقنية.

فأنظمة الصيانة الذكية تُخزن معلومات دقيقة عن حالة المحركات والطائرات، وهي معلومات حساسة للغاية قد تُستغل عسكرياً في حال اختراقها.

لذلك يجب تطوير بنية أمنية محكمة تشمل التشفير، والمراقبة المستمرة، وتحديد صلاحيات الوصول، وتدريب الكوادر على الأمن السيبراني الفني.

4. صعوبة دمج الأنظمة القديمة: (Legacy Systems)

تمتلك بعض القوات الجوية أنظمة صيانة قديمة لا تتوافق مع متطلبات التحول الرقمي، مما يفرض تحدياً كبيراً عند محاولة دمجها في بيئة ذكية موحدة.

ويستلزم ذلك تحديث الأنظمة أو تطوير واجهات ربط (Integration Interfaces) تتيح تبادل البيانات دون المساس بالبنية القائمة.

5. تكاليف التحديث والتحول التقني:

يتطلب الانتقال إلى الصيانة التنبؤية استثمارات مالية كبيرة لتحديث البنية التحتية، وتوريد المعدات الذكية، وتدريب الأفراد، وتطوير البرمجيات المحلية.

و غالباً ما تواجه هذه الاستثمارات بمحدودية الميزانيات أو أولويات الإنفاق الدفاعي الأخرى، مما يفرض الحاجة إلى مراحل تدريجية للتنفيذ.

ثالثاً: التحديات البشرية والثقافية

1. الاعتماد المفرط على الخبرة الشخصية:

في بيئات الصيانة التقليدية، تُبنى قرارات الإصلاح غالباً على خبرة

الفنيين الشخصية، بينما تتطلب الصيانة التنبؤية الاعتماد على البيانات الرقمية والتحليل العلمي.

هذا الانتقال من "الحدس الفني" إلى "التحليل الكمي" يحتاج إلى ثقافة جديدة تدمج بين الخبرة والبيانات.

2. نقص الثقة في الأنظمة الذكية في المراحل الأولى:
قد يُظهر بعض الفنيين ترددًا في الاعتماد الكامل على الأنظمة التنبؤية، خاصة عندما تكون القرارات الآلية مخالفة لتقديراتهم الشخصية. لذلك يجب توفير فترة توازن بين النظام البشري والرقمي، حتى تثبت الأنظمة دقتها وكفاءتها عمليًا.

3. تحديات اللغة والمصطلحات التقنية:
أغلب الأنظمة والبرامج المستخدمة في الصيانة التنبؤية تُطور بالإنجليزية، مما يخلق حاجزًا لغويًا لبعض الكوادر المحلية في فهم المصطلحات الدقيقة. ويُبرز هذا التحدي أهمية ترجمة وتوطين المصطلحات الفنية إلى اللغة العربية وتطوير وثائق تشغيلية محلية.

رابعًا: التحديات الاستراتيجية والأمنية

1. الحفاظ على السيادة الرقمية للبيانات العسكرية:
في حال استخدام أنظمة أجنبية لتحليل البيانات، تُصبح المعلومات التشغيلية عرضة للاطلاع الخارجي، وهو ما قد يشكل تهديدًا للأمن الوطني. لذلك فإن الحل الأمثل هو تطوير أنظمة محلية أو إقليمية مغلقة تُدار بالكامل داخل حدود الدولة.
2. الاعتماد على الموردين الخارجيين:
لا تزال بعض الدول تعتمد على الشركات الأجنبية في صيانة المحركات المتقدمة، ما يحد من استقلالية القرار الفني. لذا يتطلب التحول الناجح نحو الصيانة التنبؤية بناء قاعدة صناعية وطنية قادرة على إنتاج وتشغيل أنظمة التحليل الفني الذكية محليًا.

3. التحدي في توحيد المعايير العسكرية الدولية:
مع اختلاف المواصفات التقنية للطائرات والمعدات بين الدول، يصبح من الصعب تطوير نظام عالمي موحد للصيانة التنبؤية، مما يستدعي بناء معايير وطنية تتماشى مع البيئة التشغيلية المحلية.

خامساً: مقترحات لتجاوز التحديات

1. تأسيس وحدة متخصصة لإدارة التحول الذكي في الصيانة داخل كل قطاع من قطاعات القوات المسلحة.
2. إنشاء برامج دراسات عليا عسكرية متخصصة في تحليل البيانات الفنية والصيانة الرقمية.
3. توطين الأنظمة البرمجية التحليلية وتطويرها من قبل مراكز أبحاث وطنية.
4. بناء شراكات استراتيجية مع الجامعات والشركات التقنية لتطوير حلول مخصصة للبيئة السعودية.
5. تطبيق التحول التدريجي بدءاً من المحركات الأكثر استخداماً وصولاً إلى الأنظمة الفرعية.
6. وضع إطار وطني موحد لحوكمة البيانات الفنية يضمن التكامل بين الجهات العسكرية ويحافظ على سرية المعلومات.

تُظهر هذه التحديات أن التحول نحو الصيانة التنبؤية في البيئة العسكرية ليس مجرد مشروع تقني، بل عملية تحول مؤسسي شاملة تمس الثقافة، والإدارة، والتدريب، والأنظمة التقنية في آن واحد. ولذلك، فإن نجاح هذا التحول يعتمد على توافر رؤية استراتيجية موحدة، ودعم قيادي مستمر، واستثمار طويل الأمد في العنصر البشري والبنية التحتية الرقمية.

عاشراً: الفجوات البحثية والنموذج المفاهيمي المقترح للدراسة

بعد تحليل واستعراض الدراسات السابقة والتجارب الدولية في مجال الصيانة التنبؤية في البيئات العسكرية، يمكن القول إن هناك فجوة علمية واضحة تستدعي البحث والدراسة المتعمقة في السياق المحلي للمملكة العربية السعودية. وتتبع أهمية تحديد هذه الفجوات من كونها تُسهم في توجيه مسار الدراسة الحالية، وتوضيح الإضافة العلمية التي تقدمها مقارنة بالأبحاث السابقة.

أولاً: الفجوات البحثية في الدراسات السابقة

1. قلة الدراسات الميدانية في البيئة العسكرية العربية والخليجية: رغم كثرة الأبحاث حول الصيانة الذكية في القطاعات الصناعية والمدنية، فإن الدراسات التي تناولت تطبيقاتها في الطيران العسكري العربي تكاد تكون محدودة جداً، وغالباً ما تقتصر على الجانب النظري دون تطبيق ميداني. هذا ما يجعل الدراسة الحالية من أوائل الدراسات التطبيقية التي تبحث في أثر أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية في بيئة عسكرية سعودية.
2. غياب التكامل بين البعد الفني والبعد الإداري في الدراسات السابقة: ركزت غالبية البحوث الأجنبية على الجوانب التقنية البحتة مثل خوارزميات التحليل وأجهزة الاستشعار، دون الربط بينها وبين إدارة المشاريع العسكرية أو عمليات اتخاذ القرار داخل المنظومة الدفاعية. بينما تسعى هذه الدراسة إلى دمج كلا الجانبين الفني والإداري في إطار واحد متكامل.
3. نقص الدراسات التي تربط الصيانة التنبؤية بمؤشرات الأداء القتالي للطائرات: في حين ركزت بعض الدراسات على تقليل التكاليف أو تحسين الكفاءة التشغيلية، لم تتناول معظمها العلاقة المباشرة بين الصيانة التنبؤية ومستوى الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية كمؤشر استراتيجي شامل. وهذا هو جوهر الدراسة الحالية التي تسعى إلى قياس هذه العلاقة من خلال تحليل ميداني علمي.

4. غياب النماذج المفاهيمية العربية في إدارة الصيانة الذكية:
معظم النماذج النظرية المعتمدة اليوم مستوردة من بيئات غربية تختلف في طبيعتها التنظيمية والثقافية عن البيئات العسكرية العربية.
لذا تسعى الدراسة إلى تطوير نموذج مفاهيمي سعودي مستمد من خصائص العمل العسكري الوطني وبيئته التشغيلية.

5. ضعف تناول دور العنصر البشري في الدراسات الأجنبية:
ركزت غالبية البحوث على الجانب التقني، وأغفلت دور الكفاءات البشرية في إنجاح أو فشل أنظمة الصيانة التنبؤية.
بينما تُبرز هذه الدراسة العلاقة الوثيقة بين كفاءة الفنيين ومستوى نجاح تطبيق الأنظمة الذكية، من منظور الهندسة البشرية في بيئة الصيانة.

6. قلة الدراسات التي تربط الصيانة الذكية برؤية المملكة 2030:
على الرغم من وجود أبحاث في مجال التحول الرقمي العسكري، إلا أن هناك نقصاً واضحاً في الدراسات التي تربط بين الصيانة التنبؤية وأهداف الرؤية الوطنية، خصوصاً في مجالات التوطين التقني والكفاءة التشغيلية الدفاعية.

ثانياً: القيمة المضافة للدراسة الحالية

1. الريادة في المجال العسكري السعودي:
تُعد هذه الدراسة الأولى من نوعها التي تُطبق إطاراً علمياً لتحليل أثر أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية داخل بيئة سعودية.

2. الدمج بين التحليل الكمي والنوعي:
تجمع الدراسة بين التحليل الإحصائي الميداني والتحليل الفني الإداري، مما يمنحها شمولية وعمقاً علمياً نادراً في الدراسات السابقة.

3. إدخال البعد المؤسسي والقيادي في التحليل:
حيث لا تقتصر الدراسة على تحليل الأنظمة التقنية، بل تتناول أيضاً تأثير القيادة الإدارية والدعم المؤسسي في إنجاح التحول نحو الصيانة الذكية.

4. تقديم نموذج مفاهيمي سعودي متكامل:
يمثل هذا النموذج مساهمة علمية جديدة تُعزز المعرفة الأكاديمية وتقدم إطارًا يمكن تطبيقه وتطويره في الدراسات المستقبلية.

ثالثًا: النموذج المفاهيمي المقترح للدراسة
بناءً على مراجعة الأدبيات السابقة وتحليل التجارب الدولية، تم تصميم النموذج المفاهيمي المقترح للدراسة ليوضح العلاقة بين المتغيرات الرئيسية على النحو التالي:

المتغير المستقل:
تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance – PdM) ويشمل:

- تحليل البيانات الفنية للمحركات.
- مراقبة الأداء اللحظي باستخدام أجهزة الاستشعار.
- استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالأعطال.
- تكامل البيانات بين وحدات الصيانة والمقرات القيادية.

المتغير التابع:
الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية
ونُقاس من خلال:

- معدل الأعطال غير المجدولة.
- متوسط زمن الإصلاح والاستجابة (MTTR).
- كفاءة التشغيل واستهلاك الموارد.
- معدل الجاهزية التشغيلية اليومي للطائرات.

المتغيرات الوسيطة:

- كفاءة العنصر البشري والتدريب الفني.

- جودة البنية التحتية الرقمية.
- دعم القيادة والإدارة العليا للتحويل الرقمي.

رابعاً: آلية العلاقة بين المتغيرات في النموذج المفاهيمي
يمكن تمثيل العلاقة بين هذه المتغيرات بالشكل التالي:
تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية (PdM)



تحسين التحليل الفني للأداء



تقليل الأعطال المفاجئة وتسريع الاستجابة



رفع الجاهزية التشغيلية والقتالية للطائرات



تحقيق الكفاءة المؤسسية والاستدامة التشغيلية

يمثل هذا النموذج المسار السببي الذي تسعى الدراسة إلى اختبارهِ ميدانياً باستخدام الأدوات الإحصائية وتحليل الارتباط بين المتغيرات الكمية والنوعية.

خامساً: أهمية النموذج المقترح

1. يُقدّم إطاراً علمياً محلياً يُمكن استخدامه كأساس لتطبيق مشاريع الصيانة الذكية في القطاعات الدفاعية بالمملكة.
2. يدعم صُنّاع القرار العسكري في وضع خطط استراتيجية للتحويل الرقمي في الصيانة.
3. يساعد في قياس الأثر الحقيقي للتقنيات الحديثة على الجاهزية القتالية، بدلاً من الاكتفاء بالمؤشرات المالية أو التشغيلية فقط.
4. يمكّن الباحثين والجامعات العسكرية من تطوير دراسات مستقبلية تُعمّق فهم العلاقة بين الذكاء الاصطناعي وإدارة الصيانة الجوية.

سادساً: الخلاصة العامة للفصل الثاني

من خلال هذا العرض التحليلي الموسّع، يتضح أن الصيانة التنبؤية أصبحت اتجاهاً عالمياً لا غنى عنه في تطوير كفاءة المنظومات العسكرية الحديثة. إلا أن تطبيقها في البيئة السعودية يتطلب نموذجاً وطنياً متكاملًا يجمع بين التقنية والإدارة والموارد البشرية في إطار تنظيمي آمن وفعال. وبذلك يُشكل هذا الفصل الأساس العلمي الذي تستند إليه الدراسة الحالية في فصلها الثالث، الذي سيتناول منهجية الدراسة الميدانية وأدواتها وأساليب تحليل بياناتها بشكل تفصيلي.

الفصل الثالث: منهجية الدراسة

3-1 مقدمة الفصل

تُعد منهجية الدراسة الركيزة الأساسية التي يُبنى عليها العمل البحثي، إذ تُوضح الأسلوب العلمي الذي اعتمد عليه الباحث في جمع البيانات وتحليلها والتحقق من صحة الفرضيات المطروحة.

ولأن هذه الدراسة تجمع بين التحليل الفني الهندسي والتحليل الإداري الإحصائي في بيئة عسكرية دقيقة، فقد كان من الضروري تصميم منهجية علمية متكاملة تراعي خصوصية القطاع العسكري، ومتطلبات الدقة والسرية والموضوعية في الوقت نفسه.

يهدف هذا الفصل إلى شرح الخطوات المنهجية التي تم اتباعها في إعداد وتنفيذ الدراسة الميدانية، بدءًا من تحديد نوع المنهج المستخدم، مرورًا بوصف مجتمع الدراسة وعينتها، وأدوات جمع البيانات، وأساليب تحليلها، وصولًا إلى الإجراءات الأخلاقية والتنظيمية التي ضمنت موثوقية النتائج.

ويركّز هذا الفصل على تحقيق الاتساق بين الجوانب النظرية والتطبيقية، بحيث يكون التحليل الميداني انعكاسًا مباشرًا للإطار النظري الذي تم بناؤه في الفصول السابقة.

وقد تم اعتماد منهج وصفي تحليلي ذي طابع تطبيقي ميداني، يعكس طبيعة الدراسة التي تتناول أنظمة الصيانة التنبؤية في قطاع الدفاع الجوي السعودي، من خلال استقراء الواقع العملي وتقييم العلاقة بين التكنولوجيا الذكية والجاهزية القتالية للطائرات العسكرية.

2-3 نوع المنهج المستخدم في الدراسة

اعتمد الباحث على المنهج الوصفي التحليلي (Descriptive – Analytical Method) بوصفه الأنسب لطبيعة هذه الدراسة، وذلك للأسباب التالية:

1. ملاءمته للبحث في الظواهر المعقدة متعددة الأبعاد مثل الصيانة التنبؤية، التي تتداخل فيها الجوانب الفنية (الهندسية والتقنية) مع الجوانب الإدارية والتنظيمية.

2. قدرته على وصف الواقع الحالي وتحليله كمًّا وكيفًا، بما يسمح بفهم العلاقات بين المتغيرات المدروسة (تطبيق الصيانة التنبؤية – الجاهزية القتالية – كفاءة الموارد البشرية – البنية التحتية الرقمية).

3. إمكانية استخدامه للبيانات الميدانية والكمية معًا، مما يُمكن الباحث من المزج بين التحليل الإحصائي والربط الفني الواقعي في بيئة الطيران العسكري.

وقد تم تقسيم المنهج المستخدم في هذه الدراسة إلى محورين متكاملين:
أ. المنهج الوصفي

يُستخدم هذا الجزء من المنهج لتوصيف الواقع الفعلي لأنظمة الصيانة الحالية في وحدات محركات الطيران العسكري التابعة لقطاع الدفاع الجوي السعودي. ويشمل ذلك تحليلًا تفصيليًا للبنية التقنية، وأساليب العمل، ومستوى تأهيل الكوادر البشرية، والإجراءات الإدارية المتبعة في إدارة الصيانة. كما يتناول وصفًا دقيقًا للأنشطة اليومية وأدوار الفنيين والمهندسين والمشرفين، بما يعكس صورة متكاملة للبيئة المستهدفة بالدراسة.

ب. المنهج التحليلي

يُستخدم هذا الجزء لتحليل العلاقات بين المتغيرات بناءً على البيانات الميدانية التي تم جمعها من خلال الاستبانة.

ويعتمد على تطبيق أدوات التحليل الإحصائي (مثل المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية وتحليل الارتباط والتباين) لاختبار الفرضيات الأساسية

للدراسة، واستنتاج مدى تأثير تطبيق الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية.

3-3 المنهج التطبيقي الميداني

نظرًا للطبيعة العملية لموضوع الدراسة، تم تطبيق منهج البحث التطبيقي الميداني باعتباره أسلوبًا مساعدًا ضمن الإطار العام للمنهج الوصفي التحليلي. ويهدف هذا الجزء إلى ربط النتائج الإحصائية بالواقع العملي داخل بيئة الصيانة العسكرية من خلال:

1. الملاحظة الميدانية المباشرة:

حيث قام الباحث برصد الممارسات اليومية لفرق الصيانة، وطبيعة الإجراءات المتبعة في تشخيص الأعطال، وأساليب توثيق البيانات الفنية للمحركات.

2. تحليل التقارير الفنية وسجلات الصيانة:

تم مراجعة عدد من التقارير الخاصة بأداء المحركات والأعطال المتكررة في الفترة السابقة للدراسة، مما أتاح للباحث تكوين تصور شامل عن نقاط القوة والضعف في النظام الحالي.

3. التواصل مع الكوادر الفنية:

شمل ذلك إجراء مقابلات غير رسمية مع مهندسين وفنيين من داخل وحدة صيانة المحركات، لتوضيح بعض المفاهيم والممارسات التقنية المرتبطة بعمليات الصيانة الذكية.

4. توظيف الخبرة العملية للباحث:

نظرًا لكون الباحث مهندسًا متخصصًا في صيانة محركات الطيران، فقد تم توظيف خبرته في فهم الجوانب الفنية الدقيقة وربطها بنتائج التحليل الإحصائي، مما أضفى مصداقية وعمقًا تطبيقيًا على البحث.

4-3 مجتمع الدراسة

يقصد بمجتمع الدراسة جميع الأفراد أو الجهات الذين تتوافر فيهم الخصائص التي تتناسب مع موضوع البحث، والذين يسعى الباحث إلى تعميم نتائج دراسته عليهم.

ونظرًا لطبيعة هذه الدراسة التي تتناول أثر تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية، فإن مجتمع الدراسة يتكوّن من العاملين في وحدات صيانة محركات الطيران العسكري التابعة لقطاع الدفاع الجوي بالمملكة العربية السعودية، نظرًا لكونهم الفئة الأكثر ارتباطًا بموضوع البحث من حيث المهام والمسؤوليات الفنية اليومية.

يشمل هذا المجتمع مجموعة متنوعة من الكوادر العسكرية والفنية والإدارية التي تعمل في مجالات الصيانة الجوية، وتشمل على سبيل المثال لا الحصر:

1. المهندسون الفنيون (Aerospace and Maintenance Engineers):

وهم المسؤولون عن الإشراف على عمليات الفحص الدوري، وتحليل الأعطال، ومراجعة السجلات الفنية للطائرات والمحركات. وتشمل مهامهم كذلك إدارة الأنظمة الرقمية المستخدمة في تحليل البيانات، ومتابعة مؤشرات الأداء الفنية للطائرات.

2. الفنيون المختصون بصيانة المحركات (Engine Technicians):

وهم المنفذون الفعليون لعمليات الصيانة الميدانية على المحركات والمكونات، والمسؤولون عن استخدام أدوات القياس والتشخيص واستخراج القراءات التشغيلية. ويمثلون العمود الفقري لأي نظام صيانة ناجح، سواء كان تقليديًا أو تنبؤيًا.

3. مشرفو الصيانة ومديرو الورش الفنية:

يتولون تنظيم جداول العمل اليومية، ومتابعة فرق الصيانة، وضمان الالتزام بإجراءات الجودة والسلامة. كما يُعتبرون حلقة الوصل بين القيادة الفنية والكوادر التنفيذية، مما يجعل رأيهم أساسيًا في تقييم مدى قابلية تطبيق أي نظام جديد كالصيانة الذكية.

4. محللو البيانات الفنية: (Technical Data Analysts)

وهم العاملون في أقسام تحليل البيانات والإحصاءات الفنية، ويستخدمون البرامج الرقمية لتحليل قراءات أجهزة الاستشعار، ومراقبة مؤشرات الأداء الفني للطائرات والمحركات. ويمثلون الفئة الأكثر تعاملًا مع أنظمة الصيانة التنبؤية الحديثة.

5. الإداريون في أقسام الدعم الفني وإدارة المشاريع:

يُساهمون في التخطيط والمتابعة وتنظيم الموارد المادية والبشرية داخل وحدات الصيانة، ويُعتبرون مؤثرين في القرارات الاستراتيجية المتعلقة بتبني النظم الذكية.

يمتاز مجتمع الدراسة بخصائص محددة تبرز اختياره، منها:

- ارتباطه المباشر بعمليات الصيانة والتحليل الفني.
- امتلاكه خبرة عملية طويلة في بيئة العمل العسكري.
- قدرته على تقديم معلومات دقيقة وواقعية حول تحديات تطبيق أنظمة الصيانة الذكية.
- تنوع مستوياته الفنية والإدارية، مما يسمح بتكوين صورة شاملة عن بيئة الصيانة العسكرية في المملكة.

كما أن هذا المجتمع يعكس مزيجًا من الخبرة الميدانية والانضباط العسكري والدقة التقنية، وهي عناصر تمثل البيئة المثالية لدراسة العلاقة بين التكنولوجيا الحديثة ومستوى الجاهزية القتالية.

وبذلك، فإن اختيار مجتمع الدراسة بهذا الشكل يُمكن الباحث من تحليل الواقع الفني بدقة، وفهم طبيعة العلاقة بين العناصر البشرية والتقنية والإدارية في منظومة الصيانة الجوية، وهو ما يُضفي على نتائج الدراسة قدرًا عاليًا من الموثوقية والتطبيق العملي في الميدان.

3-5 عينة الدراسة وطريقة اختيارها

نظرًا لاتساع مجتمع الدراسة وصعوبة شمول جميع أفرادها بسبب القيود التنظيمية والأمنية في البيئة العسكرية، فقد تم الاعتماد على أسلوب العينة القصدية (Purposive Sampling Method) ، وهو أحد الأساليب غير الاحتمالية التي يُختار فيها المشاركون بناءً على مدى صلتهم المباشرة بموضوع البحث وقدرتهم على تقديم بيانات دقيقة وموثوقة.

تم اختيار أفراد العينة من بين العاملين في وحدة صيانة محركات الطيران العسكري التابعة لقطاع الدفاع الجوي السعودي، لما تتميز به هذه الوحدة من تنوع في المهام الفنية والمستويات الوظيفية، واحتوائها على فئات تمثل كافة أدوار منظومة الصيانة الجوية، بدءًا من الفنيين التنفيذيين وحتى الإداريين والمشرفين ومديري الأقسام الفنية.

بلغ حجم العينة (40) مشاركًا، وهو عدد كافٍ لتحقيق متطلبات التحليل الإحصائي والوصول إلى نتائج ذات دلالة علمية وواقعية. وقد تم اختيار هؤلاء المشاركين وفق المعايير التالية:

1. أن يكون المشارك يعمل فعليًا في مجال صيانة محركات الطائرات العسكرية أو في الأقسام الفنية المرتبطة بها.
2. أن يمتلك خبرة عملية لا تقل عن سنتين في مجال الصيانة الجوية أو التحليل الفني.
3. أن يكون على دراية بالإجراءات التنظيمية والفنية داخل الوحدة المستهدفة.
4. أن يُبدي الاستعداد للمشاركة في الاستبانة وتقديم معلومات دقيقة وصادقة.

توزعت العينة على النحو التالي:

النسبة المئوية عدد المشاركين الفئة الوظيفية		
25%	10	مهندسون فنيون
37.5%	15	فنيون ميدانيون (محركات/أنظمة)
12.5%	5	محلولو بيانات فنية
15%	6	مشرفو صيانة ومديرو ورش
10%	4	إداريون في الدعم الفني والمشاريع
100%	40	مشاركًا إجمالي

تُظهر هذه التوزيعة أن العينة تمثل جميع الفئات المهنية المؤثرة في عملية الصيانة الجوية، وهو ما يضمن تنوع وجهات النظر والبيانات التي تعكس الواقع الميداني بدقة.

وقد تم توزيع الاستبانة الإلكترونية على المشاركين بعد التنسيق المسبق مع قيادة الوحدة لضمان الالتزام بالإجراءات الأمنية والحفاظ على سرية المعلومات.

كما تم تقديم شرح موجز للمشاركين حول أهداف الدراسة وطبيعتها البحثية، مع التأكيد على أن المشاركة طوعية وأن البيانات ستُستخدم لأغراض علمية فقط دون أي تأثير على مهامهم الوظيفية.

اعتمد الباحث في تصميم العينة على المبدأ الإحصائي القائل بأن حجم العينة يجب أن يكون كافيًا لتحقيق التمثيل الواقعي دون الإفراط في التكرار أو الهدر في الموارد.

وبناءً على ذلك، فإن اختيار 40 مشاركًا من إجمالي مجتمع يتراوح بين 120-150 فردًا في الوحدة يُعد كافيًا لإجراء التحليل الإحصائي المطلوب بثقة ودقة.

ويُلاحظ أن تنوع الخبرات العملية بين المشاركين أسهم في إثراء البيانات الميدانية؛ إذ شملت العينة فنيين ميدانيين ذوي خبرة تشغيلية مباشرة، ومهندسين إداريين مسؤولين عن التخطيط الفني، ومحلي بيانات متخصصين في التحليل الرقمي للأداء.

وبذلك تم تحقيق مبدأ التوازن بين التحليل الفني والإداري، وهو ما يعزز موثوقية نتائج الدراسة وإمكانية تعميمها داخل بيئات الصيانة العسكرية المشابهة في المملكة.

3-6 أداة الدراسة (الاستبانة) وتصميمها ومكوناتها

نظرًا لطبيعة الدراسة التي تتطلب جمع بيانات ميدانية كمية من فئة فنية متخصصة، فقد تم اختيار الاستبانة (Questionnaire) كأداة رئيسية لجمع البيانات، لما تتميز به من مرونة وسرعة في التطبيق وقدرتها على الوصول إلى عدد كبير من المشاركين بدقة وموضوعية. وقد صُممت الاستبانة لتتوافق مع أهداف الدراسة وتساؤلاتها وفرضياتها، ولتعكس بدقة أبعاد موضوع البحث الذي يتمحور حول أثر تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية.

أولاً: مبررات اختيار أداة الاستبانة

1. ملاءمتها لطبيعة البيئة العسكرية الفنية، إذ تسمح بجمع آراء عدد من الفنيين والمهندسين دون الحاجة إلى مقابلات مطوّلة قد تتعارض مع انشغالاتهم الميدانية.
2. قدرتها على القياس الكمي للمفاهيم المجردة، مثل مدى المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية أو مستوى الجاهزية التشغيلية.
3. إمكانية تحليلها إحصائياً، مما يُتيح اختبار الفرضيات بشكل علمي وفق مقاييس الثبات والصدق.
4. بساطتها وسريتها، ما يجعلها مناسبة للبيئة العسكرية التي تتطلب دقة في تداول المعلومات وتجنب الإفصاح المباشر عن تفاصيل فنية حساسة.

ثانياً: خطوات إعداد الاستبانة

تم إعداد الاستبانة وفق منهجية علمية دقيقة مرّت بالمراحل التالية:

1. تحديد الأهداف البحثية لكل محور بالاستناد إلى الإطار النظري وتساؤلات الدراسة.
2. صياغة العبارات والمفاهيم بطريقة مبسطة ومفهومة تراعي الخلفية الفنية للمشاركين وتجنب المصطلحات الأكاديمية المعقدة.

3. اعتماد مقياس "ليكرت الخماسي (Likert Scale)" لقياس اتجاهات المشاركين نحو كل عبارة، بحيث تتدرج الإجابات من:
(1) لا أوافق بشدة – (2) لا أوافق – (3) محايد – (4) أوافق – (5) أوافق بشدة.

4. عرض المسودة الأولية على مجموعة من المحكمين الأكاديميين في تخصصات هندسة الطيران والإحصاء التطبيقي للتأكد من وضوح العبارات وسلامة الصياغة ودقة القياس.

5. تطبيق تجربة استطلاعية أولية (Pilot Test) على عينة محدودة من (8) مشاركين للتأكد من وضوح البنود وتقدير الزمن اللازم للإجابة عليها، وتم تعديل بعض البنود بناءً على ملاحظاتهم.

ثالثاً: هيكل الاستبانة ومكوناتها

تكوّنت الاستبانة النهائية من ثلاثة محاور رئيسية تمثل أبعاد الدراسة، بالإضافة إلى قسم تمهيدي يتضمن البيانات العامة للمشاركين:

1. القسم التمهيدي – البيانات الديموغرافية للمشاركين:
يشمل معلومات أساسية تهدف إلى توصيف خصائص العينة، مثل:

- المسمى الوظيفي.
- المؤهل العلمي.
- عدد سنوات الخبرة.
- طبيعة المهام الحالية (فنية – إدارية – إشرافية).
- عدد الدورات التدريبية الفنية في مجال الصيانة الذكية أو تحليل البيانات.
- تُستخدم هذه البيانات لاحقاً لتحليل الفروق الإحصائية بين فئات المشاركين.

2. المحور الأول: المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية (PdM Knowledge):

يهدف هذا المحور إلى قياس مدى إدراك المشاركين لمفهوم الصيانة التنبؤية ومكوناتها الأساسية. واشتمل على بنود مثل:

- أفهم مفهوم الصيانة التنبؤية بشكل واضح.
- أعرف الفرق بين الصيانة الوقائية والتنبؤية.
- أدرك أهمية أجهزة الاستشعار في اكتشاف الأعطال.
- اطلعت على تجارب عالمية في تطبيق الصيانة الذكية.
- تلقيت تدريباً مرتبطاً بتحليل البيانات الفنية للطائرات.

3. المحور الثاني: واقع الصيانة الحالية في وحدات المحركات العسكرية (Current Maintenance Status):
يهدف إلى وصف وتقييم الأساليب الحالية المتبعة في الصيانة. ومن أبرز بنوده:

- يتم تحديد مواعيد الصيانة وفق جداول زمنية ثابتة.
- الأعطال المفاجئة تحدث بشكل متكرر.
- تعتمد عمليات التقييم الفني على الاجتهاد الشخصي أكثر من التحليل الرقمي.
- لا يوجد تكامل واضح بين نظام الصيانة ونظام الإدارة الفنية.
- يتم التعامل مع الأعطال بعد حدوثها وليس قبلها.

4. المحور الثالث: الأثر المتوقع لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية (Expected Impact of PdM):
يقيس هذا المحور آراء المشاركين حول الفوائد المحتملة لتطبيق الصيانة الذكية. ومن بنوده:

- تطبيق PdM يقلل من عدد الأعطال المفاجئة.
- يرفع من كفاءة التشغيل للمحركات.

- يسهم في تسريع الاستجابة الفنية وتقليل زمن الإصلاح.
 - يرفع معدل الجاهزية القتالية للطائرات.
 - يسهم في خفض تكاليف التشغيل السنوية.
- بلغ إجمالي عدد فقرات الاستبانة (30)فقرة موزعة بالتساوي على المحاور الثلاثة، إضافة إلى (5)أسئلة تمهيدية للبيانات الديموغرافية.

رابعاً: طريقة توزيع الاستبانة

تم توزيع الاستبانة إلكترونياً عبر البريد الداخلي للوحدة العسكرية باستخدام نموذج محمي بكلمة مرور لضمان سرية البيانات. كما تم شرح الهدف من الدراسة في مقدمة الاستبانة، مع توضيح أن الإجابات ستستخدم لأغراض البحث الأكاديمي فقط ولن يُفصح عن أي معلومات شخصية.

وقد استغرق المشاركون في الإجابة ما بين (10-15 دقيقة)، وتم جمع جميع الردود خلال فترة أسبوعين بعد إرسال التذكيرات الرسمية عبر البريد الفني والإداري للوحدة.

خامساً: مبررات استخدام مقياس "ليكرت الخماسي"

تم اختيار مقياس "ليكرت" لأنه:

1. يُستخدم على نطاق واسع في الدراسات الإدارية والهندسية، ما يُسهل مقارنة النتائج.
2. يُمكن الباحث من تحليل الاتجاهات العامة للمشاركين إحصائياً بدقة.
3. يمنح المشاركين حرية التعبير التدريجي عن آرائهم دون إجبارهم على خيار محدد.

سادساً: مزايا تصميم الأداة

- شمولها لجميع أبعاد موضوع الدراسة (المعرفي، الفني، الإداري).
- وضوح بنودها وسهولة فهمها للفنيين والمهندسين.
- قابليتها للتحليل الكمي باستخدام أدوات إحصائية موثوقة.
- توافقها مع الخصوصية الأمنية للبيئة العسكرية.

إن إعداد هذه الأداة بعناية وضمان صدقها وثباتها مكن الباحث من جمع بيانات دقيقة وموضوعية يمكن الاعتماد عليها في اختبار فرضيات الدراسة والوصول إلى نتائج علمية ذات مصداقية عالية.

7-3 صدق وثبات أداة الدراسة

إن التأكد من صدق وثبات الأداة البحثية يمثل خطوة أساسية في أي دراسة علمية تهدف إلى الوصول إلى نتائج دقيقة وموثوقة. ولأن أداة هذه الدراسة (الاستبانة) تُستخدم لقياس مفاهيم فنية وإدارية في بيئة حساسة كبيئة الصيانة العسكرية، فقد أولى الباحث عناية خاصة للتحقق من مدى صلاحيتها العلمية والعملية.

أولاً: الصدق (Validity)

الصدق هو مدى قدرة الأداة على قياس ما وُضعت لقياسه بالفعل، أي مدى تمثيل فقرات الاستبانة للمفاهيم النظرية التي ترتبط بها. ولتحقيق هذا الهدف، استخدم الباحث عدة أنواع من الصدق كما يلي:

1. الصدق الظاهري: (Face Validity)

تم التأكد من وضوح صياغة العبارات ومدى سهولة فهمها من قبل الفئة المستهدفة (المهندسين والفنيين). وقد تم عرض الاستبانة على مجموعة من الفنيين ذوي الخبرة داخل الوحدة للتأكد من أن العبارات مفهومة ولا تحتمل أكثر من تفسير.

2. صدق المحتوى: (Content Validity)

تحقق الباحث من أن بنود الاستبانة تغطي جميع أبعاد الظاهرة محل الدراسة (المعرفة، الواقع الفني، الأثر المتوقع)، بحيث لا تُهمل أي جانب من جوانب موضوع الصيانة التنبؤية والجاهزية القتالية. وقد تم عرض المسودة الأولية على لجنة من خمسة محكمين أكاديميين متخصصين في مجالات:

- هندسة الطيران وصيانة المحركات.
- إدارة المشاريع الدفاعية.
- الإحصاء التطبيقي.

◦ إدارة الجودة في المنظمات العسكرية.

◦ نظم المعلومات الإدارية.

وقدم المحكمون ملاحظاتهم على صياغة بعض العبارات وعدد الفقرات في بعض المحاور.

بناءً على تلك الملاحظات، تم تعديل الصياغة في (7) بنود لضمان دقة التعبير واتساق المعنى، كما تم حذف فقرتين متشابهتين ودمجهما في بند واحد أكثر وضوحًا.

3. الصدق البنائي: (Construct Validity)

بعد جمع البيانات ميدانيًا، تم التحقق من الصدق البنائي عن طريق تحليل الاتساق الداخلي للعلاقات بين فقرات كل محور باستخدام معامل الارتباط. (Correlation Coefficient) وأظهرت النتائج أن جميع الفقرات كانت مترابطة بدرجة مرتفعة تتراوح بين (0.68 – 0.84)، مما يدل على تجانس الأداة وقدرتها على قياس المفهوم نفسه في كل محور.

ثانيًا: الثبات (Reliability)

الثبات هو مدى استقرار نتائج الأداة عند إعادة تطبيقها في ظروف مماثلة، أي مدى خلوها من التناقض أو التذبذب في القياس. ولقياس الثبات، استخدم الباحث معامل كرونباخ ألفا (Cronbach's Alpha) لقياس الاتساق الداخلي لفقرات الاستبانة.

تم تطبيق الأداة على عينة تجريبية مكونة من (8) أفراد من مجتمع الدراسة قبل التطبيق الفعلي، وبعد إدخال البيانات إلى برنامج (SPSS) ، تم الحصول على النتائج التالية:

مستوى الثبات	قيمة معامل كرونباخ ألفا (α)	عدد الفقرات	المحور
مرتفع جدًا	0.89	10	المحور الأول: المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية
مرتفع	0.86	10	المحور الثاني: واقع الصيانة الحالية
مرتفع جدًا	0.91	10	المحور الثالث: الأثر المتوقع لتطبيق PdM
ثبات ممتاز	0.88	30 فقرة	الإجمالي الكلي للأداة

يتضح من الجدول أن جميع قيم معامل كرونباخ ألفا تجاوزت الحد المقبول إحصائيًا (0.70)، وهو ما يدل على أن الأداة تتمتع بدرجة عالية من الثبات والاتساق الداخلي، وتعد صالحة للاستخدام الميداني.

ثالثًا: تفسير النتائج

تشير هذه النتائج إلى أن الاستبانة تحقق مستوى عاليًا من الصدق والثبات، مما يجعلها أداة موثوقة يمكن الاعتماد عليها في جمع البيانات وتحليلها. كما أن درجة الاتساق المرتفعة بين فقرات المحاور المختلفة تعكس وضوح المفاهيم لدى أفراد العينة، مما يعزز دقة النتائج النهائية للدراسة.

وتعد هذه الخطوة من الخطوات المنهجية الجوهرية التي تُكسب الدراسة مصداقية علمية عالية، وتضمن أن أي نتائج لاحقة تُستند إلى بيانات دقيقة خضعت لاختبارات الصلاحية الإحصائية الكاملة.

8-3 أساليب تحليل البيانات الإحصائية المستخدمة في الدراسة

تُعد مرحلة تحليل البيانات من أهم مراحل البحث العلمي، إذ تُحوّل فيها المعلومات المجمعة من أداة الدراسة إلى نتائج كمية يمكن تفسيرها واستنتاجها علميًا.

وبما أن هذه الدراسة تهدف إلى تحليل أثر تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية، فقد استخدم الباحث مجموعة من الأساليب الإحصائية الوصفية والاستنتاجية المناسبة لطبيعة المتغيرات المدروسة وطبيعة العينة.

اعتمد الباحث في عمليات التحليل على برنامج SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) نظرًا لدقته في معالجة البيانات الإحصائية وتقديم مؤشرات تحليلية تساعد في تفسير العلاقات بين المتغيرات.

أولاً: الأساليب الإحصائية الوصفية (Descriptive Statistics)

تُستخدم الأساليب الوصفية لتقديم صورة دقيقة عن خصائص العينة وبياناتها العامة، ولتوضيح الاتجاهات الأساسية في إجابات المشاركين على فقرات الاستبانة.

وقد تم الاعتماد على المؤشرات التالية:

1. التكرارات: (Frequencies)

استخدمت لتوضيح عدد ونسبة المشاركين في كل فئة من فئات المتغيرات الديموغرافية (الوظيفة، المؤهل، سنوات الخبرة، نوع المهام).

2. النسب المئوية: (Percentages)

تم توظيفها لتوضيح توزيع الاستجابات عبر مستويات مقياس ليكرت الخماسي في كل بند من بنود الاستبانة.

3. المتوسط الحسابي: (Mean)

يُستخدم لقياس الاتجاه العام لاستجابات المشاركين نحو كل محور من محاور الدراسة.

ويُعبّر المتوسط الأعلى عن مستوى اتفاق أكبر مع محتوى الفقرة أو المحور.

4. الانحراف المعياري: (Standard Deviation)
يُستخدم لقياس مدى تشتت آراء المشاركين حول المتوسط العام، حيث يشير انخفاض قيمة الانحراف المعياري إلى درجة اتفاق مرتفعة بين المستجيبين.

5. الوسيط والمنوال: (Median and Mode)
تم استخدامهما في بعض التحليلات التوضيحية لتحديد أكثر القيم تكرارًا وقياس ميل التوزيع الإحصائي للاستجابات.

ثانيًا: الأساليب الإحصائية الاستنتاجية (Inferential Statistics)
تهدف الأساليب الاستنتاجية إلى اختبار فرضيات الدراسة والتأكد من وجود علاقات ذات دلالة إحصائية بين المتغيرات، وقد استخدم الباحث الأدوات التالية:

1. اختبار (T-Test) لعينة واحدة:
لقياس مدى اختلاف المتوسطات الفعلية لاستجابات المشاركين عن القيمة المتوقعة على مقياس ليكرت (القيمة المحايدة = 3).
يساعد هذا الاختبار في تحديد ما إذا كانت إجابات المشاركين تميل إيجابيًا أو سلبياً نحو موضوع الدراسة.

2. اختبار تحليل التباين الأحادي: (One-Way ANOVA)
لقياس الفروق ذات الدلالة الإحصائية في آراء المشاركين باختلاف متغيراتهم الديموغرافية (مثل سنوات الخبرة أو المستوى الوظيفي).
وقد تم تحديد مستوى الدلالة الإحصائية عند $(\alpha \leq 0.05)$ بوصفه المعيار المقبول علميًا لاعتبار الفروق ذات دلالة.

3. تحليل الارتباط: (Pearson Correlation)
لقياس قوة العلاقة واتجاهها بين المتغيرات الأساسية للدراسة، مثل العلاقة بين المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية ومستوى الجاهزية التشغيلية

للطائرات.

وقد اعتمد المقياس التالي لتفسير قوة الارتباط:

- من (0.00 إلى 0.29): علاقة ضعيفة.
- من (0.30 إلى 0.59): علاقة متوسطة.
- من (0.60 إلى 0.79): علاقة قوية.
- من (0.80 فأكثر): علاقة قوية جدًا.

4. تحليل الانحدار البسيط والمتعدد (Simple & Multiple Regression):

استخدم لقياس مدى تأثير متغير الصيانة التنبؤية (كمتغير مستقل) على الجاهزية القتالية (كمتغير تابع)، مع إدخال المتغيرات الوسيطة (البنية الرقمية، كفاءة الكادر الفني، الدعم الإداري). وقد مكّن هذا التحليل من تحديد حجم التأثير الفعلي لكل عامل على الجاهزية التشغيلية.

5. التحليل العاملي: (Factor Analysis)

استخدم لتجميع فقرات الاستبانة في محاور مترابطة إحصائياً بهدف التحقق من صحة بناء الأداة وقياس مدى تمثيل الفقرات للمتغيرات النظرية للدراسة.

6. اختبار كرونباخ ألفا – (Cronbach's Alpha) إعادة فحص الثبات: تم استخدامه مرة أخرى بعد التحليل النهائي للتحقق من ثبات الأداة على العينة الكاملة وليس فقط العينة التجريبية، للتأكد من استمرار مستوى الثبات المرتفع.

ثالثاً: منهجية عرض وتحليل النتائج

تم ترتيب النتائج وتحليلها في الفصل الرابع من الرسالة على النحو التالي:

1. تحليل الخصائص الديموغرافية للعينة.

2. تحليل فقرات كل محور على حدة.

3. عرض الجداول الإحصائية للمتوسطات والانحرافات المعيارية.

4. تفسير النتائج في ضوء الدراسات السابقة والنظرية العلمية.

5. اختبار الفرضيات العامة والفرعية باستخدام الأدوات الإحصائية المناسبة.

وقد حرص الباحث على عرض النتائج بطريقة تجمع بين الدقة الرقمية والتحليل الفني، بحيث لا تُعرض الأرقام بمعزل عن سياقها الهندسي والعملي في بيئة الصيانة الجوية العسكرية.

رابعاً: مبررات استخدام الأساليب الإحصائية المختارة

- تنوع متغيرات الدراسة (فنية – إدارية – بشرية) تطلب استخدام أدوات تحليل متعددة لتغطية جميع الأبعاد.
- صغر حجم العينة النسبي (40 مشاركاً) يجعل الأساليب المستخدمة (T-Test وANOVA وCorrelation) الأنسب لقياس العلاقات دون الحاجة إلى نماذج معقدة.
- ملائمة البرنامج الإحصائي SPSS لبيئة البحوث التطبيقية في المجالات الإدارية والهندسية.

إن هذه الأساليب الإحصائية تُشكّل الأساس العلمي الذي بُني عليه تحليل البيانات في الفصل الرابع، والذي يتناول عرض النتائج ومناقشتها بصورة تفصيلية تربط بين الأرقام والمفاهيم الفنية للجاهزية القتالية والطيران العسكري.

9-3 الحدود المنهجية والإجراءات الأخلاقية للدراسة

إن الالتزام بالحدود المنهجية والمعايير الأخلاقية في البحث العلمي يُعد أحد أهم عناصر ضمان المصداقية والموضوعية في النتائج. ونظرًا لحساسية البيئة العسكرية التي نُفذت فيها هذه الدراسة، فقد حرص الباحث على الالتزام الصارم بجميع الضوابط الأكاديمية والأمنية والتنظيمية المعمول بها، لضمان سلامة جمع البيانات وتحليلها، وصون سرية المعلومات المتعلقة بموضوع الصيانة العسكرية.

أولاً: الحدود المنهجية للدراسة

تم تحديد مجموعة من الحدود المنهجية التي التزم بها الباحث أثناء تنفيذ الدراسة، وذلك لضبط نطاقها وضمان دقة نتائجها، وتشمل ما يلي:

1. الحدود الزمنية:

اقتصرت فترة تنفيذ الدراسة الميدانية على الفصل الدراسي الثاني من العام الجامعي 1446 هـ / 2025 م، وهي المدة التي تم خلالها توزيع الاستبانات وجمع البيانات وتحليلها.

2. الحدود المكانية:

تم تطبيق الدراسة في إحدى وحدات صيانة محركات الطيران العسكري التابعة لقطاع الدفاع الجوي بالمملكة العربية السعودية، لكونها تمثل نموذجًا متكاملًا يعكس بيئة الصيانة الجوية العسكرية من حيث التنظيم الفني والبنية التقنية.

3. الحدود الموضوعية:

ركزت الدراسة على تحليل أثر تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات، دون التوسع في تحليل أنظمة الطائرات الأخرى أو تقييمات التسليح والتشغيل الميداني.

4. الحدود البشرية:

اقتصرت المشاركة على المهندسين والفنيين والإداريين العاملين في

مجال الصيانة الجوية والدعم الفني، ممن يمتلكون خبرة عملية تتجاوز السنتين في هذا المجال.

5. الحدود الإجرائية:

تم تنفيذ جميع مراحل جمع البيانات وتحليلها ضمن النطاق المسموح به رسميًا، وبما لا يتعارض مع أنظمة السرية العسكرية أو سياسات النشر المعتمدة في وزارة الدفاع.

ثانيًا: الإجراءات الأخلاقية للدراسة

احترام المبادئ الأخلاقية في البحث العلمي يمثل التزامًا جوهريًا خاصة عند التعامل مع أفراد يعملون في مؤسسات عسكرية، حيث تتسم طبيعة البيانات بالحساسية وتتطلب أعلى درجات الثقة والشفافية. وقد اتبع الباحث مجموعة من الإجراءات الأخلاقية خلال مراحل البحث لضمان حماية المشاركين وسرية المعلومات، وتشمل ما يلي:

1. الحصول على الموافقات الرسمية:

قبل الشروع في جمع البيانات، تم الحصول على موافقة خطية من الجهة المعنية داخل قطاع الصيانة الجوية العسكري، بعد تقديم نسخة من خطة البحث والأداة المعتمدة، مع توضيح الهدف الأكاديمي للدراسة.

2. موافقة المشاركين الطوعية: (Informed Consent)

تم توضيح هدف الدراسة لجميع المشاركين عبر مقدمة الاستبانة، مع التأكيد على أن المشاركة اختيارية تمامًا وأن بإمكانهم الانسحاب في أي وقت دون أي التزام أو أثر وظيفي. كما أكد لهم أن إجاباتهم ستستخدم لأغراض البحث العلمي فقط.

3. سرية المعلومات وحماية الهوية:

لم يتم طلب أي معلومات شخصية أو بيانات تعريفية (مثل الأسماء أو الأرقام العسكرية أو المواقع الوظيفية الدقيقة). كما تم حفظ جميع الاستجابات في ملفات رقمية مشفرة دون الإشارة إلى هوية الأفراد أو وحداتهم العسكرية.

4. الحياد والموضوعية في التحليل:
التزم الباحث بالحياد التام أثناء تفسير البيانات، دون تحيز لأي فئة وظيفية أو مستوى إداري، وحرص على أن تكون النتائج مبنية على الأدلة الإحصائية فقط.

5. تجنب الإضرار بالمشاركين:
لم تتضمن الدراسة أي أسئلة يمكن أن تُسبب حرجاً شخصياً أو تمس بمهامهم العملية أو الأمنية.
كما لم يُطلب من المشاركين الكشف عن معلومات فنية أو تشغيلية حساسة تتعلق بأنظمة الطائرات أو تفاصيل المهمات العسكرية.

6. توثيق المصادر والاقتباسات العلمية:
تم الالتزام التام بمعايير التوثيق العلمي المعترف بها (APA Style) في جميع المراجع والدراسات السابقة التي تم الاستشهاد بها في متن البحث.

7. حفظ البيانات بعد انتهاء الدراسة:
تم حفظ النسخة الإلكترونية للبيانات على وسائط تخزين آمنة خاصة بالباحث، على أن تُتلف بعد انتهاء متطلبات مناقشة الرسالة الأكاديمية رسمياً.

ثالثاً: الالتزام بالمعايير الأكاديمية الدولية
تماشياً مع معايير البحث العلمي المعتمدة في الجامعات العالمية، التزم الباحث بالضوابط التالية:

- الصدق والشفافية في العرض والتحليل، بحيث تعكس النتائج واقع البيانات دون أي تعديل أو انتقائية.
- الاستقلالية الأكاديمية، إذ تم إعداد البحث دون أي تدخل أو توجيه من جهات خارجية قد تؤثر على الحياد العلمي.
- الابتعاد عن النقل أو الانتحال العلمي، وتم توثيق جميع الاقتباسات والأفكار من مصادرها الأصلية.

رابعاً: أثر الالتزام الأخلاقي على جودة الدراسة

أسهم الالتزام بهذه المعايير في تعزيز موثوقية النتائج النهائية، وضمان قبولها من قبل الجهات الأكاديمية والمهنية، فضلاً عن تعزيز الثقة بين الباحث والمشاركين داخل بيئة العمل العسكري. كما شكّل هذا الالتزام عاملاً رئيسياً في نجاح تنفيذ الدراسة داخل منشأة عسكرية ذات طبيعة خاصة، دون أي تعارض مع سياسات الأمن الفني أو السرية المؤسسية.

إن احترام الحدود المنهجية والأخلاقية لم يكن مجرد التزام شكلي، بل كان عنصراً محورياً في تصميم وتنفيذ البحث، لضمان أن تكون نتائجه واقعية، وأدواته دقيقة، وإجراءاته منضبطة بما يتماشى مع القيم المهنية والأكاديمية في ميدان هندسة الطيران والدعم الفني العسكري.

10-3 ملخص الفصل الثالث

يُعتبر هذا الفصل من أهم فصول الرسالة، إذ تناول المنهجية العلمية التي استندت إليها الدراسة في تحليل العلاقة بين أنظمة الصيانة التنبؤية ومستوى الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية.

وقد حرص الباحث على أن تكون المنهجية مصممة بعناية لتتوافق مع طبيعة الموضوع الفني والعسكري الذي تتناوله الدراسة، وتضمن في الوقت ذاته الدقة والحياد في جمع البيانات وتحليلها وتفسيرها.

بدأ الفصل بتوضيح المنهج المستخدم وهو المنهج الوصفي التحليلي المدعوم بالتطبيق الميداني، نظرًا لملاءمته للبيئات المعقدة التي تتداخل فيها الأبعاد الفنية والإدارية.

وقد أوضح الباحث أن هذا المنهج يمكّنه من وصف الواقع الفعلي للصيانة الجوية العسكرية وتحليل العلاقة بين متغيرات الدراسة من خلال البيانات الكمية التي تم جمعها بواسطة أداة الاستبانة.

كما تناول الفصل بالتفصيل مجتمع الدراسة وعينتها، حيث تم تحديد المجتمع في العاملين بوحدات صيانة محركات الطيران العسكري التابعة للدفاع الجوي، واختيار عينة مكونة من (40) مشاركًا من المهندسين والفنيين والمشرفين والإداريين، تم اختيارهم بأسلوب العينة القصدية بما يضمن تمثيلًا واقعيًا لمختلف الفئات الوظيفية ذات العلاقة بموضوع البحث.

ثم استعرض الفصل أداة الدراسة الرئيسية (الاستبانة)، موضحًا مراحل إعدادها ومكوناتها، والتي صُممت لتشمل ثلاثة محاور رئيسية تغطي الجوانب المعرفية والفنية والإدارية لأنظمة الصيانة التنبؤية.

وقد استخدم الباحث مقياس "ليكرت الخماسي" لتقدير اتجاهات المشاركين بدقة، وأخضع الأداة لاختبارات الصدق والثبات التي أكدت صلاحيتها للاستخدام الميداني، حيث بلغت قيمة معامل كرونباخ ألفا (0.88) ، وهي دلالة على اتساق داخلي مرتفع جدًا.

كما تم عرض الأساليب الإحصائية المستخدمة في تحليل البيانات، والتي شملت الإحصاء الوصفي (ال تكرارات، المتوسطات، الانحراف المعياري)، والإحصاء الاستنتاجي (تحليل التباين الأحادي ANOVA ، واختبار T-Test ، وتحليل

الارتباط والانحدار البسيط والمتعدد)، وذلك بهدف اختبار فرضيات الدراسة بدقة علمية.

ولم يغفل الفصل الحدود المنهجية والأخلاقية التي التزم بها الباحث أثناء تنفيذ الدراسة في بيئة عسكرية، بما يضمن حماية سرية المعلومات واحترام القواعد التنظيمية.

كما أوضح الباحث الإجراءات الأخلاقية التي اتخذها، مثل الحصول على الموافقات الرسمية من الجهات المختصة، وضمان الطوعية والسرية في مشاركة الأفراد، والحياد التام في معالجة البيانات.

وقد شكّل هذا الفصل نقطة التحول بين الإطار النظري والتطبيق العملي في الدراسة، إذ وضع الأسس العلمية التي سيتم من خلالها تحليل البيانات واستخلاص النتائج في الفصل الرابع.

وبالتالي، فإن منهجية الدراسة بما تتضمنه من تصميم علمي دقيق للأداة واستخدام أساليب تحليل متقدمة تُعد ضماناً لسلامة النتائج التي سيُعرضها الفصل القادم، والذي سيتناول عرض البيانات الميدانية وتحليلها ومناقشة نتائجها في ضوء الفرضيات النظرية والدراسات السابقة.

الفصل الرابع: عرض النتائج وتحليلها

4-1 مقدمة الفصل

يُعد هذا الفصل جوهر الدراسة ومركزها التحليلي، إذ يُقدّم عرضًا تفصيليًا للبيانات الميدانية التي تم جمعها باستخدام أداة الاستبانة، ويُحلّلها تحليلًا علميًا دقيقًا للوصول إلى مؤشرات كمية تدعم فرضيات البحث وتُجيب عن تساؤلاته. ويركز هذا الفصل على ربط النتائج الرقمية بالواقع الفني للصيانة الجوية العسكرية، بحيث لا تقتصر التحليلات على الجانب الإحصائي البحث، بل تمتد لتفسير المعاني العملية لهذه النتائج في بيئة العمل العسكري.

لقد تم تحليل البيانات وفق خطة محددة تتماشى مع هيكل الدراسة ومنهجها الوصفي التحليلي، بحيث يبدأ الفصل بعرض الخصائص العامة للمشاركين، ثم تحليل محاور الدراسة الثلاثة (المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية، واقع الصيانة الحالية، والأثر المتوقع للتطبيق)، يلي ذلك اختبار الفرضيات باستخدام الأدوات الإحصائية المناسبة.

وقد اعتمد الباحث في التحليل على برنامج SPSS نظرًا لما يوفره من دقة في استخراج المؤشرات الإحصائية، مثل المتوسطات والانحرافات المعيارية ومعاملات الارتباط والدلالة الإحصائية، والتي تمثل الأساس الكمي للتحليل.

الغاية من هذا الفصل ليست فقط عرض النتائج الرقمية، بل تفسيرها وربطها بالإطار النظري والدراسات السابقة، بما يُظهر الاتجاه العام لآراء العاملين في قطاع الصيانة الجوية العسكري تجاه تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية ومدى تأثيرها على الجاهزية القتالية للطائرات.

2-4 الخصائص الديموغرافية لعينة الدراسة

يُعتبر تحليل الخصائص الديموغرافية للمشاركين خطوة أساسية لفهم طبيعة العينة ومدى تنوعها، إذ تُسهم هذه البيانات في تفسير تباين الإجابات وتوضيح الاتجاهات العامة لكل فئة وظيفية.

وفي هذه الدراسة، تم جمع بيانات ديموغرافية من خلال القسم التمهيدي من الاستبانة، شملت المسمى الوظيفي، والمؤهل العلمي، وعدد سنوات الخبرة، وطبيعة المهام، وعدد الدورات التدريبية المتخصصة في الصيانة الذكية أو تحليل البيانات.

أولاً: التوزيع حسب المسمى الوظيفي

النسبة المئوية العدد الفئة		
25%	10	مهندسون فنيون
37.5%	15	فنيون ميدانيون
15%	6	مشرفو صيانة ومديرو ورش
12.5%	5	محلولو بيانات فنية
10%	4	إداريون في الدعم الفني والمشاريع
100%	40	الإجمالي

يتضح من الجدول أن الفئة الأكبر من المشاركين هم الفنيون الميدانيون بنسبة (37.5%)، يليهم المهندسون الفنيون بنسبة (25%)، مما يُعزز من واقعية الدراسة لأن أغلب المشاركين على تماس مباشر مع العمليات اليومية للصيانة. كما أن وجود فئة من المشرفين والإداريين يُضفي توازناً في وجهات النظر بين الجانب التنفيذي والإداري، مما يعكس شمولية العينة وتمثيلها لجميع المستويات الفنية والتنظيمية في الوحدة العسكرية.

ثانيًا: التوزيع حسب المؤهل العلمي

النسبة المئوية العدد المؤهل العلمي		
35%	14	دبلوم تقني
50%	20	بكالوريوس هندسة
15%	6	ماجستير إدارة مشاريع أو هندسة
100%	40	الإجمالي

تُظهر النتائج أن معظم أفراد العينة يحملون مؤهلات هندسية أو فنية عالية، حيث بلغت نسبة حملة البكالوريوس (50%)، وهي نسبة مرتفعة تعكس الطابع العلمي للقطاع.

كما أن وجود نسبة من حملة الماجستير (15%) يدل على أن بعض العاملين يمتلكون خلفية أكاديمية متقدمة تمكّنهم من فهم المفاهيم الحديثة مثل التحليل التنبؤي والذكاء الاصطناعي في الصيانة.

ثالثًا: التوزيع حسب سنوات الخبرة

النسبة المئوية العدد سنوات الخبرة		
20%	8	أقل من 3 سنوات
47.5%	19	من 3 إلى 7 سنوات
32.5%	13	أكثر من 7 سنوات
100%	40	الإجمالي

يُلاحظ أن غالبية المشاركين يتمتعون بخبرة تتراوح بين (3-7 سنوات) بنسبة (47.5%)، وهي فئة وسطية تجمع بين الخبرة العملية والتفاعل مع التقنيات الحديثة، تليها فئة ذوي الخبرة العالية (أكثر من 7 سنوات) بنسبة (32.5%)،

وهي فئة تمثل الخبرة التراكمية داخل الوحدات العسكرية، ما يُكسب الدراسة توازنًا في وجهات النظر بين الأجيال المختلفة من الفنيين.

رابعًا: التوزيع حسب طبيعة المهام الوظيفية

النسبة المئوية العدد طبيعة المهام		
50%	20	فنية تنفيذية
25%	10	إشرافية وإدارية
25%	10	تحليل بيانات ومتابعة
100%	40	الإجمالي

يتضح أن نصف العينة (50%) تعمل في المهام الفنية التنفيذية، مما يعكس ارتباطهم المباشر بموضوع الدراسة، في حين تمثل الفئتان الأخريان (الإشرافية والتحليلية) النصف الآخر، ما يتيح رؤية متكاملة تشمل مختلف المستويات الفنية والإدارية في الصيانة الجوية.

خامسًا: التوزيع حسب عدد الدورات التدريبية الفنية في الصيانة الذكية أو تحليل البيانات

النسبة المئوية العدد عدد الدورات		
25%	10	لم يحصل على أي دورة
40%	16	دورة واحدة إلى دورتين
35%	14	أكثر من دورتين
100%	40	الإجمالي

تشير النتائج إلى أن (75%) من المشاركين تلقوا تدريبًا في مجالات مرتبطة بالصيانة الذكية أو تحليل البيانات، وهي نسبة تعكس مدى اهتمام القيادة الفنية بتطوير مهارات الكوادر الوطنية في هذا المجال.

كما يُظهر أن الوعي بالمفاهيم الحديثة بدأ بالانتشار فعليًا في البيئة العسكرية السعودية، مما يمهد الطريق لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على نطاق أوسع.

التحليل العام للخصائص الديموغرافية

يتضح من تحليل هذه الخصائص أن عينة الدراسة تُعتبر نموذجًا تمثيليًا واقعيًا للعاملين في مجال الصيانة الجوية العسكرية؛ فهي تضم مختلف المستويات الوظيفية والمؤهلات العلمية ودرجات الخبرة. كما أن وجود عدد معتبر من المشاركين ذوي التدريب المسبق في مجال الصيانة الذكية يعزز من مصداقية النتائج ويجعلها قابلة للتطبيق العملي. وتُظهر البيانات أن البيئة الفنية داخل وحدات الصيانة السعودية أصبحت أكثر تأهيلاً من أي وقت مضى لاستقبال أنظمة الصيانة الذكية والتعامل مع تقنياتها الحديثة.

3-4 تحليل نتائج المحور الأول: المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance – PdM)

يهدف هذا المحور إلى قياس مستوى المعرفة والوعي لدى المهندسين والفنيين المشاركين في الدراسة حول مفهوم الصيانة التنبؤية وتقنياتها الأساسية ودورها في تعزيز الأداء الفني للطائرات العسكرية.

ويُعد هذا المحور ذا أهمية خاصة، لأن نجاح تطبيق الصيانة الذكية يعتمد بدرجة كبيرة على إدراك العاملين لمفهومها وأساليبها، وقدرتهم على التعامل مع أدواتها التقنية مثل أجهزة الاستشعار وتحليل البيانات.

اشتمل هذا المحور على (10) عبارات في الاستبانة، تم قياس استجابات المشاركين عليها باستخدام مقياس "ليكرت الخماسي"، حيث تتراوح الدرجات بين (1) لا أوافق بشدة إلى (5) أوافق بشدة. وفيما يلي عرض تفصيلي للنتائج الإحصائية الخاصة بكل فقرة من فقرات هذا المحور:

جدول (4-1): نتائج تحليل استجابات المشاركين على فقرات محور المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية

الترتيب	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة	التفسير
1	0.65	4.10	أفهم مفهوم الصيانة التنبؤية بشكل واضح.	1	مرتفع
2	0.61	4.25	أعرف الفرق بين الصيانة الوقائية والصيانة التنبؤية.	2	مرتفع
3	0.78	4.00	أدرك أهمية أجهزة الاستشعار في اكتشاف الأعطال قبل وقوعها.	3	مرتفع

التفسير	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة
مرتفع نسبيًا	0.85	3.90	لدي معرفة بتقنيات التحليل التنبؤي المستخدمة في الصيانة الذكية.	4
متوسط مرتفع	0.90	3.75	أستطيع تفسير المؤشرات الرقمية الناتجة عن أجهزة المراقبة الفنية.	5
متوسط	0.90	3.45	اطلعت على تطبيقات عالمية لأنظمة الصيانة التنبؤية في المجال العسكري.	6
متوسط منخفض	1.10	3.05	تلقيت تدريبًا في تحليل البيانات الفنية المرتبطة بالصيانة الذكية.	7
متوسط مرتفع	0.87	3.80	أستطيع التمييز بين الأعطال المتكررة وتلك الناتجة عن خلل في التصميم.	8
متوسط	0.95	3.50	أمتلك خلفية تقنية كافية حول استخدام أنظمة الذكاء الاصطناعي في الصيانة.	9
مرتفع جدًا	0.52	4.45	أؤمن بأن الصيانة التنبؤية ستكون مستقبل الصيانة العسكرية في المملكة.	10

التفسير	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة
مستوى معرفة مرتفع نسبيًا	0.81	3.93	—	المتوسط العام للمحور

التحليل الإحصائي والوصفي للمحور

يتضح من الجدول السابق أن المتوسط العام للمحور بلغ (3.93) بانحراف معياري قدره (0.81)، وهو ما يشير إلى أن مستوى المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية لدى المشاركين مرتفع نسبيًا، ويعكس وجود وعي جيد بالمفاهيم الأساسية لهذه الأنظمة، خصوصًا فيما يتعلق بفهم الفروق الجوهرية بينها وبين الصيانة الوقائية التقليدية.

وتُظهر البيانات أن أعلى درجة اتفاق كانت في الفقرة رقم (10) بمتوسط (4.45)، والتي نصّت على أن "الصيانة التنبؤية ستكون مستقبل الصيانة العسكرية في المملكة"، مما يدل على إيمان راسخ لدى المشاركين بضرورة التحول نحو الأنظمة الذكية.

كما جاءت الفقرات (1، 2، 3) بدرجات مرتفعة أيضًا، مما يُشير إلى أن المفاهيم النظرية العامة للصيانة التنبؤية أصبحت مألوفة لدى العاملين في الصيانة الجوية.

في المقابل، جاءت الفقرتان (6) و(7) بأدنى متوسطين (3.45) و(3.05) على التوالي، ما يدل على وجود فجوة في المعرفة التطبيقية والتدريب العملي، إذ لم يتلق عدد كافٍ من العاملين تدريبًا مباشرًا في تحليل البيانات أو استخدام الأنظمة الذكية في الصيانة.

ويُظهر ذلك الحاجة إلى برامج تدريبية موسعة تركز على التطبيق العملي وليس الجانب النظري فقط.

التفسير الفني والعملي للنتائج

من الناحية الفنية، يمكن تفسير ارتفاع مستوى المعرفة النظرية بأنظمة الصيانة التنبؤية بأنه ناتج عن:

- انتشار ثقافة التحول الرقمي في بيئة الدفاع الجوي خلال السنوات الأخيرة.
 - تنفيذ برامج توعوية وتدريبية مبدئية حول التحول نحو الصيانة الذكية.
 - اهتمام القيادة العسكرية بتطوير كفاءات المهندسين والفنيين السعوديين في المجالات التقنية المتقدمة.
- غير أن المعرفة العملية التطبيقية لا تزال محدودة نسبياً، وهو ما يعكسه تراجع متوسطات الفقرات المتعلقة بالتدريب العملي واستخدام أدوات التحليل الذكي. فالمهندس أو الفني يدرك أهمية التقنية، لكنه لا يمتلك بعد الأدوات الكاملة لتطبيقها بكفاءة.

الاستنتاج العام للمحور الأول

يُظهر هذا المحور أن لدى الكوادر الفنية والإدارية في الصيانة الجوية العسكرية إدراكاً جيداً للمفاهيم الأساسية لأنظمة الصيانة التنبؤية، وأن الاتجاه العام لديهم إيجابي نحو تبنيها في المستقبل القريب. ومع ذلك، فإن المرحلة الحالية تتطلب استكمال المعرفة النظرية بالتطبيق العملي والتدريب الفني المتخصص لضمان قدرة العاملين على تشغيل الأنظمة الذكية وتحليل بياناتها بدقة. وهذا الاستنتاج يُعد مؤشراً مهماً في التخطيط لبرامج التأهيل الفني المستقبلية ضمن منظومة الدفاع الجوي السعودي.

4-4 تحليل نتائج المحور الثاني: واقع الصيانة الحالية في وحدات المحركات العسكرية

يهدف هذا المحور إلى تقييم الوضع الراهن للصيانة الجوية في وحدات محركات الطيران العسكري التابعة لقطاع الدفاع الجوي، وذلك من خلال رصد الأساليب المطبقة حاليًا، ومدى اعتمادها على النظم التقليدية أو الرقمية، وتحليل نقاط القوة والضعف في الإجراءات القائمة.

ويُعد هذا المحور حجر الأساس لفهم البيئة التشغيلية قبل الانتقال إلى تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية، إذ يوضح مدى جاهزية البنية المؤسسية والفنية للتحويل نحو الصيانة الذكية.

تضمّن هذا المحور (10) فقرات في الاستبانة، تناولت الجوانب الإدارية والفنية والتنظيمية لعمليات الصيانة الحالية، وقد تم قياس استجابات المشاركين باستخدام مقياس "ليكرت الخماسي" نفسه.

جدول (2-4): نتائج تحليل استجابات المشاركين على فقرات محور "واقع الصيانة الحالية"

التفسير	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة
مرتفع جدًا	0.55	4.35	يتم تحديد مواعيد الصيانة وفق جداول زمنية ثابتة دون الاعتماد على الحالة الفعلية للمحرك.	1
مرتفع	0.70	4.10	الأعطال المفاجئة تحدث بشكل متكرر في بعض المحركات رغم تنفيذ الصيانة الدورية.	2
مرتفع	0.63	4.20	تعتمد عمليات التقييم الفني على الخبرة الشخصية	3

التفسير	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة
			أكثر من الاعتماد على البيانات الرقمية.	
متوسط مرتفع	0.88	3.95	لا يوجد نظام رقمي موحد لتوثيق أعمال الصيانة وتحليل الأعطال.	4
مرتفع	0.68	4.05	يتم تسجيل البيانات الفنية يدوياً أو في جداول إكسل منفصلة.	5
متوسط مرتفع	0.85	3.85	لا يوجد تكامل بين نظام الصيانة ونظام الإدارة الفنية أو العمليات الجوية.	6
مرتفع	0.73	4.00	إجراءات الموافقات الفنية تتطلب وقتاً طويلاً بسبب التسلسل الإداري التقليدي.	7
متوسط مرتفع	0.80	3.90	تُنفذ بعض أعمال الصيانة الاحتياطية دون الحاجة الفعلية إليها.	8
متوسط مرتفع	0.84	3.95	لا توجد تقارير تحليلية فورية للأداء الفني للمحركات.	9
مرتفع	0.68	4.05	تواجه فرق الصيانة صعوبة في التنبؤ بالأعطال قبل وقوعها.	10

التفسير	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة
مستوى مرتفع (اعتماد كبير على النظم التقليدية)	0.72	4.04	—	المتوسط العام للمحور

التحليل الإحصائي والوصفي للمحور

تشير نتائج الجدول إلى أن المتوسط العام للمحور بلغ (4.04) بانحراف معياري (0.72)، وهو مستوى مرتفع يدل على أن الأنظمة الحالية في الصيانة العسكرية ما زالت تقليدية في معظم جوانبها وتعتمد على الخبرة الشخصية والجدول الزمنية أكثر من اعتمادها على التحليل الرقمي أو البيانات الآنية.

أعلى متوسط ظهر في الفقرة (1) بمتوسط (4.35)، ما يؤكد أن أغلب الصيانة تُجرى وفق مواعيد مجدولة مسبقاً وليس بناءً على حالة المكونات، وهي السمة المميزة لنظام الصيانة الوقائية التقليدي.

كما أظهرت الفقرتان (2) و(3) متوسطات مرتفعة أيضاً، مما يعكس استمرار ظاهرة الأعطال المفاجئة والاعتماد الكبير على التقديرات البشرية في اتخاذ القرار الفني.

أما الفقرات (4)، (6)، و(9) فقد حصلت على متوسطات أقل قليلاً (بين 3.85 و3.95)، وهو ما يدل على ضعف التكامل الرقمي بين أنظمة الصيانة والإدارة الفنية، وغياب لوحات التحليل اللحظي للأداء الفني. كما تبين من الفقرة (7) أن هناك بطئاً في إجراءات الموافقات بسبب التسلسل الإداري الطويل، وهو ما يحد من سرعة الاستجابة للأعطال الطارئة.

التحليل الفني للنتائج

من خلال المقارنة مع النتائج العالمية، يُلاحظ أن واقع الصيانة في البيئة العسكرية السعودية لا يختلف كثيرًا عن المراحل الأولى لتطبيق الصيانة الذكية في الدول المتقدمة، حيث يبدأ التحول عادة من مرحلة "الصيانة الوقائية" التقليدية قبل الانتقال إلى مرحلة "الصيانة المعتمدة على الحالة" ثم "الصيانة التنبؤية".

ويُشير ارتفاع المتوسطات إلى أن البنية الإدارية والتنظيمية ما زالت تعتمد على النظام الزمني الثابت، وهو ما يُسبب هدرًا في الجهد والموارد، إذ يتم تنفيذ أعمال صيانة غير ضرورية على مكونات سليمة، بينما لا تُكتشف بعض الأعطال إلا بعد وقوعها.

كما تُبرز النتائج مشكلة عدم وجود نظام رقمي موحد يربط بين الصيانة والعمليات الجوية، مما يؤدي إلى فجوة معلوماتية بين التقارير الفنية اليومية والتقارير القيادية.

وتُعد هذه الفجوة أحد أهم العوائق أمام تطبيق الصيانة التنبؤية، التي تعتمد أساسًا على تدفق البيانات اللحظي (Real-time Data Streaming) من الطائرة إلى قاعدة البيانات المركزية.

التحليل الإداري والتنظيمي

تُظهر النتائج أن الإجراءات الإدارية لا تزال تستند إلى الهرمية التقليدية في الموافقات، مما يؤدي إلى تأخير بعض قرارات الصيانة الحساسة. ومن الناحية الإدارية، يمكن القول إن النظام الحالي يعاني من بطء في حلقة القرار الفني نتيجة الحاجة إلى موافقات متعددة قبل تنفيذ أي عمل ميداني، بينما تتطلب بيئة الصيانة الذكية سرعة في اتخاذ القرار بناءً على التحليل الآني.

كما كشفت النتائج أن العديد من المشاركين يعتقدون أن التكرار في أعمال الصيانة وعدم وجود تقارير تحليلية فورية يُضعف الكفاءة التشغيلية، ويزيد من احتمالية الأعطال المفاجئة.

وهذا يعكس الحاجة إلى أنظمة دعم قرار ذكية (Decision Support Systems) قادرة على تحليل البيانات وتقديم توصيات فنية فورية للفنيين والمهندسين.

التفسير العملي في سياق الصيانة الجوية السعودية

من الناحية العملية، يمكن القول إن واقع الصيانة في وحدات محركات الدفاع الجوي السعودية لا يزال في مرحلة ما قبل التحول الرقمي الكامل، حيث تتوافر كوادرفنية مؤهلة وإجراءات تشغيلية واضحة، لكن تفتقر المنظومة إلى التكامل بين التقنية والإدارة.

ويشير ذلك إلى أن عملية الانتقال إلى الصيانة التنبؤية تحتاج إلى:

1. تحديث البنية التحتية الرقمية وأنظمة إدارة الصيانة.(CMMS)
2. ربط قواعد بيانات الصيانة بنظم الأداء الجوي والتشغيل.
3. تطوير لوحة تحكم رقمية مركزية لمراقبة أداء المحركات.
4. تدريب الفنيين على استخدام أدوات التحليل الذكي واتخاذ القرار المبني على البيانات.

الاستنتاج العام للمحور الثاني

تشير نتائج هذا المحور إلى أن نظام الصيانة الحالي في الوحدات العسكرية السعودية يتميز بانضباط إداري قوي ولكنه يفتقر إلى المرونة الرقمية والتحليل التنبؤي.

فهو يعتمد بدرجة كبيرة على النظم الوقائية المجدولة والخبرة البشرية، بينما ما زال استخدام البيانات والتحليل الذكي في بداياته.

وبالتالي، يُعد هذا الوضع فرصة مثالية للانتقال التدريجي إلى الصيانة التنبؤية (PdM)، من خلال بناء قواعد البيانات وربط الأنظمة الحالية بخوارزميات التحليل الذكي، بحيث تُصبح القرارات الفنية مستندة إلى مؤشرات واقعية تُحسن الكفاءة التشغيلية وتدعم الجاهزية القتالية للطائرات في الوقت ذاته.

4-5 تحليل نتائج المحور الثالث: الأثر المتوقع لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية

يُعد هذا المحور من أهم محاور الدراسة، لأنه يُمثل جوهر العلاقة بين التكنولوجيا والجاهزية القتالية، ويهدف إلى قياس تصورات المشاركين حول مدى تأثير تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على الأداء التشغيلي والجاهزية الفنية للطائرات العسكرية.

ويتناول هذا المحور مؤشرات حيوية مثل: تقليل الأعطال المفاجئة، رفع كفاءة التشغيل، تحسين سرعة الاستجابة الفنية، خفض تكاليف الصيانة، وزيادة الجاهزية القتالية.

وقد تضمن المحور (10) فقرات قيسَت استجابات المشاركين عليها باستخدام مقياس ليكرت الخماسي، وتم تحليل النتائج كما هو موضح في الجدول التالي:

جدول (3-4): نتائج تحليل استجابات المشاركين على فقرات محور الأثر المتوقع لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية

التفسير	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة
مرتفع جدًا	0.48	4.50	أرى أن تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية سيققل من عدد الأعطال المفاجئة في الطائرات.	1
مرتفع	0.60	4.30	الصيانة التنبؤية تسهم في رفع كفاءة التشغيل لمحركات الطائرات العسكرية.	2

التفسير	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة
مرتفع	0.59	4.15	تطبيق الصيانة الذكية يؤدي إلى تسريع عملية الاستجابة الفنية للأعطال.	3
مرتفع	0.66	4.05	تساعد أنظمة PdM في خفض تكاليف الصيانة السنوية.	4
مرتفع جدًا	0.53	4.35	تسهم الصيانة التنبؤية في تقليل فترات التوقف غير المخطط لها للطائرات.	5
مرتفع جدًا	0.52	4.45	الصيانة التنبؤية تدعم جاهزية الطائرات القتالية خلال العمليات الجوية.	6
مرتفع	0.58	4.25	تطبيق أنظمة PdM يعزز من سلامة العمليات الجوية ويقلل الأخطاء البشرية.	7
مرتفع	0.55	4.30	توفر الصيانة التنبؤية بيانات دقيقة تسهل اتخاذ القرار الفني.	8
مرتفع	0.63	4.10	تطبيق PdM يساعد في تحسين التخطيط المسبق للعمليات الجوية.	9
مرتفع جدًا	0.55	4.35	أدعم تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية في وحدتي متى ما	10

التفسير	الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	نص الفقرة	رقم الفقرة
			توفرت الإمكانيات التقنية لذلك.	
مرتفع جدًا (اتجاه إيجابي قوي)	0.57	4.28	—	المتوسط العام للمحور

التحليل الإحصائي والوصفي للمحور

أظهرت نتائج التحليل أن المتوسط العام للمحور بلغ (4.28) بانحراف معياري (0.57)، وهو ما يدل على اتفاق شبه تام بين المشاركين حول الأثر الإيجابي لتطبيق الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات. ويعكس هذا المتوسط المرتفع درجة وعي وإدراك عالية لدى المشاركين لأهمية التحول نحو الأنظمة الذكية في الصيانة الجوية العسكرية.

أعلى متوسط جاء في الفقرة (1) بمتوسط (4.50)، ما يشير إلى قناعة قوية بأن الصيانة التنبؤية تقلل فعليًا من الأعطال المفاجئة، وهي من أهم أهداف هذه الأنظمة في البيئات العسكرية الحساسة.

تلتها الفقرتان (5) و(6) بمتوسطات مرتفعة جدًا (4.35 و4.45 على التوالي)، مما يُظهر إدراكًا واضحًا بأن أنظمة PdM ترفع الجاهزية التشغيلية وتقلل فترات التوقف، وهو ما ينعكس مباشرة على الأداء القتالي للطائرات.

أما أدنى متوسط فكان للفقرات (4) و(9)، على الرغم من بقائها ضمن المستوى المرتفع، مما يشير إلى أن بعض المشاركين ربما لم يلمسوا بعد التأثير المباشر لهذه الأنظمة على التكلفة أو التخطيط العملياتي نظرًا لعدم تطبيقها فعليًا في جميع الوحدات.

التحليل الفني لنتائج المحور

من منظور هندسي، تعكس هذه النتائج حقيقة أن تطبيق الصيانة التنبؤية في قطاع الطيران العسكري يحقق وفورات كبيرة في الطاقة والموارد، إذ يُمكن النظام من تحديد الأعطال قبل حدوثها، وبالتالي يمنع التوقف المفاجئ للمحركات أو الأنظمة الحيوية للطائرة.

ويؤدي ذلك إلى زيادة متوسط الجاهزية الفنية (A-Rate) وتحسين متوسط زمن الإصلاح (MTTR)، وهما مؤشران رئيسيان لقياس الأداء الفني في منظومات الدفاع الجوي.

كما أن ارتفاع المتوسطات في الفقرات المتعلقة بالسلامة الجوية (الفقرة 7) يؤكد أن المشاركين يدركون أن الصيانة الذكية تُقلل الأخطاء البشرية الناتجة عن القرارات الفردية، إذ تستند الأنظمة التنبؤية إلى التحليل الآلي للبيانات بدلاً من الحدس الفني، ما يرفع مستوى الموثوقية والسلامة في العمليات الجوية.

التحليل الإداري والتشغيلي

من الناحية الإدارية، تُظهر النتائج أن المشاركين يؤمنون بأن تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية سيؤدي إلى تحسين عملية اتخاذ القرار الفني والإداري داخل وحدات الصيانة.

فبفضل توفر البيانات الرقمية الدقيقة، سيتمكن القادة من وضع جداول تشغيل وصيانة أكثر كفاءة وتوازنًا بين متطلبات المهام القتالية والدعم الفني. كما أشار المشاركون في إجاباتهم إلى أن الصيانة التنبؤية تُسهم في التخطيط المسبق للعمليات الجوية، عبر توقع أوقات الصيانة المستقبلية وتوفير الموارد اللازمة مسبقًا، ما يمنع تضارب المهام أو تأخيرها.

أما من الناحية الاقتصادية، فإن ارتفاع المتوسط في الفقرة (4) يدل على أن المشاركين يُدركون أن تطبيق أنظمة PdM يؤدي إلى خفض التكاليف التشغيلية على المدى الطويل، رغم أن الاستثمار الأولي في البنية التحتية التقنية قد يكون مرتفعًا.

ويُظهر هذا وعيًا إداريًا جيدًا بفكرة العائد على الاستثمار (ROI) في مجال الصيانة الذكية.

التحليل العسكري والعملياتي

من المنظور العملياتي العسكري، تُبرز النتائج أن العاملين في الصيانة الجوية يدركون أن تطبيق الصيانة التنبؤية يُعد عاملاً مباشراً في رفع الجاهزية القتالية للطائرات.

فكل دقيقة يتم توفيرها في التشخيص أو الإصلاح تُترجم إلى زيادة في ساعات الجاهزية التشغيلية للطائرة، ما يعني قدرة أكبر على تنفيذ المهام الدفاعية والهجومية دون انقطاع.

وتُظهر الفقرة (6) بمتوسط (4.45) أن المشاركين مقتنعون بأن الصيانة التنبؤية تدعم الاستعداد القتالي للطائرات أثناء العمليات، إذ تُمكن القيادات من تحديد الجاهزية الفعلية لكل طائرة في الأسطول بشكل لحظي، وتُتيح إعادة توزيع الموارد الفنية بسرعة في حال ظهور أي مؤشرات خطر فني.

الاستنتاج العام للمحور الثالث

يتضح من نتائج هذا المحور أن هناك اتجاهاً إيجابياً قوياً بين العاملين في الصيانة الجوية العسكرية نحو تبني أنظمة الصيانة التنبؤية، وأنهم يُدركون بشكل واضح حجم تأثيرها على رفع الكفاءة التشغيلية وتقليل الأعطال وتحسين السلامة الجوية.

كما تؤكد النتائج أن الوعي التنظيمي داخل وحدات الصيانة العسكرية بات مهياً لاستقبال التحول الرقمي القادم في مجال الصيانة الذكية.

ويمكن القول إن هذا المحور أثبت ميدانياً الفرضية الرئيسية للدراسة، والتي تنص على أن:

"تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية يؤدي إلى رفع الجاهزية التشغيلية للطائرات العسكرية من خلال تقليل الأعطال وتحسين الاستجابة الفنية".

4-6 تحليل العلاقة الإحصائية بين محاور الدراسة (المعرفة – الواقع – الأثر)

تهدف هذه الفقرة إلى اختبار العلاقات الإحصائية بين المحاور الثلاثة الرئيسية للدراسة، وهي:

1. المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية (المحور الأول).
2. واقع الصيانة الحالية في وحدات المحركات العسكرية (المحور الثاني).
3. الأثر المتوقع لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات (المحور الثالث).

ويُعد هذا التحليل من أكثر الأجزاء أهمية في هذا الفصل، إذ يُظهر مدى الترابط بين الوعي الفني والمعرفة النظرية من جهة، والواقع التطبيقي والأداء التشغيلي من جهة أخرى.

ولتحقيق هذا الهدف، استخدم الباحث تحليل الارتباط البسيط (Pearson Correlation) لقياس قوة واتجاه العلاقة بين المحاور الثلاثة، كما استخدم اختبار الدلالة الإحصائية عند مستوى $(\alpha \leq 0.05)$.

جدول (4-4): مصفوفة الارتباط (Correlation Matrix) بين محاور الدراسة

المحور الثالث: الأثر المتوقع لتطبيق PdM	المحور الثاني: واقع الصيانة الحالية	المحور الأول: المعرفة بالصيانة التنبؤية	المحور الأول: المعرفة بأنظمة PdM
0.71**	0.68**	1	
0.74**	1	0.68**	
1	0.74**	0.71**	

مستوى الدلالة ($\alpha \leq 0.01$):
(**) دلالة إحصائية قوية عند مستوى معنوية مرتفع.

تفسير نتائج الارتباط

تشير النتائج في الجدول إلى أن جميع العلاقات بين المحاور الثلاثة كانت إيجابية وقوية ودالة إحصائية، مما يدل على وجود ترابط متبادل بين المعرفة الفنية، والواقع التشغيلي، والأثر المتوقع لتطبيق الصيانة التنبؤية.

1. العلاقة بين المعرفة والواقع الحالي: ($r = 0.68$)
تُظهر هذه النتيجة أن زيادة مستوى المعرفة لدى الفنيين والمهندسين بأنظمة الصيانة التنبؤية ترتبط بتحسين إدراكهم لجوانب القصور في النظام الحالي، مما يعني أن الوعي التقني يُسهم في تحديد الثغرات القائمة ويزيد من قابلية الوحدات لتبني التغيير نحو الصيانة الذكية.

2. العلاقة بين المعرفة والأثر المتوقع: ($r = 0.71$)
تعكس هذه العلاقة القوية أن الكوادر التي تمتلك معرفة أكبر بالمفاهيم التقنية للـ PdM أكثر اقتناعاً بفاعلية تطبيقها على رفع الجاهزية القتالية للطائرات.

وهذا يشير إلى أن نشر الوعي والتدريب المستمر على المفاهيم الذكية يؤدي مباشرة إلى تبني إيجابي أكبر من قبل العاملين.

3. العلاقة بين الواقع الحالي والأثر المتوقع: ($r = 0.74$)
تُعد هذه العلاقة الأقوى بين المحاور الثلاثة، إذ تشير إلى أن تقييم العاملين لواقع الصيانة الحالية يؤثر بشكل مباشر على رؤيتهم للأثر المتوقع من تطبيق الصيانة التنبؤية.
فكلما كانت التحديات في النظام الحالي أوضح وأكثر وضوحاً للعاملين، زاد إدراكهم للحاجة إلى التحول الرقمي الذكي كحل عملي وفعال.

التحليل الفني للعلاقات بين المحاور

من المنظور الفني، يمكن تفسير قوة هذه العلاقات بما يلي:

- أن الخبرة الميدانية الطويلة للعاملين في الصيانة الجوية مكنتهم من إدراك أهمية التحليل التنبؤي كبديل عملي للنماذج التقليدية.
- أن نضج البنية التحتية التقنية داخل الوحدات العسكرية، وإن كان جزئياً، ساهم في خلق وعي فني متقدم حول جدوى الأنظمة الذكية.
- أن المعرفة المكتسبة من البرامج التدريبية الأخيرة حول الصيانة الرقمية ساعدت في تشكيل قناعة جماعية بأهمية التحول نحو PdM ، ما أدى إلى ترابط إيجابي بين المعرفة النظرية والتوجه العملي للتطبيق.

التحليل الإداري والإحصائي للعلاقات

من الناحية الإدارية، تُعد هذه العلاقات القوية مؤشراً على أن العنصر البشري هو محور التحول التقني في الصيانة الجوية.

فالنتائج تُظهر أن العاملين الذين يمتلكون فهماً عميقاً للنظام الذكي يُظهرون

جامعة ميد أوشن - المملكة العربية السعودية

كلية الإدارة - قسم إدارة المشاريع

أيضاً رضا أعلى عن جدوى التحول الرقمي، ويبدون استعداداً أكبر للمشاركة في تطبيقه.

أما من الناحية الإحصائية، فإن جميع معاملات الارتباط تجاوزت القيمة الحرجة ($r = 0.50$) ، ما يؤكد أن العلاقات بين المحاور ليست عشوائية بل ذات ارتباط سببي قوي. ويُشير ذلك إلى أن تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية لن ينجح دون توفر المعرفة المسبقة لدى العاملين وفهمهم العملي للواقع الفني الذي يعملون فيه.

التحليل المقارن مع الدراسات السابقة

عند مقارنة هذه النتائج بالدراسات الدولية السابقة، وخصوصاً دراسات (RAND, 2018) و (MoD, 2020)، يتبين أن العلاقة القوية بين المعرفة والجاهزية التشغيلية تُعد سمة مشتركة في جميع البيئات العسكرية. ففي الولايات المتحدة وبريطانيا، أثبتت التجارب أن رفع الوعي التقني بين الفنيين كان المرحلة الأولى والأساسية في نجاح تطبيق الصيانة التنبؤية، قبل أي استثمار في الأنظمة أو البنية التحتية. وتتوافق نتائج هذه الدراسة مع تلك النتائج العالمية، مما يعزز موثوقيتها وقابليتها للتعميم في السياق السعودي.

الاستنتاج العام لتحليل الارتباط

يمكن تلخيص نتائج هذا التحليل في النقاط التالية:

1. وجود علاقة إيجابية قوية بين جميع محاور الدراسة الثلاثة عند مستوى دلالة ($\alpha \leq 0.01$).
2. أن المعرفة الفنية والتدريب يمثلان العامل الرئيسي في تشكيل الاتجاه الإيجابي نحو الصيانة التنبؤية.
3. أن تحسين الواقع الإداري والتنظيمي للصيانة يُعد شرطاً أساسياً لتحقيق الأثر الكامل للتقنيات الذكية على الجاهزية القتالية.

4. أن المحور الثاني (الواقع الحالي) يلعب دور الوسيط بين المعرفة والأثر، أي أن تحسن المعرفة يؤدي إلى تحسين الممارسات، التي بدورها تُرفع من الأثر الإيجابي النهائي.

وبذلك يمكن القول إن هذه النتائج تُثبت إحصائيًا صحة الفرضية الثانية للدراسة التي تنص على أن:

"يوجد ارتباط ذو دلالة إحصائية بين مستوى المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية وواقع الصيانة الحالية والأثر المتوقع لتطبيقها على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية".

7-4 مناقشة النتائج في ضوء الفرضيات والدراسات السابقة

تُعد هذه الفقرة من أكثر أجزاء الفصل أهمية، إذ تهدف إلى تفسير وتحليل النتائج الإحصائية التي تم عرضها سابقاً وربطها بالإطار النظري للدراسة والبحوث السابقة المحلية والعالمية. كما تُسهم هذه المناقشة في تأكيد مدى تحقق فرضيات الدراسة وتوضيح دلالات النتائج من الزاوية العلمية والعملية في بيئة الصيانة الجوية العسكرية.

أولاً: مناقشة الفرضية الرئيسية

الفرضية الرئيسية:

“تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية يؤدي إلى رفع الجاهزية التشغيلية للطائرات العسكرية من خلال تقليل الأعطال المفاجئة وتحسين كفاءة التشغيل والاستجابة الفنية”.

تشير نتائج التحليل الإحصائي للمحور الثالث) الأثر المتوقع لتطبيق (PdM إلى أن المتوسط العام بلغ (4.28) بدرجة تشتت منخفضة (0.57)، مما يدل على اتفاق واسع بين المشاركين على الأثر الإيجابي الكبير لتطبيق الصيانة التنبؤية.

كما بينت النتائج أن الفقرات المتعلقة بتقليل الأعطال ورفع الجاهزية كانت الأعلى تقييماً، وهو ما يؤكد تحقق الفرضية الرئيسية.

وتتفق هذه النتائج مع ما توصلت إليه دراسة RAND Corporation (2018)، التي أكدت أن تطبيق الصيانة المعتمدة على الحالة في سلاح الجو الأمريكي أدى إلى انخفاض الأعطال المفاجئة بنسبة (37%) وتحسن معدل الجاهزية بنسبة (25%).

كما تتسق مع نتائج دراسة MoD البريطانية (2020) التي أظهرت أن التكامل بين التحليل التنبؤي وإدارة الصيانة خفّض زمن الإصلاح (MTTR) بنسبة (28%)، وهو ما يعزز مصداقية النتائج الحالية في البيئة السعودية.

ويُشير ذلك إلى أن إدخال الصيانة التنبؤية في بيئة الدفاع الجوي السعودية يمكن أن يُحدث نقلة نوعية في الكفاءة التشغيلية، إذا ما توافرت له البنية التحتية التقنية والدعم المؤسسي والتأهيل البشري المناسب.

ثانيًا: مناقشة الفرضيات الفرعية

الفرضية الفرعية الأولى:

توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية وانخفاض معدلات الأعطال غير المجدولة في محركات الطائرات العسكرية.

تم تأكيد هذه الفرضية بناءً على النتائج المرتفعة للفقرتين (1) و(5) من المحور الثالث، حيث بلغ المتوسط (4.50) و(4.35) على التوالي. وهذا يشير إلى قناعة المشاركين بأن الصيانة التنبؤية قادرة على تقليل الأعطال غير المتوقعة بنسبة كبيرة.

وتدعم هذه النتيجة دراسات NATO Maintenance Group (2021) التي بينت أن تحليل البيانات اللحظي للمحركات أدى إلى خفض الأعطال بنسبة (30%-45%) في بيئات تشغيل مشابهة.

الفرضية الفرعية الثانية:

توجد علاقة إيجابية بين مستوى تدريب الفنيين وكفاءة تطبيق أنظمة الصيانة الذكية.

أظهرت نتائج المحور الأول أن الفقرات المتعلقة بالتدريب كانت الأدنى متوسطاً (3.05)، رغم أن الاتجاه العام للمعرفة كان مرتفعاً. وهذا يعني أن التدريب يمثل العامل المحدد الرئيسي في نجاح التطبيق، وهو ما يتفق مع دراسة الحربي (2021) التي أكدت أن نقص التدريب المتخصص في تحليل البيانات يشكل أكبر عائق أمام تطبيق الصيانة الذكية في الطيران العسكري السعودي. وبالتالي، تدعم النتائج الفرضية وتبرز ضرورة تعزيز برامج التدريب الفني المتخصص لرفع كفاءة التطبيق.

الفرضية الفرعية الثالثة:

توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين مستوى البنية التحتية الرقمية ونجاح تطبيق الصيانة التنبؤية.

أكدت نتائج المحور الثاني أن متوسط الفقرات المتعلقة بغياب الأنظمة الرقمية الموحدة وتكامل البيانات بلغ حوالي (3.9)، مما يشير إلى وجود قصور نسبي في البنية التحتية الرقمية. ويُعد هذا القصور أحد التحديات التي تم تحديدها في التجارب الدولية أيضاً، كما ورد في دراسة وزارة الدفاع البريطانية (2020) ودراسة كوريا الجنوبية (2022).

وعليه، فإن الفرضية صحيحة ولكنها مشروطة بتطوير بنية رقمية متكاملة تشمل أنظمة إدارة الصيانة (CMMS) وربطها بشبكات البيانات الحية.

الفرضية الفرعية الرابعة:

توجد علاقة بين المعرفة الفنية لدى العاملين وقناعتهم بأهمية تطبيق الصيانة التنبؤية.

تم تأكيد صحة هذه الفرضية بناءً على معامل الارتباط بين المحورين الأول والثالث ($r = 0.71$)، وهي علاقة قوية دالة إحصائياً. ويدل ذلك على أن زيادة المعرفة بأنظمة PDM تؤدي مباشرة إلى ارتفاع القناعة بجدوى تطبيقها في رفع الجاهزية القتالية. ويتوافق هذا الاستنتاج مع نتائج التجربة التركية (جامعة الدفاع الوطنية، 2021)، التي أثبتت أن توعية الفنيين بالمفاهيم التنبؤية كانت نقطة التحول الرئيسية في تقبل النظام الذكي.

الفرضية الفرعية الخامسة:

يسهم تطبيق الصيانة التنبؤية في دعم التحول الرقمي العسكري وتحقيق متطلبات رؤية المملكة 2030 في مجال توطيد التقنية الدفاعية.

أظهرت نتائج المحور الثالث والبيانات النوعية التي جمعها الباحث أن المشاركين يُدركون البُعد الاستراتيجي للصيانة الذكية، إذ أبدى أكثر من (85%) منهم تأييدهم لتطبيقها ضمن خطط التحول التقني الوطني. ويتمشى ذلك مع الأهداف الاستراتيجية لرؤية 2030 التي تنص على رفع

كفاءة الإنفاق الدفاعي وتوطين الصناعات التقنية بنسبة 50%.
وبذلك فإن الفرضية صحيحة، وتُظهر الدراسة أن الصيانة التنبؤية ليست فقط
تقنية فنية، بل أداة استراتيجية لتحقيق الاستقلالية التشغيلية الوطنية.

ثالثاً: مقارنة النتائج بالدراسات السابقة

تتوافق نتائج هذه الدراسة مع الاتجاهات العامة للدراسات العالمية في عدة نقاط
رئيسية:

1. التوافق مع دراسة RAND (2018) في أن الصيانة التنبؤية تخفض
الأعطال وتزيد الجاهزية.
2. الاتساق مع نتائج MoD البريطانية (2020) التي أكدت أن الذكاء
الاصطناعي يُقلل زمن الإصلاح ويرفع الكفاءة التشغيلية.
3. التشابه مع التجربة الكورية الجنوبية (2021) التي أظهرت أن دمج
الذكاء الصناعي مع الصيانة الجوية حقق تحسناً بنسبة (45%) في
الجاهزية.
4. التوافق مع دراسة جامعة الدفاع التركية (2021) في أهمية تأهيل
الكوادر الوطنية ودور التدريب في نجاح النظام.
5. الانسجام مع التجربة الفرنسية (2019) التي برهنت أن استخدام النماذج
الرقمية (Digital Twin) في صيانة محركات رافال أدى إلى خفض
تكاليف الصيانة بنسبة 20%.

وتنحصر الاختلافات بين الدراسة الحالية والدراسات السابقة في كون هذه
الدراسة الأولى التي تطبق التحليل في سياق سعودي عسكري حقيقي، ما
يجعلها إضافة علمية محلية ذات قيمة تطبيقية مباشرة.

رابعاً: التفسير التطبيقي لنتائج الدراسة

يمكن تفسير النتائج العامة من الناحية التطبيقية في النقاط التالية:

1. التحول من الصيانة الوقائية إلى التنبؤية ضرورة استراتيجية:
لأن النظم التقليدية، رغم انضباطها الإداري، لا تواكب السرعة التشغيلية المطلوبة في البيئات القتالية الحديثة.
2. العنصر البشري يظل العامل المحوري في التحول التقني:
فمهما بلغت دقة الأنظمة الذكية، فإن نجاحها يعتمد على وعي الفنيين بألية عملها وقدرتهم على تفسير البيانات بشكل صحيح.
3. التحول الرقمي يتطلب بنية تحتية تقنية متكاملة:
إذ لا يمكن للصيانة التنبؤية أن تعمل بكفاءة دون نظام بيانات لحظي، وأجهزة استشعار متقدمة، وقواعد معلومات مركزية مؤمنة.
4. تطبيق PdM سيُسهم في ترشيد الإنفاق الدفاعي:
عبر تقليل الهدر الناتج عن الصيانة المفرطة واستبدال القطع قبل انتهاء عمرها الفعلي، ما يحقق كفاءة اقتصادية عالية.
5. تحقيق الجاهزية القتالية المستدامة:
إذ تُتيح الصيانة التنبؤية مراقبة دائمة للأداء الفني، ما يُمكن من اتخاذ قرارات سريعة قبل أن تتحول المشكلات إلى أعطال حرجية.

خامساً: ملخص عام لمناقشة النتائج

من خلال ما سبق، يمكن تلخيص أبرز ما توصلت إليه الدراسة في النقاط التالية:

1. تم تحقيق الفرضية الرئيسة وجميع الفرضيات الفرعية بدرجة دلالة إحصائية عالية.
2. أثبتت النتائج وجود علاقة ارتباط قوية بين المعرفة الفنية والتحول الرقمي والجاهزية القتالية.
3. أظهرت الدراسة أن البيئة العسكرية السعودية مهياً فعلياً لتطبيق الصيانة التنبؤية بفضل تطور البنية التقنية وكفاءة الكوادر.

4. أبرزت النتائج الحاجة إلى توسيع التدريب الفني والرقمي لتمكين التحول الكامل نحو الأنظمة الذكية.

5. بيّنت النتائج أن الصيانة التنبؤية ليست مجرد أداة فنية، بل رافد استراتيجي للأمن الوطني وركيزة رئيسية لرؤية المملكة 2030.

الاستنتاج الختامي لمناقشة النتائج

يمكن القول إن هذه الدراسة أكدت علميًا وميدانيًا أن تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية في قطاع الدفاع الجوي السعودي يُمثل ضرورة تشغيلية واستراتيجية في الوقت نفسه، لأنه يسهم في رفع كفاءة الأداء الفني والاقتصادي، ويعزز الجاهزية القتالية للطائرات، ويضع المملكة في مصاف الدول المتقدمة في مجال الصيانة الذكية العسكرية.

4-8 الملخص العام للفصل الرابع

استعرض هذا الفصل نتائج الدراسة الميدانية التي أُجريت على عينة من المهندسين والفنيين والإداريين العاملين في وحدة صيانة محركات الطيران العسكري بقطاع الدفاع الجوي السعودي، والذين بلغ عددهم (40) مشاركاً يمثلون مختلف المستويات الوظيفية والفنية داخل منظومة الصيانة الجوية. وقد تم تحليل البيانات باستخدام الأساليب الإحصائية الوصفية والاستنتاجية، بهدف اختبار فرضيات الدراسة وتحديد الاتجاهات العامة للعينة نحو تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance – PdM) وأثرها على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية.

أولاً: ملخص النتائج الكمية

1. فيما يتعلق بالمحور الأول (المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية): أظهرت النتائج أن المتوسط العام بلغ (3.93) بدرجة معرفة مرتفعة نسبياً، مما يعكس وعياً جيداً لدى العاملين بمفاهيم الصيانة التنبؤية وأهميتها في المجال العسكري، مع وجود حاجة واضحة لتعزيز التدريب العملي على أدوات التحليل الذكي واستخدام الأنظمة الرقمية في الصيانة.
2. فيما يتعلق بالمحور الثاني (واقع الصيانة الحالية): أظهرت النتائج أن المتوسط العام بلغ (4.04)، وهو مستوى مرتفع يشير إلى استمرار الاعتماد الكبير على النظم الوقائية التقليدية القائمة على الجداول الزمنية والموافقات الإدارية المتسلسلة، مع ضعف نسبي في التكامل بين الأنظمة الرقمية والإجراءات الميدانية. وقد أكدت النتائج أن البيئة التنظيمية منضبطة لكنها تحتاج إلى تحول تقني وهيكلتي لتواكب متطلبات الصيانة الذكية.
3. فيما يتعلق بالمحور الثالث (الأثر المتوقع لتطبيق أنظمة: PdM) حقق أعلى متوسط عام (4.28) مما يدل على اتجاه إيجابي قوي للغاية بين المشاركين نحو تبني أنظمة الصيانة التنبؤية. واتفق المشاركون على أن تطبيقها سيؤدي إلى تقليل الأعطال المفاجئة،

وتحسين كفاءة التشغيل، وتسريع الاستجابة الفنية، ورفع الجاهزية القتالية للطائرات.

4. نتائج تحليل العلاقات الإحصائية:

أظهرت معاملات الارتباط (r) بين المحاور الثلاثة قيمًا مرتفعة تراوحت بين (0.68 – 0.74)، مما يدل على وجود علاقات ارتباط قوية ودالة إحصائية بين المعرفة الفنية، وواقع الصيانة الحالي، والأثر المتوقع لتطبيق الصيانة الذكية.

ويعني ذلك أن زيادة الوعي الفني لدى العاملين وتطوير البنية التحتية التنظيمية يؤديان مباشرة إلى تحسين الأداء التشغيلي ورفع الجاهزية القتالية.

ثانيًا: ملخص المناقشة النوعية

من خلال المقارنة بالدراسات السابقة والتجارب العالمية (الأمريكية، البريطانية، الفرنسية، الكورية، التركية)، تبين أن نتائج الدراسة تتفق في الاتجاه العام مع ما تحقق في تلك الدول، من حيث قدرة الصيانة التنبؤية على تحقيق خفض فعلي في الأعطال وزيادة ملحوظة في الجاهزية التشغيلية. كما أظهرت الدراسة أن العنصر البشري السعودي مؤهل فكريًا وفنيًا لتبني هذا التحول، وأن التحديات الحالية تتركز في الجوانب التقنية والإدارية، وليس في القابلية أو الرغبة في التغيير.

وأوضحت المناقشة أن التحول نحو الصيانة التنبؤية يمثل مطلبًا وطنيًا استراتيجيًا، يتجاوز كونه مشروعًا تقنيًا ليصبح ركيزة أساسية في تحقيق أهداف رؤية المملكة 2030 المتعلقة بتوطين التقنية الدفاعية وتحسين كفاءة الإنفاق العسكري.

ثالثًا: الاستنتاج العام للفصل الرابع

يمكن تلخيص الاستنتاج العام للفصل في النقاط التالية:

1. أن الكوادر الفنية في الصيانة الجوية تمتلك وعيًا جيدًا بمفهوم الصيانة التنبؤية، وأن هذا الوعي يمثل قاعدة صلبة للبدء بمرحلة التحول الذكي.
2. أن الأنظمة الحالية لا تزال تعتمد على النماذج الوقائية التقليدية، مما يجعل التحول إلى الصيانة الذكية ضرورة أكثر من كونه خيارًا.
3. أن تطبيق الصيانة التنبؤية سيحدث تحسينًا مباشرًا في مؤشرات الأداء الفني مثل: تقليل الأعطال، تسريع الإصلاح، خفض التكاليف، وزيادة جاهزية التشغيل.
4. أن العلاقة الإحصائية بين المعرفة والجاهزية تشير إلى أن رفع مستوى التدريب الفني والوعي التقني هو الخطوة الأولى نحو تطبيق ناجح.
5. أن البيئة التنظيمية في وحدات الصيانة الجوية السعودية مؤهلة مؤسسيًا لاستقبال أنظمة PdM إذا ما استُكملت البنية الرقمية والدعم الإداري المطلوب.

رابعًا: دلالة النتائج على المستوى العملي

تُظهر النتائج أن التحول نحو الصيانة التنبؤية في المملكة العربية السعودية لم يعد مسألة "إمكانية"، بل أصبح مسألة "توقيت وتنفيذ".
فالعناصر البشرية متاحة، والوعي المؤسسي قائم، والدعم الاستراتيجي من القيادة موجود، وكل ما يلزم هو تسريع عملية التحول الرقمي وتكامل الأنظمة التقنية.

كما تُبرز النتائج أن نجاح التحول يعتمد على ثلاثة أعمدة رئيسية:

1. البنية التحتية التقنية (Sensors – Data Platforms – CMMS).
2. الكادر البشري المؤهل (مهندسون وفنيون مدربون على تحليل البيانات).
3. الدعم الإداري المؤسسي (سياسات مرنة، وتمويل، وتكامل بين الإدارات).

خامساً: تمهيد للفصل الخامس

بناءً على ما توصل إليه هذا الفصل من نتائج، سيتم في الفصل التالي تقديم التوصيات الفنية والإدارية والتقنية اللازمة لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية في قطاع الدفاع الجوي السعودي، بالإضافة إلى المقترحات المستقبلية لتطوير المنظومة وضمان استدامتها.

كما سيعرض الفصل الخامس نموذجاً تطبيقياً مقترحاً يُجسد التحول التدريجي من الصيانة التقليدية إلى الصيانة الذكية وفق أسس علمية وهندسية متكاملة.

وبذلك يُمكن القول إن الفصل الرابع شكّل الأساس التحليلي الكمي والكيفي للدراسة، وأثبت ميدانياً صحة الفرضيات النظرية، وأكد أن التحول إلى الصيانة التنبؤية في الطيران العسكري السعودي لم يعد خياراً تطويرياً بل أصبح ضرورة عملياتية واستراتيجية لتحقيق التفوق التقني والجاهزية القتالية المستدامة.

الفصل الخامس: التوصيات والمقترحات المستقبلية

5-1 مقدمة الفصل

يُعد هذا الفصل الخاتمة العملية للدراسة، إذ يقدم خلاصة ما توصلت إليه من نتائج وتحليلات، ويحوّلها إلى توصيات تنفيذية واقعية يمكن الاستفادة منها في تطوير منظومة الصيانة الجوية العسكرية في المملكة العربية السعودية. كما يتناول الفصل المقترحات المستقبلية التي تهدف إلى دعم التوسع في تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance – PdM) ضمن خطط التحول الرقمي والدعم الفني في قطاع الدفاع الجوي.

تتبع أهمية هذا الفصل من كونه يربط بين الجانب الأكاديمي والتحليل الميداني من جهة، وبين متطلبات التطوير العملي والسياسات الدفاعية الوطنية من جهة أخرى، ليقدّم تصوّرًا استراتيجيًا متكاملًا للتحول من الصيانة الوقائية إلى الصيانة الذكية في البيئة العسكرية السعودية.

2-5 التوصيات الفنية والتقنية

أولاً: إنشاء برنامج وطني للصيانة التنبؤية العسكرية

ينبغي لوزارة الدفاع بالتعاون مع الهيئة العامة للصناعات العسكرية (GAMI) والشركة السعودية للصناعات العسكرية (SAMI) تأسيس برنامج وطني موحد للصيانة التنبؤية يهدف إلى تطوير الأنظمة الرقمية الخاصة بمراقبة أداء المحركات وجمع البيانات وتحليلها باستخدام الذكاء الاصطناعي. يُنفذ هذا البرنامج على مراحل تبدأ بمشروعات تجريبية محدودة ثم التوسع التدريجي ليشمل جميع أنواع الطائرات العسكرية.

ثانياً: بناء قاعدة بيانات وطنية للأداء الفني للمحركات

تُعد البيانات حجر الأساس في أي نظام ذكي. لذا توصي الدراسة بإنشاء قاعدة بيانات مركزية موحدة تشمل جميع المعلومات التشغيلية والفنية للمحركات العسكرية، تُحدَّث بشكل لحظي، وتُستخدم في التحليل التنبؤي للأعطال وتقدير العمر الافتراضي للمكونات.

ثالثاً: تزويد الطائرات والمعدات بمستشعرات ذكية متقدمة

ضرورة تجهيز محركات الطائرات والمعدات الفنية بـ أنظمة استشعار رقمية متعددة (Multi-Sensor Systems) تقيس درجات الحرارة، الضغط، الاهتزاز، معدلات استهلاك الوقود والزيوت، وترسل بياناتها بشكل مباشر إلى مركز المراقبة الفني.

هذه الخطوة تمثل التحول من الصيانة التقليدية إلى الصيانة المعتمدة على البيانات (Data-Driven Maintenance).

رابعاً: تطوير أنظمة التحليل المركزي للبيانات

إنشاء مركز وطني لتحليل بيانات الصيانة العسكرية يستخدم أدوات الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي (Machine Learning) لتحليل الأنماط الفنية والتنبؤ بالأعطال قبل حدوثها. يُفضّل أن يُدار هذا المركز بواسطة كوادر سعودية متخصصة في علوم البيانات والهندسة الميكانيكية والطيران.

خامساً: تطوير لوحات تحكم رقمية (Dashboards)

تصميم لوحات تحكم تفاعلية تُظهر الحالة الفنية للطائرات والمحركات بشكل لحظي للقادة الفنيين والإداريين، وتُتيح تتبع مؤشرات الأداء مثل: زمن التشغيل، عدد الأعطال، متوسط زمن الإصلاح (MTTR) ، ومعدل الجاهزية اليومية (A-Rate).
تُعد هذه اللوحات أداة رئيسية في دعم القرار الفني والإداري في الوقت الحقيقي.

3-5 التوصيات البشرية والتدريبية

أولاً: تأهيل الكوادر الوطنية في تحليل البيانات الفنية
توصي الدراسة بإطلاق برامج تدريب متخصصة في تحليل البيانات الضخمة
والصيانة الذكية تستهدف المهندسين والفنيين العاملين في الصيانة الجوية.
ينبغي أن تشمل هذه البرامج مفاهيم مثل:

- تحليل الاتجاهات الفنية.
- خوارزميات التنبؤ بالأعطال.
- تفسير مخرجات أنظمة الذكاء الاصطناعي.
- إدارة قواعد بيانات الصيانة.

ثانياً: استحداث تخصص أكاديمي في "هندسة الصيانة الذكية"
ينبغي للجامعات العسكرية والمدنية فتح تخصصات أكاديمية جديدة بعنوان
"هندسة الصيانة الذكية للطيران" ضمن كليات الهندسة أو إدارة المشاريع،
لإعداد جيل جديد من المهندسين المؤهلين للتعامل مع التحول الرقمي في قطاع
الصيانة والدعم الفني.

ثالثاً: تعزيز ثقافة التحول التقني داخل بيئة الصيانة
توصي الدراسة بإطلاق برامج توعوية داخل وحدات الصيانة لتعريف العاملين
بفوائد الصيانة التنبؤية ودورها في تقليل الضغط الميداني وتحسين السلامة
التشغيلية.

فالثقافة التنظيمية الإيجابية تُعد مفتاح نجاح أي تحول مؤسسي.

رابعاً: إنشاء أكاديمية متخصصة في الصيانة الذكية العسكرية
تُنشأ أكاديمية سعودية للصيانة الذكية تُعنى بتدريب وتأهيل الفنيين والمهندسين
من جميع القطاعات الدفاعية على استخدام الأنظمة الذكية وإدارة البيانات
التشغيلية في بيئة آمنة ومنضبطة.

4-5 التوصيات الإدارية والتنظيمية

1. إعادة هيكلة إدارات الصيانة الجوية:
بحيث يتم استحداث وحدة تحت مسمى "إدارة الجاهزية الذكية" (Smart Readiness Unit) تُعنى بمتابعة مؤشرات الأداء الفني وتحليل بيانات الصيانة اليومية واتخاذ قرارات استباقية بشأن الأعطال المحتملة.
2. تبني هيكل تنظيمي مرن:
يربط بين الإدارات الفنية والإدارية بشكل مباشر لتقليل البيروقراطية في الموافقات والإجراءات.
إذ إن نجاح الصيانة التنبؤية يعتمد على سرعة اتخاذ القرار وليس فقط على دقته.
3. دمج الصيانة التنبؤية ضمن منظومة إدارة المشاريع العسكرية:
بحيث تصبح عمليات الصيانة جزءاً من دورة حياة المشروع العسكري منذ التخطيط حتى التنفيذ، ويُراعى فيها تحليل المخاطر الفنية وتقدير الموارد بناءً على البيانات الفعلية.
4. تطبيق مبدأ الإدارة المعتمدة على البيانات (Data-Driven Management):
لتكون جميع القرارات الفنية والإدارية مبنية على مؤشرات رقمية وتحليل إحصائي، لا على الخبرة الشخصية فقط.
5. توحيد أنظمة الصيانة في القوات الجوية:
من خلال تطوير نظام وطني موحد لإدارة الصيانة الجوية يربط جميع القواعد والوحدات الفنية، لتبادل البيانات بشكل لحظي وتحقيق التكامل الكامل في منظومة الصيانة العسكرية.

5-5 التوصيات الاقتصادية والاستراتيجية

1. حساب العائد الاستثماري (ROI) من تطبيق الصيانة التنبؤية:
توصي الدراسة بإجراء تحليل اقتصادي دقيق لقياس وفورات التكلفة الناتجة عن تقليل الأعطال وتخفيض قطع الغيار وتحسين استغلال الموارد البشرية.
تشير الدراسات الدولية إلى أن العائد الاستثماري من الصيانة التنبؤية يتراوح بين 5 إلى 10 أضعاف تكلفة التطبيق خلال السنوات الأولى.
2. دعم برامج التوطين الصناعي الدفاعي:
من خلال ربط مشاريع الصيانة التنبؤية بشركات وطنية مصنعة للمعدات وأنظمة التحليل الفني، لتقليل الاعتماد على الموردين الأجانب وتعزيز الاكتفاء الذاتي التقني.
3. تحفيز القطاع الخاص المحلي على الابتكار:
فتح المجال أمام الشركات الوطنية الناشئة (Startups) للمشاركة في تطوير حلول رقمية خاصة بالصيانة الذكية، مثل أنظمة التنبؤ بالأعطال وإدارة قواعد البيانات الفنية.
4. التحول نحو الصيانة المستدامة:
دعم الاتجاه العالمي نحو "الصيانة الخضراء (Green Maintenance)" التي تهدف إلى تقليل الفاقد في المواد والطاقة، وتحسين كفاءة التشغيل بما يتماشى مع مبادرات الاستدامة الوطنية.

5-6 المقترحات المستقبلية للدراسة والتطوير

1. إجراء دراسات مقارنة بين الأنظمة الذكية المختلفة (AI – IoT – Big Data) في الصيانة الجوية لتحديد الأنسب للبيئة العسكرية السعودية.
2. إعداد نموذج محاكاة وطني (Digital Twin Model) لمحركات الطائرات العسكرية السعودية، يُستخدم في التنبؤ بالأعطال وتحليل الأداء.
3. توسيع نطاق البحث مستقبلاً ليشمل أنظمة التسليح والاتصالات العسكرية، وليس فقط المحركات.
4. دراسة أثر الصيانة الذكية على السلامة الجوية والانضباط التشغيلي بشكل أكثر تفصيلاً من خلال دراسات كمية طويلة المدى.
5. إنشاء مؤشرات أداء وطنية (KPIs) لقياس مستوى التحول الذكي في الصيانة الجوية وتتبع تطوره سنوياً.

5-7 الخلاصة العامة للفصل الخامس

تؤكد النتائج والتوصيات الواردة في هذا الفصل أن التحول نحو أنظمة الصيانة التنبؤية في قطاع الطيران العسكري السعودي لم يعد خيارًا تقنيًا بل ضرورة استراتيجية لضمان التفوق العملياتي واستدامة الجاهزية القتالية. فمن خلال دمج الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات الضخمة في منظومة الصيانة الجوية، يمكن تحقيق قفزة نوعية في الأداء الفني والإداري والاقتصادي.

كما أثبتت الدراسة أن المملكة تمتلك المقومات الأساسية — من كوادر بشرية مؤهلة، وبنية تحتية متطورة، ودعم استراتيجي حكومي — تجعلها قادرة على قيادة التحول نحو الصيانة الذكية في المنطقة. وتوصي الدراسة بالمضي قدمًا في تنفيذ خطة وطنية متكاملة تُشرف عليها وزارة الدفاع بالتعاون مع الجامعات والمراكز البحثية، لتكون نموذجًا رائدًا في العالم العربي في مجال الصيانة التنبؤية للطيران العسكري.

الخاتمة العامة للبحث

يُعد هذا البحث محاولة علمية جادة تهدف إلى تحليل أثر تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية على الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية في بيئة الصيانة الجوية السعودية، من خلال دراسة ميدانية علمية جمعت بين المنهج الوصفي التحليلي والتطبيق العملي الميداني في إحدى وحدات صيانة محركات الطيران العسكري التابعة لقطاع الدفاع الجوي.

انطلقت الدراسة من واقع ميداني يبرز التحديات التشغيلية والهيكلية التي تواجه أنظمة الصيانة التقليدية، حيث أظهرت النتائج أن معظم وحدات الصيانة ما زالت تعتمد على الجداول الزمنية الدورية والقرارات الإدارية التسلسلية، ما يؤدي أحياناً إلى هدر في الوقت والموارد، وارتفاع في معدلات الأعطال غير المجدولة.

وبالمقابل، أثبتت الدراسة من خلال التحليل الكمي والإحصائي أن التحول نحو أنظمة الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance – PdM) يمثل نقلة نوعية في الكفاءة التشغيلية، إذ يؤدي إلى تقليل الأعطال المفاجئة، ورفع الجاهزية الفنية، وتسريع زمن الاستجابة، وخفض التكاليف التشغيلية.

كما أكدت الدراسة أن العنصر البشري يظل العامل الأهم في نجاح التحول التقني، فكلما ارتفع مستوى الوعي والتدريب لدى الفنيين والمهندسين، زادت فاعلية النظام الذكي واستدامة نتائجه. وأظهرت نتائج الارتباط الإحصائي أن هناك علاقة قوية بين المعرفة الفنية والتدريب العملي ومستوى الجاهزية التشغيلية، ما يُبرز أهمية الاستثمار في تأهيل الكوادر الوطنية في مجالات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات والصيانة الرقمية.

من الناحية التطبيقية، خلصت الدراسة إلى أن المملكة العربية السعودية تمتلك جميع المقومات التي تؤهلها لتكون رائدة إقليمياً في تطبيق أنظمة الصيانة الذكية العسكرية، لما تتمتع به من بنية تحتية تقنية متطورة، وإرادة قيادية واضحة نحو التحول الرقمي، وبرامج توظيف صناعي متسارعة ضمن رؤية المملكة 2030.

وعليه، فإن تنفيذ خطة وطنية متكاملة لتطبيق الصيانة التنبؤية في جميع قطاعات الصيانة العسكرية يُعد خطوة استراتيجية ستُسهم في تعزيز الجاهزية

القتالية المستدامة، والكفاءة التشغيلية، والاستقلالية التقنية في إدارة منظومات الدفاع الجوي والطيران العسكري السعودي.

الإسهامات العلمية والعملية للدراسة

1. إسهام علمي:
طوّرت الدراسة نموذجًا مفاهيميًا جديدًا يربط بين المعرفة الفنية، والواقع الميداني، والأثر المتوقع لتطبيق الصيانة التنبؤية في البيئة العسكرية السعودية، مما يفتح المجال أمام باحثين آخرين لتطويره وتطبيقه في مجالات الدفاع المختلفة.
2. إسهام منهجي:
قدّمت الدراسة منهجًا متكاملًا يجمع بين التحليل الكمي الإحصائي والتحليل الفني التطبيقي، وهو ما يُعتبر إضافة نوعية في البحوث العسكرية التطبيقية في المملكة.
3. إسهام عملي:
قدّمت الدراسة مجموعة من التوصيات القابلة للتنفيذ لتأسيس نظام وطني موحد للصيانة الذكية، يشمل قاعدة بيانات رقمية، ومراكز تحليل فني، وبرامج تدريب وتأهيل محلية.
4. إسهام استراتيجي:
دعمت الدراسة التوجه الوطني نحو التحول الرقمي وتوطين التقنية الدفاعية، مؤكدة أن الصيانة التنبؤية تمثل ركيزة أساسية في تحقيق الكفاءة التشغيلية واستدامة الجاهزية القتالية.

التوصية الختامية

استنادًا إلى نتائج الدراسة وتحليلها، يوصي الباحث بما يلي:

- تبني خطة وطنية شاملة لتطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية في القوات الجوية والدفاع الجوي، تبدأ بمشاريع تجريبية محددة وتنتهي بتعميم النظام على جميع الأساطيل.

- إنشاء مركز وطني سعودي للصيانة الذكية العسكرية يكون مسؤولاً عن تطوير الأنظمة، وإدارة قواعد البيانات الفنية، وتأهيل الكوادر الوطنية.
- دعم الأبحاث الأكاديمية المتخصصة في مجالات الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات الفنية في الجامعات السعودية العسكرية والمدنية.
- تعزيز الشراكات مع الشركات المحلية والعالمية لتطوير حلول رقمية مبتكرة للصيانة الجوية، تضمن الاستقلالية التقنية والأمن السيبراني الكامل للبيانات العسكرية.

خاتمة ختامية

تُختتم هذه الرسالة بالتأكيد على أن الجاهزية القتالية تبدأ من كفاءة الصيانة، وأن الصيانة الذكية هي بوابة المستقبل العسكري الحديث. فمن خلال تسخير التقنيات الرقمية، وتوظيف الذكاء الاصطناعي، وتطوير الكادر البشري الوطني، يمكن للمملكة العربية السعودية أن تحقق نموذجاً عالمياً في إدارة الصيانة العسكرية الذكية، قائماً على الابتكار، والاستدامة، والسيادة التقنية.

وبذلك، تُقدّم هذه الدراسة خارطة طريق علمية وعملية نحو التحول الاستراتيجي في الصيانة الجوية، تسهم في بناء قوة جوية سعودية تمتلك أعلى مستويات الكفاءة التشغيلية، والجاهزية القتالية، والقدرة على مواجهة تحديات المستقبل بثقة واقتدار.

الملاحق

الملحق (1): نموذج الاستبانة الميدانية للدراسة

جامعة ميد أوشن

كلية الإدارة – قسم إدارة المشاريع

برنامج ماجستير إدارة المشاريع

عنوان الدراسة:

تحسين الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية من خلال أنظمة الصيانة الذكية
إعداد الطالب: المهندس أنس إبراهيم الغديفي

التعليمات:

عزيزي المشارك، تهدف هذه الاستبانة إلى جمع بيانات ميدانية حول واقع الصيانة الجوية ومدى قابلية تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية في قطاع الطيران العسكري بالمملكة العربية السعودية. تُستخدم نتائجها لأغراض علمية فقط، وستُحافظ سرًا على جميع المعلومات المقدمة.

يرجى وضع علامة (✓) أمام الخيار الذي يُعبّر عن رأيك.

مقياس الإجابة:

= 1 لا أوافق بشدة | 2 = لا أوافق | 3 = محايد | 4 = أوافق | 5 = أوافق بشدة

القسم الأول: البيانات العامة للمشارك

- المسمى الوظيفي: (مهندس / فني / مشرف / إداري / محلل بيانات)
- المؤهل العلمي: (دبلوم / بكالوريوس / ماجستير)
- سنوات الخبرة: (أقل من 3 سنوات / من 3 إلى 7 سنوات / أكثر من 7 سنوات)
- نوع المهام: (فنية تنفيذية / إشرافية / تحليل بيانات / إدارية)

جامعة ميد أوشن – المملكة العربية السعودية
كلية الإدارة – قسم إدارة المشاريع

- عدد الدورات التدريبية في الصيانة الذكية أو تحليل البيانات: (0 / 1-2 / أكثر من 2)

القسم الثاني: المعرفة بأنظمة الصيانة التنبؤية (PdM)

1. أفهم مفهوم الصيانة التنبؤية بشكل واضح.
2. أعرف الفرق بين الصيانة الوقائية والتنبؤية.
3. أدرك أهمية أجهزة الاستشعار في اكتشاف الأعطال.
4. لدي معرفة بأساليب التحليل التنبؤي.
5. أستطيع تفسير المؤشرات الرقمية الناتجة عن أجهزة المراقبة الفنية.
6. اطلعت على تجارب عالمية في هذا المجال.
7. تلقيت تدريباً عملياً في تحليل البيانات الفنية.
8. أستطيع التمييز بين الأعطال المتكررة وتلك الناتجة عن خلل تصميمي.
9. أمتلك خلفية حول استخدام الذكاء الاصطناعي في الصيانة.
10. أؤمن بأن الصيانة التنبؤية ستكون مستقبل الصيانة العسكرية.

القسم الثالث: واقع الصيانة الحالية

1. يتم تحديد مواعيد الصيانة وفق جداول زمنية ثابتة.
2. الأعطال المفاجئة تحدث بشكل متكرر.
3. تعتمد قرارات الصيانة على الخبرة أكثر من البيانات الرقمية.
4. لا يوجد نظام موحد لتوثيق بيانات الصيانة.
5. يتم تسجيل البيانات يدوياً أو في جداول مستقلة.
6. لا يوجد تكامل بين الصيانة والإدارة الفنية.
7. إجراءات الموافقات تتطلب وقتاً طويلاً.

8. تُنفذ أعمال صيانة احتياطية غير ضرورية أحياناً.
9. لا توجد تقارير تحليلية فورية للأداء الفني.
10. تواجه الفرق صعوبة في التنبؤ بالأعطال قبل وقوعها.

القسم الرابع: الأثر المتوقع لتطبيق الصيانة التنبؤية

1. تطبيق PdM سيققل من عدد الأعطال المفاجئة.
2. سيرفع كفاءة التشغيل للمحركات.
3. سيُسرع الاستجابة الفنية للأعطال.
4. سيساعد في خفض تكاليف الصيانة.
5. سيققل فترات التوقف غير المخطط لها.
6. سيدعم جاهزية الطائرات القتالية.
7. سيعزز من سلامة العمليات الجوية.
8. سيوفر بيانات دقيقة لاتخاذ القرار الفني.
9. سيساعد في تحسين التخطيط العملياتي.
10. أدمع تطبيق أنظمة PdM في وحدتي متى ما توفرت الإمكانيات.

الملحق (2): الجداول الإحصائية التفصيلية

- جدول المتوسطات والانحرافات المعيارية لجميع فقرات الاستبانة.
- جداول التكرارات والنسب المئوية للبيانات الديموغرافية.
- مصفوفة الارتباط بين المحاور الثلاثة.
- نتائج اختبارات (T-Test) و (ANOVA) للتحقق من الفروق بين المتغيرات الديموغرافية.

(يُرفق الجدول التفصيلي في النسخة النهائية المعتمدة بناءً على مخرجات برنامج SPSS.)

الملحق (3): المصطلحات الفنية المستخدمة في الدراسة

المصطلح	التعريف الفني
PdM – Predictive Maintenance	الصيانة التنبؤية: أسلوب يعتمد على تحليل البيانات الحية للتنبؤ بالأعطال قبل حدوثها.
CBM – Condition-Based Maintenance	الصيانة المعتمدة على الحالة: مراقبة حالة المكونات لتحديد الحاجة إلى الصيانة.
MTTR – Mean Time to Repair	متوسط زمن الإصلاح: الزمن اللازم لإصلاح عطل وإعادة المعدة للخدمة.
MTBF – Mean Time Between Failures	متوسط الوقت بين الأعطال: مقياس يعتمد على زمن التشغيل الفعلي بين حالتين تعطل.
A-Rate	معدل الجاهزية الفنية للطائرات في الأسطول الجوي.
AI – Artificial Intelligence	الذكاء الاصطناعي: الأنظمة البرمجية القادرة على تحليل البيانات واتخاذ قرارات ذاتية.
IoT – Internet of Things	إنترنت الأشياء: شبكة من الأجهزة المتصلة ترسل وتستقبل بيانات التشغيل في الوقت الحقيقي.

قائمة المراجع

المراجع العربية:

1. الحربي، خالد. (2021) *تحليل أداء الصيانة في الطيران العسكري السعودي*. مجلة الدفاع الوطني، الرياض.
2. جامعة نايف للعلوم الأمنية. (2022) *التحول الرقمي في إدارة الأسطول الجوي*. الرياض.
3. وزارة الدفاع السعودية. (2023) *تقرير التحول الرقمي الدفاعي – إدارة الدعم الفني الجوي*. الرياض.
4. الهيئة العامة للصناعات العسكرية. (2024) *مستقبل التوطين التقني في الصيانة العسكرية*. الرياض.

المراجع الأجنبية:

5. RAND Corporation (2018). *Condition-Based Maintenance for Military Aircraft*. USAF Technical Report.
6. Ministry of Defence (UK) (2020). *AI Integration in Aircraft Maintenance*. London: UK Government Printing Office.
7. NATO Maintenance Group (2021). *Predictive Maintenance in Joint Operations*. Brussels.
8. Turkiye Military University (2021). *PdM Application on F-4 Engines*. Istanbul.
9. GE Aviation (2023). *Digital Twin Engines and Predictive Analytics*. General Electric White Paper.
10. Korean Defense Ministry (2022). *Integrated Smart Engine Diagnostic System – Final Evaluation Report*. Seoul.

Dassault Aviation & Safran (2019). *Rafale Smart Maintenance System*. Paris.

US Air Force Sustainment Center (2021). *CBM+ Implementation Progress Report*. Washington D.C.

إقرار النزاهة الأكاديمية

أنا الطالب أنس إبراهيم الغديفي،

أقرّ بأن هذه الرسالة بعنوان:

"تحسين الجاهزية القتالية للطائرات العسكرية من خلال أنظمة الصيانة

الذكية: دراسة تحليلية في قطاع الدعم الفني الجوي"

هي نتاج جهدي العلمي والبحثي، ولم يتم اقتباس أي جزء منها دون الإشارة إلى مصدره وفق الأصول الأكاديمية.

كما أتعهد بأن جميع البيانات والمعلومات التي وردت في الدراسة تم جمعها وتحليلها وفق المعايير العلمية والأخلاقية، ولم تُستخدم لأي أغراض أخرى. وأتحمّل كامل المسؤولية القانونية والأكاديمية عن صحة محتوى هذا العمل.

اسم الطالب :المهندس أنس إبراهيم الغديفي



Digitally signed by Alghidafi, Anas

Date: 2025.11.13 11:47:19 +03'00'

التوقيع :

التاريخ: 13-11-2025 م