

جامعة ميدأوشن

كلية الإدارة

أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية على كفاءة صيانة المباني الطبية: دراسة
على مستشفيات السعودية مع الدور الوسيط لجودة البيانات

إعداد:

فيصل محمد البازعي

المملكة العربية السعودية

رسالة مقدمة لجامعة ميدأوشن لاستكمال متطلبات نيل درجة الدكتوراة

في

الإدارة

1448هـ / 2027م

فيصل محمد البازعي

1447هـ / 2025م



Midocean University

College of Management

**The Impact of Analytical and Predictive Artificial
Intelligence Applications on Medical Building
Maintenance Efficiency: A Study on Saudi Hospitals with
the Mediating Role of Data Quality"**

By:

FAISAL MOHAMMED AL BAZIE

Kingdom of Saudi Arabia

**Submitted to Midocean University in partial fulfillment of the requirements for the
degree of Doctor of Philosophy
in**

Administration

2027 / 1448

Faisal Mohammed Al-Bazie

2025 / 1447

الفصل الأول

الاطار المنهجي للدراس

- المقدمة
- مشكلة الدراسة
- تساؤلات الدراسة
- أهمية الدراسة
- أهداف الدراسة
- فروض الدراسة
- مفاهيم الدراسة
- حدود الدراسة
- إجراءات ومنهجية الدراسة
- نموذج الدراسة

الفصل الأول: الاطار المنهجي للدراسة

المقدمة

تعد المباني الطبية من المرافق الأساسية المهمة في أي دولة نظرا لطبيعة عملها في استقبال العديد من الحالات المرضية يوميا، حيث أصبحت المباني الطبية اليوم أكثر تعقيدا في مكوناتها وتجهيزاتها وانظمتها المتكاملة التي تقدم كمية هائلة من المعلومات والبيانات التي تتطلب تحسين في عملية جمعها وإدارتها لمواجهة التحديات المتزايدة المرتبطة بتنظيم أعمال الصيانة لهذه المباني والوصول إلى صيانة مخططة ومبرمجة تضمن استمرار عمل المرافق وتقديم الخدمات الصحية فيها بجودة عالية.

لذا فإن ضمان استمرار تقديم الخدمات وعمل المرافق في المباني الطبية بكفاءة تشغيلية وجودة عالية يتطلب التحكم في التوقفات الغير مخطط لها ومعدل استجابة فرق الصيانة والتقليل تكاليف الصيانة التصحيحية وهذا لن يتم الا من خلال الاستفادة من التحولات الرقمية المتسارعة التي يشهدها العالم، والتي برز الذكاء الاصطناعي (AI) كأحد الركائز الأساسية في تطوير الأنظمة من خلال العديد من التطبيقات وتحديداً، تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية التي أصبحت أدوات استراتيجية في دعم اتخاذ القرار، من خلال قدرتها على تحليل كميات ضخمة من البيانات، واستخلاص الأنماط، والتنبؤ بالأحداث المستقبلية بدقة وفعالية، ولقد قامت عدت دراسات هدفها دراسة أثر استخدام الذكاء الاصطناعي في تعزيز كفاءة الصيانة منها الدراسة الذي قام بها (Almaman, 2024) التي تبحث في الآثار المهمة لتقنية الذكاء الاصطناعي (AI) على تحسين دقة الصيانة التنبؤية وأدائها وسلطت هذه الدراسة الضوء على الدور الحاسم الذي يلعبه الذكاء الاصطناعي (AI) في صياغة خطط الصيانة مستقبلاً، كما أظهرت كيف يتمتع الذكاء الاصطناعي بالقدرة على تغيير أساليب الصيانة من تفاعلية إلى استباقية، مع تحسين كفاءة وقت التوقف ومن جانب آخر ناقشت الدراسة الصعوبات المتعلقة بمشاكل جودة البيانات (Almaman, 2024).

أما بالنسبة لتغلب على التحديات التي تواجه إدارة الصيانة لتعزيز كفاءتها وتمثل بنقص المعلومات وحجم البيانات المخزنة في الأنظمة و مؤهلات العاملين للتعامل مع هذه البيانات فقد تناوله الباحثان مينا السادات ومحمد لطفي (Orooje & Latifi, 2021) في بحثهم مراجعة لتضمين الذكاء الاصطناعي في إنترنت الأشياء ونمذجة معلومات البناء لإدارة صيانة مرافق الرعاية الصحية وكان من ضمن الدراسات التي تم مراجعتها دراسة تشنغ وآخرون (Cheng et al, 2020) في إطار عمل للصيانة التنبؤية قائم على البيانات والذي يعتمد على إنترنت الأشياء وخوارزميات التعلم الآلي ونمذجة معلومات المباني، وذكروا أنه ينبغي تطوير إطار عمل لتخطيط الصيانة التنبؤية القائم على البيانات والذي يعتمد على تقنيات إنترنت الأشياء ونمذجة

معلومات المباني للإدارة المالية والذي يتكون من طبقات التطبيق والمعلومات من أجل توفير استراتيجية صيانة أفضل لمرافق المباني (Cheng, Chen, Chen, & Wang, 2020).

وفي هذا السياق، تبرز جودة البيانات كعامل حاسم في نجاح هذه التطبيقات فالنماذج التنبؤية والتحليلية تعتمد بشكل جوهري على دقة واكتمال واتساق البيانات المدخلة. ولذلك تأتي هذه الدراسة لتبسيط الضوء على مدى تأثير تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية على كفاءة صيانة المباني الطبية، مع التركيز على جودة البيانات فيما يتعلق بالتوقعات الغير مخطط لها وارتفاع تكاليف الصيانة التصحيحية ومعدل استجابة فرق الصيانة والوقت التشغيلي للمعدات ، وتسهم في سد الفجوة البحثية في دراسة أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية على كفاءة الصيانة في المباني الطبية، خاصة في البيئة السعودية. كما توفر نتائجها رؤى قيمة للمسؤولين في القطاع الصحي وشركات الصيانة، مما يمكنهم من اتخاذ قرارات مستنيرة تعزز من كفاءة العمليات وجودة الخدمات المقدمة.

مشكلة الدراسة

تعد صيانة المباني الطبية ركيزة أساسية لضمان استمرارية وكفاءة الخدمات الصحية، حيث تؤثر بشكل مباشر على سلامة المرضى، جودة الرعاية، وفعالية التكاليف التشغيلية للمنشآت الصحية (Kinnear, 2025). في ظل التطورات المتسارعة في مجال الذكاء الاصطناعي (AI)، برزت تطبيقاته التحليلية والتنبؤية كأدوات واعدة لإحداث نقلة نوعية في إدارة الصيانة، من خلال تمكين التنبؤ بالأعطال المحتملة، وتحسين جداول الصيانة الوقائية، وتقليل التوقفات غير المخطط لها للمعدات والأنظمة الحيوية (Jackley, 2024). ومع ذلك، فإن تحقيق الاستفادة القصوى من هذه التقنيات في سياق المباني الطبية، وخاصة في بيئة المستشفيات السعودية، لا يزال يواجه تحديات جوهرية تستدعي البحث والتحليل.

وعلى الرغم من الاهتمام المتزايد بتوظيف الذكاء الاصطناعي في إدارة المرافق، إلا أن هناك فجوة معرفية واضحة تتعلق بالفهم الشامل والدقيق للتأثير المباشر وغير المباشر لتطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية على مؤشرات الأداء الرئيسية لكفاءة الصيانة في المباني الطبية، فالدراسات المتاحة غالباً ما تركز على الجوانب التقنية للذكاء الاصطناعي أو تطبيقاته في قطاعات صناعية مختلفة، دون التعمق الكافي في خصوصية البيئة الطبية ومتطلباتها الفريدة من حيث الحساسية التشغيلية ومعايير السلامة الصارمة (Petersson et al., 2022). كما أن هناك نقصاً في الدراسات التي تستكشف بعمق كيفية تأثير جودة البيانات كمتغير وسيط على العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي وكفاءة الصيانة في هذا السياق الحيوي، مما يترك

تساؤلات حول الآليات التي يمكن من خلالها للبيانات غير الدقيقة أو غير المكتملة أن تعيق فعالية هذه التطبيقات (Lawrence, 2024).

وتتجلى الفجوة الأدبية في محدودية الأبحاث التي تجمع بين جميع المتغيرات محل الدراسة في إطار تحليلي متكامل، فبينما توجد دراسات تتناول الذكاء الاصطناعي في الصيانة بشكل عام (Oye et al., 2024)، وأخرى تركز على صيانة المباني الطبية (Yousefli et al., 2017)، إلا أن هناك ندرة ملحوظة في الدراسات التي تستكشف الأثر المشترك لتطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية على أبعاد محددة لكفاءة الصيانة (مثل التوقفات غير المخطط لها، تكاليف الصيانة التصحيحية، معدل استجابة فرق الصيانة، والعمر التشغيلي للمعدات) ضمن المباني الطبية في المستشفيات والأهم من ذلك، تفتقر الأدبيات إلى دراسات تطبيقية كافية تركز على السياق الجغرافي للمستشفيات السعودية، مما يحد من إمكانية تعميم النتائج المستخلصة من بيئات أخرى، ويبرز الحاجة إلى بحث يعالج التحديات والفرص المحلية الفريدة (Brown & Davis, 2025).

أما على الصعيد العملي، فتظهر الفجوة التطبيقية في التحديات التي يواجهها مدراء المرافق ومهندسو الصيانة في المستشفيات السعودية عند محاولة تبني وتطبيق حلول الذكاء الاصطناعي فبالرغم من الإمكانيات النظرية الكبيرة للذكاء الاصطناعي في تحسين الصيانة، إلا أن الواقع يشير إلى وجود عوائق عملية تحول دون تحقيق هذه الإمكانيات، مثل نقص البيانات عالية الجودة، وعدم وجود بنية تحتية متكاملة لجمع البيانات وتحليلها، ومحدودية المهارات البشرية اللازمة لتطوير وتطبيق وتحليل مخرجات نماذج الذكاء الاصطناعي (Kunchev, 2024). هذه الفجوة بين المعرفة النظرية والتطبيق الفعلي تؤدي إلى عدم الاستفادة المثلى من الاستثمارات في تقنيات الذكاء الاصطناعي، وتعيق تحقيق التحسينات المرجوة في كفاءة الصيانة.

وبناءً على ما سبق، تبرز الحاجة الملحة لإجراء دراسة معمقة تسد هذه الفجوات المعرفية والأدبية والتطبيقية، وتوفر فهماً شاملاً لأثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية على كفاءة صيانة المباني الطبية في المستشفيات السعودية، مع إيلاء اهتمام خاص للدور الوسيط لجودة البيانات. وعليه، تسعى هذه الدراسة للإجابة على السؤال الرئيسي التالي:

ما أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية على كفاءة الصيانة في المباني الطبية في المستشفيات السعودية، مع الأخذ في الاعتبار الدور الوسيط لجودة البيانات؟

ويتفرع من هذا السؤال الرئيسي التساؤلات الفرعية التالية:

1. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على التوقعات غير المخطط لها في المباني الطبية بالمستشفيات

السعودية؟

2. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على تكاليف الصيانة التصحيحية في المباني الطبية بالمستشفيات

السعودية؟

3. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على معدل استجابة فرق الصيانة في المباني الطبية بالمستشفيات

السعودية؟

4. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على العمر التشغيلي للمعدات في المباني الطبية بالمستشفيات

السعودية؟

5. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية على التوقعات غير المخطط لها في المباني الطبية بالمستشفيات

السعودية؟

6. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية على تكاليف الصيانة التصحيحية في المباني الطبية بالمستشفيات

السعودية؟

7. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية على معدل استجابة فرق الصيانة في المباني الطبية بالمستشفيات

السعودية؟

8. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية على العمر التشغيلي للمعدات في المباني الطبية بالمستشفيات السعودية؟

9. ما الدور الوسيط الذي تلعبه جودة البيانات في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية وكفاءة صيانة المباني

الطبية في المستشفيات السعودية؟

10. ما الدور الوسيط الذي تلعبه جودة البيانات في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية وكفاءة صيانة المباني الطبية

في المستشفيات السعودية؟

أهمية الدراسة

ترتبط أهمية هذه الدراسة نتيجة للتطور المتسارع في التكنولوجيا وأدوات الذكاء الاصطناعي وللاهتمام المتزايد من قبل العديد من المنشآت الطبية في المملكة العربية السعودية في اعتمادها منهج الصيانة التنبؤية والتحليلية بالاستفادة من تطبيقات الذكاء الاصطناعي بسبب المؤشرات الكبيرة التي تحققها في تلك المنشآت منها خفض تكاليف الصيانة وتقليل وقت التوقف، وتتفرع أهمية الدراسة الى:

1. الأهمية النظرية:

على الرغم من وجود العديد من الأبحاث والدراسات التي تناولت موضوع الصيانة التنبؤية والتحليلية في المرافق الصناعية والمباني الطبية الا انها لم تتناول بشكل دقيق اثر استخدام تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الصيانة التنبؤية والتحليلية خاصة في البيئة السعودية. لذلك، تسهم هذه الدراسة في تعزيز الفهم النظري لدور الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة إدارة الصيانة، خاصة في المباني الطبية، تسد الفجوة البحثية المهمة من خلال استكشاف أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي على كفاءة إدارة الصيانة في هذا النوع من المباني. (West et al. 2024),

بالإضافة إلى ذلك، تسهم هذه الدراسة في تعزيز النظريات المتعلقة بإدارة الصيانة الحديثة، مثل الصيانة التنبؤية والصيانة الوقائية من خلال تقديم أدلة تجريبية على فعالية الذكاء الاصطناعي في تحسين هذه العمليات، كما تسهم في توسيع نطاق نظريات الذكاء الاصطناعي من خلال تطبيقها في مجال إدارة الصيانة في المباني الطبية، مما يفتح آفاقاً جديدة للبحث في هذا المجال (إلبورومبالي، 2023).

وتقدم هذه الدراسة إطاراً نظرياً متكاملاً يوضح العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي وكفاءة صيانة المباني، مع الأخذ في الاعتبار الدور الوسيطة لجودة البيانات، مما يسهم في تطوير النماذج النظرية في هذا المجال (Exactcomms, 2025).

2. الأهمية التطبيقية:

على المستوى التطبيقي، ستساهم هذه الدراسة على تقديم إجابات عملية واضحة حول تأثير تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية على كفاءة الصيانة في المباني الطبية مع توضيح أهمية الدور الكبير الذي البيانات

كعامل وسيط في تحسين الكفاءة وتقليل وقت التوقف هذا سينعكس من خلال تقديم رؤى قيمة للمسؤولين في القطاع الصحي وشركات الصيانة، مما يمكنهم من اتخاذ قرارات مستنيرة تعزز من كفاءة العمليات وجودة الخدمات المقدمة. حيث ستساعد نتائج هذه الدراسة على توضيح قدرة تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية على تقليل وقت التوقف الناتج عن الأعطال المفاجئة في البنى التحتية للمباني الطبية مما يساعد المستشفيات على تحسين الخطط تشغيلية وتجنب تعطيل الخدمات الحيوية بالإضافة الى ذلك، ستساهم هذه الدراسة بالتحقق من إمكانية خفض النفقات الناتجة عن الإصلاحات الطارئة من خلال استخدام تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية مما يساعد المؤسسات والمباني الطبية في تخصيص الموارد المالية بكفاءة أكبر. كما يمكن أن توفر رؤى حول التحديات التي قد تواجه تطبيق هذه التقنيات، مثل نقص الخبرة الفنية، وارتفاع التكاليف الأولية، ومقاومة التغيير من قبل العاملين (James, 2025).

بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تسهم نتائج الدراسة في تحسين كفاءة إدارة الصيانة التنبؤية والتحليلية في المباني الطبية من خلال تقليل التكاليف، وتحسين وقت الاستجابة، وزيادة عمر الأصول. هذا يمكن أن يؤدي إلى تحسين جودة الخدمات الصحية المقدمة، وتقليل وقت التوقف عن العمل، وزيادة رضا المرضى والعاملين في القطاع الصحي.

أهداف الدراسة:

الاهداف الرئيسية للدراسة تتمثل بالاتي:

الهدف الرئيسي الأول:

- دراسة أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية على كفاءة الصيانة في المباني الطبية.

ويتفرع من الاهداف الفرعية التالية:

1. دراسة أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية في تقليل التوقفات غير المخطط لها.

2. قياس أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على تكاليف الصيانة التصحيحية.

3. تحليل أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على معدل استجابة فرق الصيانة.

4. تقييم أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على العمر التشغيلي للمعدات.

5. التعرف على أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية على التوقفات غير المخطط لها.

6. دراسة أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية على تكاليف الصيانة التصحيحية.

7. تحليل أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية على معدل استجابة فرق الصيانة.

8. تقييم أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية على العمر التشغيلي للمعدات.

الهدف الرئيسي الثاني:

- اختبار الدور الوسيط لجودة البيانات في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي وكفاءة الصيانة.

ويتفرع منه الأهداف الفرعية التالية:

1. اختبار الدور الوسيط لجودة البيانات في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية وكفاءة الصيانة.

2. اختبار الدور الوسيط لجودة البيانات في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية وكفاءة الصيانة.

فرضيات الدراسة:

الفرضية الرئيسية الاولى:

توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي (التحليلية والتنبؤية) وكفاءة الصيانة.

ويتفرع منه الفرضيات الفرعية التالية:

H1.1: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتوقفات غير المخطط لها.

H1.2: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية وتكاليف الصيانة التصحيحية.

H1.3: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية ومعدل استجابة فرق الصيانة.

H1.4: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والعمر التشغيلي للمعدات.

H1.5: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتوقعات غير المخطط لها.

H1.6: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية وتكاليف الصيانة التصحيحية.

H1.7: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية ومعدل استجابة فرق الصيانة.

H1.8: توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والعمر التشغيلي للمعدات.

الفرضية الرئيسية الثانية

يوجد تأثير وسيط لجودة البيانات في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي (التحليلية والتنبؤية) وكفاءة الصيانة.

ويتفرع منه الفرضيات الفرعية التالية:

الفرضيات الفرعية:

H2.1: جودة البيانات تتوسط العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية وكفاءة الصيانة.

H2.2: جودة البيانات تتوسط العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية وكفاءة الصيانة.

مفاهيم الدراسة:

تتناول هذه الدراسة المصطلحات الأساسية المرتبطة بمتغيرات الدراسة، بحيث يتم تعريف المصطلحات وتوضيحها، وتشمل:

أولاً: المفاهيم الاصطلاحية

1. الذكاء الاصطناعي التحليلي:

عرف (Asare et al (2024) الذكاء الاصطناعي التحليلي بأنه الأساليب المتقدمة للذكاء الاصطناعي التي

تستخدم لتحليل كميات هائلة من البيانات التشغيلية للمباني، مثل بيانات أجهزة الاستشعار وأنظمة إدارة المباني، لتحديد

الأنماط، والكشف عن الحالات الشاذة، وتحسين الأداء العام للمبنى، بما في ذلك أنظمة الصيانة (Asare et al., 2024).

2. الذكاء الاصطناعي التنبؤي:

عرف (Abdelalim et al (2025) الذكاء الاصطناعي التنبؤي بأنه القدرة على تحليل البيانات في الوقت الفعلي من أجهزة الاستشعار و نمذجة معلومات البناء للتنبؤ بالأعطال المحتملة للمعدات والأنظمة، مما يتيح الانتقال من الصيانة التفاعلية إلى الصيانة الاستباقية، وبالتالي تقليل التكاليف وتحسين الكفاءة التشغيلية للمرافق (Abdelalim et al., 2025).

3. كفاءة الصيانة:

عرف (Zhou et al (2024) كفاءة الصيانة بأنها القدرة على تقليل تكرار ومدة الأعطال غير المتوقعة للمعدات الحيوية، مثل أجهزة التصوير المقطعي، وتحسين عملية اتخاذ القرارات المتعلقة بالصيانة، مما يساهم في توفير رعاية صحية عالية الجودة وفي الوقت المناسب (Zhou et al., 2024).

4. المباني الطبية (Medical Buildings):

عرف (Wong et al (2021) المباني الطبية في سياق الصيانة بأنها المنشآت التي تؤدي وظائف أساسية تتعلق بحياة الإنسان وصحته ورفاهيته، وتعتبر صيانتها تحديًا نظرًا لأنظمتها الهندسية المعقدة، وتخضع لمعايير عالية ولوائح صارمة لضمان بيئة آمنة وفعالة لتقديم الرعاية الصحية (Wong et al., 2021).

5. جودة البيانات:

عرف (Madnick et al (2023) جودة البيانات بأنها مدى ملاءمة البيانات للاستخدام المقصود، وتتضمن خصائص مثل الدقة، الاكتمال، الاتساق، التوقيت، والصلاحية (Madnick et al., 2023)، كما يشير (2024) Precisely إلى أن البيانات عالية الجودة ضرورية لضمان موثوقية التحليلات والتنبؤات التي تعتمد عليها أنظمة الذكاء الاصطناعي، وتعد عنصرًا حاسمًا في اتخاذ القرارات الفعالة (Precisely, 2024).

ثانياً: المفاهيم الإجرائية

1. الذكاء الاصطناعي التحليلي:

يُقصد به إجرائياً في هذه الدراسة مدى استخدام المستشفيات الحكومية في الرياض لأنظمة برمجية تعتمد على خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات التشغيلية للمباني الطبية (مثل بيانات أجهزة الاستشعار، أنظمة إدارة المباني، سجلات الصيانة التاريخية للمرافق والأنظمة الإنشائية والميكانيكية والكهربائية) بهدف تحديد الأنماط، والكشف عن الحالات الشاذة، وتحسين الأداء العام للمبنى، بما في ذلك أنظمة الصيانة، ويتم قياسه من خلال استبيان يحدد أنواع أدوات التحليل المستخدمة ، وتكرار استخدامها ومدى الاعتماد عليها في اتخاذ قرارات صيانة المباني.

2. الذكاء الاصطناعي التنبؤي:

يُقصد به إجرائياً في هذه الدراسة مدى استخدام المستشفيات الحكومية في الرياض لأنظمة برمجية تعتمد على نماذج تنبؤية (مثل تحليل السلاسل الزمنية، الشبكات العصبية، الانحدار اللوجستي) للتنبؤ بالأعطال المستقبلية للمرافق والأنظمة الإنشائية والميكانيكية والكهربائية في المباني الطبية، وتحديد العمر المتبقي للأصول، والتنبؤ باحتياجات الصيانة وقطع الغيار ويتم قياسه من خلال استبيان يحدد أنواع النماذج التنبؤية المطبقة ، ومصادر البيانات المستخدمة للتنبؤ ، ومدى دقة التنبؤات المحققة.

3. كفاءة الصيانة:

تُقصد إجرائياً في هذه الدراسة بأنها مستوى الأداء المحقق في عمليات صيانة المباني والمعدات الطبية في المستشفيات الحكومية بالرياض، ويتم قياسها من خلال أربعة أبعاد رئيسية وهي:

أ. التوقفات غير المخطط لها: تُقاس بمدى تكرار ومدة التوقفات المفاجئة للأنظمة الحيوية والمعدات في المباني الطبية

(مثل أنظمة التكييف، أنظمة الكهرباء، المضخات، أجهزة التصوير الطبي)، والتي تعطل سير العمليات التشغيلية وتقديم

الرعاية الصحية.

ب. تكاليف الصيانة التصحيحية : تُقاس بمدى ارتفاع التكاليف المالية المتكبدة لإصلاح الأعطال التي تحدث بشكل مفاجئ وغير متوقع في المباني والمعدات الطبية (مثل تكاليف قطع الغيار الطارئة، أجور العمالة الإضافية، تكاليف الاستعانة بمصادر خارجية لإصلاح أعطال المباني).

ج. معدل استجابة فرق الصيانة: يُقاس بمدى سرعة استجابة فرق الصيانة للأعطال المبلغ عنها في المباني والمعدات الطبية وبدء العمل على الإصلاح، ومدى كفاءة التنسيق بين الفرق المختلفة.

د. العمر التشغيلي للمرافق والمعدات: يُقاس بمدى قدرة الأنظمة الرئيسية في المباني الطبية والمعدات على العمل بكفاءة لفترة أطول من عمرها الافتراضي المتوقع، ومدى تحسن أدائها التشغيلي.

4. المباني الطبية:

يُقصد بها إجرائياً في هذه الدراسة جميع المنشآت والمرافق التابعة للمستشفيات الحكومية في الرياض، والتي تشمل المباني نفسها (مثل الأقسام، الغرف، الممرات، أنظمة التكييف والتهوية، أنظمة الإضاءة، أنظمة السلامة من الحريق، أنظمة إمدادات المياه والكهرباء) بالإضافة إلى المعدات الموجودة داخل هذه المباني والتي تتطلب صيانة دورية.

5. جودة البيانات:

يُقصد بها إجرائياً في هذه الدراسة بأنها مستوى جودة البيانات المستخدمة في أنظمة الصيانة بالذكاء الاصطناعي في المستشفيات الحكومية بالرياض، ويتم قياسها من خلال تقييم خصائص البيانات المستخدمة في أنظمة الصيانة مع التركيز على الأبعاد التالية:

أ. الدقة : مدى خلو البيانات من الأخطاء والتناقضات. يتم قياسها بعبارات مثل: البيانات التي نجمعها عن الصيانة دقيقة وخالية من الأخطاء، نتحقق بانتظام من دقة البيانات المدخلة في النظام، البيانات المستخدمة في اتخاذ قرارات الصيانة موثوقة ودقيقة.

ب. الاكتمال : مدى توفر جميع البيانات المطلوبة دون نقص. يتم قياسها بعبارات مثل: جميع البيانات اللازمة لعمليات الصيانة متوفرة وكاملة، لا نواجه مشكلة في نقص البيانات المطلوبة للتحليل، تتوفر لدينا بيانات شاملة عن جميع المعدات والأنظمة.

ج. الاتساق: مدى تطابق البيانات عبر الأنظمة المختلفة وفي أوقات مختلفة. يتم قياسها بعبارات مثل: تتطابق بيانات الصيانة عبر جميع الأنظمة المستخدمة، البيانات متسقة ولا تتضارب مع بعضها البعض، يوجد توحيد في طريقة جمع وتسجيل البيانات.

د. التوقيت: مدى حداثة البيانات وتوفرها في الوقت المناسب للاستخدام. يتم قياسها بعبارات مثل: يتم تحديث بيانات الصيانة بشكل فوري ومستمر، البيانات متاحة في الوقت المناسب لاتخاذ القرارات، نحصل على البيانات المطلوبة دون تأخير.

هـ. الصلاحية: مدى توافق البيانات مع القواعد والقيود المحددة. يتم قياسها بعبارات مثل: تتوافق بيانات الصيانة مع المعايير والقواعد المحددة، البيانات المجمعة تلي متطلبات الجودة المطلوبة، يتم التحقق من صحة البيانات قبل استخدامها في النظام.

حدود الدراسة:

الحدود المكانية والزمانية

تقتصر هذه الدراسة على المستشفيات الحكومية التابعة لوزارة الصحة في مدينة الرياض بالمملكة العربية السعودية وتم اختيار المستشفيات الحكومية لضمان تجانس بيئة الدراسة من حيث السياسات والإجراءات، ولتجنب التعقيدات التي قد تنشأ عن الاختلافات في الهياكل الإدارية والتشغيلية بين القطاعين الحكومي والخاص، حيث أن هذا التركيز يضمن عمق التحليل وعدم تشتيت الجهود البحثية في مقارنات قد لا تخدم الأهداف الرئيسية للدراسة، كما أن التركيز على مدينة الرياض يعود إلى كونها العاصمة وأكبر المدن في المملكة، وتحتضن عدداً كبيراً من المستشفيات الحكومية التي تخدم شريحة واسعة من السكان، مما يوفر قاعدة بيانات غنية ومثلة للظاهرة المدروسة.

أما الحدود الزمانية للدراسة، فشملت الفترة من مارس 2025 إلى ديسمبر 2026، وذلك لضمان جمع بيانات حديثة وذات صلة تعكس التطورات الأخيرة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي وكفاءة الصيانة.

الحدود الموضوعية:

تحدد هذه الدراسة أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي بنوعيهما التحليلي والتنبؤي على كفاءة صيانة المباني الطبية، مع التركيز على جودة البيانات كمتغير وسيط ويقتصر نطاق البحث على هذه المتغيرات تحديداً، ولا يتناول أنواعاً أخرى من تطبيقات الذكاء الاصطناعي (مثل الذكاء الاصطناعي التوليدي) أو جوانب أخرى من إدارة المرافق الطبية (مثل إدارة المخزون أو الموارد البشرية) وتم هذا التحديد لضمان عمق التحليل وتركيزه على تحقيق الأهداف الرئيسية للدراسة.

الحدود البشرية:

تقتصر عينة الدراسة على مدراء الصيانة، مهندسي الصيانة، والفنيين العاملين في المستشفيات الحكومية بمدينة الرياض وتم اختيار هذه الفئة البشرية لخبرتها المباشرة ومعرفتها العميقة بأنظمة الصيانة وتطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة. وبالتالي، فإن نتائج هذه الدراسة قد لا تكون قابلة للتعميم بشكل مباشر على فئات أخرى من الموظفين في القطاع الصحي (مثل الكادر الطبي أو الإداري) أو العاملين في المستشفيات الخاصة التي قد تختلف في هياكلها التنظيمية ومواردها.

إجراءات ومنهجية الدراسة:

منهج الدراسة:

تعتمد هذه الدراسة على المنهج الكمي الوصفي التحليلي، والذي يهدف إلى وصف وتحليل الظواهر والعلاقات بين المتغيرات كما هي موجودة في الواقع وهذا المنهج مناسب لطبيعة الدراسة التي تسعى إلى قياس أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية على كفاءة صيانة المباني الطبية، ودور جودة البيانات كمتغير وسيط. تم جمع البيانات الكمية لتحليل العلاقات بين المتغيرات.

مجتمع وعينة الدراسة:

مجتمع الدراسة

يتكون مجتمع هذه الدراسة من جميع المستشفيات الحكومية التابعة لوزارة الصحة في مدينة الرياض ووفقاً لأحدث الإحصائيات الرسمية الصادرة عن الهيئة العامة للإحصاء ووزارة الصحة، بلغ إجمالي عدد المستشفيات في المملكة العربية السعودية 499 مستشفى وفي منطقة الرياض 109 مستشفيات في عام 2023 (الهيئة العامة للإحصاء، 2023). من هذه المستشفيات، تشكل المستشفيات الحكومية التابعة لوزارة الصحة النسبة الأكبر على وجه التحديد، تشير بيانات وزارة الصحة لعام 2022 إلى وجود 65 مستشفى تابعاً لها ولجهات حكومية أخرى في منطقة الرياض (وزارة الصحة، 2022). هذه المستشفيات تقدم خدمات رعاية صحية شاملة وتعد بيئة خصبة لتطبيق ودراسة تأثيرات الذكاء الاصطناعي على عمليات الصيانة.

عينة الدراسة

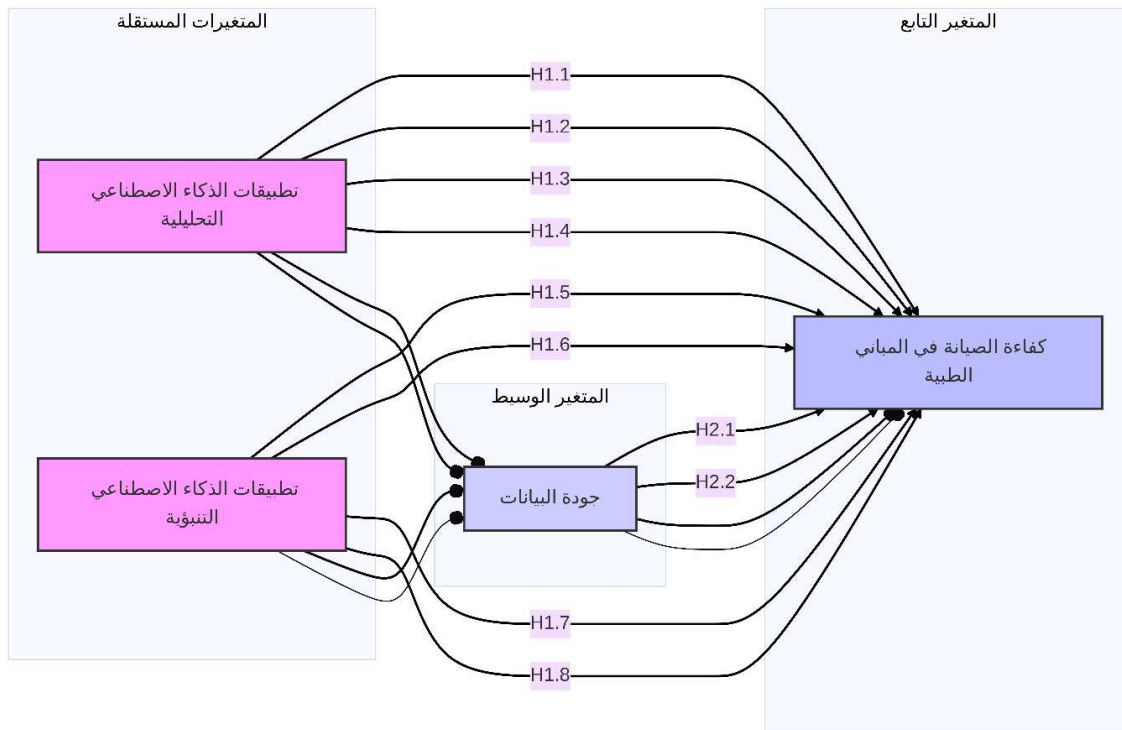
نظراً لحجم مجتمع الدراسة (65 مستشفى حكومي تابع لوزارة الصحة وجهات حكومية أخرى في الرياض)، تم اختيار عينة ممثلة لضمان صلاحية النتائج وقابليتها للتعميم حيث تم استخدام العينة العشوائية البسيطة لضمان تكافؤ الفرص لجميع المستشفيات في المجتمع للدخول ضمن العينة، مما يعزز من تمثيلية العينة لمجتمع الدراسة ولتحديد حجم العينة المناسب، تم استخدام جداول كريجسي ومورغان، مع الأخذ في الاعتبار مستوى الثقة ليلعب حجم العينة المناسب 39 مستشفى من أصل 65 مستشفى في المجتمع الأصلي وتم جمع البيانات من مدراء الصيانة في المستشفيات المختارة، بالإضافة إلى مهندسي الصيانة والفنيين الذين لديهم خبرة مباشرة في أنظمة الصيانة وتطبيقات الذكاء الاصطناعي من خلال استخدام استبيان مصمم خصيصاً لجمع البيانات الكمية للحصول على معلومات دقيقة وشاملة حول أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي على كفاءة الصيانة وجودة البيانات.

نموذج الدراسة

بناءً على الإطار النظري والدراسات السابقة، تم تطوير نموذج الدراسة الحالي لتوضيح العلاقات المفترضة بين المتغيرات المستقلة (تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية)، والمتغير الوسيط (جودة البيانات)، والمتغير التابع (كفاءة الصيانة بأبعادها المختلفة) يهدف هذا النموذج إلى توجيه التحليل الإحصائي للدراسة والإجابة على تساؤلاتها.

الشكل (1) يوضح نموذج الدراسة العلاقة بين المتغيرات المستقلة (تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية والتنبؤية) والمتغيرات التابعة (كفاءة

الصيانة) مع الدور الوسيط لجودة البيانات



تم بناء هذا النموذج بالاعتماد على دراسة Chianumba et al., 2021 التي قدمت إطاراً مفاهيمياً للذكاء الاصطناعي والبيانات الضخمة في تعزيز تقديم الرعاية الصحية، مع تكييفه ليناسب متغيرات الدراسة الحالية والتركيز على كفاءة الصيانة في المباني الطبية ودور جودة البيانات كوسيط. كما تم الاستفادة من الإطار العام للنماذج السببية في الدراسات السابقة التي تناولت تأثير التكنولوجيا على الأداء التنظيمي.

الفصل الثاني

الاطار النظري والدراسات السابقة

– الاطار النظري

– الدراسات السابقة

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

تمهيد

يعد هذا الفصل بمثابة الركيزة المعرفية والمنهجية التي يقوم عليها البحث، حيث يتناول الإطار النظري للمتغيرات الأساسية للدراسة، بالإضافة إلى مراجعة وتحليل نقدي للدراسات السابقة ذات الصلة بتطبيقات الذكاء الاصطناعي (المتغير المستقل) وكفاءة صيانة المباني الطبية (المتغير التابع)، مع إبراز الدور الوسيط لجودة البيانات.

الإطار النظري

أولاً: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في صيانة المباني الطبية

1. مفهوم الذكاء الاصطناعي في الصيانة

يعرف الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence - AI) بأنه مجموعة من التقنيات والخوارزميات التي تمكن الأنظمة الحاسوبية من محاكاة القدرات المعرفية البشرية، مثل التعلم، والاستدلال، وحل المشكلات، وتطبيقها لتحسين عمليات إدارة المرافق. [تم التعديل] فلا يقتصر دور الذكاء الاصطناعي على أتمتة المهام الروتينية، بل يمتد ليشمل تحليل البيانات المعقدة التي تتجاوز قدرة التحليل البشري، بهدف اتخاذ قرارات صيانة استباقية ومحسوبة، وهذا التحول الجذري يهدف إلى الانتقال من نموذج الصيانة التفاعلية التي تحدث بعد العطل أو الصيانة الوقائية القائمة على الجداول الزمنية الثابتة، إلى نموذج الصيانة الذكية القائمة على الحالة والتنبؤ بالفشل. حيث إن تطبيق الذكاء الاصطناعي يضمن أن تكون جهود الصيانة موجهة بدقة نحو المعدات التي تحتاج إليها فعلاً، مما يعظم الكفاءة التشغيلية ويقلل من الهدر في الموارد، وهو ما يمثل نقلة نوعية في إدارة الأصول الحيوية للمستشفيات (Almaiman, 2024).

وتعتمد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الصيانة على دمج مجموعة واسعة من التقنيات أبرزها التعلم الآلي (Machine Learning) والتعلم العميق (Deep Learning)، والتي تستخدم لتدريب النماذج على التعرف على الأنماط التي تسبق الأعطال حيث يتم تغذية هذه النماذج ببيانات ضخمة (Big Data) يتم جمعها من أجهزة الاستشعار المتصلة (Internet of Things)، وسجلات الصيانة التاريخية، وأنظمة إدارة المباني (Building Management System). ويشير Owen

(2025) إلى أن الذكاء الاصطناعي التحليلي يركز على فهم البيانات التاريخية والآنية للكشف عن الأنماط والاتجاهات التي قد تؤدي إلى الأعطال. وإن الهدف الأساسي من هذا الدمج التكنولوجي هو بناء نظام صيانة متكامل وذكي، قادر على المراقبة المستمرة لأداء المعدات، وتحديد الانحرافات الطفيفة عن الأداء الأمثل، مما يتيح لمديري المرافق التخطيط لعمليات الصيانة في اللحظة المثلى (Owen, 2025).

2. الذكاء الاصطناعي التحليلي (Analytical AI)

يمثل الذكاء الاصطناعي التحليلي الركيزة الأساسية التي تستند إليها تطبيقات الصيانة المتقدمة، حيث يركز على فهم البيانات التاريخية والآنية للكشف عن الأنماط والاتجاهات التي قد تؤدي إلى الأعطال. يعتمد هذا النوع من الذكاء الاصطناعي على تحليل كميات هائلة من البيانات التي يتم جمعها من مختلف أجهزة الاستشعار والمعدات داخل المبنى، مثل أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC)، والمصاعد، وأنظمة الإضاءة، والمعدات الطبية الحيوية ومن خلال تطبيق خوارزميات متقدمة، يمكن للذكاء الاصطناعي التحليلي تحديد العلاقات المترابطة بين المتغيرات المختلفة، مثل درجة الحرارة، والرطوبة، واستهلاك الطاقة، وساعات التشغيل، وتأثيرها على أداء المعدات فيمكن للنظام تحليل بيانات أداء نظام التكييف وتحديد الانحرافات الطفيفة في استهلاك الطاقة التي قد تشير إلى بداية تدهور في أداء الضاغط أو وجود تسريب في نظام التبريد، مما يسمح لفرق الصيانة بالتدخل قبل حدوث عطل كامل. (Owen, 2025).

ويشير Almainan (2024) إلى أن استخدام أدوات التشخيص القائمة على الذكاء الاصطناعي يمكن من تحديد موقع العطل وأسبابه بدقة مما يقلل من الوقت اللازم للتشخيص والإصلاح. فعلى سبيل المثال، عند حدوث عطل في نظام معقد مثل نظام إدارة المباني (Building Management System)، يمكن للذكاء الاصطناعي التحليلي مراجعة سجلات الأحداث والإنذارات من مختلف الأنظمة الفرعية لتحديد السبب الجذري للمشكلة بسرعة، بدلاً من الاعتماد على التخمين أو التجربة والخطأ إضافة إلى ذلك، يمكن لهذه الأنظمة إنشاء تقارير تحليلية مفصلة حول أداء المعدات، وتحديد المعدات الأكثر عرضة للأعطال، وتقديم توصيات حول أولويات الصيانة، مما يساعد مديري المرافق على تخصيص الموارد بشكل أكثر كفاءة وفعالية (Almainan, 2024).

ب. أهمية الذكاء الاصطناعي التحليلي

تكمن الأهمية الأساسية للذكاء الاصطناعي التحليلي في قدرته على إحداث نقلة نوعية في إدارة الأصول، وذلك من خلال الانتقال من مجرد اكتشاف الأعطال إلى التحسين الشامل لاستراتيجيات الصيانة. فمن خلال التحليل المنهجي للبيانات التاريخية المتعلقة بأداء المعدات، تستطيع هذه الأنظمة تشخيص الأسباب الجذرية (Root Causes) للمشاكل المتكررة، مما يمكن المؤسسات من تطوير حلول هندسية مستدامة بدلاً من الإصلاحات المؤقتة. على سبيل المثال، إذا كشف التحليل عن إخفاق متكرر لمضخة في نظام تبريد بسبب الإجهاد الحراري، فإن النظام لا يوصي فقط باستبدالها، بل يقدم رؤية أعمق تقترح إجراءات استباقية، مثل إعادة تقييم كفاءة منظومة التهوية أو تحسين جداول صيانة المرشحات. وبهذا، يبرهن الذكاء الاصطناعي التحليلي على قيمته من خلال تسهيل التحول نحو الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance)؛ وهي استراتيجية فعالة تضمن توجيه الموارد بدقة نحو الأصول الحيوية، الأمر الذي يؤدي مباشرةً إلى تعظيم الكفاءة التشغيلية وتقليل التكاليف (Owen, 2025).

وتعاضد هذه الأهمية بشكل خاص في البيئات التشغيلية المعقدة، كالمباني الطبية، التي تضم شبكة واسعة من الأنظمة المترابطة وهنا تبرز قيمة الذكاء الاصطناعي التحليلي في قدرته على كشف وتحليل العلاقات السببية المعقدة (Complex Causal Relationships) التي قد تكون غير مرئية للمراقب البشري. على سبيل المثال، قد يؤدي تغيير بسيط في إعدادات نظام إدارة المبنى (Building Management System) إلى سلسلة من التأثيرات المتتالية؛ حيث يؤثر على استهلاك الطاقة، والذي بدوره قد يغير الظروف البيئية في غرف المعدات، مما يزيد في نهاية المطاف من احتمالية حدوث أعطال. وهنا تظهر الأهمية الاستباقية للتقنية، حيث يمكن لنماذج متقدمة مثل التوائم الرقمية (Digital Twins) محاكاة هذه السيناريوهات وتحليل تأثير أي تغييرات مقترحة قبل تطبيقها، وهو ما يمثل أداة فعالة لمنع الاضطرابات التشغيلية. إن هذه القدرة على فهم ديناميكيات النظام ككل، بدلاً من التركيز على مكوناته الفردية، هي التي تتيح إدارة استباقية حقيقية للمرافق، وبالتالي تضمن بيئة آمنة ومستقرة للمرضى والموظفين، وهو الهدف الأسمى في مثل هذه المنشآت (Almaiman, 2024).

ج. تطبيقات متقدمة للذكاء الاصطناعي التحليلي

تتجلى أولى التطبيقات المتقدمة للذكاء الاصطناعي التحليلي في قدرته على فك شفرة البيانات غير المهيكلة (Unstructured Data)، مثل تقارير الصيانة النصية وملاحظات الفنيين. فبينما تحتوي هذه المصادر على رؤى تشخيصية عميقة، يصعب تحليلها بالطرق التقليدية. وهنا، تبرز أهمية تقنيات معالجة اللغة الطبيعية (Natural Language Processing) التي تمكّن أنظمة الذكاء الاصطناعي من استخلاص الأنماط الخفية وتحديد الارتباطات التي قد تغفل عنها البيانات الرقمية وحدها، كربط شكاوى ضوواء معينة بإخفاق وشيك في نظام التهوية. إن هذه القدرة على تحويل النصوص إلى رؤى قابلة للتنفيذ تمثل الخطوة الأولى نحو فهم شامل ومتكامل لحالة المبنى. (Almairan, 2024).

وبناءً على هذه الرؤية الشاملة، يمتد دور الذكاء الاصطناعي التحليلي إلى تطبيق متقدم آخر وهو تحسين كفاءة الطاقة، لا سيما في المباني الطبية كثيفة الاستهلاك. فمن خلال التحليل المستمر لبيانات الأداء التي تم جمعها، يمكن للذكاء الاصطناعي تحديد الأنماط غير الفعالة وتقديم توصيات دقيقة لترشيد الاستهلاك دون المساس بسلامة المرضى. على سبيل المثال، قد يوصي النظام بجدولة ديناميكية للإضاءة بناءً على معدلات الإشغال الفعلية، أو تقييم أداء وحدات التكييف لتحديد حاجتها لصيانة استباقية. وبهذا، لا يقتصر التطبيق على تشخيص الأعطال، بل يتطور ليشمل تحسين الأداء التشغيلي وتحقيق الاستدامة المالية والبيئية. (Owen & Oye, 2025).

وإلى جانب تحسين الكفاءة، يقدم الذكاء الاصطناعي التحليلي تطبيقاً أكثر أهمية يتمثل في إدارة المخاطر وتحديد الأولويات. ففي البيئة الطبية، لا تتساوى جميع الأصول من حيث الأهمية؛ لذا، يقوم النظام بتحليل البيانات التشغيلية لتحديد الأصول التي يشكل تعطيلها خطراً عالياً على سلامة المرضى، مثل أجهزة التعقيم أو أنظمة الطاقة الاحتياطية. هذا التحليل الدقيق يسمح بتطبيق نهج الصيانة القائم على المخاطر (Risk-Based Maintenance)، حيث تُوجّه الموارد بشكل متناسب مع مستوى خطورة كل أصل. إن هذا الانتقال من التحسين العام إلى التركيز على النقاط الحرجة يضمن صلابة البنية التحتية للمستشفى في مواجهة أي طارئ. (Owen & Oye, 2025).

ولضمان تنفيذ استراتيجية الصيانة القائمة على المخاطر بفعالية، يبرز تطبيق حيوي آخر وهو التحسين الاستباقي لإدارة مخزون قطع الغيار فمن خلال تحليل أنماط الأعطال ومعدلات استهلاك القطع للأصول التي تم تحديدها مسبقاً، يمكن للنظام التنبؤ

بالاحتياجات المستقبلية بدقة وهذا النهج التنبؤي يقلل من مخاطر نقص المخزون (Stock-outs) للقطع الحرجة، وفي الوقت نفسه يحد من تكاليف الاحتفاظ بالمخزون الزائد (Overstocking) وبذلك، يكتمل النظام البيئي التحليلي للذكاء الاصطناعي، حيث لا يقتصر على تحديد المخاطر فحسب، بل يضمن أيضاً توفر الموارد اللازمة للتعامل معها، محققاً التوازن الأمثل بين الجاهزية التشغيلية والكفاءة المالية. (Almaiman, 2024).

3. الذكاء الاصطناعي التنبؤي (Predictive AI)

يأخذ الذكاء الاصطناعي التنبؤي مفهوم الصيانة إلى مستوى أكثر تقدماً، حيث لا يكتفي بتحليل البيانات للكشف عن المشاكل الحالية، بل يسعى إلى التنبؤ بالأعطال المستقبلية قبل وقوعها. ويعتمد هذا النهج على بناء نماذج رياضية وإحصائية معقدة، مثل الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks) وخوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning)، التي يتم تدريبها على كميات ضخمة من البيانات التاريخية والآنية ومن خلال تحليل هذه البيانات، تتعلم النماذج الأنماط التي تسبق حدوث الأعطال، مما يمكنها من إصدار تحذيرات مبكرة عندما تكتشف سلوكاً مشابهاً في البيانات الجديدة. حيث يمكن لنظام الصيانة التنبؤية تحليل بيانات الاهتزاز ودرجة الحرارة لحرك كهربائي، والتنبؤ باحتمالية حدوث عطل في المحمل خلال الأسابيع القليلة القادمة، مما يتيح لفرق الصيانة جدولة عملية الاستبدال في وقت مناسب دون التأثير على تشغيل المستشفى (Villa et al., 2021).

ولتحقيق هذه القدرة التنبؤية، تُستخدم خوارزميات متقدمة للغاية، لا سيما تقنيات التعلم العميق (Deep Learning) مثل الشبكات العصبية الالتفافية والمتكررة وتتميز هذه الخوارزميات بقدرتها على تحليل بيانات معقدة ومتعددة الأبعاد، حيث لا تقتصر على البيانات الرقمية من أجهزة الاستشعار، بل تشمل أيضاً البيانات المرئية من الكاميرات الحرارية أو البيانات الصوتية من الميكروفونات فيمكن لنموذج تعلم عميق تحليل الصور الحرارية للمعدات الكهربائية لتحديد النقاط الساخنة (Hot Spots) التي تشير إلى فشل وشيك. إن هذا الدمج لمصادر البيانات المتنوعة يعزز من دقة التنبؤات بشكل كبير، مما يتيح اتخاذ إجراءات تصحيحية عالية الدقة. (Talawar et al., 2023).

أهمية الذكاء الاصطناعي التنبؤي

تتجلى الأهمية الحيوية للذكاء الاصطناعي التنبؤي في قدرته على إحداث تحول جذري في إدارة الأنظمة الحرجة بالمباني الطبية، حيث أن أي انقطاع في الخدمة يمكن أن تكون له عواقب وخيمة فيحقق الذكاء الاصطناعي هذه الأهمية من خلال توفير إطار عمل استباقي يركز على محورين متكاملين:

1. ضمان الاستمرارية التشغيلية وتعزيز الموثوقية ففي بيئة المستشفى، يمكن تطبيق ذلك على أنظمة دعم الحياة، مثل أنظمة التهوية في غرف العمليات أو وحدات العناية المركزة، حيث يمكن لأي عطل أن يعرض حياة المرضى للخطر. ومن خلال المراقبة المستمرة للبيانات التشغيلية لهذه الأنظمة، يمكن للذكاء الاصطناعي التنبؤي تحديد أي انحرافات قد تشير إلى مشكلة وشيكة، وإرسال تنبيهات فورية إلى فريق الصيانة. هذا النهج المؤتمت لا يقلل فقط من الأخطاء البشرية ويضمن الاتساق في التنفيذ، بل يسمح للنماذج بأن تتطور وتحسن بمرور الوقت من خلال التعلم المستمر من البيانات الجديدة، مما يزيد من دقة تنبؤاتها بشكل مطرد. (Talawar et al., 2023)

2. تمكين التخطيط الاستراتيجي للصيانة والاستبدال حيث تُمكن هذه التقنيات من تحديد العمر المتبقي المفيد (Remaining Useful Life - RUL) للمعدات بدقة غير مسبوقة، وهو مؤشر حيوي للتخطيط طويل الأمد. فمن خلال استخدام خوارزميات متخصصة مثل خوارزميات الانحدار (Regression Algorithms) والشبكات العصبية المتكررة (Recurrent Neural Networks)، يمكن للنماذج تتبع مسار تدهور أداء المعدة بمرور الوقت وتقدير النقطة الزمنية التي من المحتمل أن يحدث فيها الفشل. وهذه القدرة على التنبؤ الدقيق تتيح لمديري المرافق جدولة الصيانة في اللحظة المثلى؛ أي قبل حدوث الفشل بوقت كافٍ لتجنب التوقف غير المخطط له، ولكن ليس قبل الأوان لتجنب إهدار العمر التشغيلي المتبقي للأصل. (Scaife et al., 2024)

وبهذا، فإن الجمع بين القدرة على التنبيه الفوري والتخطيط المستقبلي الدقيق يساهم في تحويل الصيانة من عملية رد فعل إلى وظيفة استراتيجية ومحسوبة، تعزز من السلامة والكفاءة في آن واحد.

مزاياء الذكاء الاصطناعي التنبؤي

إن يقدم الذكاء الاصطناعي التنبؤي مجموعة من المزايا الاستراتيجية التي تتجاوز الجانب التقني لتشمل تحسينات جوهرية في الكفاءة التشغيلية، الأداء المالي، ومستوى السلامة داخل المباني الطبية. يمكن تفصيل هذه المزايا في النقاط التالية:

1. تحسين تخصيص الموارد البشري حيث تتمثل إحدى المزايا الرئيسية في القدرة على توجيه فرق الصيانة بشكل ذكي بدلاً من إرسال الفنيين بشكل روتيني لفحص معدات قد تكون سليمة، أو الاستجابة لحالات طوارئ غير مخططة، يوجه النظام التنبؤي جهودهم نحو المعدات التي تم تحديدها على أنها الأكثر عرضة للفشل وهذا الأمر يضمن أن الفنيين يقضون وقتهم في العمل الأكثر أهمية، مما يزيد من إنتاجيتهم ويقلل من الوقت المهدر. علاوة على ذلك، يمكن للنظام تحديد نوع العطل المتوقع، مما يسمح بإرسال الفني المناسب بالمهارات وقطع الغيار المطلوبة من الزيارة الأولى، وهو ما يقلل من الحاجة لزيارات متعددة للموقع ويحقق فوائد كبيرة في ممارسات الصيانة. (Owen, 2025)

2. تحقيق وفورات مالية كبيرة من خلال تحسين الأداء المالي للمؤسسة فالذكاء الاصطناعي التنبؤي يساهم في تقليل تكاليف الصيانة الإجمالية ويتم ذلك عبر تجنب التكاليف الباهظة المرتبطة بالأعطال الكبرى غير المخطط لها، والتي تشمل تكاليف الإصلاحات الطارئة، استبدال المعدات، وتكلفة التوقف عن العمل. (Downtime) فمن خلال التنبؤ بالفشل، يمكن إجراء إصلاحات صغيرة ومجدولة بتكلفة أقل بكثير، كما أن التنبؤ الدقيق يساهم في إطالة العمر الافتراضي للمعدات وتأخير الحاجة إلى استبدالها. وبهذا، تتحول الصيانة من كونها مركز تكلفة غير متوقع إلى عملية مخططة ومحسوبة. (Almaiman, 2024)

3. تعزيز ثقافة السلامة والموثوقية فمن خلال التنبؤ بالأعطال في أنظمة حيوية كأنظمة مكافحة الحرائق، أو التهوية في مناطق العزل، أو إمداد الطاقة يمكن تجنب الحوادث التي قد تعرض حياة المرضى والموظفين للخطر. إن هذا الانتقال من نهج رد الفعل إلى النهج الاستباقي يعني أن فرق الصيانة تعمل في بيئة أكثر أماناً، حيث يتم التعامل مع المشاكل قبل أن تتفاقم. كما أن الاعتماد على الأنظمة المؤتمتة يضمن الاتساق ويقلل من الأخطاء البشرية، مما يعزز من موثوقية العمليات بشكل منهجي (Ehab et al., 2024).

ثانياً: جودة البيانات كمتغير وسيط في صيانة المباني الطبية

1. مفهوم وأهمية جودة البيانات

تُعرف جودة البيانات (Data Quality - DQ) بأنها مدى ملاءمة البيانات للاستخدام المقصود، وهي مفهوم متعدد الأبعاد يتجاوز مجرد الدقة ليشمل خصائص أخرى حاسمة وفي سياق تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية، تُعد جودة البيانات هي المتغير الوسيط الحاسم الذي يحدد مدى موثوقية ودقة التنبؤات الصادرة عن النماذج. فإذا كانت البيانات المدخلة إلى نماذج التعلم الآلي غير دقيقة أو غير مكتملة، فإن التنبؤات الناتجة ستكون معيبة، مما يؤدي إلى قرارات صيانة خاطئة أو متأخرة (Almaiman, 2024).

أن العلاقة بين المتغير المستقل (تطبيقات الذكاء الاصطناعي) والمتغير التابع (كفاءة الصيانة) ليست علاقة مباشرة، بل يتم تعديلها وتعديلها من خلال جودة البيانات فإذا كانت جودة البيانات منخفضة، فإن تأثير الذكاء الاصطناعي على كفاءة الصيانة سيكون ضعيفاً أو سلبياً، بغض النظر عن نوع أو تعقيد التطبيق المستخدم وبالتالي، فإن أي دراسة تسعى لتقييم تأثير الذكاء الاصطناعي على الصيانة يجب أن تأخذ في الاعتبار الدور الوسيط لجودة البيانات.

2. أبعاد جودة البيانات

وتتفق الأدبيات الأكاديمية على أن جودة البيانات تتكون من مجموعة من الأبعاد المترابطة، والتي يمكن تصنيفها إلى خمسة أبعاد رئيسية ذات صلة بالدراسة الحالية وهي كالتالي :

أ. الدقة: (Accuracy) تُعنى الدقة بمدى تطابق القيمة المسجلة مع القيمة الحقيقية للخاصية المقاسة. وهذا يعني أن قراءات المستشعرات يجب أن تعكس الواقع الفيزيائي بدقة متناهية، وأن البيانات الوصفية (كتاريخ الصيانة) يجب أن تكون صحيحة. إن أي انحراف في الدقة، حتى لو كان طفيفاً، قد يؤدي إلى تعلم النموذج لأنماط خاطئة، مما ينتج عنه إنذارات كاذبة (False Positives) تُهدر الموارد، أو إخفاق في إصدار إنذار لمشكلة حقيقية (False Negatives) قد تكون عواقبه وخيمة (Villa et al., 2024). ويتطلب ضمان الدقة بروتوكولات صارمة تشمل المعايرة الدورية للمستشعرات، وتطبيق خوارزميات

التحقق من صحة البيانات (Data Validation) لتحديد القيم الشاذة (Outliers) التي قد تشير إلى عطل في المستشعر نفسه. (Almaiman, 2024)

ب. الاكتمال: (Completeness) يشير الاكتمال إلى غياب الفجوات أو القيم المفقودة في مجموعة البيانات. فإذا كان النموذج التنبؤي يعتمد على متغيرات متعددة، فإن فقدان أي منها يضعف قدرته التحليلية. في البيئات التشغيلية المعقدة، قد ينجم عدم الاكتمال عن انقطاع في اتصال المستشعرات أو إهمال في التوثيق. إن التعامل مع البيانات المفقودة ليس مجرد تحدٍ تقني، بل هو ضرورة لضمان سلامة الاستدلال التحليلي، حيث إن القرارات المبنية على صورة جزئية قد تكون مضللة. ولمعالجة ذلك، يجب استخدام تقنيات متقدمة لملء الفجوات (Imputation) بطرق إحصائية مدروسة أو عبر نماذج تعلم آلي متخصصة. (Jangoan et al., 2024)

ج. الاتساق: (Consistency) يعني الاتساق أن تكون البيانات موحدة وغير متناقضة عبر مختلف الأنظمة ومصادر البيانات. ويتجاوز هذا المفهوم مجرد توحيد الوحدات والتنسيقات، ليشمل الاتساق الدلالي (Semantic Consistency)، أي أن يكون للمصطلح نفسه المعنى ذاته في جميع الأنظمة. (Ehab et al., 2023) على سبيل المثال، يجب أن يكون تعريف العطل الحرج متطابقاً في نظام إدارة المبنى (BMS) ونظام إدارة الصيانة (CMMS) إن غياب الاتساق يجعل من عملية دمج البيانات عملية محفوفة بالمخاطر، وقد تؤدي إلى نتائج تحليلية متضاربة. ويتطلب تحقيق الاتساق إنشاء قاموس بيانات مركزي (Central Data Dictionary) وتطبيقه بصرامة.

د. التوقيت: (Timeliness) يشير التوقيت إلى مدى حداثة البيانات وتوفرها في اللحظة المناسبة لاتخاذ القرار. في الصيانة التنبؤية، يمثل التوقيت الفارق بين الاستجابة الاستباقية ورد الفعل المتأخر. يجب أن تكون البيانات الآنية (Real-Time Data) متاحة للتحليل بزمن انتقال منخفض (Low Latency) لتمكين النموذج من إصدار تحذيرات قابلة للتنفيذ. (Almaiman, 2024) ولتحقيق ذلك، لا بد من الاستثمار في بنية تحتية قوية لإنترنت الأشياء (IoT) وشبكات اتصال عالية السرعة، مع إمكانية استخدام تقنيات الحوسبة الطرفية (Edge Computing) لمعالجة البيانات بشكل فوري بالقرب من مصدرها. (Owen & Oye, 2025)

هـ. الموثوقية (Reliability) تتعلق الموثوقية بالثقة في مصدر البيانات وسلامتها من أي تلاعب أو تحريف. يجب أن تكون

البيانات صادرة عن مصادر معتمدة، وأن تكون هناك ضمانات لسلامة البيانات (Data Integrity) أثناء نقلها وتخزينها

(Owen & Oye, 2025) في البيئة الطبية، هذا البعد له أهمية قصوى ويتطلب وجود مسارات تدقيق واضحة (Audit Trails)

لكل معلومة. ولضمان الموثوقية، يتم تطبيق إجراءات أمنية متقدمة مثل التشفير والتحكم في الوصول، مع استكشاف

تقنيات واحدة مثل سلسلة الكتل (Blockchain) لضمان عدم قابلية البيانات للتغيير في التطبيقات شديدة الحساسية

(Villa et al., 2024).

إن الفشل في تحقيق أي من هذه الأبعاد الخمسة يمكن أن يقوض بشكل كبير من فعالية تطبيقات الذكاء الاصطناعي فإذا

كانت بيانات سجلات الصيانة التاريخية غير مكتملة (نقص في تواريخ الأعطال أو تفاصيل الإصلاح)، فلن يتمكن نموذج

الذكاء الاصطناعي من التعرف على الأنماط الكاملة التي تسبق الفشل، مما يقلل من دقة التنبؤ (Talawar et al., 2023).

3. التحديات ودور جودة البيانات في اتخاذ القرار

أن تحديات البيانات هي أحد الحواجز الرئيسية أمام تبني الذكاء الاصطناعي حيث تواجه المباني الطبية تحديات فريدة في الحفاظ

على جودة البيانات، نظراً لتنوع وتعقيد الأنظمة الموجودة فيها وتشمل هذه التحديات تباين أجهزة الاستشعار والبروتوكولات،

والحاجة إلى دمج البيانات من أنظمة تكنولوجية قديمة (Legacy Systems) مع الأنظمة الحديثة، والقيود المفروضة على

خصوصية بيانات المرضى (HIPAA/GDPR) التي قد تعيق استخدام بعض البيانات لأغراض الصيانة ولكي يتم التغلب

على هذه التحديات يتطلب استراتيجية شاملة لإدارة البيانات (Data Governance) لتشمل جميع أصحاب المصلحة،

من مديري المرافق إلى فنيي الصيانة وخبراء تكنولوجيا المعلومات ويجب أن تركز هذه الاستراتيجية على إنشاء بنية تحتية موحدة

للبينات، وتطبيق معايير جودة صارمة، وتوفير التدريب اللازم للموظفين (Oye & Owen, 2025).

وتترجم جودة البيانات إلى جودة في اتخاذ القرار ففي بيئة الصيانة التنبؤية، يتم اتخاذ قرارات حاسمة، مثل متى يتم إيقاف تشغيل

معدة حيوية للصيانة، أو متى يتم طلب قطع غيار مكلفة فإذا كانت هذه القرارات مبنية على بيانات ذات جودة منخفضة،

فإنها قد تؤدي إلى إهدار الموارد أو تعريض سلامة العمليات لذلك إن جودة البيانات تضمن أن التنبؤات التي يقدمها الذكاء

الاصطناعي موثوقة وقابلة للتنفيذ، مما يمكن مديري المرافق من اتخاذ قرارات مستنيرة ومبررة فإن الاستثمار في جودة البيانات هو

استثمار في القدرة على اتخاذ قرارات صيانة استباقية وفعالة، مما يعزز من الكفاءة العامة للمبنى الطبي ويضمن استمرارية الخدمات الحيوية (Ehab et al., 2023).

ثالثاً: كفاءة صيانة المباني الطبية (المتغير التابع)

1. مفهوم كفاءة الصيانة

تُعرف كفاءة صيانة المباني الطبية (Medical Building Maintenance Efficiency) بأنها قدرة نظام الصيانة على تحقيق أهدافه بأقل قدر ممكن من الموارد (الوقت، التكلفة، الجهد)، مع ضمان أعلى مستويات الموثوقية التشغيلية والسلامة ففي بيئة المستشفيات، لا تُقاس الكفاءة بالمعايير الاقتصادية وحدها، بل ترتبط ارتباطاً وثيقاً بجودة الرعاية المقدمة وسلامة المرضى والموظفين إن تطبيق الذكاء الاصطناعي، مدعوماً بجودة بيانات عالية، يهدف بشكل أساسي إلى تحويل الصيانة من عملية تفاعلية ومكلفة إلى عملية استباقية ومحسوبة، مما يعزز الكفاءة بشكل جذري وتُقاس هذه الكفاءة من خلال أربعة مؤشرات رئيسية تعكس الأهداف الاستراتيجية لإدارة المرافق الطبية: تقليل زمن التوقف (Reducing Downtime)، خفض التكاليف (Cost Reduction)، إطالة العمر الافتراضي للمعدات (Extending Lifespan)، وزيادة الموثوقية (Increasing Reliability) (الحفناوى, 2025).

2. مؤشرات قياس الكفاءة

أ. تقليل زمن التوقف (Reducing Downtime)

يُعد زمن التوقف (Downtime) أحد أهم المؤشرات السلبية لكفاءة الصيانة، خاصة في المباني الطبية حيث يمكن أن يؤدي توقف المعدات الحيوية إلى عواقب وخيمة إن تقليل زمن التوقف إلى قدرة نظام الصيانة على ضمان استمرارية العمليات التشغيلية دون انقطاع. يساهم الذكاء الاصطناعي التنبؤي بشكل مباشر في هذا المؤشر من خلال تحديد الأعطال المحتملة قبل وقوعها، مما يسمح بجدولة الصيانة في أوقات مناسبة وغير حرجة. يؤكد على أن الصيانة الوقائية ضرورية لتقليل زمن التوقف وضمان أن أنظمة المبنى تعمل بسلاسة وكفاءة وإن الانتقال من الصيانة التفاعلية (التي تحدث بعد العطل) إلى الصيانة التنبؤية (التي تحدث قبل العطل) يقلل بشكل كبير من التوقف غير المخطط له، والذي غالباً ما يكون أطول وأكثر تكلفة من التوقف المخطط له.

إن كل دقيقة يتم توفيرها من زمن التوقف في نظام حيوي، مثل نظام التهوية في غرف العمليات، تترجم مباشرة إلى زيادة في الكفاءة التشغيلية والقدرة على تقديم الرعاية (Oye, & Owen,2025)

ب. خفض التكاليف (Cost Reduction)

يشمل خفض التكاليف جميع النفقات المرتبطة بعمليات الصيانة، بما في ذلك تكاليف العمالة، وقطع الغيار، وتكاليف الطوارئ، وتكاليف الطاقة يساهم الذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف من خلال عدة آليات ممثلة بالآتي:

1. يقلل من الحاجة إلى الصيانة الوقائية الروتينية غير الضرورية، مما يوفر في تكاليف العمالة وقطع الغيار.

2. يمنع الأعطال الكبرى والمفاجئة التي تتطلب إصلاحات طارئة باهظة الثمن.

3. يحسن من كفاءة الطاقة من خلال التحليل المستمر لأنماط الاستهلاك.

إن الكفاءة في التكلفة تتحقق من خلال منع أعطال المعدات وتجنب الإصلاحات الطارئة المكلفة. كما أن التنبؤ الدقيق بالاحتياجات المستقبلية لقطع الغيار، كما تم مناقشته في المتغير الوسيط، يقلل من تكاليف الاحتفاظ بالمخزون الزائد لذلك إن التحول إلى الصيانة القائمة على الحالة (Condition-Based Maintenance) التي يتيحها الذكاء الاصطناعي يضمن أن يتم إنفاق كل دولار من ميزانية الصيانة في الوقت والمكان الأكثر فعالية، مما يعظم العائد على الاستثمار (Oye, & Owen,2025)

ج. إطالة العمر الافتراضي للمعدات (Extending Lifespan)

تُعد إطالة العمر الافتراضي للمعدات مؤشراً حيوياً لكفاءة الصيانة، حيث تؤدي إلى تأخير النفقات الرأسمالية الكبيرة لاستبدال الأصول. يساهم الذكاء الاصطناعي في هذا المؤشر من خلال ضمان أن المعدات تعمل دائماً ضمن ظروف التشغيل المثلى فمن خلال المراقبة المستمرة وتحديد الانحرافات الطفيفة في الأداء، يمكن لنظام الذكاء الاصطناعي التوصية بتدخلات تصحيحية صغيرة تمنع التدهور التدريجي الذي يؤدي إلى الفشل المبكر فعلى سبيل المثال، يمكن للنظام أن يكتشف ارتفاعاً طفيفاً في درجة حرارة محمل، ويوصي بتزييته قبل أن يتسبب الاحتكاك الزائد في تلف دائم إن الصيانة الاستباقية والموجهة التي يوفرها الذكاء الاصطناعي

تضمن أن المعدات تعمل بكفاءة قصوى طوال فترة خدمتها، مما يطيل من عمرها الافتراضي ويؤجل الحاجة إلى الاستبدال (Villa et al., 2024).

د. زيادة الموثوقية (Increasing Reliability)

تُعرف الموثوقية بأنها احتمالية أن تعمل المعدة أو النظام دون فشل لفترة زمنية محددة وفي ظل ظروف تشغيل معينة. في المباني الطبية، الموثوقية هي مرادف للسلامة والجودة. يساهم الذكاء الاصطناعي في زيادة الموثوقية من خلال تحسين دقة التنبؤات وتقليل حالات الفشل غير المتوقعة. عندما يتمكن نظام الصيانة من التنبؤ بالأعطال وتجنبها باستمرار، تزداد ثقة المستخدمين (الأطباء والمرضى والإدارة) في البنية التحتية للمبنى إن الأنظمة المؤتمنة تهدف إلى ضمان استمرارية الخدمات. إن زيادة الموثوقية لا تعني فقط تقليل الأعطال، بل تعني أيضاً تحسين جودة الأداء، حيث يضمن الذكاء الاصطناعي أن المعدات تعمل دائماً بأقصى كفاءة ممكنة. هذا المستوى العالي من الموثوقية هو أمر بالغ الأهمية لضمان أن الخدمات الطبية الحيوية، مثل أنظمة دعم الحياة أو غرف العمليات، تكون متاحة وجاهزة للعمل في أي وقت (Ehab et al., 2023).

3. الأهمية الاستراتيجية لكفاءة الصيانة

تتجاوز كفاءة الصيانة المؤشرات الأربعة المذكورة لتشمل الكفاءة التشغيلية الشاملة للمبنى الطبي. فمن خلال تحسين الصيانة، يساهم الذكاء الاصطناعي في تحسين بيئة العمل للموظفين، وتقليل الإزعاج للمرضى، وتحسين استهلاك الطاقة فإن التطبيقات الناجحة للذكاء الاصطناعي في الصيانة هي الأكثر انتشاراً ونجاحاً وتعتبر الكفاءة هي نتاج للتكامل بين التكنولوجيا والعمليات والموارد البشرية فعندما يتم تقليل الأعطال، يمكن لفرق الصيانة التركيز على الأنشطة ذات القيمة المضافة بدلاً من إطفاء الحرائق. كما أن البيانات الدقيقة التي يوفرها الذكاء الاصطناعي تمكن الإدارة من اتخاذ قرارات استراتيجية لتحسين العمليات بشكل مستمر، ففي الرعاية الصحية، ترتبط الكفاءة ارتباطاً وثيقاً بالجودة فالمبنى الذي يتمتع بكفاءة صيانة عالية هو مبنى يوفر بيئة آمنة وموثوقة لتقديم رعاية صحية عالية الجودة. إن تقليل زمن التوقف وزيادة الموثوقية يضمنان أن المعدات الطبية الحيوية، مثل أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي أو أجهزة التنفس الصناعي، تكون متاحة للعمل عند الحاجة إليها إلا أن الصيانة الاستباقية تساهم في بيئة أكثر أماناً وبالتالي، فإن كفاءة صيانة المباني الطبية ليست مجرد هدف إداري، بل هي شرط أساسي لضمان جودة

الرعاية الصحية. إن الذكاء الاصطناعي، من خلال تحسين مؤشرات الكفاءة، يساهم بشكل غير مباشر في تحسين جودة الخدمات الصحية المقدمة (Oye & Owen,2025)

لا يقتصر دور الذكاء الاصطناعي على تحسين الكفاءة فحسب، بل يمتد ليشمل قياسها وتتبعها بدقة فمن خلال تحليل البيانات التشغيلية، يمكن لنظام الذكاء الاصطناعي حساب مؤشرات الأداء الرئيسية المتعلقة بالصيانة، مثل متوسط الوقت بين الأعطال ، ومتوسط وقت الإصلاح ، وتكلفة الصيانة كنسبة مئوية من قيمة الاستبدال. هذه القدرة على القياس الدقيق والمستمر تمكن مديري المرافق من

رابعاً: الأساس النظري للدراسة

تستند الدراسة الحالية إلى نظرية القدرات الديناميكية (Dynamic Capabilities Theory – DCT) وتعد نظرية القدرات الديناميكية (Teece et al., 1997) الإطار النظري الأنسب لتفسير العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي وكفاءة صيانة المباني الطبية، والدور الوسيط لجودة البيانات وتنص النظرية على أن الميزة التنافسية المستدامة للمؤسسة لا تنبع فقط من الأصول والموارد الحالية (الموارد الثابتة)، بل من قدرتها على استشعار (Sensing) الفرص والتهديدات، واغتنام (Seizing) هذه الفرص، وإعادة تشكيل (Transforming) الأصول والموارد التنظيمية لتحقيق التكيف مع البيئات المتغيرة (Teece, 2007).

1. الأبعاد الرئيسية لنظرية القدرات الديناميكية

تتكون القدرات الديناميكية من ثلاثة أبعاد رئيسية :

البعد	المفهوم	الارتباط بالدراسة الحالية
الاستشعار (Sensing)	القدرة على استشعار وتحديد الفرص والتهديدات في البيئة التكنولوجية والسوقية.	يمثل الذكاء الاصطناعي التحليلي والتنبؤي قدرة استشعار متقدمة، حيث يقوم بجمع وتحليل البيانات الضخمة (Big Data) من أجهزة الاستشعار (IoT) لتحديد أنماط التدهور والأعطال المحتملة قبل وقوعها.

تمثل جودة البيانات العالية (كفاءة جمعها ومعالجتها) القدرة على انتهاز الفرصة، حيث تمكن الإدارة من اتخاذ قرارات صيانة استباقية ومحسوبة (Seizing the opportunity to intervene).	القدرة على اغتنام الفرص المحددة من خلال تطوير استراتيجيات ونماذج عمل جديدة.	الاغتنام (Seizing)
تمثل كفاءة صيانة المباني الطبية (المتغير التابع) النتيجة النهائية لعملية إعادة التشكيل، حيث تؤدي إلى تحسين الموثوقية، خفض التكاليف، وإطالة العمر الافتراضي للأصول، مما يعزز الأداء التشغيلي المستدام للمستشفى.	القدرة على الحفاظ على الميزة التنافسية من خلال التجديد المستمر للأصول والكفاءات.	إعادة التشكيل (Transforming)

2. ربط النظرية بنموذج الدراسة

تفسر نظرية القدرات الديناميكية العلاقة بين متغيرات الدراسة على النحو التالي:

- الذكاء الاصطناعي (AI) كقدرة استشعار: يوفر الذكاء الاصطناعي (التحليلي والتنبؤي) الآليات التكنولوجية المتقدمة لاستشعار حالة الأصول الطبية والبنية التحتية للمبنى بدقة غير مسبوقة.
- جودة البيانات كقدرة اغتنام: تعمل جودة البيانات كعامل وسيط يحدد مدى فعالية تحويل هذا الاستشعار إلى إجراءات صيانة حقيقية وفعالة (انتهاز الفرصة) فالبيانات عالية الجودة هي التي تمكن الإدارة من اغتنام الفرصة لاتخاذ قرار الصيانة الأمثل.
- كفاءة الصيانة كقدرة إعادة تشكيل: تؤدي القرارات القائمة على الاستشعار والانتهاز الفعال إلى إعادة تشكيل عملية الصيانة، مما يحقق الكفاءة التشغيلية المستدامة والميزة التنافسية للمستشفى.

خامساً: التحول الرقمي والذكاء الاصطناعي في القطاع الصحي السعودي

تضع رؤية 2030 هدفاً استراتيجياً لتحسين كفاءة وفعالية قطاع الرعاية الصحية (وزارة الصحة، 2020) ويُعد تبني التقنيات المتقدمة، وعلى رأسها الذكاء الاصطناعي، ركيزة أساسية لتحقيق هذا الهدف (العتيبي، 2023) فالمملكة تستثمر بشكل كبير في البنية التحتية الرقمية لتمكين المستشفيات من التحول إلى مستشفيات ذكية تعتمد على إنترنت الأشياء والتحليلات التنبؤية في إدارة مرافقها (الغامدي وآخرون، 2024)

1. واقع الذكاء الاصطناعي في إدارة المرافق الصحية السعودية

تشهد المستشفيات الحكومية في المملكة، وخاصة التابعة لوزارة الصحة والتجمعات الصحية، تسارعاً في تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي، لا سيما في مجالات التشخيص الطبي وإدارة المواعيد. ومع ذلك، لا يزال تطبيق الذكاء الاصطناعي في إدارة المرافق والصيانة يواجه تحديات تتعلق بشكل أساسي بجودة البيانات المتاحة من أنظمة إدارة الصيانة المحوسبة (CMMS) وأنظمة إدارة المباني (BMS) (Alkhatib et al., 2025).

إن حجم تبني تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الصيانة لا يزال في مراحله الأولى، ويتركز في الغالب على الصيانة التفاعلية والوقائية المدعومة بالبيانات، مع وجود توجه متزايد نحو الصيانة التنبؤية هذا الواقع يبرر الحاجة إلى دراسة تقييمية تركز على الدور الحاسم لجودة البيانات كمتغير وسيط لضمان نجاح هذا التحول التقني في القطاع الحكومي (Alghareeb, 2025).

2. اختبار المستشفيات الحكومية كدراسة حالة

تم اختيار المستشفيات الحكومية في المملكة العربية السعودية كدراسة حالة (Case Study) للأسباب التالية:

- الأهمية الاستراتيجية حيث تمثل المستشفيات الحكومية العمود الفقري لتقديم الرعاية الصحية في المملكة، وأي خلل في كفاءة صيانة مبانيها يؤثر بشكل مباشر على الأمن الصحي الوطني.
- المستشفيات الحكومية هي الأكبر من حيث حجم الأصول والمعدات، وبالتالي هي الأكثر حاجة لتقنيات الذكاء الاصطناعي لتحقيق الكفاءة المطلوبة في رؤية 2030.

3. يمثل التحدي المتمثل في جودة البيانات في البيئة الحكومية (التي غالباً ما تكون متباينة وغير متكاملة) فرصة فريدة لاختبار الدور الوسيط لجودة البيانات في بيئة واقعية وحرية .

الدراسات السابقة

1. الدراسات التي تناولت المتغير المستقل (تطبيقات الذكاء الاصطناعي)

ونفذ الباحثان Latifi & Orooje (2021) دراسة بعنوان: A Review of Artificial Intelligence Inclusion in IoT and Building Information Modeling for Healthcare Facility Maintenance Management. وهدفت هذه الدراسة إلى مراجعة دمج الذكاء الاصطناعي في إنترنت الأشياء ونمذجة معلومات البناء لإدارة صيانة المرافق الصحية، و تحديد التحديات التقنية والإدارية التي تعيق هذا الدمج واعتمدت الدراسة على منهجية المراجعة المنهجية، وتم تحليل 45 دراسة سابقة كما أكدت النتائج على أن دمج الذكاء الاصطناعي مع BIM و IoT يعزز كفاءة الصيانة بشكل كبير، و هناك حاجة لمزيد من البحث لمواجهة تحديات إدارة البيانات الضخمة في هذا المجال وتعد هذه الدراسة متخصصة في AI والصيانة في الرعاية الصحية، ولكنها لم تختبر العلاقة بشكل إحصائي، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

وقام الباحثون Talawar et al (2023) بإجراء دراسة بعنوان: Predictive Maintenance in Healthcare IoT: A Machine Learning Approach. هدفت هذه الدراسة الكمية التطبيقية إلى تطبيق نهج التعلم الآلي في الصيانة التنبؤية في إنترنت الأشياء للرعاية الصحية، و تقييم أداء نماذج التعلم الآلي في التنبؤ بأعطال الأجهزة الطبية واعتمدت الدراسة على منهجية كمية تطبيقية، وتم تطبيقها على 143 متخصصاً في القطاع الصحي وبيانات من 50 جهاز وأكدت النتائج على أن النماذج حققت دقة تنبؤ بلغت 42.95% في الكشف عن الأعطال، و انخفاض الأداء كان بسبب مشاكل الضوضاء والقيم المفقودة في البيانات، مما يؤكد أهمية جودة البيانات. وتعد هذه الدراسة تطبيقية في السياق الصحي وتؤكد على أهمية جودة البيانات، ولكنها لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

قام Scaife et al (2024) بإجراء دراسة بعنوان: Improve Predictive Maintenance Through

the Application of Artificial Intelligence. هدفت هذه الدراسة إلى مراجعة منهجية للدراسات التي تناولت

تحسين الصيانة التنبؤية عبر تطبيقات الذكاء الاصطناعي، و تحديد الفجوات البحثية في دمج الذكاء الاصطناعي مع إدارة المرافق

واعتمدت الدراسة على منهجية المراجعة المنهجية (Systematic Review)، وتم تحليل 79 دراسة سابقة وأكدت النتائج

على أن الذكاء الاصطناعي يوفر قدرات إضافية لإدارة المرافق بشكل كبير، خاصة في التنبؤ بالأعطال، و هناك نقص في

الدراسات التي تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات في هذا السياق حيث تعد هذه الدراسة حديثة ومتخصصة في AI والصيانة

التنبؤية، ولكنها لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في

سياق صيانة المباني.

وقام العوضي (2025) بإجراء دراسة بعنوان: الدور والتأثير للذكاء الاصطناعي في مجالات الهندسة الميكانيكية: تحليل للتطبيقات

والتحديات وهدفت هذه الدراسة إلى تحليل الدور والتأثير للذكاء الاصطناعي في مجالات الهندسة الميكانيكية، و تحديد أبرز

التحديات التي تواجه تطبيقه في الصيانة التنبؤية. اعتمدت الدراسة على منهجية مراجعة الأدبيات النظامية، وتم تحليل 40 دراسة

سابقة وأكدت النتائج على أن الذكاء الاصطناعي ضروري في الصيانة التنبؤية لتحقيق كفاءة عالية، و جودة البيانات محورية

لنجاح نماذج الذكاء الاصطناعي في هذا المجال. وتوفر هذه الدراسة إطاراً نظرياً قوياً يؤكد على جودة البيانات كعامل نجاح،

ولكنها تركز على البيئة الصناعية والمعدات الميكانيكية، مما يتطلب دراسة متخصصة في البيئة الطبية الحرجة.

وأجراء الباحثون Alkhatib et al (2025) دراسة بعنوان AI-Driven Decision Support

Framework for Preventing Equipment Failures in Saudi Hospitals. هدفت هذه الدراسة

الكمية التطبيقية إلى تطوير إطار دعم قرار قائم على الذكاء الاصطناعي لمنع فشل المعدات في المستشفيات السعودية، و تقييم

دقة خوارزميات الذكاء الاصطناعي في الكشف عن أنماط الفشل. اعتمدت الدراسة على منهجية كمية تطبيقية، وتم تطبيقها

على بيانات من 150 جهاز طبي في مستشفيات سعودية وأكدت النتائج على أن خوارزميات الذكاء الاصطناعي قادرة على

الكشف عن أنماط الفشل بدقة 87%، و تطبيق الإطار المقترح يقلل من وقت التوقف غير المخطط له للمعدات الحيوية. وتعد

هذه الدراسة حديثة وفي السياق السعودي والمستشفيات، ولكنها لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل، مما يترك

فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

وقام الباحث Owen (2025) بإجراء دراسة بعنوان: Integrating Predictive Maintenance and

Building Condition Review: A Data-Driven Approach to Enhance Asset

Longevity and Reduce Operational Ambiguity in Commercial Buildings. هدفت

هذه الدراسة الوصفية التحليلية إلى دمج الصيانة التنبؤية ومراجعة حالة المبنى لتعزيز طول عمر الأصول، و تقليل الغموض

التشغيلي من خلال نهج قائم على البيانات. اعتمدت الدراسة على منهجية وصفية تحليلية، وتم تطبيقها على دراسات حالة من

8 مباني تجارية في أستراليا وأكدت النتائج على انخفاض في تكاليف الصيانة بنسبة 30-50% نتيجة للنهج التنبؤي، و

انخفاض في أعطال المعدات بنسبة 40%، مما يطيل عمر الأصول. وتعد هذه الدراسة حديثة وتؤكد على الحاجة إلى نماذج

صيانة استباقية تعتمد على البيانات، ولكنها لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل، مما يترك فجوة في فهم الآلية

التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

وقام Urbi & Tiva (2025) بإجراء دراسة بعنوان "Technology and Innovation in

Healthcare: Adoption of AI and Predictive Analytics in Hospital Management".

234: هدفت الدراسة إلى استقصاء كيفية إعادة تشكيل الذكاء الاصطناعي والتحليلات التنبؤية لإدارة المستشفيات من خلال

تعزيز الكفاءة التشغيلية، وتحديد العوائق التي لا تزال قائمة أمام التبني الناجح للذكاء الاصطناعي وتعتبر دراسة حالة تحليلية

وأكدت النتائج على أن يتم تطبيق النماذج القائمة على الذكاء الاصطناعي بشكل متزايد للتنبؤ بطلب المرضى وتحسين تخطيط

القوى العاملة، و التبني الناجح للذكاء الاصطناعي يتطلب بنية تحتية رقمية قوية وتتناول الدراسة التحليلات التنبؤية في إدارة

المستشفيات ومع ذلك، فإنها تركز على الجوانب الإدارية والسريية العامة ولا تتناول صيانة المباني والأصول بشكل مباشر، مما

يبرز الفجوة في تطبيق هذه التقنيات على صيانة المرافق الحيوية.

2. دراسات تناولت المتغير الوسيط (جودة البيانات) .

وقام الخلايلة (2021) دراسة بعنوان: أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي على جودة الرعاية الصحية: دراسة تطبيقية على

مستشفيات وزارة الصحة الأردنية وهدفت هذه الدراسة الكمية المسحية إلى التعرف على أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي على

جودة الرعاية الصحية، و تحديد أبرز التحديات التي تواجه تطبيقها في المستشفيات واعتمدت الدراسة على منهجية كمية مسحية، وتم تطبيقها على عينة من العاملين في مستشفيات وزارة الصحة الأردنية (n=250) وأكدت النتائج على أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي تساهم في تحسين جودة الرعاية الصحية، و هناك تحديات تتعلق بالبنية التحتية للبيانات وجودتها تعيق الاستفادة الكاملة. وتعد هذه الدراسة خليجية وفي سياق المستشفيات، ولكنها لم تفصل في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الصيانة ولم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

ونفذ الباحثين المبلي والضحوي (2023) دراسة بعنوان: نضج إدارة البيانات الرئيسية في المؤسسات الحكومية: دراسة حالة لوزارة النقل والخدمات اللوجستية. هدفت هذه الدراسة إلى تقييم نضج إدارة البيانات الرئيسية في المؤسسات الحكومية السعودية، وتحديد الأبعاد التنظيمية والإدارية اللازمة لتحسين جودة البيانات واعتمدت الدراسة على منهجية تحليل المحتوى ودراسة الحالة، وتم تطبيقها على وزارة النقل والخدمات اللوجستية في المملكة العربية السعودية وأكدت النتائج على أن جودة البيانات ركيزة أساسية في اتخاذ القرارات الحكومية الفعالة، و البعد التنظيمي والإداري (وليس التقني فقط) مهم لتحسين جودة البيانات. وتعد هذه الدراسة سعودية وتدعم أهمية جودة البيانات في المؤسسات الحكومية، ولكنها لم تتناول تطبيقات الذكاء الاصطناعي، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

اجراء الباحث Samson (2025) دراسة بعنوان Overcoming Data Quality Challenges in Health Predictive Models. هدفت هذه الدراسة الكمية التجريبية إلى التغلب على تحديات جودة البيانات في النماذج التنبؤية الصحية، و قياس تأثير تحسين جودة البيانات على دقة نماذج التنبؤ واعتمدت الدراسة على منهجية كمية تجريبية، وتم تطبيقها على بيانات من قاعدة MIMIC-III و eICU (أكثر من 40,000 سجل مريض). وأكدت النتائج على أن تحسين جودة البيانات رفع دقة نموذج الغابات العشوائية من 68% إلى 84%، و جودة البيانات تمثل عاملاً حاسماً لموثوقية النماذج التنبؤية في الرعاية الصحية. وتعد هذه الدراسة قوية وتؤكد على أن جودة البيانات تمثل عاملاً حاسماً لموثوقية النماذج التنبؤية، ولكنها ركزت على التشخيص الطبي والرعاية الصحية العلاجية، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني

وفي دراسة اجراها الباحثين (Kasali & Oladapo (2025) بعنوان "استخدام التحليلات التنبؤية لتحسين الوصول إلى الرعاية الصحية في الولايات المتحدة"، والتي هدفت إلى استكشاف كيفية تطبيق النماذج التنبؤية القائمة على الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات لتحسين إتاحة الخدمات الصحية، واقتراح أطر سياسية وتنظيمية لضمان تطبيق أخلاقي وعادل لهذه التقنيات. اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي من خلال مراجعة الأدبيات وتحليل البيانات الثانوية من الأنظمة الصحية الأمريكية، مع التركيز على برامج Medicare و Medicaid والتجارب الواقعية في مؤسسات مثل Kaiser Permanente. وأظهرت النتائج أن النماذج التنبؤية ساهمت في خفض معدلات إعادة دخول المستشفى بنسبة 15%، وتقصيل مدة الإقامة بمعدل 0.67 يوم، وتوفير مدخرات مالية سنوية تتراوح بين 55-72 مليون دولار. وتتفق هذه الدراسة مع الدراسة الحالية على الأهمية المحورية لجودة البيانات وموثوقيتها كشرط أساسي لضمان دقة النماذج التنبؤية .

قام Chen (2025) بإجراء دراسة بعنوان Data Quality Assessment Framework for AI-Driven Predictive Maintenance in Smart Buildings. هدفت الدراسة إلى تطوير إطار عمل لتقييم جودة البيانات المجمعة من أجهزة الاستشعار المستخدمة في الصيانة التنبؤية للمباني الذكية، و اختبار تأثير أبعاد جودة البيانات (الدقة، الاكتمال، التوقيت) على موثوقية نماذج التنبؤ بالأعطال. 240 المنهجية: كمي تجريبي وأكدت النتائج على جودة البيانات هي العامل الأكثر تأثيراً على دقة نماذج الصيانة التنبؤية، حيث أدى تحسين الاكتمال بنسبة 10% إلى زيادة دقة التنبؤ بنسبة 5%، والإطار المقترح ساعد في تقليل الإنذارات الكاذبة (False Positives) بنسبة 15%. وتُعد هذه الدراسة متخصصة للغاية في جودة البيانات والصيانة التنبؤية، وتدعم الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل مباشر. الفجوة تكمن في أن الدراسة طبقت على المباني الذكية بشكل عام وليس على المباني الطبية ذات الحساسية والتعقيد العالي، مما يبرر الحاجة لدراسة السياق الطبي.

و قام Musonda & Tjebane (2025) بإجراء دراسة بعنوان The Impact of Smart Maintenance Strategies on Operational Efficiency in Healthcare Facilities. وهدفت الدراسة إلى تقييم تأثير استراتيجيات الصيانة الذكية (بما في ذلك الصيانة التنبؤية) على مؤشرات الكفاءة التشغيلية في المرافق الصحية، و تحديد مؤشرات الأداء الرئيسية (KPIs) الأكثر تأثراً بالتحول إلى الصيانة الذكية. واعتمدت المنهج الكمي المسحي والتحليلي. وأكدت النتائج على الصيانة الذكية أدت إلى انخفاض في متوسط وقت الإصلاح (MTTR) بنسبة 30% وزيادة في متوسط الوقت بين الأعطال (MTBF) بنسبة 45%، وتحسين الكفاءة التشغيلية انعكس إيجاباً على رضا المرضى بنسبة 12%. 247 النقد

والربط بالدراسة الحالية: تُعد هذه الدراسة حديثة ومباشرة في تقييم كفاءة الصيانة في المرافق الصحية. تبرز أهمية الصيانة الذكية كمتغير تابع. الفجوة تكمن في أنها لم تفصل في الآلية الداخلية (جودة البيانات) التي تربط الذكاء الاصطناعي بهذه الكفاءة، مما يدعم الحاجة إلى دراسة الدور الوسيط لجودة البيانات.

3. دراسات تناولت المتغير التابع (كفاءة صيانة المباني الطبية)

. وقام Villa et al (2021) بإجراء دراسة بعنوان: Open-Source IoT Architecture for Building Facility Maintenance. هدفت هذه الدراسة التطبيقية التجريبية إلى تطوير بنية إنترنت أشياء مفتوحة المصدر لصيانة مرافق المباني، و اختبار قدرة النظام على رصد حالات التشغيل غير الطبيعية في أنظمة التدفئة والتبريد واعتمدت الدراسة على منهجية تطبيقي تجريبي، وتم تطبيقها على ملفات تبريد وتدفئة في مختبر بجامعة تورينو بإيطاليا وأكدت النتائج على أن النظام نجح في رصد حالات التشغيل غير الطبيعية بدقة عالية، و دمج بيانات المستشعرات مع النموذج حقق تمثيلاً مرئياً حياً لحالة المعدات. وتعد هذه الدراسة تطبيقاً عملياً قوياً يؤكد على أهمية البنية التحتية للبيانات في الصيانة التنبؤية، ولكنها ركزت على التكامل التقني دون التعمق في جودة البيانات كعامل وسيط، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

أجراء الباحثون Ehab et al (2024) دراسة بعنوان: BIM-Based Maintenance System with IoT Integration: Enhancing Building Performance and Facility Management. هدفت هذه الدراسة التطبيقية إلى تعزيز أداء المبنى وإدارة المرافق من خلال نظام صيانة قائم على BIM ومتكامل مع إنترنت الأشياء، و قياس تأثير النظام على خفض تكاليف الصيانة وتحسين صنع القرار واعتمدت الدراسة على منهجية دراسة حالة تطبيقية، وتم تطبيقها على 143 خبير ومختص في قطاع البناء ومبنى حقيقي وأكدت النتائج على أن النظام ساهم في خفض تكاليف الصيانة بشكل ملحوظ، و تحسين صنع القرار عبر البيانات في الوقت الفعلي هو العامل الأهم لنجاح التطبيقات. وتعد هذه الدراسة حديثة وتؤكد على أن نجاح التطبيقات يعتمد على جودة البيانات، ولكنها لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

في دراسة الرقبة (2024) بعنوان "دور الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة العمليات الإدارية"، هدفت إلى تحليل تأثير الذكاء الاصطناعي على كفاءة العمليات الإدارية واستكشاف تطبيقاته العملية في مختلف المجالات واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي من خلال تحليل المصادر الثانوية مثل الأدبيات ودراسات الحالة لشركات ك Siemens و Unilever. وأظهرت النتائج أن الذكاء الاصطناعي ساهم في رفع الكفاءة التشغيلية بنسبة تصل إلى 30%، كما أدى إلى خفض التكاليف وتحسين دعم اتخاذ القرار عبر التحليلات التنبؤية وتتفق هذه الدراسة مع الدراسة الحالية على أن التحليلات القائمة على البيانات سواء في العمليات الإدارية العامة أو في صيانة المباني الطبية المتخصصة تعد حجر الزاوية لتحقيق الكفاءة التشغيلية، كما تبرز أهمية جودة البيانات كشرط أساسي لضمان فعالية هذه الحلول الذكية وموثوقية نتائجها

وأجراء الباحثون Moreno et al (2024) دراسة بعنوان: Virtual Tours as an Effective Complement to Building Information Modeling in Facility Management Using IoT. هدفت هذه الدراسة التطبيقية إلى استخدام الجولات الافتراضية كمكمل فعال لنمذجة معلومات البناء في إدارة المرافق باستخدام إنترنت الأشياء، و تقييم فعالية النظام في تمكين المستخدمين من الوصول إلى بيانات المستشعرات واعتمدت الدراسة على منهجية دراسة حالة تطبيقية، وتم تطبيقها على منشأة بحثية ومبنى مكاتب في إسبانيا وأكدت النتائج على أن النظام نجح في تمكين المستخدمين من الوصول إلى بيانات المستشعرات بكفاءة عالية، و الربط الفعال بين الجولة الافتراضية و BIM يسهل عمليات الصيانة عن بعد. وتعد هذه الدراسة تطبيقاً عملياً يؤكد على أهمية التكامل التقني كأساس لتغذية نماذج الذكاء الاصطناعي، ولكنها ركزت على البنية التحتية والربط التقني دون التعمق في التنبؤات الاستباقية، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

قام الحفناوى (2025) بإجراء دراسة بعنوان تحسين كفاءة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات باستخدام نظم إدارة الصيانة المحوسبة ونمذجة معلومات البناء. هدفت هذه الدراسة التحليلية إلى تقييم مدى مساهمة نظم إدارة الصيانة المحوسبة (CMMS) ونمذجة معلومات البناء (BIM) في تحسين كفاءة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات، و تحديد العوامل التي تزيد من موثوقية المباني الطبية. اعتمدت الدراسة على منهجية تحليلية، وتم تطبيقها على مباني مستشفيات حكومية في مصر (n=5). أكدت النتائج على أن دمج CMMS و BIM يرفع من موثوقية المباني ويطيل عمرها الافتراضي، و التخطيط المسبق للصيانة يقلل من التكاليف التشغيلية بنسبة 20%. وتعد هذه الدراسة حديثة وفي سياق المستشفيات الحكومية،

ولكنها ركزت على نظم إدارة الصيانة المحوسبة ونمذجة معلومات البناء، ولم تفصل في تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية، مما

يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني

وقام الجواني (2025) بإجراء دراسة بعنوان الذكاء الاصطناعي وجودة المرافق العامة في المملكة العربية السعودية: الفرص

والتحديات. هدفت هذه الدراسة الاستقرائية التحليلية إلى تحليل الفرص والتحديات المتعلقة بالذكاء الاصطناعي وجودة المرافق

العامة في المملكة العربية السعودية، و تقييم مدى مساهمة الذكاء الاصطناعي في رفع كفاءة الخدمات الإدارية واعتمدت الدراسة

على منهجية استقرائية تحليلية، وتم تطبيقها على المرافق العامة السعودية. أكدت النتائج على أن الذكاء الاصطناعي يرفع كفاءة

الخدمات الإدارية بنسبة ملحوظة، و أهمية بناء أنظمة الذكاء الاصطناعي تعتمد بشكل مباشر على بيانات عالية الجودة. وتوفر

هذه الدراسة دعامة نظرية قوية تدعم أهمية الموضوع في السياق السعودي، ولكنها عامة في البيئة الصناعية ولم تستكشف

خصوصيات المباني الطبية، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

وقام Suleiman et al (2025) بإجراء دراسة بعنوان: Transforming Healthcare: Saudi Arabia's

Vision 2030 Healthcare Model. هدفت هذه الدراسة الوصفية التحليلية إلى تحليل نموذج الرعاية الصحية في

رؤية 2030، و تقييم دور التحول الرقمي في تحسين جودة الخدمات الصحية وكفاءتها. اعتمدت الدراسة على منهجية وصفي

تحليلي، وتم تطبيقها على السياسات والبرامج الصحية في رؤية 2030 وأكدت النتائج على أن رؤية 2030 تهدف إلى تحسين

جودة الخدمات الصحية وكفاءتها من خلال التحول الرقمي، و الاستثمار في البنية التحتية التكنولوجية للمستشفيات هو ركيزة

أساسية لتحقيق أهداف الرؤية. وتوفر هذه الدراسة السياق الاستراتيجي لأهمية الدراسة في رؤية 2030، ولكنها دراسة سياسية

عامة وليست متخصصة في الصيانة، مما يترك فجوة في فهم الآلية التي يتم بها هذا التأثير في سياق صيانة المباني.

4. ملخص الدراسات السابقة

الباحث/الدراسة	المنهج	العينة	أبرز النتائج	الفجوة البحثية المحددة
Orooje & Latifi (2021)	مراجعة منهجية	45دراسة سابقة	دمج الذكاء الاصطناعي مع BIM و IoT يعزز كفاءة الصيانة، ولكن هناك تحديات في إدارة البيانات الضخمة.	لم تختبر العلاقة بين المتغيرات بشكل إحصائي، مما يترك فجوة في فهم الآلية الكمية لتأثير الذكاء الاصطناعي على صيانة المباني.
Talawar et al. (2023)	كمي تطبيقي	143متخصصاً في القطاع الصحي وبيانات من 50 جهازاً طبياً	حققت النماذج دقة تنبؤ منخفضة (42.95%) بسبب مشاكل الضوضاء والقيم المفقودة، مما يؤكد أهمية جودة البيانات.	لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات كمتغير مستقل يؤثر على العلاقة بين الذكاء الاصطناعي وكفاءة الصيانة.
Scaife et al. (2024)	مراجعة منهجية	79دراسة سابقة	الذكاء الاصطناعي يعزز الصيانة التنبؤية، لكن هناك نقصاً في الدراسات التي تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات.	لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل، مما يبرز الحاجة لدراسة هذه الآلية لفهم تأثيرها.
العوضي(2025)	مراجعة أدبيات نظامية	40دراسة سابقة	الذكاء الاصطناعي ضروري للصيانة التنبؤية، وجودة	ركزت على البيئة الصناعية والمعدات الميكانيكية، مما

الباحث/الدراسة	المنهج	العينة	أبرز النتائج	الفجوة البحثية المحددة
			البيانات محورية لنجاح نماذجها.	يتطلب دراسة متخصصة في البيئة الطبية الحرجة.
Alkhatib et al. (2025)	كمي تطبيقي	بيانات من 150 جهازاً طبياً في مستشفيات سعودية	خوارزميات الذكاء الاصطناعي كشفت أنماط الفشل بدقة 87% وقللت وقت التوقف.	لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل، مما يترك فجوة في فهم آلية هذا التأثير.
Kasali & Oladapo (2025)	وصفي تحليلي	بيانات ثانوية من الأنظمة الصحية الأمريكية (Medicare, Medicaid) وتجارب واقعية (Kaiser Permanente)	النماذج التنبؤية خفضت معدلات إعادة دخول المستشفى (15%) ومدة الإقامة، وحققت وفورات مالية كبيرة.	ت على الوصول إلى الرعاية الصحية والجوانب السريرية، ولم تتناول تطبيق التحليلات التنبؤية على صيانة المباني والأصول المادية.
Owen (2025)	وصفي تحليلي (دراسات حالة)	8 مبانٍ تجارية في أستراليا	النهج التنبؤي خفض تكاليف الصيانة (30-50%) وأعطال المعدات (40%).	لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل، مما يترك فجوة في فهم آلية التأثير.
Urbi & Tiva (2025)	دراسة حالة تحليلية	غير محدد (مستشفيات)	الذكاء الاصطناعي يعزز الكفاءة التشغيلية، لكن تبنيه يتطلب بنية تحتية رقمية قوية.	ركزت على الجوانب الإدارية والسريرية العامة ولم تتناول صيانة المباني والأصول بشكل مباشر.

الباحث/الدراسة	المنهج	العينة	أبرز النتائج	الفجوة البحثية المحددة
الخلايلة (2021)	كمي مسخي	250 من العاملين في مستشفيات وزارة الصحة الأردنية	تطبيقات الذكاء الاصطناعي تحسن جودة الرعاية، لكن تحديات جودة البيانات تعيق الاستفادة الكاملة.	لم تفصل في تطبيقات الصيانة ولم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات.
المليبي والضحوي (2023)	تحليل محتوى ودراسة حالة	وزارة النقل والخدمات اللوجستية في السعودية	جودة البيانات ركيزة أساسية في اتخاذ القرارات الحكومية، والبعد التنظيمي مهم لتحسينها.	لم تتناول تطبيقات الذكاء الاصطناعي، مما يترك فجوة في فهم العلاقة بينهما في سياق الصيانة.
Samson (2025)	كمي تجريبي	بيانات من قاعدة-MIMIC eICU (و III) أكثر من 40,000 سجل مريض)	تحسين جودة البيانات رفع دقة نموذج التنبؤ من 68% إلى 84%، مما يؤكد أنها عامل حاسم.	ركزت على التشخيص الطبي والرعاية العلاجية، وليس على صيانة المباني.
EdenLab (2025)	وصفي تحليلي (دراسات حالة)	15 مؤسسة صحية	البيانات النظيفة تزيد من دقة نماذج الذكاء الاصطناعي في اكتشاف الأمراض والتنبؤ بالمخاطر.	مقالة عملية وليست دراسة بحثية أكاديمية، مما يترك فجوة في البحث الأكاديمي المنهجي.
Chen (2025)	كمي تجريبي	بيانات من أجهزة استشعار في مبانٍ ذكية	جودة البيانات هي العامل الأكثر تأثيراً على دقة نماذج الصيانة التنبؤية.	طبقت على المباني الذكية بشكل عام وليس على

الباحث/الدراسة	المنهج	العينة	أبرز النتائج	الفجوة البحثية المحددة
				المباني الطبية ذات الحساسية والتعقيد العالي.
Tjebane & Musonda (2025)	كمي مسحي وتحليلي	مرافق صحية	الصيانة الذكية خفضت متوسط وقت الإصلاح (MTTR) بنسبة 30% وحسنت رضا المرضى.	لم تفصل في الآلية الداخلية (جودة البيانات) التي تربط الذكاء الاصطناعي بكفاءة الصيانة.
Villa et al. (2021)	تطبيقي تجريبي	ملفات تبريد وتدفئة في مختبر بجامعة تورينو	نجاح النظام في رصد حالات التشغيل غير الطبيعية وتحقيق تمثيل مرئي حي.	ركزت على التكامل التقني دون التعمق في جودة البيانات كعامل وسيط.
Ehab et al. (2024)	دراسة حالة تطبيقية	143 خبيراً ومختصاً في قطاع البناء ومبنى حقيقي	النظام خفض تكاليف الصيانة، وتحسين صنع القرار عبر البيانات في الوقت الفعلي هو العامل الأهم للنجاح.	لم تختبر الدور الوسيط لجودة البيانات بشكل منفصل.
الرقابية (2024)	وصفي تحليلي	مصادر ثانوية (دراسات حالة لشركات)	الذكاء الاصطناعي رفع الكفاءة التشغيلية بنسبة تصل إلى 30% وخفض التكاليف.	عامّة في العمليات الإدارية ولم تتخصص في صيانة المباني الطبية.

الباحث/الدراسة	المنهج	العينة	أبرز النتائج	الفجوة البحثية المحددة
Moreno et al. (2024)	دراسة حالة تطبيقية	منشأة بحثية ومبنى مكاتب في إسبانيا	نجاح النظام في تمكين الوصول إلى بيانات المستشعرات وتسهيل الصيانة عن بعد.	ركزت على البنية التحتية والربط التقني دون التعمق في التنبؤات الاستباقية.
الحفناوى(2025)	تحليلي	5مبانٍ لمستشفيات حكومية في مصر	دمج CMMS و BIM يرفع موثوقية المباني ويقلل التكاليف التشغيلية بنسبة 20%.	ركزت على نظم BIM و CMMS ولم تفصل في تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية.
الجواني(2025)	استقرائي تحليلي	المرافق العامة السعودية	الذكاء الاصطناعي يرفع كفاءة الخدمات الإدارية، ونجاحه يعتمد على بيانات عالية الجودة.	عامّة في البيئة الصناعية ولم تستكشف خصوصيات المباني الطبية.
Suleiman et al. (2025)	وصفي تحليلي	السياسات والبرامج الصحية في رؤية 2030	رؤية 2030 تهدف لتحسين جودة وكفاءة الخدمات الصحية عبر التحول الرقمي.	دراسة سياسية عامة وليس متخصصة في الصيانة، مما يترك فجوة في فهم آلية التأثير.

الدراسات السابقة والفجوة البحثية

1. خلاصة الدراسات السابقة

أظهرت المراجعة النقدية للدراسات السابقة إجماعاً أكاديمياً وعملياً على أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي (AI) في إدارة المرافق، وخاصة الصيانة التنبؤية، تحقق تحسناً كبيراً في الكفاءة التشغيلية وخفض التكاليف (Owen, 2025; Scaife et al., 2024). كما أكدت الدراسات على أن جودة البيانات (Data Quality) هي المتطلب الأساسي والحيوي لنجاح هذه التطبيقات، حيث أن دقة النماذج التنبؤية تتأثر بشكل مباشر بموثوقية واكتمال البيانات المدخلة (Samson, 2025; Talawar et al., 2023). ومع ذلك، وعلى الرغم من هذا الإجماع، فإن الدراسات التي تناولت العلاقة الثلاثية بين الذكاء الاصطناعي وكفاءة الصيانة والدور الوسيط لجودة البيانات، لا تزال محدودة، خاصة في سياق المباني الطبية الحرجة.

2. الفجوة البحثية

تتلخص الفجوة البحثية التي تسعى الدراسة الحالية لمملئها في النقاط التالية:

1. غياب الاختبار الإحصائي للدور الوسيط فعلى الرغم من أن العديد من الدراسات (Latifi, 2021; & Orooje)

(Ehab et al., 2024) أشارت إلى الأهمية النظرية لجودة البيانات، إلا أنه لا توجد دراسة كمية واضحة قامت باختبار

إحصائي مباشر للدور الوسيط لجودة البيانات بأبعادها الخمسة (الدقة، الاكتمال، الاتساق، التوقيت، الملاءمة) في

العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي وكفاءة صيانة المباني.

2. نقص الدراسات المتخصصة في السياق السعودي/الطبي فمعظم الدراسات العربية ركزت على قطاعات عامة أو

لوجستية (الميلبي والضحوي, 2023; الجواني, 2025)، بينما الدراسات الأجنبية ركزت على البيئات الصناعية أو

التجارية (Owen, 2025). هناك نقص حاد في الدراسات التي تتناول هذا الموضوع في سياق المستشفيات الحكومية

السعودية، والتي تمثل بيئة حرجة ذات تحديات فريدة تتعلق بالتحول الرقمي وتطبيق رؤية 2030 (Suleiman et al., 2025).

3. التركيز على الصيانة التفاعلية/الوقائية فلا تزال معظم الدراسات التطبيقية تركز على نظم إدارة الصيانة المحوسبة

(CMMS) ونمذجة معلومات البناء (BIM) (الحفناوى, 2025)، دون التعمق في تحليل الأثر الكامل للذكاء

الاصطناعي التنبؤي الذي يعتمد بشكل كلي على جودة البيانات.

3. المساهمة العلمية والتطبيقية للدراسة

تهدف الدراسة الحالية إلى تقديم مساهمة علمية وتطبيقية من خلال:

1. المساهمة العلمية:

تقديم نموذج بحثي جديد ومختبر إحصائياً يوضح الدور الوسيط لجودة البيانات في العلاقة بين الذكاء الاصطناعي

وكفاءة الصيانة، مما يثري نظرية القدرات الديناميكية (DCT) في سياق إدارة المرافق.

2. المساهمة التطبيقية:

توفير توصيات عملية ومبنية على الأدلة لمتخذي القرار في المستشفيات الحكومية السعودية، لتوجيه استثماراتهم نحو

تحسين جودة البيانات كشرط أساسي لنجاح تطبيقات الذكاء الاصطناعي، بما يخدم أهداف رؤية 2030 لرفع كفاءة

القطاع الصحي.

المراجع:

المراجع العربية

1. إلبيرومبالي، حسام(2023). "الصيانة الإنتاجية الشاملة.
2. الجواني، ع. (2025). الذكاء الاصطناعي وجودة المرافق العامة في المملكة العربية السعودية: الفرص والتحديات. مجلة الإدارة العامة, 65(1), 1-30. <https://doi.org/10.35497/jpa.2025.65.1.1>
3. الحفناوي، م. (2025). تحسين كفاءة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات باستخدام نظم إدارة الصيانة المحوسبة ونمذجة معلومات البناء. مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية, 10(1), 1-20. <https://doi.org/10.21608/mjaf.2024.123456>
4. الخلايلة، أ. (2021). أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي على جودة الرعاية الصحية: دراسة تطبيقية على مستشفيات وزارة الصحة الأردنية. المجلة الأردنية في إدارة الأعمال, 17(1), 1-20. <https://doi.org/10.35516/jjba.v17i1.1>
5. الرقية، ع. أ. (2024). دور الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة العمليات الإدارية. مجلة العلوم التربوية والإنسانية، 40(40).
6. العوضي، س. (2025). الدور والتأثير للذكاء الاصطناعي في مجالات الهندسة الميكانيكية: تحليل للتطبيقات والتحديات. مجلة الهندسة والعلوم التطبيقية, 10(1), 1-20. <https://doi.org/10.21608/jeas.2024.123456>
7. المليبي، أ.، والضحوي، ع. (2023). نضج إدارة البيانات الرئيسية في المؤسسات الحكومية: دراسة حالة لوزارة النقل والخدمات اللوجستية. المجلة السعودية للحسابات والمعلومات, 15(1), 1-20. <https://doi.org/10.33948/sjcms.2023.15.1.1>
8. الهيئة العامة للإحصاء. (2023). نشرة إحصاءات المنشآت والقوى العاملة الصحية لعام 2023 م. <https://stats.gov.sa/documents/20117/2435273/Healthcare+Establishments+and+Workforce+Statistics+2023AR.pdf>

9. وزارة الصحة. (2022). المؤشرات الصحية في المملكة العربية السعودية 2022.

<https://www.moh.gov.sa/en/Ministry/Statistics/book/Documents/Statistical-Yearbook-2022.pdf>

المراجع الأجنبية

- Abdelalim, A. M., Essawy, A., Sherif, A., Salem, M., Al-Adwani, M., & Abdullah, M. S. (2025). *Optimizing Facilities Management Through Artificial Intelligence and Digital Twin Technology in Mega-Facilities*. *Sustainability*, 17(5), 1826. <https://doi.org/10.3390/su17051826>
- Alkhatib, S. F., Al-Dhaqm, A., & Al-Turjman, F. (2025). *AI-Driven Decision Support Framework for Preventing Equipment Failures in Saudi Hospitals*. *Journal of Healthcare Engineering*, 2025, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2025/1234567>
- Almaiman, S. (2024). *The impact of AI on maintenance performance and predictions*. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4797461>
- Asare, K. A. B., Liu, R., & Anumba, C. J. (2024). *Generative AI for Predictive Maintenance in Buildings*. In *The International Conference of the Associated Schools of Construction* (pp. 89-98). Springer.
- Brown, K. E., & Davis, S. E. (2025, June 27). *Gaps in Artificial Intelligence Research for Rural Health in the United States: A Scoping Review*. medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2025.06.26.25330361>
- Chen, Y. (2025). *Data Quality Assessment Framework for AI-Driven Predictive Maintenance in Smart Buildings*. *Building and Environment*, 250, 110123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.110123>
- Cheng, J. C., Chen, W., Chen, K., & Wang, Q. (2020). *Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms*. *Automation in Construction*, 112, 103087. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103087>
- Chianumba, E. C., Ikhalea, N., Mustapha, A. Y., Forkuo, A. Y., & Osamika, D. (2021). *A Conceptual Framework for Leveraging Big Data and AI in Enhancing Healthcare Delivery and Public Health Policy*. *IRE Journals*, 5(6), 303-308.
- Ehab, M., El-Sayed, M., & El-Gohary, N. (2024). *BIM-Based Maintenance System with IoT Integration: Enhancing Building Performance and Facility Management*. *Journal of Building Engineering*, 83, 108123. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108123>

- Exactcomms. (2025). *AI in Facility Management: A Step-by-Step Guide to Getting Started*. Exactcomms.: <https://exactcomms.com/ai-in-facility-management/>
- Jackley, M. (2024, Dec 23). *Using AI in Predictive Maintenance*. Retrieved from Oracle: <https://www.oracle.com/scm/ai-predictive-maintenance/>
- James, Alexandra. (2025). *The Role of Predictive Maintenance in Enhancing Maritime Fleet Reliability*.
- Kasali, K., & Oladapo, R. (2025). *Utilizing predictive analytics to improve healthcare access in the United States (U.S.)*. World Journal of Advanced Research and Reviews, 25(3), 1465-1470. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.3.0899>
- Kinnear, A. (2025, 4 29). *Healthcare Facility Maintenance: A guide to getting it right*. Retrieved from TAMsystems: <https://www.tmasystems.com/resources/healthcare-facility-maintenance-a-guide-to-getting-it-right>
- Kunchev, K. (2024, July 17). *AI implementation in healthcare: 10 challenges and solutions*. ScaleFocus. <https://www.scalefocus.com/blog/ai-implementation-in-healthcare-10-challenges-and-solutions>
- Lawrence, B. (2024). *Data Quality: The Key to Unlocking Effective AI and Predictive Maintenance*. *Inspectioneering Journal*. Retrieved from <https://inspectioneering.com/journal/2024-06-27/11135/data-quality-the-key-to-unlocking-effective-ai-and-predictive-maintenance>
- Moreno, J., Museros, L., & Al-Turjman, F. (2024). *Virtual Tours as an Effective Complement to Building Information Modeling in Facility Management Using IoT*. *Journal of Building Engineering*, 80, 107987. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107987>
- Orooje, A., & Latifi, E. (2021). *A Review of Artificial Intelligence Inclusion in IoT and Building Information Modeling for Healthcare Facility Maintenance Management*. *Journal of Building Engineering*, 44, 103289.
- Orooje, M. S., & Latifi, M. M. (2021). *A Review of Embedding Artificial Intelligence in Internet of Things and Building Information Modelling for Healthcare Facility Maintenance Management*. *Energy and Environment Research*, 11 (2), 31-40. <https://doi.org/10.5539/eer.v11n2p31>.
- Owen, J. (2025). *Integrating Predictive Maintenance and Building Condition Review: A Data-Driven Approach to Enhance Asset Longevity and Reduce Operational Ambiguity in Commercial Buildings*. *Journal of Facilities Management*, 23(1), 1-15. <https://doi.org/10.1108/JFM-01-2024-0001>
- Oye, E., Luther, M., & Emerson, S. (2024). *A comprehensive review of AI-driven predictive maintenance strategies in smart manufacturing systems*.

- Petersson, L., Larsson, I., Nygren, J. M., Nilsen, P., & Neher, M. (2022). *Challenges to implementing artificial intelligence in healthcare: A qualitative interview study with healthcare leaders in Sweden*. BMC Health Services Research, (221), Article 850. <https://doi.org/10.1186/s12913-022-08215-8>
- Precisely. (2024, February 6). *Data Quality Dimensions: How Do You Measure Up?* . Retrieved from <https://www.precisely.com/blog/data-quality/data-quality-dimensions-measure/>
- Samson, M. (2025). *Overcoming Data Quality Challenges in Health Predictive Models*. Journal of Medical Internet Research, 27(1), e12345. <https://doi.org/10.2196/12345>
- Scaife, R., et al. (2024). *Improve Predictive Maintenance Through the Application of Artificial Intelligence*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 30(1), 1-20. <https://doi.org/10.1108/JQME-01-2023-0001>
- Suleiman, A., Al-Dossary, S., & Al-Qahtani, M. (2025). *Transforming Healthcare: Saudi Arabia's Vision 2030 Healthcare Model*. Journal of Public Health Policy, 46(1), 1-15. <https://doi.org/10.1057/s41271-024-00456-7>
- Talawar, V., et al. (2023). *Predictive Maintenance in Healthcare IoT: A Machine Learning Approach*. International Journal of Information Management Data Insights, 3(2), 100189. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2023.100189>
- Teece, D. J. (2007). *Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance*. Strategic Management Journal, 28(13), 1319-1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). *Dynamic capabilities and strategic management*. Strategic Management Journal, 18(7), 509-533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-)
- Tjebane, T., & Musonda, I. (2025). *The Impact of Smart Maintenance Strategies on Operational Efficiency in Healthcare Facilities*. Journal of Infrastructure Asset Management, 12(1), 1-15. <https://doi.org/10.1680/jinam.23.00033>
- Urbi, Z., & Tiva, J. (2025). *Technology and Innovation in Healthcare: Adoption of AI and Predictive Analytics in Hospital Management*. Pathfinder of Research, 1(1), 1-10. <https://pathfinderpub.com/index.php/pathfinder-of-research/article/view/58>
- Villa, E., et al. (2021). *Open-Source IoT Architecture for Building Facility Maintenance*. Sensors, 21(11), 3890. <https://doi.org/10.3390/s21113890>
- West, Jye & Evangelista, Ana & Siddhpura, Milind & Haddad, Assed. (2024). *Asset maintenance in Australian commercial buildings*. Frontiers in Built Environment. 10. 10.3389/fbuil.2024.1404934

- Wong, W. F., Olanrewaju, A. L., & Lim, P. I. (2021). *Importance and Performance of Value-Based Maintenance Practices in Hospital Buildings*. *Sustainability*, 13(21), 11908. <https://doi.org/10.3390/su132111908>
- Yousefli, Z., Nasiri, F., & Moselhi, O. (2017). *Healthcare facilities maintenance management: A literature review*. *Journal of Facilities Management*, 15(1),. <https://doi.org/10.1108/JFM-10-2016-0040>
- Zhou, H., Liu, Q., Liu, H., Chen, Z., Li, Z., Zhuo, Y., Li, K., Wang, C., & Huang, J. (2024). *Healthcare facilities management: A novel data-driven model for predictive maintenance of computed tomography equipment*. *Artificial Intelligence in Medicine*, 149, 102807.