

نموذج

مشروع خطة أطروحة للتسجيل لدرجة الدكتوراه

العنوان باللغة العربية:

تأثير تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية على مؤشرات كفاءة صيانة في المباني
الطبية: دراسة تطبيقية على المستشفيات في المملكة العربية السعودية

ب. العنوان باللغة الإنجليزية:

**The Impact of Predictive and Analytical AI Applications on
Maintenance Efficiency Indicators in Medical Buildings: An Applied
Study on Hospitals in Saudi Arabia**

اسم الباحث : فيصل محمد البازعي

الرقم الأكاديمي: ٢٠٢١٢٠٣٨٢٠

الكلية: الإدارة

١٤٤٦ هـ - ٢٠٢٥ م

مقدمة الدراسة

يجب أن تكون عملية الصيانة منظمة ودورية وتراعي خصوصية كل العناصر الموجودة في المبنى من حيث المواد المكونة لهذه العناصر وطريقة تنفيذها وتشكيلها وطريقة استعمالها. تعد إدارة الصيانة واحدة من المفاصل الأساسية لإدارة المنشأة ضمن الشروط المحددة من الأمان والجودة ، وتحتاج عملية إدارة الصيانة إلى بيانات منظمة وطريقة محددة تسمح بأرشفة الخبرة العلمية المتراكمة (مرهج، ٢٠٢٢). تعتبر العمليات في إدارة الصيانة في المباني الطبية بالبطيئة والمكررة وغير المتكاملة، مما يؤدي إلى خسارة المال والموارد والوقت. من ناحية أخرى، فإن نقص البيانات والمعلومات في النماذج الرقمية "كما تم بناؤها" يحد بشكل كبير من إمكانيات نمذجة معلومات البناء (BIM) في إدارة صيانة المرافق. وبالتالي، فإن تحسين عملية جمع البيانات وإدارتها أمر مطلوب لمواجهة التحديات المتزايدة المرتبطة بالصيانة مثل ارتفاع تكاليف الصيانة، وصعوبة التنبؤ بالأعطال، وطول وقت الاستجابة، وفي هذا السياق أصبحت الحاجة ملحة لتبني تقنيات حديثة تعزز كفاءة إدارة الصيانة، وتقلل من التكاليف، وتحسن من جودة الخدمات المقدمة (Oroojee & Latifi, 2021). أن الصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي تساعد في توقع أعطال المعدات، مما يقلل من التوقفات وتكاليف الإصلاح من بين التقنيات الحديثة التي برزت كحل واعد لتحسين إدارة الصيانة (الرميح وآخرون، ٢٠٢٥).

"تطبق المؤسسات بشكل متزايد الصيانة التنبؤية، وهو نهج استباقي يستخدم تحليلات البيانات (Bandy et al., 2024a) وتقنيات متطورة للتنبؤ بأعطال المعدات، وذلك لمنع الإصلاحات المكلفة وفترات الخمول غير المتوقعة. يعتمد هذا النهج استراتيجي فريدة تُقارن بنهج الصيانة الأساسي: الصيانة التفاعلية (التي تُعالج المشكلات بعد حدوثها) والصيانة الوقائية (التي تُخطط للصيانة بغض النظر عن حالة المعدات). وقد تحسّنت دقة وفعالية مهام الصيانة بشكل كبير من خلال دمج الذكاء الاصطناعي (Bandy et al., 2024b) في أنظمة الصيانة التنبؤية، مما أحدث نقلة نوعية في إدارة الأصول" (K L, 2024).

تعتبر المملكة العربية السعودية من الدول الرائدة في تبني التقنيات الحديثة في القطاع الصحي، حيث تسعى رؤية المملكة ٢٠٣٠ إلى تعزيز استخدام التقنيات المتقدمة في الذكاء الاصطناعي لتحسين جودة الخدمات الصحية وكفاءتها (رمضان، ٢٠٢٤). وتمثل إدارة الصيانة في المنشآت الصحية أحد المجالات الحيوية التي يمكن أن تستفيد بشكل كبير من تطبيقات الذكاء الاصطناعي، سواء في التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها أو في تحليل البيانات لتحسين قرارات الصيانة وتقليل التكاليف. (Knezevic, 2025).

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية على مؤشرات كفاءة صيانة المباني في الطبية بالمملكة العربية السعودية، مع التركيز على أنظمة المباني الرئيسية مثل التكييف والكهرباء والسباكة، والأخذ في الاعتبار دور المتغيرات الوسيطة المتمثلة في جودة البيانات والبنية التحتية التكنولوجية والكفاءات البشرية. وتسعى الدراسة إلى تقديم إطار متكامل يمكن من خلاله تعظيم الاستفادة من تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين مؤشرات كفاءة الصيانة وتقليل التكاليف وزيادة موثوقية أنظمة المباني وتحسين جودها .

مشكلة الدراسة وأسئلتها

تواجه المباني الطبية في مدينة الرياض تحديات جسيمة في تحويل عمليات الصيانة من النموذج التفاعلي التقليدي إلى النموذج التنبؤي القائم على الذكاء الاصطناعي، على الرغم من الإمكانيات الواعدة التي تقدمها هذه التقنيات في تقليل التكاليف وتحسين الكفاءة. فوفقاً لـ Karen Rossi (2025)، تُقلل الصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي وقت التوقف غير المخطط له بنسبة تصل إلى ٣٠٪ عبر تحليل البيانات التاريخية وبيانات أجهزة الاستشعار في الوقت الفعلي، إلا أن تبني هذه الاستراتيجيات في القطاع الصحي السعودي لا يزال محدوداً بسبب عوائق متعددة (Rossi, 2025).

أحد التحديات الرئيسية التي تواجه تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية تتمثل في تجزئة البيانات وعدم تكاملها، حيث تُشير الدراسات إلى أن ٧٥٪ من بيانات الصيانة في المستشفيات تُخزن في أنظمة معزولة، مما يُعيق إنشاء "مصدر واحد للبيانات" ومن الضروري لتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي التوليدي (GenAI) بفعالية (Sanders, 2025). علاوةً على ذلك، تعتبر التكلفة العالية لتكنولوجيا الذكاء الاصطناعي عائقاً رئيسياً، خاصة للمستشفيات الصغيرة، حيث تتطلب البنية التحتية التكنولوجية (مثل أجهزة الاستشعار المتقدمة وشبكات الاتصال) استثمارات مالية كبيرة قد تصل إلى ٢٠٪ من ميزانيات الصيانة السنوية (الريمح وآخرون، ٢٠٢٥).

علاوةً على ذلك، تبرز فجوة بحثية في فهم دور الكفاءات البشرية كعامل وسيط في نجاح تطبيقات الذكاء الاصطناعي، حيث تُركّز معظم الأبحاث على الجوانب التقنية دون دراسة التفاعل البشري مع هذه الأنظمة (Tan et al., 2021)، ص. ٤. (كما أن تأثير البنية التحتية التكنولوجية - مثل توافر أجهزة الاستشعار وشبكات الاتصال - على فعالية الذكاء الاصطناعي في الصيانة لم يُدرس بشكل كافٍ في البيئات الطبية العربية، حيث تشير دراسة حول تكامل BIM مع إنترنت الأشياء إلى أن نقص البنية التحتية يُضعف قدرة الأنظمة الذكية على معالجة البيانات في الوقت الفعلي (Mannino et al., 2021).

من ناحية أخرى، يُعد نقص الكفاءات البشرية المُدرّبة على إدارة أنظمة الذكاء الاصطناعي تحدياً محورياً. ففي دراسة أجرتها CBRE (٢٠٢٤)، أشار ٦٥٪ من مديري المرافق الطبية إلى أن العاملين يفتقرون إلى المهارات اللازمة لتحليل مخرجات النماذج التنبؤية، مما يُقلل من فعالية الصيانة الاستباقية (CBRE, 2024).

كما أن تأثير البنية التحتية التكنولوجية - مثل توافر أجهزة الاستشعار وشبكات الاتصال - على فعالية الذكاء الاصطناعي في الصيانة لم يُدرس بشكل كافٍ في البيئات الطبية العربية، حيث تشير دراسة حول تكامل BIM مع إنترنت الأشياء إلى أن نقص البنية التحتية يُضعف قدرة الأنظمة الذكية على معالجة البيانات في الوقت الفعلي (Mannino et al., 2021).

ومع تزايد تعقيد هذه الأنظمة، أصبحت الحاجة ملحة لتبني تقنيات حديثة يمكنها تحسين كفاءة إدارة الصيانة وتقليل التكاليف. في هذا السياق، تبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي كأحد الحلول المبتكرة التي يمكن أن تسهم في

تحسين إدارة الصيانة (Ganesan & Pant, 2023) حيث تتميز هذه التقنيات بقدرتها على تحليل كميات هائلة من البيانات، والتنبيه بالأعطال قبل حدوثها، واتخاذ قرارات ذكية تعتمد على البيانات (Stevens et al, 2025) على الرغم من التطور الكبير في تقنيات الذكاء الاصطناعي وإمكاناتها الواعدة في تحسين كفاءة الصيانة، إلا أن هناك فجوة معرفية كبيرة حول مدى فعالية هذه التطبيقات في سياق المنشآت الصحية بالمملكة العربية السعودية، والعوامل المؤثرة في نجاح تنفيذها، والتحديات التي تواجه تطبيقها كما أن هناك نقصاً في الدراسات التي تتناول دور المتغيرات الوسيطة مثل جودة البيانات والبنية التحتية التكنولوجية والكفاءات البشرية في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي ومؤشرات كفاءة الصيانة، وهو ما يمثل فجوة بحثية مهمة تسعى هذه الدراسة إلى سدها .

في ضوء ما سبق، تتمثل مشكلة الدراسة في الإجابة على السؤال الرئيسي التالي:

ما تأثير تطبيق أدوات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية على مؤشرات كفاءة إدارة الصيانة في المباني الطبية: دراسة تطبيقية على المستشفيات في مدينة الرياض.

أسئلة الدراسة

١. ما العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية وتقليل وقت التوقف غير المخطط لأنظمة المباني

الطبية ؟

٢. إلى أي مدى تؤثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على خفض تكاليف الصيانة التصحيحية في

المنشآت الطبية مقارنة بالأساليب التقليدية؟

٣. كيف تؤثر جودة البيانات كمتغير وسيط في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي ومؤشرات كفاءة

الصيانة في المباني الطبية؟

٤. ما تأثير البنية التحتية التكنولوجية على فعالية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين معدل

الاستجابة لطلبات الصيانة في المستشفيات الحكومية والخاصة؟

٥. كيف تؤثر الكفاءات البشرية على نجاح تنفيذ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في زيادة العمر التشغيلي

لأنظمة المباني الطبية؟

أهمية الدراسة (النظرية والتطبيقية):

١. الأهمية النظرية:

تسهم هذه الدراسة في تعزيز الفهم النظري لدور الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة إدارة الصيانة، خاصة في المباني الطبية. على الرغم من وجود العديد من الدراسات التي تناولت تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاعات الصناعية والتجارية، إلا أن الأدبيات العلمية لا تزال محدودة فيما يتعلق بتطبيق هذه التقنيات في المباني الطبية، وخاصة في البيئة السعودية. لذلك، تسد هذه الدراسة فجوة بحثية مهمة من خلال استكشاف تأثير تطبيقات الذكاء الاصطناعي على مؤشرات كفاءة إدارة الصيانة في هذا النوع من المباني. (West et al., 2024)

بالإضافة إلى ذلك، تسهم الدراسة في تعزيز النظريات المتعلقة بإدارة الصيانة الحديثة، مثل الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance) والصيانة الوقائية (Preventive Maintenance)، 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، ٢٠٢٣)

تقدم الدراسة إطاراً نظرياً متكاملًا يوضح العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي ومؤشرات كفاءة صيانة المباني، مع الأخذ في الاعتبار دور المتغيرات الوسيطة، مما يسهم في تطوير النماذج النظرية في هذا المجال. (Exactcomms, 2025)

٢. الأهمية التطبيقية:

على المستوى التطبيقي، توفر هذه الدراسة رؤى قيمة للمسؤولين في القطاع الصحي وشركات الصيانة، مما يمكنهم من اتخاذ قرارات مستنيرة تعزز من كفاءة العمليات وجودة الخدمات المقدمة. على سبيل المثال، يمكن أن تساعد نتائج الدراسة في تحديد العوامل التي تعزز تطبيق أدوات الذكاء الاصطناعي في إدارة الصيانة، مثل توفر البيانات، والبنية التحتية التكنولوجية، والكفاءات البشرية. 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 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. (QEBIM Services, 2024)

أهداف الدراسة:

الهدف العام:

تقييم تأثير تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية على مؤشرات كفاءة الصيانة في المباني الطبية بالمملكة العربية السعودية خلال الفترة ٢٠٢٥-٢٠٢٧.

الأهداف الفرعية:

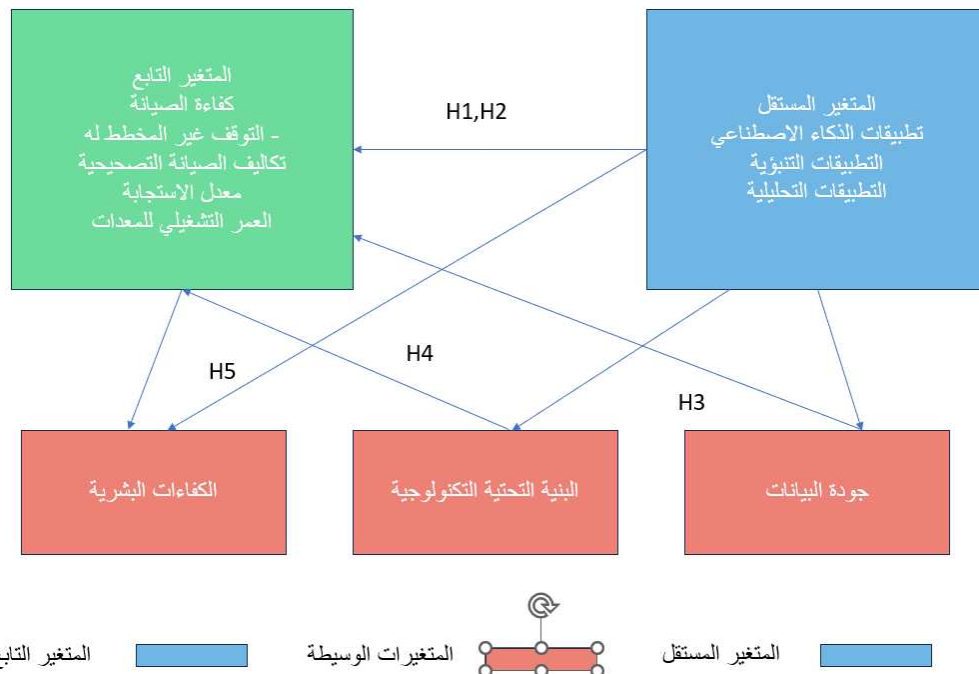
١. تحديد العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية وتقليل وقت التوقف غير المخطط لأنظمة المباني الطبية.
٢. قياس تأثير تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية على خفض تكاليف الصيانة التصحيحية في المباني الطبية.
٣. تحليل دور جودة البيانات كمتغير وسيط في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي ومؤشرات كفاءة الصيانة.
٤. تقييم تأثير البنية التحتية التكنولوجية على فعالية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين معدل الاستجابة لطلبات الصيانة.
٥. تحديد أثر الكفاءات البشرية على نجاح تنفيذ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في زيادة العمر التشغيلي لأنظمة المباني الطبية.

فرضيات الدراسة:

١. توجد علاقة إيجابية ذات دلالة إحصائية بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية وتقليل وقت التوقف غير المخطط لأنظمة المباني الطبية.
٢. تؤدي تطبيقات الذكاء الاصطناعي التحليلية إلى خفض تكاليف الصيانة التصحيحية في المباني الطبية بنسبة أكبر من الأساليب التقليدية.
٣. تؤثر جودة البيانات بشكل إيجابي على العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي ومؤشرات كفاءة الصيانة في المباني الطبية.
٤. توجد علاقة طردية بين مستوى البنية التحتية التكنولوجية وفعالية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين معدل الاستجابة لطلبات الصيانة في المباني الطبية.
٥. تلعب الكفاءات البشرية دوراً وسيطاً إيجابياً في العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي وزيادة العمر التشغيلي لأنظمة المباني الطبية.

نموذج الدراسة

الشكل (١) يوضح نموذج الدراسة العلاقة بين المتغيرات المستقلة (تطبيقات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية) والمتغيرات التابعة (مؤشرات كفاءة الصيانة) والمتغيرات الوسيطة (جودة البيانات، البنية التحتية التكنولوجية، الكفاءات البشرية).



شكل (١): نموذج الدراسة

الدراسات المرجعية:

قامت هاجر فاتق خضير (٢٠١٠) بدراسة بعنوان "تقييم إدارة صيانة أبنية مستشفيات محافظة بابل"، لتقييم النظام الحالي لإدارة صيانة أبنية المستشفيات في محافظة بابل. هدفت الدراسة إلى تحديد نقاط الضعف في النظام من خلال تحليل الوظائف الإدارية الأساسية مثل التخطيط والتنظيم والتوجيه والرقابة. أظهرت النتائج وجود ضعف في وظيفتي التخطيط والتنظيم، حيث تم التركيز على الصيانة العلاجية بدلاً من الصيانة الدورية. كما تم تحديد نقاط ضعف أخرى، مثل نقص الكادر الهندسي ورأس كوادرات طبية غير متخصصة لأعمال الصيانة. أوصت الدراسة بزيادة ميزانية الصيانة، وتحديث نظام تبويب الميزانية، ووضع نظام حوافز لجذب الكادر الفني والهندسي.

قام حسام الدين البرميلي (٢٠١٦) بدراسة بعنوان "تفعيل دور الصيانة المتكاملة لدور الرعاية الصحية (المستشفيات) في البلدان العربية"، لتحليل المشاكل التي تواجه صيانة المستشفيات في البلدان العربية. هدفت

الدراسة إلى وضع خطط صيانة فعالة تضمن استمرارية الخدمة مع الحفاظ على صحة المباني والأجهزة الطبية. أظهرت النتائج أن الصيانة المتكاملة تتطلب توافق العناصر الأساسية مع قياس كفاءة الأداء، وأن الصيانة الوقائية والدورية هي الأكثر فعالية في تقليل التكاليف على المدى الطويل، وأوصت الدراسة بضرورة تطوير نموذج كمي لإدارة الصيانة وزيادة الميزانيات المخصصة للصيانة.

قام الباحثان Shahinmoghdam, Mehrzad & Motamedi, Ali (2019) بدراسة بعنوان "مراجعة نشر تقنيات إنترنت الأشياء المعتمدة على نمذجة معلومات البناء: الوضع الحالي، الفرص، والتحديات"، لمراجعة اتجاهات البحث في دمج تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) مع نمذجة معلومات البناء (BIM). هدفت الدراسة إلى تسليط الضوء على الفرص المتاحة والتحديات التي تواجه تنفيذ أنظمة BIM المدعومة بتقنيات IoT، وأظهرت النتائج أن التقنيات المستخدمة تشمل RFID و Bluetooth Low Energy (BLE)، وأن الفرص المستقبلية تشمل إنشاء "التوائم الرقمية" (Digital Twins). كما تم تحديد تحديات مثل الأمان والخصوصية والحاجة إلى معايير بيانات أكثر تطوراً. (Tyagi & Richa, 2025)

قام الباحثون Villa, Naticchia, et al., (2021) بدراسة بعنوان "هيكل مفتوح المصدر لإنترنت الأشياء لصيانة مرافق المباني"، لتطوير إطار عمل رقمي يعتمد على تكامل تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) ونمذجة معلومات البناء (BIM) لتحسين إدارة صيانة المرافق في المباني، وأظهرت النتائج أن النظام قادر على اكتشاف الأعطال وإرسال تنبيهات إلى مديري المرافق، مما يحسن عمليات الصيانة الوقائية ويقلل من التكاليف. أوصت الدراسة باستخدام أدوات مفتوحة المصدر لتحسين كفاءة الطاقة.

وقام الباحثون Tan, Fang, et al., (2021) بدراسة بعنوان "إدارة المرافق المعتمدة على نموذج معلومات المباني الصحية (HBIM): إطار مفاهيمي"، لاقتراح إطار مفاهيمي لإدارة المرافق يعتمد على نموذج معلومات المباني الصحية (HBIM). هدفت الدراسة إلى تحسين كفاءة وسلامة تشغيل المباني في ظل جائحة COVID-19، وأظهرت النتائج أن دمج بيانات IoT مع BIM يمكن أن يوفر بيئة عمل أكثر صحة، وأوصت الدراسة باستخدام مؤشرات الصحة المعمارية (AHIs) واتخاذ القرارات متعددة المعايير (MCDM).

وقدم الباحثان Oroojee & Latifi (2021) دراسة بعنوان "مراجعة لتضمين الذكاء الاصطناعي في إنترنت الأشياء ونمذجة معلومات البناء لإدارة صيانة المرافق الصحية"، لاكتشاف كيفية دمج الذكاء الاصطناعي (AI)

مع IoT و BIM لتحسين إدارة صيانة المرافق الصحية ، وأظهرت النتائج أن تكامل IoT و BIM يمكن أن يحسن إدارة الصيانة من خلال توفير بيانات في الوقت الفعلي. أوصت الدراسة بتطوير أنظمة ذكية تعتمد على الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات الضخمة.

ونفذ الباحثون Soliman, Naji, et al., (2022) دراسة بعنوان "نماذج إدارة المرافق المعتمدة على نمذجة معلومات البناء للمباني القائمة"، لتطوير إطار عمل لإنشاء نماذج BIM للمباني القائمة باستخدام تقنيات المسح الضوئي ثلاثي الأبعاد والطائرات بدون طيار، وأظهرت النتائج أن دمج نماذج BIM مع أنظمة إدارة المرافق (BMS) يحسن كفاءة إدارة المرافق. أوصت الدراسة باستخدام تقنيات المسح الضوئي ثلاثي الأبعاد لتحسين دقة نماذج BIM.

وقام الباحثون Ganesan, Pant, et al., (2023) بدراسة بعنوان "الصيانة التنبؤية في إنترنت الأشياء الصحية: نهج قائم على التعلم الآلي"، لاستكشاف تطبيق تقنيات التعلم الآلي في الصيانة التنبؤية لأجهزة إنترنت الأشياء في القطاع الصحي وأظهرت النتائج أن النماذج التنبؤية يمكن أن تحسن كفاءة الصيانة. أوصت الدراسة بتحديث النماذج باستمرار لضمان دقتها وفعاليتها.

وقام الباحثون Ehab, Mahdi, & Halouti, (2024) بدراسة بعنوان "نظام صيانة BIM مع تكامل إنترنت الأشياء: تعزيز أداء المباني وإدارة المرافق"، لإقتراح نظام صيانة يعتمد على تكامل BIM و IoT، وأظهرت النتائج أن التكامل يمكن أن يحسن ممارسات الصيانة ويزيد كفاءة الطاقة، وأوصت الدراسة بمعالجة تحديات تكامل البيانات والأمان.

وعمل الباحثون Moreno, Lope, et al., (2024) دراسة بعنوان "الجولات الافتراضية كأداة فعالة مكمل لنماذج معلومات البناء في إدارة المرافق بمساعدة الكمبيوتر باستخدام إنترنت الأشياء"، لاستكشاف إمكانية استخدام الجولات الافتراضية (VTs) كأداة مكمل لنماذج BIM وأظهرت النتائج أن الجولات الافتراضية يمكن أن تحسن كفاءة إدارة المرافق من خلال واجهة بديهية للوصول إلى البيانات في الوقت الفعلي وأوصت الدراسة باستخدام الجولات الافتراضية كأداة فعالة لإدارة المرافق على المدى الطويل.

قام West et al., (2024) بدراسة بعنوان "تحسين صيانة المعدات: التحول من استراتيجيات الصيانة التصحيحية إلى الوقائية"، بهدف تحليل فعالية استراتيجيات الصيانة التصحيحية (CM) والوقائية (PM) في المباني التجارية في سيدني، أستراليا، وركزت الدراسة على تقييم تأثير كل استراتيجية على تكاليف التوقف عن العمل، وموثوقية المعدات، وتكرار الأعطال، مع التركيز على كيفية تحسين القرارات المتعلقة بالصيانة باستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات، وأظهرت النتائج أن الصيانة الوقائية (PM) قللت من تكرار الأعطال بنسبة كبيرة مقارنة بالصيانة التصحيحية (CM)، مما أدى إلى تحسين موثوقية المعدات وتقليل التكاليف طويلة المدى. ومع ذلك، لاحظ الباحثون أن تكاليف التنفيذ الأولية للصيانة الوقائية كانت أعلى بسبب الطبيعة الاستباقية لهذه الاستراتيجية. كما أشارت الدراسة إلى أن استخدام تحليل البيانات عبر لغة البرمجة Python ومنصة Google Colab ساعد في تحسين دقة التنبؤ بالأعطال وتخصيص الموارد بشكل أكثر كفاءة، وأوصت الدراسة بضرورة اتباع نهج متكامل يجمع بين الصيانة الوقائية والتصحيحية، مع التأكيد على أهمية استخدام التقنيات الحديثة مثل الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT) لتعزيز فعالية الصيانة. كما أبرزت الحاجة إلى مزيد من البحث حول تأثير العوامل الاقتصادية والتكنولوجية على اختيار استراتيجيات الصيانة.

قامت K L, Meera et al., (2024) بدراسة بعنوان "الصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي في إدارة الأصول"، حيث استكشف الباحثون كيف يمكن لتقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي تحويل استراتيجيات الصيانة التقليدية إلى أنظمة تنبؤية فعالة، وركزت الدراسة على تحليل البيانات الضخمة من أجهزة الاستشعار وأجهزة المراقبة لاكتشاف الأنماط والشذوذ في أداء المعدات، مما يتيح التنبؤ الدقيق بالأعطال قبل حدوثها، وأظهرت النتائج أن الصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي قللت من فترات التوقف غير المخطط لها بنسبة تصل إلى 40%، كما ساهمت في تحسين كفاءة العمليات وإطالة عمر الأصول. بالإضافة إلى ذلك، أدى استخدام هذه التقنيات إلى تحسين تخصيص الموارد وتقليل النفقات التشغيلية، حيث تم تنفيذ الصيانة فقط عند الحاجة الفعلية، بدلاً من اتباع جداول زمنية ثابتة، وأوصت الدراسة بضرورة دمج إنترنت الأشياء (IoT) مع أنظمة الذكاء الاصطناعي لتعزيز قدرات الصيانة التنبؤية، مع التأكيد على أهمية تحليل البيانات في الوقت الفعلي لتحسين دقة التنبؤات. كما أشار الباحثون إلى التحديات المرتبطة بتنفيذ هذه التقنيات، مثل الحاجة إلى بنية تحتية قوية للبيانات وتدريب الكوادر البشرية.

وقام Owen, (2025) بدراسة بعنوان "دمج الصيانة التنبؤية وتدقيق حالة المباني: نهج قائم على البيانات لتعزيز طول عمر الأصول وتقليل الغموض التشغيلي في المباني التجارية"، يهدف استكشاف كيفية تحسين إدارة الأصول من خلال دمج تقنيات الصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT) مع عمليات تدقيق حالة المباني (BCA). ركزت الدراسة على تحليل محدوديات الصيانة التقليدية (التصحيحية والوقائية) وتقييم دور التقنيات الحديثة في تحسين كفاءة الصيانة، وكانت نتائج الدراسة أن استخدام الصيانة التنبؤية قلل تكاليف الصيانة بنسبة 30-50%، وخفض معدلات الأعطال المفاجئة بنسبة 40%، كما عزز عمر الأوجودات وكفاءة الطاقة. من ناحية أخرى، كشفت الدراسة عن تحديات مثل التكلفة العالية للتطبيق، وصعوبة دمج الأنظمة القديمة، والحاجة إلى تدريب الكوادر، وأوصى الباحث بتبني إطار عمل متكامل يجمع بين الصيانة التنبؤية والتدقيق الرقمي، مع التركيز على تبني النماذج الافتراضية (Digital Twins) وتحسين البنية التحتية للبيانات.

التعقيب على الدراسات السابقة:

تشكل الدراسات السابقة ركيزة لفهم تطور مفاهيم إدارة صيانة المنشآت الصحية، حيث أظهرت الدراسات المبكرة (مثل هاجر فاتق خضير ٢٠١٠، والبرملي ٢٠١٦) تركيز الأنظمة التقليدية على الصيانة التصحيحية مع إهمال التخطيط الاستباقي، وضعف البنية التحتية للكوادر الفنية. بينما قدمت دراسات لاحقة (Shahin, 2019; Villa, 2021) رؤى حول دور التكنولوجيا الحديثة مثل IoT و BIM في تعزيز الصيانة الوقائية عبر المراقبة الذكية والتنبؤ بالأعطال. وفي السنوات الأخيرة، ركزت دراسات (Tan, 2021; Ehab, 2024) على تكامل الذكاء الاصطناعي مع هذه التقنيات لتحليل البيانات الضخمة، بينما حذرت دراسات أخرى (West 2024) ، (Firman 2024) من تحديات مثل التكلفة العالية وتعقيد التكامل بين الأنظمة.

الفجوة البحثية:

على الرغم من الإسهامات القيمة للدراسات السابقة، تظل هناك فجوات بحثية تحتاج إلى معالجة، أهمها:

١. نقص التطبيقات العملية في السياق السعودي: ركزت معظم الدراسات على سياقات مختلفة (عراقية، عربية عامة، أو غربية)، دون مراعاة الخصائص الفريدة للمنشآت الصحية السعودية، مثل المناخ الحار، وطبيعة البنية التحتية، والتحول الاستراتيجي (كرؤية ٢٠٣٠).

٢. التركيز الجزئي على التقنيات: تناولت الدراسات تقنيات منفصلة (BIM)، IoT، الذكاء الاصطناعي (دون تقديم نموذج متكامل يجمعها لتحسين مؤشرات كفاءة الصيانة).

٣. غياب القياس الكمي للتأثير: لم تقم معظم الدراسات بقياس تأثير الذكاء الاصطناعي التنبؤي على مؤشرات أداء محددة (كوقت توقف المعدات، أو تكلفة الصيانة السنوية) في المستشفيات.

٤. تحديات الخصوصية والأمان: لم تُستكشف بشكل كافٍ في سياق المنشآت الصحية، رغم حساسية البيانات الطبية والهندسية.

أوجه الاستفادة من الدراسات السابقة:

تُقدم الدراسات السابقة أساسًا نظريًا وعمليًا يمكن البناء عليه في الأطروحة الحالية، من خلال:

١. الاستفادة من النماذج التكنولوجية مثل تكامل IoT مع BIM لإنشاء أنظمة مراقبة في الوقت الفعلي (كما في دراسة Villa, 2021)، وتطبيق نماذج التعلم الآلي في الصيانة التنبؤية (كما في دراسة Talwar, 2023).

٢. تجنب التحديات المذكورة مثل التحذير من نقص الكوادر الفنية (هاجر فاتق ٢٠١٠) عبر تعويضه بالذكاء الاصطناعي، أو معالجة تحديات تكلفة الصيانة الوقائية (West 2024) عبر تحليل العائد الاقتصادي.

٣. تبني توصيات مُسبقة كاستخدام الحلول مفتوحة المصدر (Villa, 2021)، أو تطوير مؤشرات أداء قابلة للقياس (Tan, 2021).

٤. التكامل مع الرؤى الاستراتيجية ومواءمة النتائج مع أهداف رؤية السعودية ٢٠٣٠ في تحسين جودة الخدمات الصحية وترشيد الإنفاق.

بهذا، توفر الأطروحة إضافة نوعية عبر سد الفجوات المحلية والتقنية، مع الاستفادة من الإطار

النظري العالمي وتطبيقه عمليًا في بيئة سعودية فريدة.

مصطلحات الدراسة وتعريفاتها الإجرائية

١. الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence - AI):

- التعريف الإجرائي:

يشير الذكاء الاصطناعي في هذا البحث إلى التقنيات والحلول البرمجية التي تعتمد على خوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning) وتحليل البيانات الضخمة (Big Data) لتحسين عمليات الصيانة في المباني

الطبية ويتضمن ذلك أنظمة التنبؤ بالأعطال، وأنظمة التحكم الذكية، وأنظمة تحليل البيانات لاتخاذ قرارات صيانة أكثر كفاءة.

٢. أدوات الذكاء الاصطناعي (AI Tools):

- التعريف الإجرائي:

هي البرامج والتطبيقات التي تعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي، مثل أنظمة إدارة الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance Systems)، وأنظمة تحليل البيانات في الوقت الفعلي (Real-Time Data Analytics)، وأنظمة التحكم الذكية (Smart Control Systems). تُستخدم هذه الأدوات لتحسين كفاءة إدارة الصيانة في المباني الطبية.

٣. إدارة الصيانة (Maintenance Management):

- التعريف الإجرائي:

تشير إدارة الصيانة في هذا البحث إلى العمليات والأنظمة المستخدمة لتخطيط، تنظيم، توجيه، ومراقبة أعمال الصيانة في المباني الطبية. يتضمن ذلك الصيانة الوقائية (Preventive Maintenance)، والصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance)، والصيانة العلاجية (Corrective Maintenance).
٤. كفاءة إدارة الصيانة (Maintenance Management Efficiency):

- التعريف الإجرائي:

تشير كفاءة إدارة الصيانة إلى مدى فعالية وكفاءة العمليات الإدارية المتعلقة بالصيانة في تحقيق الأهداف المحددة، مثل تقليل التكاليف، تحسين وقت الاستجابة، زيادة عمر الأصول، وتقليل وقت التوقف عن العمل. يتم قياس الكفاءة من خلال مؤشرات مثل تكاليف الصيانة، وقت الإصلاح، ومعدل الأعطال.

٥. المباني الطبية (Healthcare Buildings):

- التعريف الإجرائي:

تشير المباني الطبية في هذا البحث إلى المستشفيات والعيادات والمراكز الصحية التي توفر خدمات طبية وعلاجية، وتشمل هذه المباني أنظمة معقدة مثل أنظمة التكييف والتهوية (HVAC)، والأنظمة الكهربائية، وأنظمة الأمن والسلامة.

٧. الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance):

- التعريف الإجرائي:

هي استراتيجية صيانة تعتمد على تحليل البيانات التي يتم جمعها من أجهزة الاستشعار (Sensors) وأنظمة المراقبة للتنبؤ بالأعطال قبل حدوثها. يتم استخدام الذكاء الاصطناعي لتحليل هذه البيانات وتحديد الوقت الأمثل للصيانة.

٨. البيانات الضخمة (Big Data):

- التعريف الإجرائي:

تشير البيانات الضخمة في هذا البحث إلى الكميات الهائلة من البيانات التي يتم جمعها من أجهزة الاستشعار والأنظمة الإلكترونية في المباني الطبية. يتم تحليل هذه البيانات باستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي لتحسين عمليات الصيانة

٩. أجهزة الاستشعار (Sensors):

- التعريف الإجرائي:

هي أجهزة إلكترونية تقوم بجمع البيانات من البيئة المحيطة، مثل درجة الحرارة، الرطوبة، الضغط، وغيرها. تُستخدم هذه الأجهزة في المباني الطبية لمراقبة حالة الأنظمة المختلفة وتوفير بيانات في الوقت الفعلي.

١٠. الوقت الفعلي (Real-Time):

- التعريف الإجرائي:

يشير إلى القدرة على جمع البيانات ومعالجتها وعرضها بشكل فوري أو شبه فوري. في هذا البحث، يتم استخدام البيانات في الوقت الفعلي لتحسين عمليات الصيانة واتخاذ القرارات بشكل سريع.

إجراءات الدراسة:

منهج الدراسة:

ستعتمد هذه الدراسة على المنهج الكمي الوصفي التحليلي الذي يجمع بين الوصف الدقيق للواقع القائم والتحليل الإحصائي للعلاقات بين المتغيرات، ويتمثل الجانب الوصفي في رصد وتوثيق واقع استخدام أدوات الذكاء الاصطناعي في إدارة صيانة المباني الطبية بمدينة الرياض، بما في ذلك تحديد أنواع الأدوات المستخدمة ومدى انتشارها ومؤشرات كفاءة الصيانة المرتبطة بها، أما الجانب التحليلي فيركز على اختبار العلاقات السببية والتأثيرات المتبادلة بين المتغير الرئيسي (أدوات الذكاء الاصطناعي) والمتغير التابع (مؤشرات كفاءة إدارة الصيانة) مع الأخذ في الاعتبار دور المتغيرات الوسيطة (جودة البيانات، البنية التحتية، الكفاءات

البشرية). يعتمد هذا المنهج على جمع البيانات الكمية من خلال استبيان يتم تحليله باستخدام الأساليب الإحصائية المناسبة لضمان الموضوعية والدقة في النتائج.

مجتمع وعينة الدراسة:

- **مجتمع الدراسة:**

يشمل مجتمع الدراسة المباني الطبية في المملكة العربية السعودية التي تعتمد على أنظمة الصيانة الحديثة.

- **عينة الدراسة:**

سيتم اختيار عينة عشوائية طبقية من ٢٥ مستشفى (٥ حكومي و٥ خاص).
حجم العينة:

○ المستشفيات سيتم اختيار اختيار ١٠ مستشفيات كبرى في الرياض (٥ حكومية و٥ خاصة).

معايير اختيار العينة:

- تمثيل المستشفيات الكبيرة والمتوسطة والصغيرة.
- تمثيل المستشفيات العامة والتخصصية.
- تمثيل المستشفيات المستخدمة لأنظمة الصيانة الحديثة والقديمة.

حساب حجم العينة:

١. تحديد حجم المجتمع (N):

- لنفترض أن حجم المجتمع (عدد المهندسين ومديري الصيانة في المستشفيات والشركات في الرياض) هو ٢٠٠ فرد.

٢. تحديد مستوى الثقة:

- نختار مستوى ثقة ٩٠٪ ($Z = 1.645$).

٣. تحديد هامش الخطأ:

- نختار هامش خطأ ٧٪ ($e = 0.07$).

٤. تحديد النسبة المتوقعة (p):

- نستخدم $p = 0.5$ للحصول على أكبر حجم عينة ممكن.

٥. تطبيق صيغة حجم العينة للمجتمعات الصغيرة:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{e^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}$$

$$n = \frac{200 \cdot (1.645)^2 \cdot 0.5 \cdot (1 - 0.5)}{(0.07)^2 \cdot (200 - 1) + (1.645)^2 \cdot 0.5 \cdot (1 - 0.5)}$$

$$n = \frac{200 \cdot 2.706 \cdot 0.25}{0.0049 \cdot 199 + 2.706 \cdot 0.25}$$

$$n = \frac{135.3}{0.9751 + 0.6765} = \frac{135.3}{1.6516} \approx 82$$

بالتالي، حجم العينة المطلوب هو ٨٢ فردًا.

توزيع العينة:

١. المستشفيات:

- ١٠ مستشفيات (٥ حكومية وه خاصة).
- ٤ أفراد من كل مستشفى (مهندسين ومديري صيانة).
- إجمالي الأفراد من المستشفيات: $4 \times 10 = 40$ فردًا.

حدود الدراسة: (المكانية، الزمانية، البشرية)

- الحدود المكانية:
تقتصر هذه الدراسة على المستشفيات الحكومية والخاصة وشركات الصيانة الموجودة في مدينة الرياض فقط. ولا تشمل المستشفيات أو المنشآت الطبية أو شركات الصيانة في المدن أو المناطق الأخرى في المملكة العربية السعودية.
- الحدود الزمانية:
تم جمع البيانات خلال الفترة الزمنية من مارس ٢٠٢٥ إلى ديسمبر ٢٠٢٦. كما تقتصر الدراسة على تحليل البيانات المتعلقة بإدارة الصيانة خلال هذه الفترة، ولا تشمل بيانات من فترات زمنية سابقة أو لاحقة.
- الحدود البشرية:
تشمل الدراسة المستشفيات الحكومية والخاصة وشركات الصيانة في مدينة الرياض، مع التركيز على الإدارات المسؤولة عن إدارة الصيانة في هذه المستشفيات وشركات الصيانة ولا تشمل العيادات الخارجية أو المراكز الصحية الصغيرة أو غيرها من المنشآت الطبية غير المستشفيات.

وسائل جمع بيانات الدراسة:

١. الاستبيانات (Questionnaires)

لاستبيان الكمي هو الأداة الوحيدة، مع تصميمه لقياس:

أ. المتغيرات الرئيسية:

المتغير المستقل:

- انتشار أدوات الذكاء الاصطناعي التنبؤية والتحليلية (مثل: أنظمة التنبؤ بالأعطال، تحليل البيانات الضخمة).
- شدة الاستخدام (مقياس ليكرت: يومي، أسبوعي، شهري).

المتغير التابع:

- مؤشرات كفاءة الصيانة (وقت التوقف غير المخطط، تكاليف الصيانة التصحيحية، معدل الاستجابة).

المتغيرات الوسيطة:

- جودة البيانات (الدقة، التوقيت، الاكتمال).
- البنية التحتية التكنولوجية (التوافر، التكامل مع الأنظمة).
- الكفاءات البشرية (مهارات الموظفين، التدريب).

ب. تصميم الاستبيان:

الفئة المستهدفة:

- مديرو الصيانة في المباني الطبية.
- الفنيون والمشرفون على أنظمة الذكاء الاصطناعي.
- موظفو تكنولوجيا المعلومات.

الأقسام الرئيسية:

- معلومات عامة عن المبنى (الحجم، القطاع: حكومي/خاص).
- تفاصيل استخدام الذكاء الاصطناعي (النوع، المدة، التكرار).
- قياس مؤشرات الكفاءة (مقاييس ليكرت لتقييم التحسن في الوقت والتكاليف).
- تقييم المتغيرات الوسيطة (جودة البيانات، البنية التحتية، الكفاءات البشرية).
- أسئلة مفتوحة محدودة (مثل: التحديات الرئيسية في التنفيذ).

٢. البيانات الثانوية (Secondary Data)

- سجلات الصيانة الرقمية
- تقارير أداء أنظمة الذكاء الاصطناعي
- إحصائيات الأعطال والإصلاحات

٣. الملاحظة الميدانية - اختيارية (Field Observation)

- زيارة بعض المستشفيات لمشاهدة التطبيق العملي
- مراجعة لوحات التحكم لأنظمة الذكاء الاصطناعي

المعالجات الإحصائية المقترحة:

منهجية التحليل الإحصائي:

أ. التحليل الوصفي:

- استخدام التكرارات والنسب المئوية لوصف:
- مدى انتشار أدوات الذكاء الاصطناعي.
- توزيع المؤشرات (مثل: نسبة المباني التي حققت خفض ٢٥٪ في التكاليف).

ب. التحليل السببي (الاستدلالي):

- تحليل الانحدار المتعدد (Multiple Regression) لفحص:
- تأثير الذكاء الاصطناعي على مؤشرات الكفاءة (الفرضيتان ١، ٢).
- تأثير البنية التحتية والكفاءات البشرية (الفرضيتان ٤، ٥).

ج. تحليل الوساطة (Mediation Analysis) باستخدام نموذج مثل Baron & Kenny أو PROCESS

:Macro

- لاختبار دور جودة البيانات كمتغير وسيط (الفرضية ٣).

د. مقارنة المتوسطات (ANOVA أو t-test):

- لمقارنة أداء المباني بناءً على شدة استخدام الذكاء الاصطناعي.

خطوات تنفيذ خطة الدراسة:

المرحلة الأولى: التحضير والتخطيط (٣ أشهر)

١. المراجعة المنهجية للأدبيات

- إجراء مراجعة منهجية شاملة للأدبيات حول تطبيقات الذكاء الاصطناعي في صيانة المباني
- تحديد الفجوات البحثية في مجال صيانة مباني المنشآت الصحية
- تطوير الإطار النظري للدراسة

- إنشاء قاعدة بيانات للمراجع العلمية باستخدام برنامج إدارة المراجع

٢. تطوير أدوات البحث

- تصميم استبانات لجمع البيانات من مديري الصيانة والمهندسين والفنيين
- تطوير بروتوكولات المقابلات المتعمقة
- إعداد نماذج تحليل البيانات الثانوية
- تحديد مؤشرات الأداء الرئيسية لقياس كفاءة الصيانة

المرحلة الثانية: جمع البيانات (٥ أشهر)

١. المسح الميداني

- توزيع الاستبانات على مديري الصيانة والمهندسين والفنيين في المستشفيات المختارة
- متابعة الاستجابات وإرسال تذكيرات للمشاركين
- جمع الاستبانات المكتملة وإدخال البيانات في برنامج التحليل الإحصائي

٢. جمع البيانات الثانوية

- جمع بيانات سجلات الصيانة من المستشفيات المشاركة
- جمع تقارير الأداء وبيانات استهلاك الطاقة
- جمع بيانات عن البنية التحتية التكنولوجية وأنظمة المباني

المرحلة الثالثة: تحليل البيانات (٤ أشهر)

١. التحليل الإحصائي للبيانات الكمية

- إجراء التحليل الوصفي للبيانات
- اختبار الفرضيات باستخدام الأساليب الإحصائية المناسبة
- تحليل العلاقات بين المتغيرات المستقلة والتابعة والوسيط

٢. التحليل النوعي للمقابلات

- تحليل موضوعي للبيانات النوعية
- تحديد الأنماط والموضوعات المشتركة
- دمج النتائج النوعية مع النتائج الكمية

المرحلة الرابعة: كتابة الأطروحة والنشر (٧ أشهر)

١. كتابة مسودة الأطروحة

- كتابة الفصول الأولية (المقدمة، مراجعة الأدبيات، المنهجية)

- كتابة فصول النتائج والمناقشة

- كتابة الاستنتاجات والتوصيات

٢. مراجعة وتنقيح الأطروحة

- مراجعة المسودة مع المشرف الأكاديمي

- إجراء التعديلات المطلوبة

- التدقيق اللغوي والتنسيق النهائي



المراجع:

المراجع العربية

١. الدهش، هاجر. (٢٠١٠). تقييم إدارة صيانة أبنية مستشفيات محافظة بابل. تم الاسترداد من <https://www.researchgate.net/publication/123456789>
٢. إلورومبالي، حسام (٢٠٢٣). "الصيانة الإنتاجية الشاملة.
٣. الرميح، ر. الص، الرثيمي، ع. ا، المنفوخ، ع. ع، & الديب، س. م. (٢٠٢٥). تأثير الذكاء الاصطناعي في تقليل تكلفة البناء الحديث. مجلة التربوي، (٢٦)، ٣٦-٤٢
٤. مرهج، شذى . (٢٠٢٢). نمذجة وإدارة الصيانة الدورية للمراكز الصحية. سلسلة العلوم الهندسية المدنية والمعمارية، ٤٤ (١٢).
٥. رمضان، نسيم. (٢٠٢٥). كيف يعيد الذكاء الاصطناعي تشكيل مستقبل الرعاية الصحية الرقمية في السعودية. الشرق الأوسط .
٦. Stevens, T., Calisti, D., Farioli, S., & Federici, M. (2025, April 22). تحول جذري في الصيانة بفضل الذكاء الاصطناعي التوليدي [A radical transformation in maintenance thanks to generative AI]. MIT Technology Review Arabia. <https://mitrarabia.com/%D8%A7%D9%84%D8%B5%D9%8A%D8%A7%D9%86%D8%A9-%D8%A8%D9%81%D8%B6%D9%84-%D8%B0%D9%83%D8%A7%D8%A1-%D8%A7%D9%84%D8%A7%D8%B5%D8%B7%D9%86%D8%A7%D8%B9%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%88%D9%84%D9%8A%D8%AF%D9%8A/>

المراجع الأجنبية

1. Aguacil Moreno, S., Loup, M., Lebre, M., Deschamps, L., Bacher, J.-P., & Duque Mahecha, S. (2024). Virtual tours as effective complement to building information models in computer-aided facility management using Internet of Things.
2. Ehab, A., Mahdi, M. A., & El-Helloty, A. (2024). BIM maintenance system with IoT integration: Enhancing building performance and facility management. Civil Engineering Journal, 10(6). <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-06-015>
3. Ganesan, Veeramani & Talawar, Mrs & Pant, Hemlata & Sayyed, Mr & Tamboli, Mrs & Shaik, Mr. (2023). Predictive Maintenance in Healthcare IoT: A Machine Learning-based Approach. European Chemical Bulletin. 12. 15909-15922. 10.48047/ecb/2023.12.si4.1420
4. James, Alexandra. (2025). The Role of Predictive Maintenance in Enhancing Maritime Fleet Reliability.

5. K L, Meera. (2024). AI-Driven Predictive Maintenance in Asset Management. 10.4018/979-8-3373-1032-9.ch025.
6. 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>.
7. Owen, A. (2025). Integrating Predictive Maintenance and Building Condition Auditing: A Data-Driven Approach to Enhancing Asset Longevity and Reducing Operational Ambiguity in Commercial Buildings. IU International University of Applied Sciences.
8. Shahinmoghdam, M., & Motamedi, A. (2019). Review of BIM-centered IoT deployment: State of the Art, Opportunities, and Challenges. Conference Paper. <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0170>
9. Soliman, K., Naji, K., Gunduz, M., Tokdemir, O. B., Faqih, F., & Zayed, T. (2022). BIM-based facility management models for existing buildings. *Journal of Engineering Research*, 10(1A), 21–37. <https://doi.org/10.36909/jer.11433>
10. Tan, T., Fang, Z., Yang, Y. (2021). Health Building Information Modeling (HBIM)-based Facility Management: A Conceptual Framework. Conference Paper.
11. Villa, V., Naticchia, B., Bruno, G., Aliev, K., Piantanida, P., & Antonelli, D. (2021). IoT open-source architecture for the maintenance of building facilities. *Applied Sciences*, 11(12), 5374. <https://doi.org/10.3390/app11125374>
12. 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.
13. West, Jye & Siddhpura, Milind & Evangelista, Ana & Haddad, Assed. (2024). Building Condition Auditing (BCA)—Improving Auditability—Reducing Ambiguity. *Buildings*. 14. 3645. 10.3390/buildings14113645.
14. West, Jye & Siddhpura, Milind & Evangelista, Ana & Haddad, Assed. (2024). Improving Equipment Maintenance—Switching from Corrective to Preventative Maintenance Strategies. *Buildings*. 14. 3581. 10.3390/buildings14113581.
15. Tyagi, A. K., & Richa. (2025). *Digital twin–based healthcare facilities management*. In T. A. Nguyen (Ed.), *Blockchain and digital twin for smart hospitals* (pp. 47-65). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-34226-4.00004-6>
16. Exactcomms. (2025). AI in Facility Management: A Step-by-Step Guide to Getting Started. Exactcomms.: <https://exactcomms.com/ai-in-facility-management/>

17. QEBIM Services. (2024). How AI is Transforming Building Maintenance? QEBIM Services Blog.<https://www.qebimservices.co.uk/blog/how-ai-is-transforming-building-maintenance/>
18. Knezevic, Tatiana . (2025). Realizing the Value of Artificial Intelligence When for Healthcare Facilities. Gensler Blog.<https://www.gensler.com/blog/value-of-artificial-intelligence-for-healthcare-facilities>
19. Rossi , karen (2025).AI-Powered Predictive Maintenance: How It Works, LLumin, https://llumin.com/ai-powered-predictive-maintenance-how-it-works/#Evolution_from_Traditional_Maintenance_Methods
20. Sanders, Brian.(2025) AI in Facilities Management: Unlocking the Future,IFMA, <https://blog.ifma.org/ai-in-facilities-management>
21. CBRE. (2024). AI's Impact on Healthcare Real Estate. CBRE Insights. <https://www.cbre.com/insights/articles/ais-impact-on-healthcare-real-estate>

