Journal of
Engineering Sciences
Faculty of Engineering
Assiut University
JES
مجلة
العلوم الهندسية
كلية الهندسة
جامعة أسيوط
journal homepage: http://jesaun.journals.ekb.eg

تحسين كفاءة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات بإستخدام الأنظمة والتطبيقات الرقمية

Optimizing the Efficiency of Operations & Maintenance Processes in Hospital Buildings Using Digital Systems & Applications

Received 16 April 2025; Revised 25 May 2025; Accepted 25 May 2025

Abstract: The technical level of hospital operations and maintenance management is a vital element in ensuring the quality of healthcare services and the sustainability of hospital buildings. **The research problem** lies in the clear shortcomings of traditional hospital operations and maintenance management systems, which rely primarily on human effort. In contrast, the effectiveness of digital systems for managing hospital operations and maintenance is evident, based on the tremendous potential of computing systems and information technologies. **The research aims** to identify the pivotal role of digital systems and technologies in addressing the challenges of engineering information management in hospital operations and maintenance, with the aim of improving operational efficiency. **The research adopts a descriptive and analytical approach** to identify the shortcomings of traditional systems and highlight the promising capabilities of advanced digital systems in this field. The research presents a group of the most important and common digital systems and applications for managing hospital buildings operations and maintenance. The research focuses on demonstrating the potential of using computerized maintenance management systems (CMMS) to automate and schedule operations and maintenance activities, and analyses the effectiveness of Building Information Modelling (BIM) in facilitating maintenance operations and increasing operational efficiency by providing 3D models of buildings and engineering systems. The research aims to evaluate the potential of digital twin technology- one of the most important technologies offered by artificial intelligence (AI) in managing hospital operations and maintenance- in predicting failures and monitoring the operational

(أسماء علي عطية تمام)[1]
Asmaa Ali Attiya Tmmam
(محمد حلمي الحفناوي)[2]
Mohamed Helmy ElHefnawy
(عزت عبد المنعم مرغني)[3]
Ezzat Abd El-Moniem Marghany

الكلمات الرئيسية
عمليات التشغيل والصيانة لمباني المستشفيات – إدارة الصيانة بالحاسب الآلي CMMS - نمذجة معلومات البناء BIM - الذكاء الإصطناعي AI - التوأم الرقمي DT.

[1] باحثة ماجستير – قسم الهندسة المعمارية – كلية الهندسة – جامعة أسيوط – جمهورية مصر العربية (asmaa.tmmam@yahoo.com).
[2] أستاذ العمارة بقسم العمارة - كلية الفنون الجميلة – جامعة أسيوط – جمهورية مصر العربية (mhelmy1974@yahoo.com.au)، Mohamedhelmy@farts.aun.edu.eg
[3] أستاذ العمارة بقسم الهندسة المعمارية - كلية الهندسة – جامعة أسيوط – جمهورية مصر العربية (ezzatmorghany@aun.edu.eg).

https://doi.org/10.21608/jesaun.2025.376128.1478
This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

performance of hospital buildings. The research presents three realistic models of hospitals that have adopted one of the digital systems under study. **The research results** show that the use of computerized maintenance management systems (CMMS) and building information modelling (BIM) contributes to improving operational efficiency and reducing maintenance costs, while digital twin technology provides the ability to predict failures and monitor operational performance, achieving energy efficiency and reducing operational costs.

الملخص: يؤثر المستوى التقني لإدارة لعمليات التشغيل والصيانة بالمستشفيات على مستوى جودة الخدمات الصحية المُقدمة ومدى إستدامة مباني المستشفيات. وتتمثل مشكلة البحث فى قصور الأنظمة التقليدية لإدارة عمليات التشغيل والصيانة بالمستشفيات والتي تعتمد بشكل أساسي على الجهد البشري، وفي المقابل تظهر فاعلية الأنظمة الرقمية لتشغيل وصيانة المستشفيات والتي تعتمد على الإمكانات الهائلة لأنظمة الحوسبة وتكنولوجيا المعلومات. وهدف البحث تحديد الدور الذي تقوم به الأنظمة والتقنيات الرقمية في مواجهة تحديات إدارة المعلومات الهندسية لعمليات تشغيل وصيانة المستشفيات وصولًا إلى تحسين الكفاءة التشغيلية. يعتمد البحث المنهج الوصفي التحليلي لتحديد أوجه القصور في الأنظمة التقليدية لتشغيل وصيانة المستشفيات وفي المقابل تحديد القدرات الواعدة للأنظمة الرقمية المتقدمة في تشغيل وصيانة المستشفيات من خلال دراسة بعض الأنظمة والتطبيقات الرقمية الأكثر شيوعًا لإدارة تشغيل وصيانة مباني المستشفيات؛ حيث يقوم البحث باستكشاف إمكانية الاستفادة من نظم إدارة الصيانة المحوسبة (CMMS) في أتمته وجدولة أعمال تشغيل وصيانة المستشفيات، وتحليل فعالية نمذجة معلومات البناء(BIM) في تيسير عمليات الصيانة ورفع كفاءة عمليات التشغيل من خلال توفير نماذج ثلاثية الأبعاد للمباني والأنظمة الهندسية، كما يسعى البحث إلى تقييم إمكانات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالأعطال ومراقبة الآداء التشغيلي لمبنى المستشفى مع التركيز على تقنية التوأم الرقمي Digital Twin بإعتبارها أهم التقنيات التي يتيحها الذكاء الاصطناعي في إدارة تشغيل وصيانة المستشفيات. ويستعرض البحث ثلاث نماذج لمستشفيات واقعية تبنت أحد الأنظمة الرقمية محل الدراسة. تُظهر نتائج البحث أن استخدام نظم إدارة الصيانة المحوسبة (CMMS) ونمذجة معلومات البناء (BIM) يساهم في تحسين كفاءة عمليات تشغيل المستشفيات وتقليل تكاليف صيانتها، بينما توفر تقنية التوأم الرقمي إمكانية التنبؤ بالأعطال ومراقبة الآداء التشغيلي مما يحقق كفاءة استهلاك الطاقة وتخفيض التكاليف التشغيلية.

١. المقدمة

يشهد قطاع الرعاية الصحية تطورات متسارعة تهدف إلى تحسين جودة الخدمات الطبية المُقدمة وتوفير بيئة صحية وآمنة للمرضى والكادر الطبي والعاملين. وفي ظل التطور التقني المتسارع في مجال الحوسبة والرقمنة وتكنولوجيا المعلومات تظهر مجموعة من التقنيات والأنظمة الرقمية الواعدة التي يمكن الإستفادة من قدراتها التقنية في إحداث تحول نوعي في إدارة عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات. تُعد هذه التقنيات حلاً محتملاً للتحديات التشغيلية المترتبة على القصور في إدارة بيانات ومعلومات التشغيل والصيانة، لا سيما في ظل الطبيعة المعقدة والمتداخلة للأنظمة الهندسية المتعددة بمباني المستشفيات (منظومة الغازات الطبية، منظومة التكييف والتهوية، والأنظمة الكهربائية)؛ حيث تتطلب هذه الأنظمة إجراءات صيانة عالية التخصص، مما يفاقم الأعباء المالية المرتبطة بتكاليف التشغيل والصيانة المتزايدة. وتخضع منشآت الرعاية الصحية لعمليات تقييم دورية من قبل هيئات الاعتماد والتراخيص ذات الصلة؛ مما يستلزم

الامتثال الصارم للمعايير والمواصفات التنظيمية. ويقتضي هذا الالتزام تطبيق برامج صيانة متخصصة وتنفيذ تحديثات مستمرة لضمان تحقيق أعلى مستويات الكفاءة التشغيلية، وتطبيق معايير السلامة والصحة المهنية، والامتثال لمعايير الجودة الشاملة ومكافحة العدوى، بالتوازي مع ترشيد النفقات الإجمالية لعمليات التشغيل والصيانة.

١-١- المشكلة البحثية:

تتمحور إشكالية البحث حول القصور الملحوظ في المنهجيات التقليدية المتبعة في إدارة عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات، والتي تعتمد بشكل جوهري على الجهد البشري المباشر. وقد أثبتت هذه المنهجيات عدم كفايتها في الاستجابة الفعالة للمتطلبات التشغيلية المتنامية وتطبيق معايير الكفاءة المتزايدة. وينبع هذا القصور بشكل أساسي من التحديات الجوهرية المرتبطة بمعالجة وإدارة الكم الهائل والطبيعة المتشابكة لبيانات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات؛ مما يضع معوقات كبيرة أمام الكوادر الفنية في تنظيم وتحليل واستخلاص رؤى قيمة من هذه البيانات المتعلقة بالبنية التحتية والأنظمة الهندسية المعقدة والمتداخلة داخل المؤسسات الصحية. وعلى الرغم من التقدم التكنولوجي المتسارع، لاسيما في مجال الأنظمة والتقنيات الرقمية المدعومة بقدرات حوسبية متقدمة، يُلاحظ وجود فجوة واضحة في استثمار هذه الإمكانات وتوظيفها على نطاق واسع في قطاع تشغيل وصيانة مباني المستشفيات؛ حيث أن هذه التقنيات تمثل أفقاً واعداً لتحقيق نقلة نوعية في الكفاءة التشغيلية وتحسين إدارة الموارد، بما في ذلك ترشيد التكاليف المرتبطة بعمليات الصيانة المعقدة في المنشآت الصحية.

وبناءً على ما تقدم؛ يتوجه البحث الحالي نحو إستعراض مدى ملاءمة تبني الأنظمة والتطبيقات الرقمية في رفع كفاءة العمليات التشغيلة وعمليات صيانة مباني المستشفيات. وعليه فإن السؤال البحثي المحوري هو: **"ما مدى فعالية تطبيق الأساليب والتطبيقات الرقمية في عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات في تحقيق أعلى معايير الجودة والكفاءة التشغيلية وكفاءة عمليات الصيانة وتحقيق سلامة العاملين والمرضى وخفض التكاليف الإجمالية لهذه العمليات؟"**

١-٢- الهدف من البحث

يهدف البحث إلى إستكشاف الدور الفعال الذي يمكن أن تضطلع به المناهج والتطبيقات الرقمية المتقدمة في مجال صيانة المباني بشكل عام وتحديدًا في سياق تشغيل وصيانة مباني المستشفيات، وذلك في معالجة الإشكاليات الناجمة عن سوء إدارة الحجم الهائل من المعلومات التقنية المتعلقة بالعمليات التشغيلية الهندسية وإجراءات الصيانة، علاوة على ذلك، يسعى البحث إلى تسليط الضوء على آليات الارتقاء بالعمليات التشغيلية الهندسية وعمليات الصيانة في مباني المستشفيات من خلال التوظيف الفعال للإمكانات الواعدة التي تتيحها المناهج الرقمية لإدارة عمليات التشغيل والصيانة يشمل هذا الهدف استكشاف تطبيقات هذه المناهج في التصميمات المستجدة لعمليات الإحلال والتجديد والتطوير ورفع الكفاءة في مباني المستشفيات، بالإضافة إلى معالجة التحديات التصميمية القائمة في المباني الحالية بهدف تحقيق التوافق الأمثل مع معايير ومواصفات الجودة المعتمدة.

١-٣- أهمية البحث

تحظى مباني المستشفيات بأهمية قصوى في توفير خدمات الرعاية الصحية للمجتمع تبعًا للقيمة الوظيفية الحيوية التي تكتسبها مباني المستشفيات ضمن منظومة الرعاية الصحية. ومع التنامي المطرد للطلب على الخدمات الصحية والارتفاع الملحوظ في تكاليف تشغيل وصيانة هذه المرافق، والناجم عن التطور التقني المتسارع الذي تشهده، يصبح تعزيز كفاءة عمليات التشغيل والصيانة ضرورة حتمية تقتضي البحث والتقصي. ومن المتوقع أن يساهم هذا البحث في إلقاء الضوء على أنظمة وتقنيات رقمية محددة تتميز بالقدرة على تحسين كفاءة عمليات التشغيل والصيانة في مباني المستشفيات. وينعكس الأثر الإيجابي لهذا التحسين بشكل مباشر على المجتمع من خلال الارتقاء بجودة الخدمات الصحية المقدمة، وترشيد التكاليف التشغيلية، وتحسين بيئة العمل لكل من العاملين والمرضى على حد سواء بما يحقق إستدامة مباني المستشفيات.

٢. المنهجية والأدوات

تعتمد منهجية البحث علي **المنهج الوصفي التحليلي** في تحديد أوجه القصور الجوهرية بالأنظمة التقليدية لتشغيل وصيانة مباني المستشفيات التي تعتمد بشكل أساسي على العنصر البشري والأساليب اليدوية في التعامل مع الكم الهائل من معلومات وبيانات تشغيل وصيانة المستشفيات، كما يلقي البحث الضوء على مدى فاعلية الأنظمة الرقمية المتقدمة لتشغيل وصيانة مباني المستشفيات حيث تعتمد على الإمكانات الواعدة لنظم الحوسبة والتقنيات الرقمية وتكنولوجيا المعلومات في إدارة معلومات التشغيل والصيانة لمباني المستشفيات المتعلقة بجميع الأصول من مباني وأنظمة هندسية ومعدات وموارد بشرية وحتى بيانات المستخدمين.

وخلال البحث يتم إستعراض ثلاثة من الأنظمة والتقنيات الرقمية لعمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات وبيان مدي فعاليتها وتحديد دورها الفعال في تشغيل وصيانة المستشفيات، كما يتم تحليل تجارب ونماذج واقعية لثلاث مستشفيات تبنت واحدة من هذه الأنظمة والتطبيقات الرقمية مع بيان بعض الملاحظات على كل تجربة. وذلك تبعاً للنقاط التالية:

- التعرف على كيفية إدارة أعمال التشغيل والصيانةللمستشفيات بالاستعانة بالحاسب الآلي (CMMS)، ودراسة مستشفى ١٥ مايو النموذجي كنموذج لإستخدام نظام CMMS لإدارة عمليات التشغيل والصيانة بالمستشفيات
- دراسة آلية استخدام نمذجة معلومات البناء BIM في إدارة عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات، وإلقاء الضوء على تجربة مستشفى **Wrightington** حيث تبنت منهج BIM لإعادة تطوير ورفع كفاءة العمليات التشغيلية للمستشفى.
- التعرف على إمكانية إستخدام تطبيقات الذكاء الإصطناعي في تشغيل وصيانة مباني المستشفيات، ودراسة تجربة مستشفى شانجهاى التي تبنت نظام التوأم الرقمي DT كأحد تطبيقات الذكاء الإصطناعي AI في إدارة عمليات التشغيل والصيانة.

وينتهي البحث بمجموعة من النتائج والتوصيات حيث يتم عرض خلاصة ما توصل إليه البحث والإستنتاجات الناتجة من النقاط التي تم إلقاء الضوء عليها.

٢- الفجوة التقنية بين الأنظمة التقليدية والأنظمة الرقمية لتشغيل وصيانة مباني المستتشفيات

يمكن تحديد الفجوة التقنية بين الأنظمة التقليدية والأنظمة الرقمية لإدارة العمليات التشغيلية وعمليات الصيانة بمباني المستشفيات من خلال إستعراض سريع لأهم السمات الرئيسية لهذه الأنظمة كل على حدة.

٢-١- الأنظمة التقليدية لتشغيل وصيانة مباني المستشفيات

تعاني الأنظمة التقليدية المتبعة في تشغيل وصيانة مباني المستشفيات من قصور جوهري يعيق تحقيق الكفاءة المطلوبة للخدمات الصحية المقدمة ويفاقم التحديات التشغيلية والاقتصادية. فبدلاً من الاعتماد على حلول رقمية متكاملة تقوم بالإدارة الذاتية لعمليات التشغيل والصيانة؛ تستمر العديد من المؤسسات الصحية في إدارة عملياتها التشغيلية الحيوية عبر أساليب يدوية مستهلكة للوقت والجهد تعتمد على العنصر البشري بشكل أساسي مما يؤدي إلى سلسلة من التداعيات السلبية التي يمكن حصرها فيما يلي:

٢-١-١- تأثير قصور الأنظمة التقليدية لتشغيل وصيانة المستشفيات على كفاءة الخدمات المقدمة

بطء الاستجابة للأعطال: يؤدي الاعتماد على الإجراءات الورقية والتواصل التقليدي إلى تأخر كبير في رصد الأعطال والإبلاغ عنها وتوجيه فرق الصيانة، مما يطيل فترة توقف المباني والأجهزة وأنظمة التشغيل الهندسية الحيوية، وهذا من شأنه أن يؤثر بشكل مباشر على قدرة المستشفى على تقديم الرعاية اللازمة للمرضى في الوقت المناسب.

صعوبة التنسيق بين التخصصات الهندسية: يفتقر النظام التقليدي إلى آلية مركزية وفعالة لتنسيق أعمال الصيانة بين مختلف التخصصات، مما قد يؤدي إلى تضارب في الجداول الزمنية وتكرار في الجهود وإزعاج للمرضى والعاملين.

عدم دقة بيانات ومعلومات التشغيل والصيانة: يصعب تتبع سجلات التشغيل والصيانة وتاريخ الأعطال بشكل دقيق ومنظم في الأنظمة التقليدية، مما يعيق عملية تحليل الأسباب الجذرية للمشاكل واتخاذ قرارات مستنيرة لتحسين الأداء وتجنب تكرارها.

تأخر في تنفيذ الإجراءات الوقائية: غالباً ما يتم إهمال أو تأخير إجراءات الصيانة الوقائية الدورية بسبب صعوبة تتبع المواعيد والتخطيط المسبق في الأنظمة اليدوية، مما يزيد من احتمالية حدوث أعطال مفاجئة ومكلفة.

٢-١-٢- ارتفاع تكاليف التشغيل

زيادة تكاليف العمالة: تتطلب الأنظمة التقليدية عدداً أكبر من الموظفين لتنفيذ المهام اليدوية وتتبع البيانات الورقية، مما يرفع من تكاليف الرواتب والمكافآت.

ارتفاع تكاليف الصيانة التفاعلية: يؤدي التأخر في الصيانة الوقائية إلى زيادة الاعتماد على الصيانة التفاعلية المُكلفة وغير المخطط لها، والتي تتطلب إصلاحات عاجلة والاضطرار إلى استبدال قطع غيار تضررت نتيجة قصور المتابعة بما يشكل عبء مالي غير مخطط له.

هدر في استهلاك الطاقة والموارد: يصعب مراقبة وتحسين استهلاك الطاقة والموارد الأخرى بشكل فعال في الأنظمة التقليدية، مما يؤدي إلى ارتفاع فواتير التشغيل.

٢-١-٣- عدم راحة المستخدم (المرضى والعاملين)

الإزعاج الناتج عن أعمال الصيانة المفاجئة: يؤدي غياب التخطيط والتنسيق الفعال لأعمال الصيانة إلى تنفيذها في أوقات غير مناسبة، مما يسبب إزعاجاً للمرضى ويعيق عمل الطاقم الطبي.

بيئة عمل غير مريحة: يمكن أن يؤدي تأخر إصلاح الأعطال في أنظمة التكييف والإضاءة وغيرها إلى خلق بيئة عمل غير مريحة وغير صحية للعاملين والمرضى على حد سواء.

نقص الشفافية في الإجراءات: قد يشعر المستخدمون بالارتباك وعدم الرضا نتيجة لعدم وضوح إجراءات الصيانة وعدم إطلاعهم على حالة الأعطال والمدة المتوقعة لإصلاحها.

وبناء على ما تقدم نجد أن الاعتماد المستمر على الأنظمة التقليدية لتشغيل وصيانة مباني المستشفيات يُشكل عبئاً كبيراً يعيق تحقيق أهداف المؤسسات الصحية في تقديم خدمات عالية الجودة بكفاءة وفعالية من حيث التكلفة والإلتزام بالمعايير والإشتراطات البيئية ومعايير مكافحة العدوى.

٢-٢- الأنظمة الرقمية المتقدمة لتشغيل وصيانة مباني المستشفيات

تلعب الأنظمة الرقمية المتقدمة دوراً محورياً ومتزايد الأهمية في إحداث نقلة نوعية في كفاءة عمليات التشغيل والصيانة داخل مباني المستشفيات. فهي تتجاوز الحلول التقليدية لإدارة التشغيل والصيانة للمؤسسات الصحية حيث أنها توفر أدوات ذكية ومتكاملة تعمل على تحسين الآداء وتقليل التكاليف وتعزيز تجربة المستخدم بشكل شامل. يمكن تلخيص هذا الدور في النقاط التالية:

٢-٢-١- المراقبة الآنية والتنبؤ بالاحتياجات

أدوات تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي (AI): تساعد في تحليل كميات كبيرة من بيانات التشغيل والصيانة لتحديد الاتجاهات، الكشف عن الأسباب الجذرية للمشاكل المتكررة، وتحسين استراتيجيات الصيانة بناءً على رؤى مستندة إلى البيانات[1].

أجهزة الاستشعار الذكية وإنترنت الأشياء (IoT): تتيح هذه التقنيات جمع بيانات لحظية ودقيقة عن حالة المعدات والأنظمة المختلفة (مثل التكييف، الإضاءة، إستهلاك الطاقة، الأجهزة الطبية). يتم تحليل هذه البيانات لتحديد أنماط التشغيل والتنبؤ بالأعطال المحتملة قبل وقوعها دون تدخل بشري، مما يسمح بتنفيذ صيانة وقائية استباقية بدلاً من انتظار حدوث المشكلات[2].

التوأم الرقمي (Digital Twin): تقوم النسخة الرقمية من العالم المادي لمبنى المستشفى وجميع العمليات التشغيلية التي تتم به بإتاحة عمليات المراقبة التشغيلية والقيام بإجراءات الصيانة التنبؤية بشكل فعال عن طريق أجهزة الإستشعار الذكية وأنظمة تحليل البيانات المتقدمة[3].

٢-٢-٢- أتمتة العمليات وتبسيط الإجراءات:

برمجيات إدارة الصيانة المحوسبة (CMMS): تعمل على أتمتة وجدولة عمليات التشغيل والصيانة، إصدار أوامر العمل، تتبع المخزون من قطع الغيار، وإدارة سجلات الصيانة بشكل مركزي. هذا يقلل من الاعتماد على العمل اليدوي والأوراق، ويسرع من وتيرة العمل ويقلل من الأخطاء[4].

تطبيقات الهواتف المحمولة للتقنيين والقائمين على عمليات الصيانة والتشغيل: تمكن فرق الصيانة من الوصول إلى المعلومات الضرورية، تحديث حالة العمل، وتسجيل البيانات ميدانياً؛ ما يحسن من كفاءة الاستجابة ويقلل وقت التوقف.

٢-٢-٣- تحسين التواصل والتنسيق:

منصات التواصل الرقمية: تسهل التواصل الفعال بين فرق الصيانة المختلفة، الأقسام الطبية، والإدارة، مما يضمن تبادل المعلومات بسرعة وكفاءة وتنسيق الجهود بشكل أفضل.

أنظمة الإشعارات والتنبيهات الآلية: تضمن وصول الإشعارات الهامة حول الأعطال أو الحاجة إلى صيانة فورية إلى الأشخاص المعنيين في الوقت المناسب.

٢-٢-٤- تحليل البيانات واتخاذ القرارات المستنيرة:

تقارير الأداء ولوحات المعلومات (Dashboards): توفر للإدارة نظرة عامة واضحة على أداء عمليات التشغيل والصيانة، مما يساعد في تقييم الكفاءة وتحديد مجالات التحسين واتخاذ القرارات الاستراتيجية[5].

أنظمة إدارة المباني الذكية (BMS): تعمل على دمج ومراقبة جميع الأنظمة الكهروميكانيكية في المبنى، مما يوفر رؤية شاملة للأداء ويساعد في تحديد مجالات التحسين وتوفير الطاقة[6].

نمذجة معلومات المباني (BIM): تعمل على إنشاء نموذج متكامل للمبنى وجميع الأنظمة والخدمات الهندسية به، بما يعمل على تحليل ومراقبة جميع العمليات التشغيلية[7].

وبناء على ما تقدم يتضح أن هناك دورًا كبيرًا يمكن أن تقوم به الأنظمة الرقمية المتقدمة لعمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات من خلال: المراقبة الذكية، الأتمتة، تحسين التواصل، تحليل البيانات.

ويُلقي البحث الضوء على ثلاث أنماط من هذه الأنظمة الرقمية لتشغيل وصيانة مباني المستشفيات من خلال منهجية وصفية تحليلية لثلاث أنظمة رقمية هى الأكثر شيوعًا في إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات، وهى:

- إدارة عمليات التشغيل والصيانةبمباني المستشفيات بإستخدام الحاسب الآلي CMMS.
- إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات بالإستعانة بنظام نمذجة معلومات المبنى BIM.
- إدارة تشغيل وصيانة مباني المستشفيات بإستخدام نظام التوأم الرقمي Digital Twin.

وسيتم ضمن البحث إستعراض كل نظام من هذه الأنظمة وعرض تجربة لمستشفى واقعي تبنت هذا النظام لإدارة عمليات التشغيل والصيانة بها مع عرض أهم الملاحظات على التجربة.

٣- نظام إدارة أعمال التشغيل والصيانةللمستشفيات بالاستعانة بالحاسب الآلي (CMMS)

Computer Maintenance Management System

نظام إدارة أعمال الصيانة عبر الكمبيوتر: هو برنامج أو تطبيق أو نظام يساعد المؤسسات والمنشآت في تخطيط ومتابعة وقياس وتحسين كل ما يتعلق بعمليات التشغيل والصيانة من خلال الحاسب الآلي، بما يُساعد المنشأة في تنظيم وإدارة عمليات الصيانة بمختلف اتجاهاتها وأعمال الجرد والحصر وأعمال الصحة والسلامة المهنية وأكثر من ذلك، ويعمل هذا النظام على إدارة مجموعة واسعة من المعلومات المتعلقة بالقوى العاملة في الصيانة، وقوائم جرد قطع الغيار، وجداول الإصلاح، وسجلات المعدات. يمكن استخدامه أيضًا لأتمتة وظيفة الصيانة الوقائية، وللمساعدة في التحكم في مخزونات الصيانة وشراء الخامات. كما يتم استخدامه لتخطيط وجدولة أوامر العمل وإدارة عمل الصيانة الشامل، وتقديم التقارير وتحليل القدرات[8].

يتكون نظام CMMS بشكل أساسي من قاعدة بيانات يتم دمجها مع التطبيقات الأخرى مثل نظام إدارة رأس المال أو نظام إدارة المعلومات بالمنشأة الطبية، وجداول البيانات، ومعالجة النصوص، والبريد الإلكتروني، ومدير المستندات، وتطبيقات مُحددة لجمع وتفسير معلومات التشغيل والصيانةلمُختلف أنظمة التشغيل التقنية داخل المبنى. ويجب أن تكون جميع هذه التطبيقات والبيانات التي يتم التعامل معها بواسطة CMMS موجودة بشكل مثالي ومنسق ومصنف داخل بنية المعلومات المستخدمة، أى بشكل دقيق وواضح ويمكن الوصول إليه بكل سهولة بدون أى حجب لأية معلومات أو بيانات مطلوبة[9].

ويوضح شكل ١ الركائز الأساسية لإمكانية تطبيق نظام CMMS بالمنشأة الصحية.

شكل ١: الركائز الأساسية لإمكانية تطبيق نظام CMMS بالمنشأة الصحية[10].

٣-١- دور ومميزات إستخدام نظام الصيانة المحوسب CMMS في رفع كفاءة تشغيل وصيانة المستشفيات[11]

يتم تطبيق نظام CMMS من خلال استخدام برامج الصيانة باستخدام الحاسوب والتى طُرحت مؤخرًا من قبل بعض الشركات المتخصصة فى المجال مثل Maximo, MP2, SAP, MIMS, Main Smart، و يؤدي نظام إدارة الصيانة المحوسب (CMMS) دوراً استراتيجياً وتشغيلياً حيوياً في رفع كفاءة عمليات التشغيل والصيانة بالمستشفيات. يتمثل دوره المحوري في توفير منصة تكنولوجية متكاملة تعمل على تحسين إدارة الأصول، وأتمتة إجراءات العمل، وتوفير رؤية شاملة حول أداء عمليات الصيانة، وذلك من خلال مجموعة من المميزات التقنية المتقدمة التي تشمل:

- **تحسين العمليات وتخصيص الموارد:** حيث يقوم نظام CMMS بتحسين وتوحيد إجراءات العمل المتعلقة بالصيانة (Workflow Optimization)، كما أن لديه القدرة على توزيع المهام والمسؤوليات بوضوح على فرق العمل، وتوفير إرشادات فنية موحدة، وتحسين تخصيص الموارد (العمالة، قطع الغيار، الوقت)، بالإضافة إلى توفير بيانات دقيقة لدعم إدارة الميزانيات المخصصة للصيانة والتحكم في التكاليف، مما يرفع الكفاءة التشغيلية للمستشفى.
- **تعزيز التحكم الفني والصيانة الاستباقية:** يلعب النظام دوراً هاماً في تعزيز الرقابة الفنية على الأنظمة والمرافق، ويتميز بقدرته على تمكين الربط البيني للبيانات التشغيلية بين الأنظمة المختلفة. كما يوفر ميزات تخطيط وجدولة وأتمتة تتبع مهام الصيانة الوقائية والدورية، مع إرسال تذكيرات آلية، مما يقلل من الأعطال غير المخطط لها ويضمن استمرارية تشغيل الأنظمة والمعدات الحيوية.
- **إدارة مركزية وشاملة للبيانات والمعلومات:** يعمل النظام كمنصة مركزية لإدارة البيانات، ويتميز بقدرته على حصر وجمع وتخزين كافة المعلومات والسجلات التاريخية المتعلقة بعمليات التشغيل والصيانةبطريقة منهجية ومنظمة. يضمن ذلك تكامل البيانات ويسهل الوصول الفوري إليها لاسترجاعها، وتحليلها وإجراء الاستشارات، ودعم عمليات التدقيق والامتثال لمتطلبات الجهات الرقابية.

- **تسهيل التنسيق والوصول للمعلومات:** يشمل دور النظام أيضاً تسهيل آليات التنسيق، وتظهر ميزته في تبسيط وصول الأطراف المعنية (سواء فرق العمل الداخلية أو مقدمي الخدمات الخارجيين) إلى المعلومات والمواقع المطلوبة لتنفيذ المهام.

وبشكل عام يكمن دور ومميزات نظام CMMS في كونه آداة تمكينية ترفع من مستوى الاحترافية والفعالية في إدارة تشغيل وصيانة المستشفيات، وذلك عبر مميزاته المتعددة التي تساهم في ضمان سلامة المرضى، زيادة موثوقية الأصول سواء المباني أو المعدات، تحسين استخدام الموارد، وخفض التكاليف الإجمالية.

٣-٢- منهجية تطبيق CMMS كنظام لإدارة عمليات التشغيل والصيانة لمباني المستشفيات

تتألف منهجية تطبيق CMMS من عشرة خطوات يجب تطبيقها بشكل متسلسل دون الإخلال بأى خطوة منها لتحقيق الفاعلية المرجوة لإدارة العمليات التشغيلية وعمليات الصيانة بمباني المستشفيات، تتطلب المنهجية الفعالة لتطبيق نظام إدارة الصيانة المحوسب (CMMS) في مباني المستشفيات اتباع خطوات منظمة بشكل عام تبدأ بتقييم شامل للاحتياجات التشغيلية والصيانة، وتحديد الأصول التي تتمثل في المباني ومنظومات التشغيل الهندسية والمعدات الحيوية. يلي ذلك اختيار نظام (CMMS) يتناسب مع حجم وتعقيد البنية الأساسية للمستشفى وتخصيصه ليواكب سير العمليات التشغيلية القائمة. وتتضمن عملية التنفيذ تدريب الكوادر الفنية والإدارية على استخدام نظام CMMS وإدخال بيانات المباني وأنظمة التشغيل وجداول الصيانة الوقائية وتفعيل آليات إصدار أوامر العمل (Work Orders) وتتبعها.

يستلزم النجاح المستدام لتقنية (CMMS) إجراء مراجعات دورية وتقييمات للأداء وتحديث النظام بناءً على التغيرات في الاحتياجات التشغيلية والتطورات التقنية، مما يضمن تحقيق الكفاءة في إدارة الصيانة وتقليل فترات التوقف غير المخطط لها، وبالتالي تعزيز جودة الخدمات الصحية المقدمة.

ويوضح الشكل ٢ مخططًا مبسطًا ومنظمًا للبيانات الجوهرية (Master Data) التي تُعتبر بمثابة المُدخلات الأساسية لأي نظام إدارة صيانة محوسب (CMMS) فعال. يركز التصور على العناصر الأساسية للمعلومات التي تشكل العمود الفقري لمعظم تطبيقات CMMS المتوفرة تجاريًا في الوقت الراهن، والتي بدونها لا يمكن للنظام أداء وظائفه الرئيسية.

شكل ٢: مخطط يوضح تبسيط لعناصر البيانات الأساسية المتداولة عبر نظام CMMS بها وهى الموجودة بمعظم البرامج والتطبيقات المتاحة حاليًا[12].

ويوضح الشكل ٣ مخطط إنسيابي لتسلسل مراحل تطبيق منهجية CMMS كنظام لإدارة مهام التشغيل والصيانةبمباني المستشفيات.

شكل ٣: مخطط إنسيابي يوضح تسلسل مراحل تطبيق منهجية CMMS كنظام لإدارة مهام التشغيل والصيانةبمبنى المستشفى.

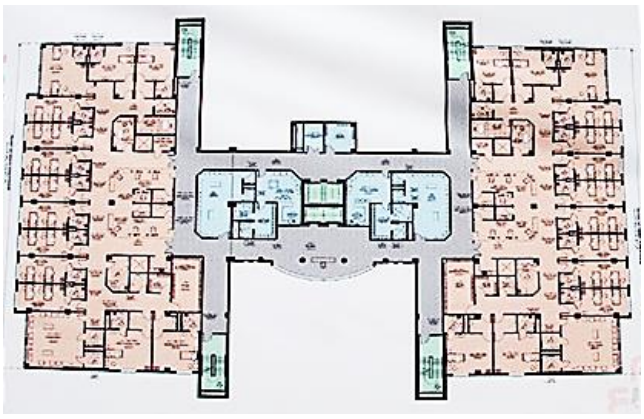
(المصدر: الباحثة بالإستعانة بالمرجع [13])

٣-٣- مستشفى ١٥ مايو كنموذج لإستخدام نظام إدارة الصيانة المحوسبة CMMS في إدارة عمليات التشغيل والصيانة بالمستشفيات

تقع مستشفى ١٥ مايو النموذجي بمدينة ١٥ مايو بمحافظة القاهرة الكبرى، وقد تم تطويرها ورفع كفاءتها التشغيلية عام ٢٠١٨ بتكلفة إجمالية بلغت حوالي ٦٠٠ مليون جنيه، حيث تم تشغيل المستشفى بعد التطوير بإجمالي عدد (١٤١) سريرًا لإقامة المرضى وعدد

(٢٦) سريرًا لاستقبال الحالات الطارئة والحرجة وعدد (٢٢) سريرًا لأقسام الرعاية المركزة، وعدد (٩) غرف عمليات، بالإضافة لوجود العديد من الخدمات التشخيصية والعلاجية مثل خدمات الغسيل الكلوي حيث يوجد عدد (٢٢) جهاز غسي كلوي وخدمات رعاية الأطفال الخُدج من خلال (١٧) حضانة حديثي الولادة[14].

شكل ٤: واجهة مستشفى ١٥ مايو النموذجي بالقاهرة.



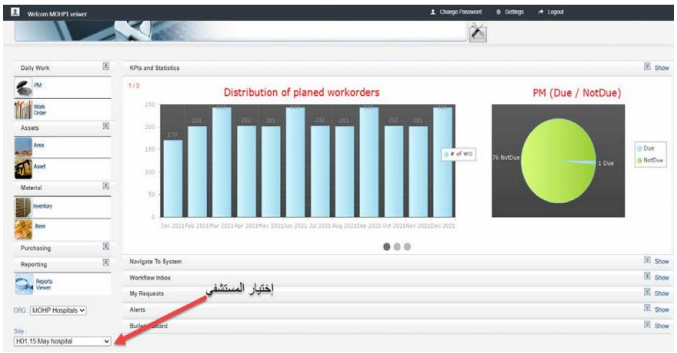
شكل ٥: المسقط الأفقي للدور المتكرر العلوي لمستشفى ١٥ مايو النموذجي بالقاهرة[15].

٣-٣-١- آلية العمل على إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمستشفى ١٥ مايو النموذجي بإستخدام CMMS

تم إختيار أسلوب الصيانة عن طريق جهة خارجية (Outsourcing Maintenance) نظرًا لعدم وجود التخصصات الفنية اللازمة للقيام بأعمال الصيانة ذاتيًا لدى مستشفى ١٥ مايو، وقد تم إسناد أعمال تشغيل وصيانة مبنى مستشفى ١٥ مايو النموذجي إلى شركة مصر للصيانة Egyptian Maintenance Company (EMC) وهى إحدى شركات قطاع البترول، وقد إختارت EMC منهج إدارة التشغيل والصيانة للمستشفى بالإستعانة بالحاسب الآلي CMMS.

يظهر بالشكل ٦ واجهة المستخدم لتطبيق CMMS، ويوضح الشكل ٧ كيفية إختيار المستشفى المراد عرضها.

شكل ٦: واجهة المستخدم لتطبيق CMMS والذي تم إنشاؤه عن طريق الجهة القائمة على التشغيل.



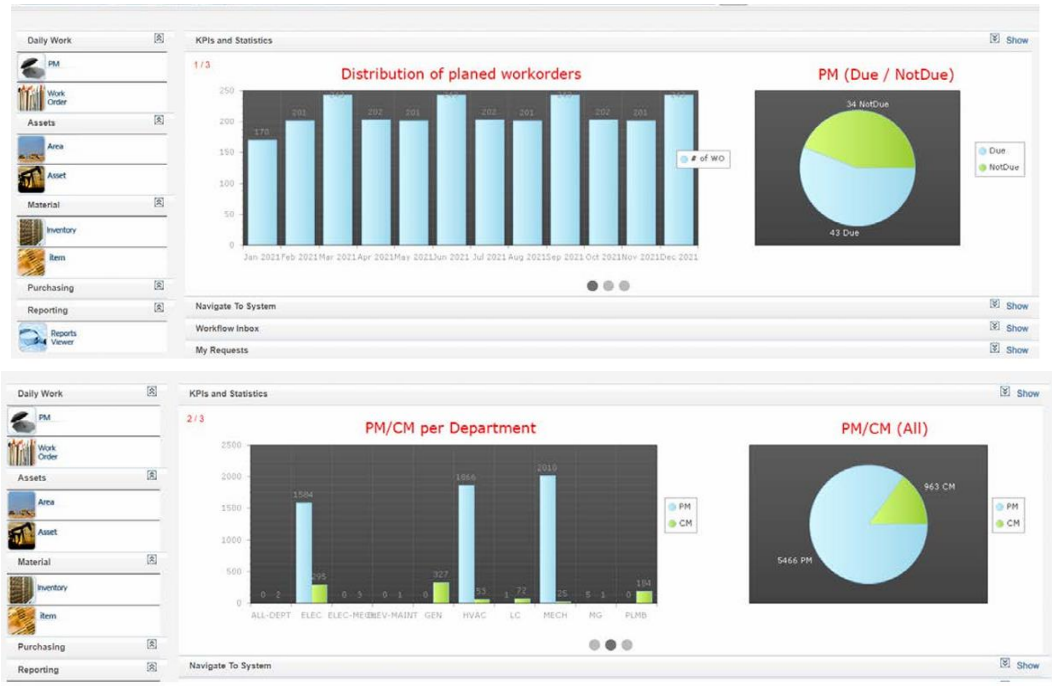
شكل ٧: كيفية إختيار المستشفى المراد عرضها
(المصدر: شركة EMC).

تم تغذية CMMS بجميع البيانات والمعلومات الخاصة بمبنى مستشفى ١٥ مايو من حيث عدد الأدوار ومساحتها وتفاصيلها الهندسية، وكذلك البيانات والمعلومات التقنية الخاصة بأنظمة التشغيل الهندسية، وقد تم تصنيف وتكويد الأنظمة التشغيلية عبر تخصصات رئيسية محددة وهى أعمال التغذية الكهربية الأساسية (ELEC) وأعمال التغذية الكهربية الإحتياطية (GEN) وأعمال تكييف وتبريد الهواء (HVAC) وأعمال التيار الكهربي الخفيف (LC) والأعمال الميكانيكية مثل المصاعد (MECH) وأعمال السباكة والمضخات (PLMB) وهى أعمال طلمبات التغذية بمياه الشرب وطلمبات شبكة إطفاء الحريق وطلمبات رفع الصرف الصحي وتشمل أيضًا أعمال السباكة.

وعبر تطبيق CMMS يمكن عرض أعمال التشغيل والصيانة التي يتم إجراؤها لكل تخصص تقني على حدة وذلك عبر بيان أوامر الشغل Workorder List بأقسام المستشفى المختلفة خلال فترة زمنية محددة، وأوامر الشغل Workorder تعني إجراءات الصيانة سواء كانت صيانة دورية أو صيانة وقائية أو إصلاح أعطال.

٣-٣-٢- مراقبة مؤشرات الآداء لعمليات التشغيل والصيانة بمستشفى ١٥ مايو بإستخدام CMMS

يتم عرض نسب الأعمال الإصلاحية إلى أعمال الصيانة الوقائية لمراقبة مؤشرات الآداء لعمليات التشغيل والصيانة KPIs وتقييم إجراءات الصيانة والتأكد من كفاءة العملية التشغيلية.



شكل ٨: قياس مؤشرات آداء التشغيل والصيانة KPIs عبر تطبيق CMMS (المصدر: شركة EMC).

٣-٣-٣- أهم الملاحظات بنموذج إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمستشفى ١٥ مايو بإستخدام CMMS

٣-٣-٣-١- مميزات النموذج

- **تم تغذية النظام ببيانات أنظمة التشغيل الهندسية الحيوية:** التي تنطوي على نظام تشغيل معقد ومتداخل، بما يعزز من عملية إدارة تشغيل الأنظمة الحيوية التي تؤثر في المجمل على الأداء التشغيلي للمستشفى.
- **تحسين التقارير الفنية وتقارير تحليل الكفاءة**: يتم بكل سهولة إستخراج التقارير من تطبيق CMMS حول تكاليف الصيانة، وأداء الفنيين، وحالة المباني والأنظمة والمعدات وغيرها من المقاييس الرئيسية لتحديد مجالات التحسين ودعم عملية صنع القرار لدى القائمين على التشغيل والصيانة.

٣-٣-٣-٢- التحديات بالنموذج

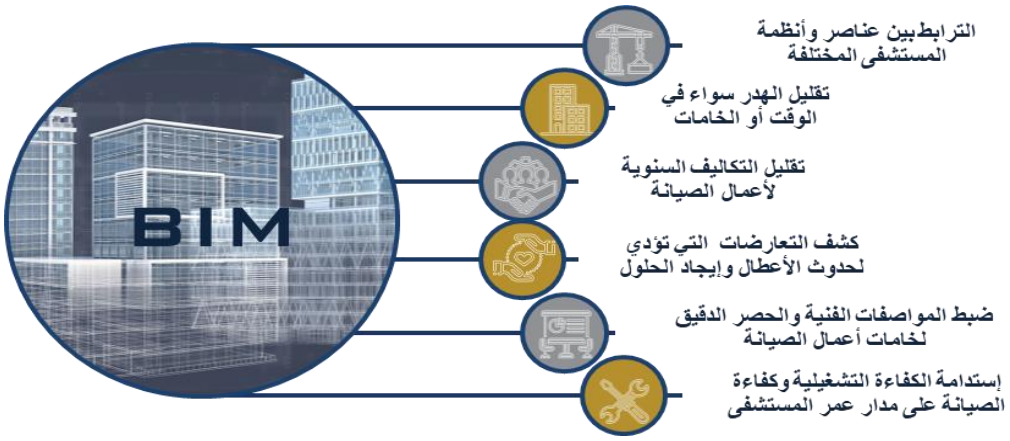
- **لم يتم الإستفادة من خاصية حصر الموارد البشرية والفنيين** والمهام المكلفين بها ضمن منظومة إدارة عمليات التشغيل بالحاسب الآلي CMMS.
- **لم يتم الإستفادة من خاصية الجدولة الزمنية وإضافة مدد الضمان للأجهزة والمعدات والمباني:** والتي من شأنها تعزيز كفاءة العملية التشغيلية من خلال إدارة الوقت ضمن العملية الإدارية المتكاملة للتشغيل والصيانة بحيث لا يحدث أى تأخير أو تقاعس في إجراءات الصيانة الدورية وإصلاح الأعطال.
- **الإضطرار للإستعانة بجهة صيانة خارجية (Outsourcing Maintenance):** نظرًا لعدم وجود الكفاءات من الموارد البشرية اللازمة من الفنيين والقائمين على الصيانة للتعامل مع منهجية CMMS.

٤- إستخدام نظام نمذجة معلومات البناء BIM في عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات

يعرف (BIM): بأنه كل الأدوات والعمليات والتقنيات التي تتيح استخدام الوثائق الرقمية المقروءة آليا حول المبانى وآدائها، والتخطيط لها وبناءها[16].
وهو أيضًا مجموعة الممارسات أو الأنشطة أو التقنيات التي تركز علي سد الثغرات بين فريق التصميم والتنفيذ للمبني وبين المكتب الفني وموقع البناء وبين عمليات التشغيل والصيانة للمبني[17].
أما عن تقنية BIM بحد ذاتها فتُعرف نمذجة معلومات المبانى (BIM) بأنها تقنية تعتمد على تكنولوجيا المعلومات بحيث تتضمن إعداد نموذج افتراضي ثلاثي الأبعاد للمبنى مرتبط بقاعدة بيانات تحتوي على كل التفاصيل المعمارية والانشائية لجميع عناصر المبنى، بحيث يمكن استدعاء جميع عناصر المبنى والمعلومات المرتبطة بها واظهارها بشكل متكامل فى جميع المراحل الزمنية للمشروع، وتقدم تقنية نمذجة معلومات المبنى العديد من المميزات فهي توفر الوقت والمال، وتحسن الانتاجية، وتنتج الرسومات بدقة عالية، وتسمح باتخاذ قرارات تصميمية أسرع وأفضل، وتزيد من فعالية التصميم بالمشاركة، وتحسن تكامل البيانات والتوثيق الذكي، وتوفر الوصول السريع لمعلومات المبنى والجودة العالية لمخرجات المشروع[18].
ومن منطلق كم البيانات الهائل بمبنى المستشفى فإن فعالية برامج الصيانة به تستوجب ربطها وفقًا لنموذج هندسي ذكي وفعال يتواكب مع ضخامة المعلومات وهذا النموذج هو نمذجة معلومات البناء BIM (التمثيل الرقمي للخصائص الفيزيائية والوظيفية للمنشأ) وهو نموذج بارامتري ثلاثي الأبعاد مبني على برمجيات تخدم العناصر الموجهة التي تقوم على إنشاء بيانات مركزية تخزن جميع مكونات المبنى (مخططات – كميات – مواصفات المواد) فضلاً عن ترابطها وبالتالي مهما بلغت التغيرات فإنها تنعكس تلقائياً على باقي المخططات ومن خلال نموذج التشغيل المثالي للمبنى يمكن تقييم تفاصيل المبنى فمثلاً يمكن تحديد الفراغات التي تحتاج إلى إعادة الصياغة، وكذلك تحديد العناصر التالفة من العناصر المتحركة الميكانيكية والكهربائية أو القابلة للتغيير في المبنى كالأبواب والنوافذ والأثاث .. إلخ لغرض إستبدالها أو ترميمها من خلال معرفة مواصفاتها وتاريخ تركيبها وتحديد الجهة المجهزة أو المصنعة للاتصال بها باستخدام معلومات النموذج [19].

٤-٢- الدور والمميزات التقنية لاستخدام نظام BIM في عمليات التشغيل والصيانة بالمستشفيات

يظهر الدور الفني الحيوي لنمذجة معلومات البناء BIM في إدارة عمليات ما بعد الإنشاء لا سيما بمباني المستشفيات؛ حيث يتمثل هذا الدور في الاحتفاظ المركزي والمنظم بالبيانات الهندسية لمبنى المستشفى بصيغة رقمية متكاملة بما يُلغي حاجة أطقم التشغيل والصيانة إلى إعادة إنشاء أو استنباط المعلومات اللازمة لتنفيذ أعمال الإصلاح والصيانة في مرحلة التشغيل، وهو أمر بالغ الأهمية في المستشفيات نظرًا لقيمتها الوظيفية العالية وحساسية استمرارية عملياتها. وتتيح الطبيعة الرقمية لبيانات BIM تحديثها المستمر بكفاءة عالية، مما يضمن دقة المعلومات المتاحة في أي وقت. كما تُسهم تقنيات BIM في تحقيق وفورات زمنية ملموسة من خلال تسريع عملية إنشاء الرسومات والمخططات الهندسية، والأهم من ذلك، القدرة على اكتشاف وتحديد التعارضات Clash Detection بين الأنظمة المختلفة بشكل استباقي.
كما يعمل نموذج BIM على تبسيط إجراءات الصيانة بشكل كبير؛ فهي تُمكّن من تحديد دقيق لمواقع المكونات والعناصر الهندسية التي تتطلب تدخلًا، وتُسهّل عملية كشف الأعطال وتحديد أسبابها الجذرية، مما يُسرّع من وتيرة عمليات الإصلاح التصحيحية. بالإضافة إلى ذلك، تُعد أدوات BIM فعالة في حساب الكميات الدقيقة للمواد والموارد اللازمة لعمليات التشغيل والصيانة O&M، ودعم عمليات تقدير التكاليف ونمذجة التدفقات النقدية المرتبطة بها. وتُستخدم بيانات BIM لإنشاء التقارير وجداول البيانات المُفصّلة التي تُساعد في جدولة أنشطة الصيانة الوقائية وتحديد متطلبات الإصلاح اللازمة للصيانة التصحيحية. يمتد دور BIM ليشمل تحسين التكامل بين عمليات الصيانة الدورية وأنشطة التطوير والتجديد التي قد تقوم بها جهات خارجية، فضلاً عن تسهيل قنوات الاتصال والتنسيق الفعّال مع الموردين ومقدمي الخدمات[20].
ويُظهر الشكل ٩ الدور التقني لاستخدام نظام BIM في تشغيل وصيانة مباني المستشفيات.



شكل ٩: الدور التقني لاستخدام نظام BIM في صيانة وتشغيل مباني المستشفيات[21].

٤-٣- منهجية إستخدام نظام نمذجة معلومات البناء BIM في عمليات صيانة مباني المستشفيات، والأبعاد المختلفة للتطبيق BIM Technical Dimensions

يمكن استخدام نموذج ثلاثي الأبعاد للمبنى يحتوي على تفاصيل دقيقة حول كل جزء من أجزاء مبنى المستشفى بحيث يتضمن النموذج الهندسي جميع المعلومات عن الهيكل الأساسي إنشائيًا ومعماريًا وجميع التجهيزات وجميع الأنظمة الهندسية مثل الأنظمة الكهربية وأنظمة تكييف الهواء سواء التبريد أو التدفئة وأنظمة الغازات الطبية وأنظمة مكافحة الحريق وأنظمة السباكة وأنظمة الإتصالات وغيرها من العناصر لتحديد تواريخ الصيانة الدورية للأنظمة والمعدات، واعداد جدول زمني لتنفيذ أعمال الصيانة. يمكن أيضًا تحديث النموذج بشكل دوري لتوثيق أي تغييرات أو تعديلات تطرأ على مبنى المستشفى، ويتم عبر النموذج إجراء محاكاة الظروف البيئية المختلفة لمبنى المستشفى لتحديد إستراتيجيات التشغيل والصيانة الأكثر كفاءة.

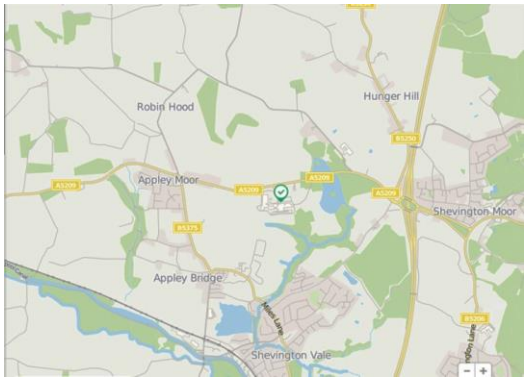
وتتضمن تطبيقات نمذجة معلومات البناء ٧ أبعاد أو مستويات تقنية يتم تطبيقها ضمن منهجية BIM، ولكل بعد دوره وتطبيقاته في النطاقات المتعددة لصناعة التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات، وبالطبع فإن هذه الأبعاد في تطور وتحديث مستمر وبالتأكيد ستتطور لمستويات وأبعاد أعلى باتباع نفس النمط (nD(3D+….nD، ويضمن الترقي عبر هذه المستويات التقنية كفاءة نمذجة معلومات وبيانات مبنى المستشفى وأنظمته التشغيلية، حيث تبدأ بالمستوى التقني الأول (BIM Execution Plan): وهو نقطة البداية لوضع خطة تنفيذ نموذج المستشفى، ثم المستوى التقني الثاني (Areas & Dimensions): ويشمل تحقيق الرسومات المسطحة لمبنى المستشفى، والمستوى التقني الثالث 3) (Dimensions & Informations: يتم فيه نمذجة مبنى المستشفى وأنظمته الهندسية مع إضافة جميع المعلومات التقنية اللازمة بحيث يتم تعريف جميع العناصر الهندسية بماهيتها التقنية، أما المستوى التقني الرابع (Tme Management): يتم فيه إضافة بُعد الزمن إلى النموذج الثلاثي الأبعاد لإنشاء نموذج رباعي الأبعاد الذي يمكن إستخدامه لوصف كل المستشفى من خلال تسلسل الجدول الزمني لتطور العمليات التشغيلية وإدارج فترات الضمان للعناصر والأنظمة، والمستوى التقني الخامس (Cost Management): يمكن من خلاله إضافة عنصر التكلفة إلى نموذج البعد الرابع لإضافة نموذج البعد الخامس حيث يمكن تقدير التكاليف التشغيلية بصورة دقيقة من خلال توضيح (كميات المواد اللازمة، عدد العمالة المطوبة، قطع الغيار المطلوبة، المدد الزمنية لأعمال الصيانة)، أما المستوى التقني السادس (Energy Effiency/ Sustianability): ومن خلاله أصبحت مهمة دراسة وتحليل كفاءة إستهلاك الطاقة مهمة يسيرة حيث من السهل عبر نموذج BIM لمبنى المستشفى عمل عدة بدائل لدراسة الإنارة وكيفية الإستعانة بالإنارة الطبيعية والتحكم في درجات الحرارة من تبريد وتدفئة وكذلك نسب الرطوبة وبحث مميزات الغطاء النباتي وكيفية توظيفه لخدمة المستشفى ومحاكاة الظروف الجوية والمناخية على مدار العام لمعرفة منطقة الراحة الحرارية لشاغلي المستشفى، وأخيرًا المستوى التقني السابع (Assets Manangement): يهتم هذا البعد بإدارة أصول المستشفى سواء

المباني أو الأنظمة التشغيلية خلال دورة حياة المبنى حيث أنه يساعد في إستخراج وتتبع البيانات ذات الصلة مثل مواصفات المواد وقطع الغيار وأدلة الصيانة والتشغيل وبيانات الضمان[22]. ويُظهر الشكل ١٠ مخطط لتدرج المستويات أو الأبعاد التقنية لمنهجية نمذجة معلومات البناء BIM في إدارة عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات.

شكل ١٠: تدرج المستويات التقنية لمنهجية نمذجة معلومات البناء BIM في إدارة عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات.

٤-٤- مستشفى Wrightington كنموذج لإستخدام نظام نمذجة البناء BIM في إدارة تشغيل وصيانة مباني المستشفيات

مستشفى Wrightington عبارة عن مرفق صحي يقع في مقاطعة لانكشاير – انجلترا، وهو مركز عالمي في علاج أمراض العضلات والهيكل العظمي واستبدال المفاصل وجراحة العظام يقع داخل أراضي Wrightington Hall، حيث تم تطوير المستشفى كمركز جديد لجراحة العظام بتكلفة ١٨ مليون جنيه إسترليني في ديسمبر ٢٠١٥[23].
والشكل ١١ يوضح خريطة لموقع مستشفى Wrightington، وشكل ١٢ يُظهرمنظور عام للمستشفى.



شكل ١١: خريطة توضح موقع مستشفى Wrightington [24].

شكل ١٢: منظور عام لمستشفى Wrightington[25].

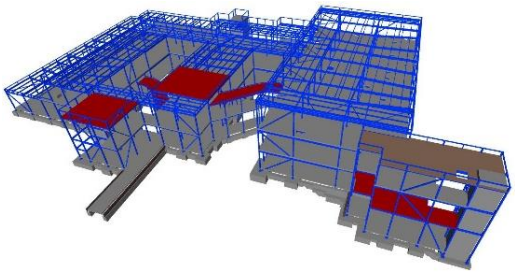
قامت مجموعة IBI Group ™ [**] بوضع إستراتيجية إعادة تطوير طويلة الأجل لمستشفى Wrightington تمتد لعشرين عامًا. ركزت هذه الاستراتيجية على الاستبدال التدريجي للمرافق، مع الأخذ في الاعتبار تحسين الوصول ومواقف السيارات والمناظر الطبيعية للموقع .نظرًا للطبيعة التشغيلية المستمرة للمستشفى، تضمنت الخطة تنفيذ أعمال البناء بأقل تأثير على

[**] IBI Group ™: شركة عالمية للهندسة والتخطيط والتكنولوجيا تعمل على إنشاء الأنظمة الذكية والمباني المستدامة والبنية التحتية الفعالة للمستقبل.

العمليات اليومية، من خلال إنشاء طريق وصول خاص لحركة البناء بعيدًا عن المدخل الرئيسي .يُستخدم هذا الطريق الآن كطريق خدمة للمستشفى ويوفر مساحة إضافية لوقوف السيارات[26].

وقد تم إعداد قواعد بيانات لنمذجة أصل مبنى مستشفى Wrightington والتعديلات التي تمت عليه عن طريق تقنية BIM تضمنت جميع البيانات من رسومات الهيكل الانشائي والرسومات المعمارية ورسومات جميع الشبكات الخدمية والتجهيزات ... إلخ، وقد ساعد استخدام نظام BIM ودمجه بمبنى المستشفى على الانتهاء من مشروع التطوير في إطار الميزانية التي تم إعتمادها للمشروع مسبقًا، كما ساهم أيضًا في التسليم قبل ستة أسابيع من الموعد المقرر، وكان هناك قدر أكبر من القدرة على التنبؤ من خلال اكتشاف مواضع التعارض سواء على مستوى الرسومات أو البيانات بشكل عام، وتم خفض النفقات الرأسمالية والنفقات التشغيلية، وقد تم تسليم بيانات أصل المبنى من رسومات للهيكل ورسومات الشبكات وقواعد البيانات وذلك لمساعدة أنشطة التشغيل والصيانة[27]، ويُظهر الشكل ١٣ نموذج ثلاثي الأبعاد لمستشفى Wrightington، وقد تم بناؤه داخل بيئة AutoDesk Revit و Tekla BIMsight، بينما يوضح الشكل ١٤ النموذج الهيكلي لمستشفى Wrightington ، وقد تم بناؤه داخل بيئة AutoDesk Revit.

شكل ١٣: نموذج ثلاثي الأبعاد لمستشفى Wrightington ، وقد تم بناؤه داخل بيئة AutoDesk Revit و Tekla BIMsight [28].



شكل ١٤: النموذج الهيكلي لمستشفى Wrightington، وقد تم بناؤه داخل بيئة AutoDesk Revit [29].

إعتمد تطبيق نظام BIM لإدارة عمليات التشغيل والصيانة بمستشفى Wrightington على النقاط التالية[٢٦]:

- **تحديد متطلبات معلومات الأصول AIR – Asset Information Requirements:** حيث تم تحديد البيانات الأساسية التي يحتاجها فريق التشغيل والصيانة لكل فئة من الأصول (المباني، الأنظمة، المعدات).
- **تضمين بيانات الأصول في النموذج:** ربط البيانات المحددة (مثل الشركة المصنعة، تاريخ التركيب، معلومات الضمان، جداول الصيانة الموصى بها، روابط للأدلة الفنية) بالعناصر المقابلة لها في نموذج BIM.
- **استخدام معايير تبادل البيانات:** استخدام معيار (COBie) Construction Operations Building information exchange كصيغة لتبادل بيانات الأصول بين فريق التصميم/التنفيذ وفريق التشغيل والصيانة.
- **إنشاء نموذج معلومات الأصول AIM - Asset Information Model:** تم تطوير نموذج BIM النهائي As-Built Model ليكون قاعدة بيانات مركزية للأصول جاهز للاستخدام من قبل فريق التشغيل والصيانة.

٤-١-٤- أهم الملاحظات بنموذج إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمستشفى Wrightington بإستخدام نظام BIM

- **مميزات النموذج**

– **تحسين إدارة الأنظمة التشغيلية:** حيث تم جمع معلومات مفصلة عن أنظمة التشغيل الميكانيكية والكهربائية ودمجها مع بيانات نموذج تبادل معلومات البناء BIM وقد أدى ذلك إلى تبسيط أنشطة الصيانة لمستشفى Wrightingtonمن خلال توفير مصدر واحد موثوق لتفاصيل الأصول.

– **نموذج BIM لمستشفى Wrightington يحقق بيئة تعاونية:** استخدم المشروع بيئة بيانات مشتركة حيث تم تبني الأبعاد التقنية حتى مستوى 5D BIM مما أدى لإمكانية مشاركة معلومات النموذج مع سلاسل توريد الخامات وقطع الغيار وتحسين كفاءة الصيانة بشكل عام.

- **مشاركة الكادر الطبي:** مكنت تقنية BIM من تحسين تخيل التصاميم من خلال جولات ثلاثية الأبعاد، مما سمح للكادر الطبي بتقديم ملاحظات قيّمة حول التصميمات ونُظم التشغيل التجهيزات والمشاركة في إبداء المقترحات حول إدارة العمليات التشغيلية وعمليات الصيانة.

- **التحديات بالنموذج**

- **عدم الإستفادة الكاملة من منهجية BIM:** وذلك نظرًا لعدم إعداد نظام إدارة مرافق رقمي بالكامل لمستشفى Wrightington وذلك مما حال دون الامتثال الكامل لبعض متطلبات نمذجة معلومات البناء (BIM) من المستوى الخامس، مما يشير إلى ضرورة مواءمة البنية التحتية والعمليات الخاصة بالتشغيل والصيانة للاستفادة الكاملة من نمذجة معلومات البناء (BIM) في إدارة المرافق.
- **جهد تعبئة البيانات:** وُصفت تعبئة بيانات الأصول في نموذج Revit من قبل الفريق القائم على إعداد النموذج بأنها "مهمة شاقة"، مما يشير إلى الجهد المطلوب لإنشاء نموذج BIM متكامل، ولذا ينبغي تطوير بيئات العمل وتطبيقات BIM لتصبح أكثر سهولة ومرونة[30].

٥- إستخدام نظام التوأم الرقمي للمبنى Digital Twin كأهم تقنيات الذكاء الإصطناعي في عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات

تعريف الذكاء الإصطناعي: هو مجال من مجالات علوم الحاسب يركز على بناء أنظمة قادرة على آداء مهام تتطلب عادة ذكاء بشريًا مثل التعلم والإستدلال والتطوير الذاتي ويطلق عليه أيضًا "ذكاء الآلة"[31].

مفهوم الذكاء فى المبانى: هو القدرة المتقدمة للمباني على استشعار وتحليل المتغيرات البيئية الداخلية والخارجية، والتكيف الفوري معها من خلال استجابات ذكية ومدروسة، ويهدف هذا التكيف إلى تحقيق الاستغلال الأمثل للموارد المتاحة، ورفع مستوى جودة البيئة الداخلية، وضمان راحة ورفاهية المستخدمين، وعلى النقيض من ذلك فإن المباني التقليدية تتسم بالجمود وعدم القدرة على التفاعل مع المتغيرات البيئية، مما يحد من كفاءتها وفعاليتها في تلبية احتياجات المستخدمين[32].

وتعتمد عمليات صيانة وتشغيل مباني المستشفيات بإستخدام الذكاء الإصطناعي بشكل أساسي على منهجية الصيانة التنبؤية بإعتبارها منهجية حديثة تعتمد على إدارة البيانات من خلال الذكاء الاصطناعي بحيث يمكن للقائمين على مباني المستشفيات والمهندسين القائمين على إدارة الصيانة والتشغيل اتخاذ قرارات أكثر استنادًا إلى البيانات، وبالتالي تحقيق كفاءة أعلى وتوفير في التكاليف كما تتيح فرصة التنبؤ بالأعطال المحتملة والتدخل المبكر لمنعها أو تقليل أثرها وذلك له أكبر الأثر على الكفاءة التشغيلية لمبنى المستشفى[33].

تهدف الصيانة التنبؤية للمباني إلى توقع وتحديد الحاجة إلى عمليات الصيانة بشكل استباقي لتجنب حدوث الأعطال، وبهذا فهى تُعد منهجًا مثاليًا لصيانة وتشغيل مباني المستشفيات حيث تجمع ما بين الابتكار التكنولوجي والفهم العلمي الدقيق للأنظمة الهندسية المتعددة المتداخلة بمبنى المستشفى، ويتضمن هذا النهج استخدام التقنيات متقدمة التي يقدمها الذكاء الإصطناعي مثل تحليل البيانات والاستشعار عن بعد لفهم الحالة التشغيلية العامة لمبنى المستشفى وتقديم تقديرات دقيقة حول إجراءات الصيانة الضرورية بدلاً من الانتظار حتى تظهر علامات الخلل أو الضرر، يعتمد النهج التنبؤي على مراقبة مستمرة للإعدادات التشغيلية لمبنى المستشفى ولجميع الأنظمة الهندسية به وتحليل معطيات الآداء ومطابقتها مع المعطيات القياسية لتحديد العوامل التي قد تؤثر على صحة المبنى وتحديد مواضع الخلل وأوجه القصور بما يسمح بإجراء عمليات الصيانة الوقائية في الوقت المناسب وتقليل وقت التوقف عن تقديم الخدمات الطبية بالمستشفى[34].

ويعتبر **نظام التوأم الرقمي Digital Twin** أحد أهم أنظمة الذكاء الإصطناعي الأكثر شيوعًا في إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات.

التوأم الرقمي Digital Twin هو إنعكاس أو نسخة رقمية من العالم المادي لمبنى المستشفى وجميع العمليات التشغيلية التي تتم به؛ حيث يتم إنشاء نسخة رقمية طبق الأصل من أى عنصر يحتويه المستشفى بدءًا من المبنى بذاته بجميع عناصره الإنشائية والمعمارية مرورًا بجميع العناصر بالمبنى سواء كان كائن حى (المستخدمين سواء المرضى أو العاملين) أو تجهيزات (الأجهزة الطبية والفرش الطبي والغير طبي) أو أنظمة هندسية (الأنظمة الكهربية وأنظمة الغازات الطبية وأنظمة التكييف والتهوية .... إلخ) وخلافه وجميع هذه العناصر مُعرفة جغرافيًا حسب موقعها الفعلي في عالم المبنى الحقيقي من خلال مزامنة النسخة المتماثلة (Twin) الرقمية مع بياناتها في الوقت الفعلي، بمعنى آخر يقوم التوأم الرقمي للمبنى بتمثيل إفتراضي في الوقت الفعلي لكيان مبنى المستشفى المادي بجميع عناصره وتجهيزاته وأنظمته وجميع المستخدمين من مرضى وعاملين[35].

٥-١- الدور والمميزات التقنية لإستخدام نظام التوأم الرقمي للمبنى DT كأحد تطبيقات الذكاء الإصطناعي في رفع كفاءة عمليات التشغيل والصيانة بالمستشفيات

توفر عمليات التشغيل والصيانة لمباني المستشفيات بإستخدام تقنية التوأم الرقمي DT العديد من المميزات التي تساهم في تحقيق الكفاءة التشغيلية للمستشفيات، ومن أهم هذه المميزات ما يلي[36]:

٥-١-١-خفض تكاليف الصيانة

عمليات الصيانة التنبؤية المعززة بنظام التوأم الرقمي وأدوات الذكاء الاصطناعي لمباني المستشفيات تهدف لتوفير التكاليف وتحسين الكفاءة التشغيلية عبر التنبؤ بالأعطال قبل وقوعها؛ حيث يتيح ذلك التدخل المبكر تجنب الإصلاحات الطارئة المكلفة والتوقفات التي تعطل تقديم الخدمات الصحية. بالإضافة إلى ذلك، تساهم هذه الصيانة في تمديد العمر الافتراضي للأصول (المباني والأنظمة والمعدات)، مما يقلل الحاجة للاستبدال ويعظم قيمة الأصول على المدى الطويل، مما يجعلها استثمارًا ذكيًا وفعالاً ومستدامًا.

٥-١-٢-تحسين الكفاءة التشغيلية

تطبيقات الذكاء الإصطناعي تضمن الحفاظ على الأنظمة والمعدات في حالة جيدة، حيث يمكن لمنهجية الصيانة التنبؤية أن تساهم في تقليل استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة الطاقة Energy Efficiency. هذا يمكن أن يقلل من التكاليف التشغيلية ويعزز الاستدامة، مما يجعل مبنى المستشفى أكثر كفاءة من حيث التكلفة والطاقة. وبشكل عام تُعزز الصيانة بإستخدام الذكاء الإصطناعي من كفاءة العمليات التشغيلية لمباني المستشفيات من خلال الحد من الأعطال، تحسين الأداء، والحفاظ على المباني والأنظمة والمعدات في حالة أمثل بما يساهم في تحقيق بيئة عمل أكثر فعالية وموثوقية وبالتالي تحقق مباني المستشفيات معايير الجودة الشاملة ومعايير مكافحة العدوى وإشتراطات جهات الإعتماد والترخيص.

٥-١-٣-تمديد العمر الإفتراضي لمبنى المستشفى وأنظمة تشغيله

برمجيات الذكاء الإصطناعي المستخدمة في إدارة مباني المستشفيات تقوم بدور حاسم في تمديد عمر الأصول (المباني والأنظمة والمعدات)، وتساعد هذه البرمجيات في التعرف على المشكلات ومعالجتها قبل أن تتسبب في حدوث أعطال كبيرة في المعدات أو الأنظمة، بما يعمل على إطالة عمر الأصول وتقليل الحاجة إلى استبدالات مكلفة أو تجديدات كبيرة. ومنهج الصيانة التنبؤية يعمل على تحسين عمليات الصيانة عن طريق التركيز على التنبؤ بالأعطال بدلاً من الرد عليها. وهذا من شأنه تحسين الكفاءة التشغيلية وتحقيق الاستدامة في الإدارة التشغيلية لمباني المستشفيات، كما تطبيقات الذكاء الإصطناعي في الحفاظ على جودة الأصول وتحقيق الاستفادة القصوى من الاستثمارات المالية حيث أن القدرة على تحديد الأعطال المحتملة قبل أن تتحول إلى مشاكل كبيرة تعني عمل الأصول بكفاءة لفترات زمنية أطول مما يزيد من القيمة السوقية لها.

٥-١-٤-تعزيز السلامة في المباني

خطر الحوادث يعتبر مرتفعًا في المستشفيات بسبب تعقيد وتعدد وتداخل أنظمة التشغيل ووجود العديد من المعدات الكبيرة. والأعطال غير المتوقعة بالأنظمة والمعدات يمكن أن تتسبب في حوادث خطيرة بدءًا من الحرائق إلى الانهيارات الهيكلية. ومع ذلك باستخدام الصيانة التنبؤية يمكن تقليل هذا الخطر بشكل كبير، حيث يمكن لأدوات الذكاء الإصطناعي في إدارة مبنى المستشفى مثل أجهزة الاستشعار عن بعد وأجهزة إدارة البيانات الكبيرة أن تساعد في التعرف على

الأنماط والمؤشرات التشغيلية التي قد تشير إلى مشكلة محتملة؛ ومن ثم القيام بالإصلاح اللازم قبل حدوث العطل؛ مما يحافظ على سلامة الأشخاص والممتلكات.

٥-١-٥-الاستدامة البيئية

تحافظ الصيانة التنبؤية على على كفاءة الأنظمة والمعدات، مما يقلل من استهلاك الطاقة ويقلل النفايات حست أن ضمان عمل الأنظمة بكفاءة لا يوفر استهلاك الطاقة فقط، بل يساهم أيضًا في الحد من النفايات التي يمكن أن تنتج عن الأعطال والإصلاحات. على سبيل المثال: يمكن لنظام تكييف الهواء الذي يعمل بكفاءة بناء على جدولة ساعات التشغيل أن يقلل من استهلاك الطاقة ويقلل من النفايات التي يمكن أن تنتج عن الإصلاحات المتكررة نتيجة الإستهلاك الغير مدروس، وتساهم برمجيات الذكاء الإصطناعي في تقليل البصمة البيئية للمبنى عن طريق الحفاظ على الأنظمة والمعدات في حالة جيدة وإستثناء المعدات التي ينشأ عنها إنبعاثات كربونية من خلال قياس مستويات الكربون عبر أجهزة الإستشعار الذكية، وبتحقيق كفاءة تشغيل المعدات تقل الحاجة إلى استبدالها أو تغيير قطع غيار منها، مما يقلل من النفايات ويقلل من الطلب على الموارد الطبيعية.

٥-٢- منهجية تطبيق نظام التوأم الرقمي Digital Twin كاحد أهم أدوات الذكاء الإصطناعي في عمليات إدارة تشغيل وصيانة مباني المستشفيات

يعتبر إستخدام تطبيقات الذكاء الإصطناعي في عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات نقلة نوعية في مجال إدارة الصيانة والمرافق، حيث تُساهم في تحسين كفاءة الآداء التشغيلي لمبنى المستشفى وتقليل تكاليف الصيانة. وهى تعتمد بشكل أساسي على استخدام تكنولوجيا البيانات الكبيرة وبرمجيات الذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات المباني وتوقع الأعطال المحتملة قبل حدوثها وإعتماد نهج الصيانة الإستباقية الأكثر كفاءة حيث تقوم بالتعامل مع كم هائل من البيانات مثل: بيانات التشغيل لأنظمة التكييف (HVAC)، أنظمة وشبكات الغازات الطبية، الأنظمة الميكانيكية والكهربائية والسباكة (MEP)، بيانات أنظمة مكافحة الحريق وأنظمة مكافحة الزلازل، بيانات قطع الغيار المطلوبة، بيانات المستخدمين وطبيعتهم وأماكن تواجدهم[37].

ويظهر بالشكل ١٥ مخطط إنسيابي يوضح منهجية إستخدام نظام التوأم الرقمي Digital Twin كأحد أهم تطبيقات الذكاء الإصطناعي في إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمبنى المستشفى.

شكل ١٥: مخطط إنسيابي يوضح منهجية إستخدام نظام التوأم الرقمي كأحد أهم تطبيقات الذكاء الإصطناعي في إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمبنى المستشفى. (المصدر: الباحثة بالإستعانة بالمرجع [٣٧]).

٥-٣- مستشفى شنجهاى الجامعي كنموذج لإستخدام نظام التوأم الرقمي Digital Twin في إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات

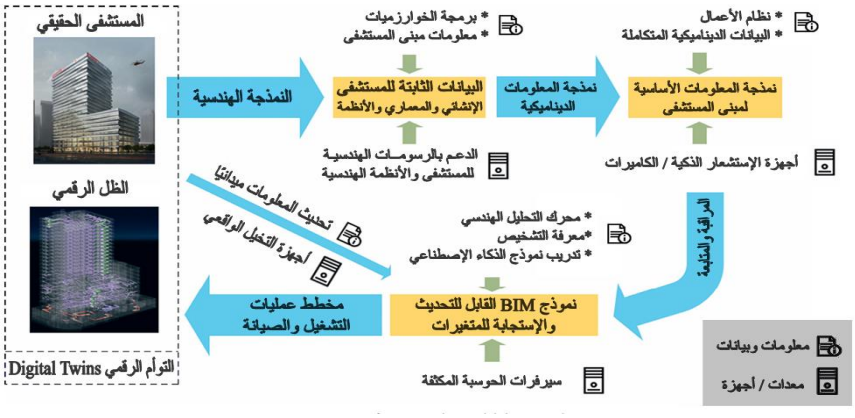
مستشفى شنجهاى التابع لجامعة تونجي Tongji University هو مستشفى جامعي يقع في منطقة الأعمال في مدينة شنجهاى شرقي الصين، وهو يقدم خدمات العلاج الطبي عالية المستوى والخدمات التعليمية والبحث العلمي، يتكون مبنى المستشفى من عدد ٢٤ دور علوي وعدد ٢ بدروم وتبلغ الطاقة السريرية للمستشفى ٥٠٠ سرير بمساحة بناء إجمالية تبلغ حوالي ٨٣٠٠٠ متر مربع، والمبنى يحتوي على جميع أنظمة التقنية الهندسية اللازمة لتشغيل المستشفى من أنظمة الغازات الطبية والأنظمة الكهربية الأساسية والإحتياطية والأنظمة الميكانيكية وأنظمة المعدات الطبية وأنظمة معالجة الصرف الصحي[38].

شكل ١٦ يوضح موقع مستشفى شانجهاى الجامعي، شكل ١٧ يوضح منظور عام للمستشفى.

شكل ١٦: موقع مستشفى شانجهاى الجامعي[39].

شكل ١٧: منظور عام لمستشفى شنجهاى الجامعي[40].

قام الفريق الهندسي المختص ببرمجة نموذج Digital Twins لمبنى مستشفى شنجهاى الجامعي بمشاركة القائمين على المشروع في مرحلة مبكرة من التخطيط والتصميم وذلك للحرص على تكامل جميع معلومات المبنى وتغطيتها لجميع مراحل دورة حياة المبنى داخل نموذج DT وقد تم بناء نموذج التوأم الرقمي للمستشفى خلال مراحل المشروع المختلفة، ويوضح شكل رقم (٢١) تسلسل مستويات إدخال المعلومات الأساسية لبناء نموذج التوأم الرقمي ويبدأ المستوى الأول بالنمذجة الهندسية لمبنى المستشفى بإستخدام الرسومات ثنائية الأبعاد CAD والرفع المساحي عن طريق المسح بالليزر والقياس التصويري، وبعد ذلك تم عمل نمذجة BIM كإحدى خطوات التكامل الرئيسية، وبشكل عام يتم تقسيم البيانات إلى بيانات ثابتة ومعلومات التشغيل التي يتم إنتاجها ديناميكيًا وذلك لضمان أمن البيانات وتحديد ملاءمة إستراتيجيات التخزين المناسبة، ومن خلال دمج البيانات الثابتة والمعلومات الديناميكية ومراقبة العمليات من خلال أنظمة العمليات وأجهزة الإستشعار الذكية ينتج نموذج BIM الديناميكي[41].

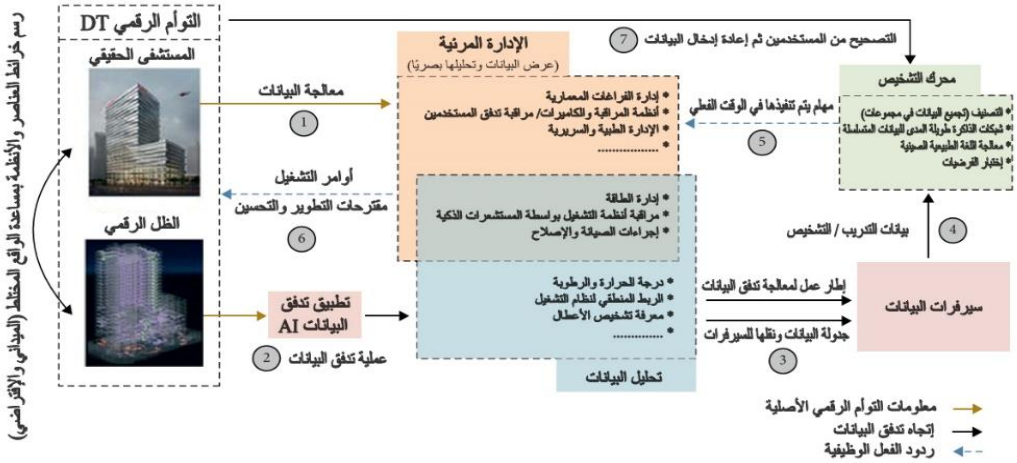


شكل ١٨: الخطوات الأساسية لنمذجة مستشفى شانجهاى من الواقع الحقيقي إلى التوأم الرقمي DT.

٥-٤-١- المنهجية التشغيلية وآلية عمل نظام التوأم الرقمي Digital Twins بمستشفى شانجهاى

يمكن تلخيص الإطار التطبيقي للمكونات الرئيسية لنظام التوأم الرقمي DT عبر ٧ مراحل أساسية: حيث تم أولًا معالجة البيانات الأساسية من مستشفى شانجهاى والتوأم الرقمي لها DT من خلال محرك Apache Kafka وهو تطبيق مراسلة وإستقبال فرعي يدعم معالجة تدفق البيانات كبيانات تدفق عالية الكثافة (المرحلة ١، ٢) . ثم عبر محركات متخصصة في تنسيق وتخزين البيانات الضخمة يتم تحويل بيانات تحليل حالة المبنى إلى بيانات ذو تنسيق مناسب لأغراض الإستعلام والتحليل؛ وفي نفس الوقت يقوم تطبيق Apache Kafka بمراجعة وتخزين ومعالجة عشرات الملايين من الأحداث في الثانية الواحدة في مجموعات مختلفة مدعومة بتطبيقات الذكاء الإصطناعي (المرحلة ٣). بعد ذلك يتم نقل البيانات من سيرفرات البيانات إلى محركات التشخيص والتحليل والتصنيف ومقارنتها بمؤشرات الآداء القياسية المدعومة بنماذج الذكاء الإصطناعي والتي تم إدخالها مسبقًا ويتم القيام بهذه العملية بشكل مستمر ومتكرر

(المرحلة ٤). عند إكتشاف أى إنحراف أو خلل بواسطة محرك التشخيص تتم إعادتها فورًا إلى واجهات الإدارة المرئية للمراجعة والتصحيح (المرحلة ٥). يتم بعد ذلك تقديم بعض الأوامر أو المقترحات للتحسين ورفع الكفاءة التشغيلية للمستشفى إلى النموذج الرقمي DT (المرحلة ٦). وفي المرحلة الأخيرة إذا تم تأكيد أى مقترح للتشخيص على أنه غير صحيح فيتم إرساله مرة أخرى إلى محرك التشخيص لإعادة تحليله بمرحلة ٤ وإعادة الخطوات السابقة ثم تقوم خوارزميات الذكاء الإصطناعي بإجراء التعديلات المقابلة (المرحلة ٧)[42]، كما هو موضح بالشكل ١٩.



شكل ١٩: المنهجية التشغيلية للمكونات الرئيسية لنظام التوأم الرقمي DT بمستشفى شانجهاى.

٥-٤-٢- الإدارة المرئية لتشغيل وصيانة مستشفى شانجهاى عبر نموذج التوأم الرقمي DT

تتم إدارة التشغيل والصيانة لمستشفى شانجهاى من داخل مركز تحكم مركزي تظهر به الشاشة الرئيسية العامة لنموذج التوأم الرقمي للمستشفى DT حيث يظهر بها نموذج ثلاثي الأبعاد يدعم التحول المرئي وإختيار العناصر والتبديل بين أنظمة التشغيل المختلفة، وبالطبع يتم فحص عناصر نظام التوأم الرقمي بصفة مستمرة مثل أجهزة الإستشعار الذكية المنبهة وشبكات وسيرفرات البيانات وتتم مراجعة إتجاهات تدفق الزائرين والمرضى ومراقبة الفراغات المعمارية ومراجعة الإدارة الطبية والسريرية، كما يظهر في الأشكال ٢٠،٢١.

شكل ٢٠: الشاشة الرئيسية العامة بغرفة التحكم المركزي لنموذج التوأم الرقمي DT لمستشفى شانجهاى.

شكل ٢١: مراقبة عمل أنظمة التشغيل عبر تطبيق التوأم الرقمي DT لمستشفى شانجهاى.

٥-٤-٣- التشخيص الذكي للأعطال وعمليات الصيانة الوقائية والصيانة الفورية

يتم التشخيص الذكي للأعطال عن طريق استخدام التقنيات المتقدمة لأجهزة الإستشعار الذكي لمراقبة حالة الأصول من المباني والأنظمة والمعدات بشكل مستمر وتحليل بياناتها لتحديد الأنماط التي تشير إلى تدهور الأداء أو الأعطال الوشيكة وتشخيص سبب العطل بدقة عند وقوعه.

وبالرغم من منهجية الصيانة التنبؤية فإنه قد تحدث أعطال غير متوقعة، ويساعد التشخيص الذكي في تسريع عملية الاستجابة لهذه الأعطال عن طريق التحديد الدقيق للمشكلة؛ فعند عند حدوث عطل، يوفر نظام التوأم الرقمي DT معلومات تشخيصية دقيقة حول طبيعة المشكلة وموقعها المحتمل؛ مما يقلل بشكل كبير من وقت استكشاف الأخطاء وإصلاحها (Troubleshooting)، ومن ثم يتم توجيه الفنيين حيث يمكن للنظام اقتراح خطوات الإصلاح المحتملة أو توفير إرشادات عبر تطبيقات الواقع المعزز (AR) للفنيين في الموقع، ويتم توفير قطع الغيار عن طريق ربط نظام التوأم الرقمي DT بنظام إدارة المخزون لضمان توفر قطع الغيار اللازمة بسهولة[43].

٥-٤-٤- أهم الملاحظات بنموذج إدارة عمليات التشغيل والصيانة بإستخدام نظام التوأم الرقمي Digital Twins بمستشفى شانجهاى

- **مميزات النموذج**

– **<u>تحسين الكفاءة التشغيلية:</u>** من خلال توفير رؤية شاملة لعمليات المستشفى، حيث يوفر التوأم الرقمي لمستشفى شانجهاى المساعدة في تحديد الاختناقات وأماكن تكدس المرضى كما يفيد أيضًا في إعطاء تقارير قطع الغيار المطلوبة بصفة يومية. كما يعطي إستجابة أسرع لحالات الطوارئ: مثل الحرائق وانقطاع التيار الكهربائي. يُمكن للتوأم الرقمي توفير معلومات مهمة حول تصميمات المباني، ومواقع المعدات، والمخاطر المحتملة، مما يُسهّل استجابة أكثر فعالية وتنسيقًا.

– **<u>تحسين الأمن والسلامة:</u>** قام نموذج DT لمستشفى شانجهاى بدمج البيانات اللحظية من أنظمة الأمن وكاميرات المراقبة، والتحكم في الوصول حيث يوفرالتوأم الرقمي رؤية شاملة للوضع الأمني للمستشفى، مما يتيح استجابة أسرع للحوادث وإدارة أفضل للمخاطر.

– **<u>تحسين إدارة الطاقة:</u>** يقوم التوأم الرقمي لمستشفى شانجهاى بمحاكاة أنماط استهلاك الطاقة بناءً على معدل الإشغال، وظروف الطقس، واستخدام المعدات، مما يسمح بتحديد أوجه القصور في كفاءة الطاقة وتطبيق استراتيجيات التحسين.

– **<u>تحسين إدارة المساحات واستخدامها:</u>** يقوم نموذج التوأم الرقمي الإفتراضي Digital Twin لمستشفى شانجهاى بتحسين تخصيص المساحات بالمستشفى وتحديد المناطق غير المستغلة بالكامل، والتخطيط للتوسعات أو التعديلات المستقبلية وهذا من شأنه تعزيز الإستفادة من الأصول.

- **التحديات بالنموذج**

– **<u>التكاليف الأولية المرتفعة للنظام:</u>** يتطلب تنفيذ توأم رقمي شامل DT استثمارًا أوليًا كبيرًا في جمع البيانات، أجهزة الاستشعار، منصات البرمجيات، تكلفة الكوادر البشرية الخبيرة القائمة على إدخال البيانات الأولية مما كلف مستشفى شانجهاى تكاليف كبيرة في المراحل الأولية من تشغيل المشروع.

– **<u>أمن البيانات وخصوصيتها:</u>** يتطلب التعامل مع البيانات التشغيلية الحساسة، والتي يوجد بعض منها متعلق بالمرضى ضمن بيئة التوأم الرقمي إجراءات أمنية صارمة والامتثال للوائح خصوصية البيانات، وقد واجهت مستشفى شانجهاى بعض التحديات في بدايات التشغيل بسبب دمج معلومات المرضى ضمن منظومة التوأم الرقمي.

٦. النتائج

- **وجود قصور ملموس في الأنظمة التشغيلية التقليدية المطبقة حاليًا في عمليات تشغيل وصيانة مباني المستشفيات** حيث غالبًا ما تعتمد هذه الانظمة التقليدية على إجراءات الصيانة التفاعلية Reactive Maintenance أو الجداول الزمنية الثابتة، وتفتقر إلى القدرة على الاستفادة من التقنيات الرقمية، هذا القصور يؤدي بطبيعته إلى عدم الكفاءة في استغلال الموارد، وصعوبة التشخيص الدقيق للأعطال، وزيادة احتمالية حدوث توقفات غير مخطط لها للأنظمة الحيوية، مما قد يؤثر سلبًا على استمرارية تقديم الخدمة الطبية، ويرفع التكاليف التشغيلية على المدى الطويل، ويحد من القدرة على تحقيق الأداء الأمثل للمبنى.

- **ارتبط تطبيق نظام إدارة الصيانة المحوسبة (CMMS)** بتقليل معنوي في الزمن اللازم لإنجاز مهام الصيانة والإصلاح، مصحوباً بزيادة ملحوظة في معدلات الإصلاح الناجح من المرة الأولى، علاوة على ذلك فإن إتاحة الوصول الفوري لمعلومات الأنظمة وسجلات الصيانة التاريخية وقوائم المراجعة الرقمية قد عززت من دقة عمليات التشخيص، وقللت من الحاجة إلى إجراء فحوصات ومراجعات متكررة للمشكلات.
- **يتيح نظام نمذجة معلومات البناء (BIM) القيام بإدارة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات عبر منصة رقمية مركزية ومتكاملة** تحتوي على بيانات دقيقة محدثة ومترابطة مكانياً وهندسياً، وقد مكّن ذلك فرق التشغيل والصيانة بالمستشفيات من الوصول الفوري للمعلومات وتعميق فهمهم للأنظمة الهندسية المعقدة، وتسريع عملية تحديد وحل المشكلات التشغيلية. ونتيجة لذلك، تم تحسين كفاءة تخطيط وتنفيذ مهام التشغيل والصيانة، ودعم الإدارة الاستباقية والفعالة لأصول المبنى على مدار دورة حياته الكاملة.
- **أدى تطبيق تحليلات البيانات المتقدمة وخوارزميات الذكاء الاصطناعي المدمجة ضمن تقنية التوأم الرقمي (DT) على مجموعات بيانات الصيانة التنبؤية وسجلات أداء المعدات والجداول التشغيلية؛** إلى تحسين جداول الصيانة الوقائية. وقد نتج عن هذا التحسين انخفاض ملموس في التكاليف الإجمالية لعمليات التشغيل والصيانة، كما أدى إلى تحقيق كفاءة إستهلاك الطاقة وذلك دون التأثير سلباً على الكفاءة التشغيلية للأنظمة الحيوية في مباني المستشفيات.
- **أثبتت الدراسة فعالية الأنظمة والتطبيقات الرقمية لإدارة العمليات التشغيلية والصيانة (O&M) بمباني المستشفيات** في رفع كفاءة الآداء التشغيلي من خلال تحسين جودة الخدمات الطبية وتحقيق معايير الجودة الشاملة وإشتراطات السلامة والصحة المهنية ومكافحة العدوى وتحسين كفاءة إستهلاك الطاقة؛ ويرجع ذلك إلى تطبيق تقنيات مراقبة الأداء والاستشعار الذكي، التي لم تقتصر على تحسين كفاءة الآداء التشغيلي فقط؛ بل ساهمت أيضاً في التحقق من فعالية استراتيجيات الصيانة المطبقة، مما أدى إلى خفض تكاليف صيانة المباني والأنظمة الهندسية المتكاملة بها وبالتالي دعم الجدوى الاقتصادية للمستشفى.

٧. الخلاصة

- **التوصية بإعتماد الأنظمة والتقنيات الرقمية في إدارة عمليات التشغيل والصيانة بمباني المستشفيات** بناءً على المميزات المثبتة؛ لتحقيق تحسينات قابلة للقياس في مجالات رئيسية تشمل: كفاءة استخدام الطاقة والمياه، وضبط جودة البيئة الداخلية، والإدارة الفعالة للنفايات (الطبية وغير الطبية)، وتحسين إدارة المواد والموارد وقطع الغيار، والاستغلال الأمثل للموقع.
- **الدعوة لإصدار كود متخصص لصيانة وتشغيل مباني المستشفيات** بحيث يتضمن توجيهات واضحة ومحددة مستنبطة من نتائج هذا البحث حول كيفية دمج وتوظيف الأنظمة والتقنيات الرقمية بفعالية في عمليات الصيانة الدورية والتطوير والتجديد ورفع الكفاءة التشغيلية للمستشفيات القائمة والمستقبلية.
- **دراسة جدوى ربط إعتماد الانظمة الرقمية بتراخيص التشغيل** بحيث يكون إعتماد مستوى معين من الأنظمة والتقنيات الرقمية في إدارة عمليات التشغيل والصيانة متطلبًا أساسيًا أو معززًا للحصول على تراخيص تشغيل المستشفيات أو تجديدها. يمكن تطبيق هذه التوصية بشكل تدريجي أو ضمن نطاقات محددة مبدئيًا، كآلية لتحفيز التحول الرقمي ومن ثم كفاءة الآداء.
- **توجيه الأبحاث المستقبلية نحو دراسة التكامل بين الحلول الرقمية حيث يوُصى** بتوجيه الأبحاث المستقبلية لتجاوز نطاق دراسة التقنيات الرقمية الفردية مثل BIM أو CMMS أو التوأم الرقمي بحيث يتم التركيز على استكشاف التأثيرات الناتجة عن دمج هذه الأنظمة. ينبغي أن تهدف الدراسات القادمة إلى فهم كيفية تحقيق التدفق السلس للبيانات والتوافق التشغيلي بين الأنظمة الرقمية المختلفة بهدف خلق نظام أكثر شمولية وكفاءة للتشغيل والصيانة بمباني المستشفيات.

المراجع

[1] Rishabh Roy, Alpana Srivastava, (2024): "Role of Artificial Intelligence (AI) In Enhancing Operational Efficiency in Manufacturing Medical Devices", Article, The Journal of Multidisciplinary Research (TJMDR), India.

[2] حنين عبد السلام أبو عود، آخرون، (٢٠١٩): "إنترنت الأشياء الذكية IOT في مجال الرعاية الصحية"، مقال منشور، Journal of Academic Research, Vol. 15، قسم الهندسة الكهربائية، كلية الهندسة، جامعة مصراتة، ليبيا.

[3] Madubuike et al., (2022): "A REVIEW OF DIGITAL TWIN APPLICATIONS IN CONSTRUCTION", Journal of Information Technology in Construction, Vol. 27, CIB, Elsevier.

[4] Zahra Yousefli, Fuzhan Nasiri, Osama Moselhi, (2020): "Maintenance Workflow Management in Hospitals: An Automated Multi-Agent Facility Management System", Article, ResearchGate, Montreal, Canada.

[5] Cheong Peng Au-Yong, et. Al., (2024): "CHALLENGES AND OPPORTUNITIES OF IMPLEMENTING ICT SYSTEMS IN OFFICE BUILDING MAINTENANCE IN KUALA LUMPUR", Article, Journal of Surveying, Construction and Property (JSCP), Vol. 15, Issue 2, Faculty of Built Environment, University of Malaya, Malaysia.

[6] سامي بدر الدين سراج الدين، (٢٠١٨): "آليات تطبيق متطلبات الإستدامة على منظومة التشغيل والصيانة للمباني الذكية"، مقال منشور، المؤتمر الدولي السادس عشر للتشغيل والصيانة بالدول العربية: (تطوير آليات التشغيل والصيانة للمباني الذكية في إطار رؤية ٢٠٣٠)، القاهرة، جمهورية مصر العربية.

[7] أحمد حنفي محمود أحمد، (٢٠١٨): "نمذجة معلومات البناء BIM ودورها في تطوير عملية التصميم المعماري والبناء"، مقال منشور، Journal of Alazhar University, Engineering Sector, Vol. 13, No. 49, جمهورية مصر العربية.

[8] Thabiso Mmelesi, Kevin N. Nwaigwe, (20٢٠): "A computerised maintenance management system as a teaching aid", Article, World Transactions on Engineering and Technology Education, Vol.18, No.3, University of Botswana, Botswana.

[9] World Health Organization, Medical device technical series, (2011): "Computerized maintenance management system",Book, Switzerland.

[10] Jonathan Thomas, PE, CEM, CRL, Doug Litwiller, PE, CEM, (2021): "Optimizing the Value of Your Computerized Maintenance Management System (CMMS)", Report, Building Maintenance Optimization Consultants (BMOC), U.S.A.

[11] Michael Weinker, et. Al, (2016): "The Computerized Maintenance Management System: An Essential Tool for World Class Maintenance", Article, Procedia Engineering 138, P. 413-420.

[12] موقع infraspeak، (مايو ٢٠٢١): https://blog.infraspeak.com/cmms/.

[13] مصطفى محمود علي السيد فودة، (يونيو ٢٠٢١): "صيانة المباني في مصر من واقع التطور التكنولوجي"، Journal of Al-Azhar University Engineering Sector JAUES، Vol. 16، No. 60، جمهورية مصر العربية.

[14] https://moovitapp.com/north_west-2105/poi/Wrightington%20Hospital/t/en-gb?tll=53.590012_-2.711334&customerId=4908&ref=1&poiType=eusite.

[15] الموقع الرسمي لجريدة البورصة الرقمية، (٥ سبتمبر ٢٠١٧): مقال بعنوان "الصحة تفتتح مستشفى ١٥ مايو المركزى أكتوبر المقبل بعد تطويرها بـ ٦٠٠ مليون جنيه".

[16] Yusuf Arayici, Charles Egbu, Paul Coates (2012): " Building Information Modelling (BIM) Implementation and Remote Construction Projects: Issues, Challenges, And Critiques", Article, Journal of Information Technology in Construction, Vol. 27, P.75-92, CIB, Rotterdam, Elsevier.

[17] Harty, C, Throssell, D, Jeffrey, H, Stagg, M, (2012): "Implementing Building Information Modelling: A Case Study of the Barts and the London Hospitals", Article, Proceedings of the International Conference on Computing in Civil Building Engineering, Nottingham University press, UK.

[18] Gu, N., London, K., (2010): "Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry", Article, Automation in Construction VOL.19, Issue 8, Elsevier.

[19] Tamer Ahmed Mohamed Hossam, Ali Fathi Eid, Laila Khodeir, (2019): "Identifying the Impact of Integrating Building Information Modeling with Maintenance Management A Literature

Review", Article, Journal of Al-Azhar University Engineering Sector, Vol. 14, No. 51, P. 627-641, Egypt.

[20] Mohamed Helmy Elhefnawy, (2017): "The Role of Building Information Modeling "BIM" in upgrading of the maintenance of Hospital Buildings during the design and construction phases", Article, 1st Memaryat International Conference, Architecture of the future: Challenges and Visions, Jeddah, KSA.

[21] حنان سليمان عيسى، (٢٠١٩): "تقنية نمذجة معلومات البناء ومستقبل التعليم المعماري في مصر"، Faculty of Urban & Regional Planning، Journal of Urban Research Cairo University، Vol. 32 ، جمهورية مصر العربية.

[22] محمد عواد نظير، (٢٠٢٢): "تطبيقات نمذجة معلومات البناء في إدارة تكلفة تشغيل المباني الفندقية"، Engineering Research Journal (ERJ)، المجلد ٥١، العدد ٢، صـ ١ -١٤، كلية الهندسة بشبرا، جمهورية مصر العربية.

[23] الموقع الرسمي لمجموعة IBI، https://www.ibigroup.com/ibi-projects/wrightington-hospital/، تاريخ الدول للموقع ٢٠٢٥/٣/١٥.

[24] https://moovitapp.com/north_west-2105/poi/Wrightington%20Hospital/t/en-gb?tll=53.590012_-2.711334&customerId=4908&ref=1&poiType=eusite، تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٣/١٥.

[25] الموقع الرسمي لجريدة vinciconstruction https://www.vinciconstruction.co.uk/mobile/news_article.asp?articleid=131.

[26] Integrated Health Projects by VINCI Construction UK & Sir Robert McAlpine, http://www.ihprojects.co.uk/projects/Wrightington.html، تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٣/١٥.

[27] https://www.bimplus.co.uk/wrightington-hospital/، تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٣/١٥.

[28] الموقع الرسمي لمجموعة IBI، https://www.ibigroup.com/ibi-projects/wrightington-hospital/، تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٣/١٥.

[29] الموقع الرسمي لمجلس غرب مقاطعة لانكشاير (١ سبتمبر ٢٠١٧): https://www.labc.co.uk/news/case-study-wrightington-hospital ، تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٣/١٦.

[30] الموقع الرسمي لشركة NYMAS، https://www.nymas.co.uk/case-studies/wrightington-hospital، تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٣/١٦.

[31] الهيئة السعودية للبيانات والذكاء الإصطناعي، (٢٠٢٤): "معجم البيانات والذكاء الإصطناعي إنجليزي - عربي"، SDAIA، الطبعة الثانية، المملكة العربية السعودية.

[32] محمد السيد ستيت، (٢٠٠٥): "التكنولوجيا الذكية في العمارة المعاصرة"، رسالة ماجستير، قسم الهندسة المعمارية، كلية الهندسة، جامعة عين شمس، مصر.

[33] منصة PlanRadar الرقمية لإدارة مشروعات البناء والتشييد وإدارة المنشآت والعقارات.

[34] حسام البرمبلي (٢٠٢٣): "الصيانة التنبؤية ومنظومة التشغيل للمباني بإستخدام الذكاء الإصطناعي"، بحث منشور، المؤتمر الدولي العشرين للتشغيل والصيانة، الرياض، المملكة العربية السعودية.

[35] Ashlin Darius Govindasamy, (2022):" Building Digital Twins", Master's thesis, Department of Mathematics & Computer Science, University of South Africa, South Africa.

[36] Adarsh Mishra, Saima Aleem, (2024): "Integration of Artificial Intelligence in Hospital Management Systems: An Overview", Article, SSRN Electronic Journal ER, Elsevier.

[37] Eugen Octav Popa, et. Al., (20٢١): "The use of digital twins in healthcare: socio-ethical benefits and socio-ethical risks", Article, Life Sciences - Society and Policy, Spain.

[38] https://www.loytec.com/legacy-case-studies/6708-shanghai-oriental-2019, تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٤/١٢.

[39] https://www.shanghaieasthospital.com/shanghai-east-hospital/, تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٤/٨.

[40] https://www.tongji.edu.cn/eng/Campus_life/Medical_care.htm, تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٤/٨.

[41] V. Stojanovic, M. Trapp, et. al, (2018): "Towards the generation of digital twins for facility management based on 3D point clouds", Article, Proceedings of the 34th Annual ARCOM Conference, Belfast, UK.

[42] Q. Lu, X. Xie,et. al, (2020): "Moving from building information models to digital twins for operation and maintenance", Article, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Smart Infrastructure and Construction, ICE Publishing, UK.

[43] https://www.loytec.com/legacy-case-studies/6708-shanghai-oriental-2019, تاريخ الدخول للموقع ٢٠٢٥/٤/٢.