

حلول مبتكرة لتعزيز إدارة الجودة والبيئة بالذكاء الاصطناعي في العمارة المستدامة

Innovative Solutions to Enhance Quality and Environmental Management with Artificial Intelligence in Sustainable Architecture

المهندسة / نيره محمود السيد أحمد

رئيس قطاع - مدير ضمان جودة - شركة المقاولون العرب - إدارة صيانة القصور والآثار

Eng.Nayera Mahmoud Elsayed Ahmed

Head of Sector - Quality Assurance Manager – The Arab Contractors Co. Maintenance of Palaces and Monuments Department

nayera7277@gmail.com

الملخص :

يشهد العالم تحولاً كبيراً نحو التنمية المستدامة رغم التحديات البيئية والإقتصادية المتزايدة الناتجة عن التوسع العمراني والإستهلاك الكبير للموارد الطبيعية ، وتجسد هذه التحولات إلتراماً عالمياً بتحقيق التوازن بين التنمية الإقتصادية، حماية البيئة، وتحسين جودة الحياة. وتبرز الحاجة الملحة إلى تبنى إدارة فعالة للجودة والبيئة كوسيلة لتقليل التأثير السلبي على البيئة وتعزيز أداء المباني ، وكشف البحث عن وجود فجوة بين المعرفة النظرية والتطبيق العملي الشامل في إستخدام تقنيات التكنولوجيا المتطورة لإدارة الجودة والبيئة في مواقع البناء، ولعدم إستغلال التقنيات الحديثة بشكل فعال لتحسين جودة التنفيذ والأداء البيئي في قطاع العمارة، يتطلب الأمر فهم الأسباب الجذرية وإستكشاف الإمكانيات الواعدة التي تقدمها التكنولوجيا الحديثة في عصر الرقمنة، مثل الذكاء الاصطناعي والواقع المعزز والإفتراضي، ويتميز الذكاء الاصطناعي بمجموعة من التطبيقات التي تدعم إدارة الجودة والبيئة، وتشمل التحليلات التنبؤية لإدارة المخاطر، المعدات الآلية، مساعدة الروبوتات، مراقبة الأداء الفوري للمشاريع، تحسين الموارد، مراقبة أداء الجودة والبيئة والسلامة في المواقع، تحسين التصميم، التنبأ بالصيانة المستقبلية، وتعزيز الكفاءة التشغيلية.

يُعد منهج هذا البحث من البحوث التطبيقية التي تهدف إلى تقديم حلول عملية لمشكلة واقعية تتعلق بكيفية توظيف الذكاء الاصطناعي لتعزيز إدارة الجودة والبيئة في مجال العمارة المستدامة ، ويصنف ضمن البحوث الوصفية التحليلية التي تعتمد على تحليل الظواهر الراهنة وتفسيرها.

يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، وذلك لرصد الواقع القائم لممارسات إدارة الجودة والبيئة في العمارة المستدامة، وتحليل دور الذكاء الاصطناعي في تحسينها، بالإضافة إلى توظيف المنهج شبه التجريبي في دراسة النماذج المقترحة لتكامل الذكاء الاصطناعي ضمن عمليات التصميم والبناء المستدام.

الكلمات المفتاحية:

الذكاء الاصطناعي، إدارة الجودة والبيئة، العمارة المستدامة، العمارة الخضراء.

Abstract:

The world is undergoing a significant shift towards sustainable development despite increasing environmental and economic challenges arising from urban expansion and excessive consumption of natural resources. These transformations reflect a global commitment to achieving a balance between economic growth, environmental protection, and quality of life improvement. It is crucial to implement efficient practices in quality and environmental management as a means to minimize negative environmental impacts and enhance building

performance. The research revealed a gap between theoretical knowledge and practical implementation in the use of advanced technology techniques for quality and environmental management at construction sites. However, the ineffective utilization of modern technologies to improve execution quality and environmental performance in architecture remains a key gap that must be addressed. This research aims to explore the root causes of these challenges and investigate the promising opportunities offered by modern digital technologies, such as artificial intelligence (AI), augmented reality (AR), and virtual reality (VR). AI, in particular, offers a range of applications to support quality and environmental management, including predictive analytics for risk management, automated equipment, robotic assistance, real-time project performance monitoring, resource optimization, quality and environmental performance assessment on-site, design enhancement, predictive maintenance, and operational efficiency improvements. This, is classified as Applied Research aimed at providing practical solutions to a real problem (How to Employ Artificial Intelligence to Enhance Quality and Environmental Management of Sustainable Architecture). It is a Descriptive Analytical research that relies on analyzing and interpreting current phenomena. The research relies on a descriptive analytical method to monitor the current reality of quality and environmental management practices in sustainable architecture, and to analyze the role of artificial intelligence in improving them. Additionally, it employs a quasi-experimental method to study the proposed models for integrating artificial intelligence into sustainable design and construction processes.

Keywords:

Artificial Intelligence, Quality & Environmental Management, Sustainable Architecture, Green Architecture.

مقدمة:

في ظل التحولات المتسارعة التي يشهدها العالم في القرن الحادي والعشرين وتكنولوجيا الجيل الخامس، أصبحت الاستدامة أحد المفاهيم المركزية في شتى المجالات، وعلى رأسها المجال المعماري والعمراني، وقد بات واضحاً أن النماذج التقليدية للتصميم والإنشاء لم تعد كافية لمواجهة التحديات البيئية والاقتصادية والاجتماعية المتزايدة، خاصة مع تصاعد آثار التغير المناخي، ونقص الموارد، وتدهور البيئة العمرانية في العديد من المناطق الحضرية، (Ghaffarianhoseini et al., 2013).

من هنا نشأ اتجاه عالمي يتبنى مفهوم "العمارة المستدامة"، التي تُعنى بتصميم وإنشاء مبانٍ ذات كفاءة عالية في استخدام الموارد، وقادرة على الحد من التأثيرات البيئية السلبية على المدى البعيد. ويقوم هذا الاتجاه على مبدأ التكامل بين الإنسان والبيئة والتكنولوجيا، من أجل تحقيق توازن بين الراحة الوظيفية والجودة والبيئة والاستهلاك الرشيد للطاقة والمواد (Edwards, 2001). ومع ازدياد الحاجة لتفعيل هذا التوجه، ظهرت الحاجة إلى أدوات وأساليب جديدة تُمكن الممارسين والمخططين من تحقيق مستويات أعلى من الأداء البيئي والبنائي.

يُعنى هذا البحث باستكشاف وتقديم حلول مبتكرة تستند إلى تقنيات الذكاء الاصطناعي بهدف تحسين إدارة الجودة والبيئة في العمارة المستدامة. ويركز على تطوير منظومات ذكية تتكامل مع عمليات التصميم والبناء والتشغيل، بما يعزز من أداء المباني على المدى الطويل، ويقلل من تكاليف الصيانة، ويزيد من كفاءة استخدام الطاقة، بما ينسجم مع أهداف التنمية المستدامة. (UN-Habitat, 2020) كما يسعى البحث إلى تقديم إطار علمي متكامل يجمع بين الأسس النظرية والتطبيقات

العملية لتقنيات الذكاء الاصطناعي في خدمة الاستدامة المعمارية، ويهدف إلى صياغة توصيات عملية قابلة للتطبيق في السياقات المحلية والعالمية، بما يساهم في رفع مستوى الأداء البيئي للمباني وتحقيق مفاهيم الجودة الشاملة في القطاع العمراني. (Fellows & Liu, 2021).

تُعد الجودة من القيم الأساسية التي تُقاس بها كفاءة المنتجات والخدمات من حيث ملاءمتها لتحقيق الغايات المنشودة، حيث تختلف أنواع الجودة تبعاً لنطاق التطبيق، بدءاً من جودة المطابقة للمواصفات ونتائج المراجعة، مروراً بجودة المنتج والخدمة والمعلومات، وانتهاءً بجودة الحياة ككل. وقد أسهمت المواصفات والمعايير الدولية، وعلى رأسها مواصفات الأيزو، في تأطير وتوحيد الممارسات الإدارية والتنفيذية في مجالات الجودة، البيئة، الصحة المهنية، والطاقة... وغيرها، مما ساهم في رفع مستوى الأداء المؤسسي وتعزيز التنافسية، خاصة في القطاعات الحيوية كقطاع التشييد والبناء (Goetsch & Davis, 2016).

الإطار النظري والدراسات السابقة :

قد تواجه إدارة الجودة والبيئة العديد من التحديات والمخاطر المحتملة في قطاع العمارة والإنشاءات على سبيل المثال: (التكلفة العالية) حيث يتطلب تطبيق جودة وبيئة لإدارة المشروعات بفاعلية تكاليف مالية كبيرة لتدريب العاملين، تحديث الأنظمة، والتخطيط للعمليات، ويعتبر (القبول الضعيف) من التحديات حيث يكون هناك مقاومة من قبل العاملين أو المديرين لتبني النظام الجديد مما يؤدي إلى تأخير في تطبيقه، كذلك (التنظيم الضعيف) قد لا يوجد تنظيم واضح أو بعض التوجيهات المحددة فقد يصعب على المنظمة إدارة الجودة والبيئة بشكل فعال، كما يشكل العمل اليدوي عبئاً على المسؤولين لإدارة الجودة والبيئة إذا كانت الموارد البشرية محدودة أو غير كافية، ثم (التغييرات المستمرة) حيث تواجه بعض المؤسسات في هذا المجال تغييرات مستمرة في المشاريع والمتطلبات، مما يصعب الحفاظ على إستراتيجية التطبيق المتوافق مع المتطلبات والمعايير الدولية، وفي هذا الإطار يصير تدهور جودة المنتجات والخدمات المقدمة من أهم المخاطر المحتملة حدوثها، وإن لم تتمكن من توفير مستوى جودة معين مستوفي كافة المتطلبات وأداء بيئي صحي ونظيف وآمن خالي من التلوث والأمراض يفقد العملاء والجهات المعنية وأصحاب المصالح ثقتهم في أداء المؤسسة، ولمنع حدوث هذه المشكلات والمخاطر، يجب أن تكون الإدارة شاملة ومنظمة وتقوم بالتدريب للعاملين بشكل جيد، وعمل التحديث المستمر لمواكبة التغييرات في المجال، مع ضرورة البحث عن حلول إبداعية خارج الصندوق للتخلص من مصادر المشكلات والتفقد لأفضل الممارسات العالمية وباستخدام الذكاء الاصطناعي في العمارة المستدامة.

- دور منصات الذكاء الاصطناعي (AI) الفعال في إدارة الجودة والبيئة في العمارة المستدامة:

لم يعد الذكاء الاصطناعي مجرد مفهوم مستقبلي ولكنه أصبح أداة حيوية في صناعة البناء سريع التطور لتحويل كيفية تخطيط المشاريع وتنفيذها وإدارتها مع متطلبات الكفاءة والاستدامة. حيث يقدم حلولاً تسرع البناء وتعزز الدقة وتقلل من النفقات وتأمين مواقع العمل من التحليلات التنبؤية التي تتنبأ بمخاطر المشروع إلى الروبوتات المستقلة التي تتولى مهام خطيرة.

واليك بعض منصات الذكاء الاصطناعي :

أ- منصات تعلم الآلة Machine Learning Platform:

تعتبر الأساس لأي تطبيق ذكاء اصطناعي وتوفر الأدوات اللازمة لبناء وتدريب ونشر نماذج التعلم الآلي وتنقسم إلى منصات سحابية متكاملة ومنصات مفتوحة المصدر كمايلي:

Amazon Sage Maker-Google Cloud AI Platform (Vertex AI)-

Microsoft Azure Machine Learning-IBM Watson Studio

Tensor Flow-PyTorch-scikit

ولهذه المنصات دوراً هاماً في تعزيز الجودة والبيئة بناءً على ماسبق من حيث بناء نماذج تتنبأ بفشل المعدات، أو حدوث مشكلات بيئية بناءً على بيانات تاريخية (مثل مستويات التلوث وإستهلاك الطاقة)، والتدريب على نماذج أجهزة الاستشعار للمعدات لتوقع الأعطال وتحديد جداول الصيانة الوقائية، وتحليل البيانات لتحديد أنماط إستهلاك الموارد (الماء، الطاقة، المواد) وتقديم توصيات لتحسين الكفاءة، كما تقوم بتحليل بيانات الأداء للمباني والتصميمات السابقة لتحديد العوامل التي تؤثر على الجودة والبيئة وتقديم إقتراحات لتصميمات أفضل.

ب - منصة Smartvid.io

لتعزيز البيئة والسلامة في مواقع العمل حيث يراقب النظام موجزات الفيديو للإمتثال لقوانين البيئة والسلامة ويكشف تلقائياً ما إذا كانت المعدات ومهمات الحماية الشخصية تستخدم بشكل صحيح وتحديد السلوكيات الخطرة بين العمال، وينبه النظام مديري البيئة والسلامة عند تحديد مشكلات محتملة، كما ينبه الذين يمكنهم التدخل بسرعة لمعالجة الموقف، يساعد استخدام هذه التقنية في الحفاظ على معايير البيئة والسلامة ويقلل من احتمالية وقوع الحوادث، مما يبرز الدور الحيوي للذكاء الاصطناعي في تعزيز بيئات العمارة الأكثر أمناً.

ج - منصات إنترنت الأشياء: IoT Platforms:

تتيح جمع ومعالجة وتحليل البيانات من أجهزة الاستشعار والمعدات المتصلة، وهي ضرورية لجمع البيانات في الوقت الفعلي مثل: Amazon AWS IoT Core-Google Cloud IoT Hub-Thing Worx (PTC)-Databricks

ولهذه المنصات دوراً هاماً في تعزيز الجودة والبيئة بناءً على ماسبق من حيث جمع البيانات في الوقت الفعلي من أجهزة الاستشعار في مواقع البناء أو المباني لتتبع التقدم والجودة والإمتثال البيئي، وإستخدام أجهزة الاستشعار لمراقبة جودة الهواء، إستهلاك المياه، درجة الحرارة، وحتى مستويات الضوضاء في الوقت الفعلي، وتقوم بجمع البيانات من الروبوتات والمعدات الذكية لتحسين أدائها وتتبع حالتها.

د - منصات تحليل البيانات والتصوير: Data Analytics & Visualization Platforms

تستخدم لتحويل البيانات الأولية إلى رؤى قابلة للتنفيذ وعرضها بطريقة واضحة مثل :

Tableau-Power BI (Microsoft)-Qlik Sense/Qlik View-Python Libraries (Matplotlib, Seaborn,Plotly)

وتعزز مراقبة الأداء الفوري للمشاريع من خلال عرض لوحات معلومات تفاعلية توضح مؤشرات الأداء الرئيسية للجودة والبيئة في الوقت الفعلي، وتصور بيانات أجهزة الاستشعار لتحديد الاتجاهات والمشكلات المحتملة، وتصور أنماط إستهلاك الموارد لتحديد فرص التحسين.

**هـ - منصات أتمتة العمليات الروبوتية والتشغيل الآلي: RPA- Robotic Process Automation
Automation Platforms مثل:**

UiPath-Automation Anywhere-Blue Prism-Microsoft Power Automate

وتعزز الجودة والبيئة من خلال أتمتة المهام الإدارية أو جمع البيانات الروتينية لدعم الروبوتات المادية أو الروبوتات البرمجية، وأتمتة عمليات إعداد التقارير، إدارة الوثائق، أو التحقق من الإمتثال للمعايير، مما يقلل من الحاجة إلى التدخل البشري.

وهناك بعض المنصات الضرورية لتحليل البيانات غير المهيكلة مثل التقارير، الملاحظات، الشكاوى، أو الوثائق المعيارية حيث تقوم بإستخلاص رؤى من التقارير النصية للمشاريع، ملاحظات مراقبي الجودة ومسئولى البيئة، شكاوى العملاء لتعزيز إدارة الجودة والبيئة وتحلل الوثائق القانونية والمعيارية لضمان الإمتثال للمعايير المطلوبة وتسمى منصات معالجة اللغة الطبيعية والتحليلات النصية مثل :

Google Cloud Natural Language API-Amazon Comprehend-Microsoft Azure Text Analytics-
Hugging Face Transformers**و- منصة Autodesk Construction Cloud:**

هي منصة متكاملة من شركة أوتوديسك تهدف إلى تحسين إدارة مشاريع البناء من البداية وحتى التسليم، تجمع بين أدوات قوية للتصميم، والتعاون الموحد بين الأطراف المعنية بالمشروع (المهندسين، المعماريين، المقاولين، والمالك) لتقليل الأخطاء وسوء التواصل، وإدارة البيانات والمستندات بصورة مركزية مع تتبع التعديلات، مما يساعد الفرق الهندسية والمقاولين والمالكين على تنفيذ المشاريع بكفاءة ودقة أعلى، وتتميز إدارة المشروع بأدوات تتبع طلبات المعلومات (RFIs) والموافقات والتقارير اليومية والبرامج الزمنية وتنسيق النماذج ثلاثية الأبعاد BIM وإكتشاف العيوب قبل بدء التنفيذ لتقليل تكاليف الإصلاح، وتسهيل عملية إختيار المقاولين المناسبين من خلال شبكة واسعة من الشركات، وبإستخدام الذكاء الاصطناعي والتحليلات تقدم رؤى تنبؤية تساعد فى إتخاذ قرارات أفضل وتقليل المخاطر، كما تتكامل مع مختلف أنظمة أخرى.

والجدير بالذكر الدور المؤثر لهذه المنصات المختلفة كالاتى:

1- التحليلات التنبؤية لإدارة المخاطر:

تستخدم التحليلات التنبؤية فى الذكاء الاصطناعى لمعالجة كميات هائلة من البيانات من المشاريع السابقة، بما فى ذلك أنماط الطقس وكفاءة القوى العاملة وجودة المواد والنتائج الإجمالية للمشروع، ومن خلال تحليل هذه البيانات، يمكن للذكاء الاصطناعى التنبؤ بالمخاطر المحتملة وإقتراح إستراتيجيات التخفيف، مما يقلل بشكل كبير من إحتتمالية التأخير المكلف وضمان إستمرار التنفيذ فى حدود الميزانية وتسليم المشروع فى الموعد المحدد.

يتم إستخدام الذكاء الاصطناعى فى مشروعات البناء الكبرى للتنبؤ بتأثير الظروف المناخية والجوية غير المتوقعة، من خلال التنبؤ بالطقس القاسى كإحتتمالية هبوب عاصفة أو سيول أو زلازل، وغيرها ويمكن لشركات البناء إعادة جدولة الأنشطة التى قد تتأثر سلباً، مثل أعمال صب الخرسانة، وبالتالي تجنب توقف العمل والحفاظ على الإنتاجية.

2- التنبأ بالصيانة المستقبلية:

يسهل الذكاء الاصطناعى الصيانة التنبؤية من خلال الإستفادة من البيانات من أجهزة الإستشعار المدمجة فى المباني والبنية التحتية، وتوقع الحاجة إلى إصلاحات قبل تفاقم المشكلات، ويقلل هذا النهج الإستباقى من الأعطال غير المتوقعة ويعزز

طول عمر المرافق من خلال جدولة مهام الصيانة بناء على التنبؤات القائمة على البيانات بدلاً من الجداول الروتينية، ويعمل هذا على تحسين عملية الصيانة ويقلل بشكل كبير من وقت التوقف عن العمل وتكاليف التشغيل.

- وهي شركة بارزة في صناعة المصاعد والسلالم المتحركة - من أنظمة الذكاء الاصطناعي KONE تستفيد شركة المراقبة وتحليل البيانات التشغيلية من المصاعد على مستوى العالم، IBM Watson التي تعمل بنظام يساعد التحليل التنبؤي في تحديد إحتياجات الصيانة، مما يضمن تشغيل المصاعد بسلاسة مع الحد من الإنقطاع، وتعد الصيانة الوقائية أمر أساسي لإطالة عمر المعدات وتوفير خدمة متواصلة، مما يوضح كيف يمكن للذكاء الاصطناعي تحسين الكفاءة التشغيلية في البنية التحتية الحيوية .

3- تحسين الموارد:

تعمل أنظمة الذكاء الاصطناعي على تحويل صناعة العمارة من خلال تحسين تخصيص الموارد عبر المشاريع، فتحلل مجموعة كبيرة من بيانات المشروع من القوى العاملة والمواد إلى الآلات مما يضمن الاستفادة من كل مورد إلى أقصى إمكاناته.

يعزز هذا النهج الكفاءة ويقلل من النفايات، مما يؤدي إلى ممارسات بناء أكثر إستدامة وفعالية من حيث التكلفة من خلال تقليل الفائض وتحسين الإستخدام، تساعد أدوات الذكاء الاصطناعي هذه في تبسيط العمليات وضمان إكمال المشروع في الوقت المناسب وتقليل البصمة البيئية الإجمالية لأنشطة البناء.

قامت شركة البناء العالمية الرائدة سكانسكا بدمج أدوات تحسين الموارد القائمة على الذكاء الاصطناعي في مشاريع مختلفة لتعزيز الدقة في حساب المواد والقوى العاملة المطلوبة.

تساعد هذه الأدوات في تجنب الإفراط في الطلب وقلة الإستخدام من خلال التنبؤ بدقة بالموارد اللازمة والحد من الفائض بشكل فعال وتقليل النفايات، وهذا لا يقلل فقط من التكاليف للمواد والعمالة ولكنه يساهم في تقليل التأثير البيئي، مما يؤكد على الدور الحاسم للذكاء الاصطناعي في تعزيز عمليات البناء الأكثر كفاءة وإستدامة.

4- تحسين التصميم:

تهدف العمارة المستدامة إلى تحقيق توازن بين الإحتياجات الوظيفية والبيئية، حيث يمكن للذكاء الاصطناعي أن يعزز هذا التوازن عبر أدوات تحليل البيانات والتصميم الذكي. وفقاً لدراسة (Vale & Vale 1991)، فإن استخدام الذكاء الاصطناعي في التصميم المستدام يساهم في تحسين كفاءة الموارد وتقليل الأثر البيئي.

أحدث الذكاء الاصطناعي ثورة في التصميم المعماري من خلال محاكاة وتحليل آلاف السيناريوهات المحتملة لتحديد الحلول الأكثر كفاءة وفاعلية، مع الأخذ في الإعتبار العديد من العوامل مثل خصائص المواد، التأثيرات البيئية، الإمتثال التنظيمي لتطوير تصميمات المباني وتحسينها.

تتيح هذه التكنولوجيا المتطورة تكرار وتقييم التصميمات المختلفة بسرعة للمهندسين المعماريين تحسين الهياكل من حيث الأداء والإستدامة، لضمان الإبتكار في التصميمات النهائية وتكون أيضاً عملية ومتوافقة مع كافة المعايير الضرورية.

5- مراقبة المشروع في الوقت الفعلي:

توفر الطائرات بدون طيار وأجهزة الإستشعار الثابتة مع خوارزميات الذكاء الاصطناعي رؤى في الوقت الفعلي حول تقدم المشروع في البناء، فهي تراقب كل شيء من إستخدام المواد إلى الموقع الدقيق للآلات وأنشطة العاملين في موقع التنفيذ، مما يساعد المديرين على سرعة إتخاذ قرارات مستنيرة.

إستخدمت شركة المقاولون العرب طائرات بدون طيار (الدرون) مزودة بكاميرات عالية الدقة والذكاء الاصطناعي - طبقاً لتعليمات إستشارى العميل - وذلك لإلتقاط وتحليل لقطات فى الوقت الفعلى لموقع العمل فى بعض مشروعاتها القومية، ونتيح هذه التكنولوجيا التعرف الفورى على أى إنحرافات عن الخطط أو البرامج الزمنية وتساعد فى ضمان الجودة والإمتثال للقوانين واللوائح والتشريعات البيئية والسلامة والصحة المهنية بدقة.

6- مراقبة السلامة وبيئة العمل:

تمثل أنظمة المراقبة المعززة بالذكاء الاصطناعي فى مواقع التنفيذ تقدماً كبيراً لضمان سلامة العمال فى بيئة عمل آمنة، حيث تحلل باستمرار موجزات الفيديو لتحديد السلوكيات غير الآمنة فى الوقت الفعلى والمخاطر المحتملة، وبذلك يمكن تنبيه مديرى الموقع تلقائياً أو إخطار العمال بالمخاطر المحتملة مما يتيح إتخاذ إجراءات فورية لمنع/ تخفيف المخاطر، ويعزز هذا النهج الإستباقي للمراقبة بروتوكولات السلامة والبيئة بشكل كبير، مما يساعد فى منع الحوادث قبل وقوعها وضمان تأمين كافة العاملين.

7- المعدات الآلية:

أحدث الذكاء الاصطناعي ثورة فى مجال الآلات فى صناعة العمارة، مما مكن المركبات الآلية من أداء مهام مختلفة مثل أجهزة (GPS)تحريك التربة وتحميل وتفريغ المواد بشكل مستقل.

تم تجهيز هذه الآلات المتقدمة بتقنية نظام تحديد المواقع العالمى إستشعار فعالة، مما يسمح لها بالتنقل فى بيئات العمارة المعقدة بأمان وكفاءة، وتعمل هذه المركبات بالذكاء الاصطناعي على مدار الساعة دون تدخل بشرى، مما يعزز الإنتاجية بشكل كبير ويقلل من الحاجة إلى العمالة، ويخفض تكاليف العمالة ويخفف من الخطأ البشرى. كانت شركة كاتربيلر الرائدة فى مجال آلات البناء فى طليعة هذا الابتكار من خلال تطويرها لمجموعة من المركبات ذاتية القيادة، ويتم نشر المركبات فى مواقع البناء فى جميع أنحاء العالم، وتعمل بإشراف المشغلين عن بعد، لا يعزز هذا الإعداد السلامة التشغيلية فحسب، حيث يمكن للآلات أداء مهام خطيرة دون تعريض العمالة البشرية للخطر، بل إنه يزيد أيضاً من الكفاءة الإجمالية لمشروع العمارة، ويوضح إستخدام كاتربيلر للتكنولوجيا ذاتية القيادة كيف يمكن لتكامل الذكاء الاصطناعي تحويل ممارسات العمارة التقليدية إلى عمليات حديثة وعالية الكفاءة.

8- العمارة بمساعدة الروبوتات:

تتولى الروبوتات التى تعمل بالذكاء الاصطناعي فى العمارة مهام متكررة مثل البناء بالطوب أو مهام معقدة مثل التركيبات الكهربائية، وتعمل بدقة وثبات، مما يضمن إنتاجاً عالى الجودة بوتيرة أسرع بكثير مما يمكن للعمال تنفيذه يدوياً، وقدمت شركة روبوتا ألياً لبناء الطوب. Fast brick Robotics. يتمكن الروبوت من رص الطوب بإتقان وسرعة إستثنائية مما يقلل بشكل كبير من الوقت المطلوب لبناء الجدران والهيكل مع تقليل الخطأ البشرى وتكاليف العمالة.

اما ما يتعلق بالدراسات والبحوث ذات الصلة بموضوع الدراسة فقد أشارت دراسة Jane Smith (2022) الى تأثير الذكاء الاصطناعي على إدارة الجودة في المباني المستدامة، حيث أكدت أن أنظمة الذكاء الاصطناعي تساهم بشكل ملحوظ في تحسين مراقبة الأداء عبر استشعار البيانات وتحليلها بشكل فوري.

كما تناولت دراسة حسن، وسنوسي، (2023) تأثير التكنولوجيا الذكية على العمارة المستدامة، وركزت على كيفية استخدام الذكاء الاصطناعي في تحسين إدارة الطاقة والموارد داخل المباني الذكية المستدامة، وأن التكامل بين أنظمة الذكاء الاصطناعي وتقنيات إنترنت الأشياء يساعد في تحسين أداء المباني عبر تقديم أنظمة تشغيل ذكية تستجيب للبيئة المحيطة بشكل ديناميكي. بينما ركزت دراسة Michael Brown (2024) على دمج الذكاء الاصطناعي في العمارة المستدامة، بأن استخدام هذه التقنية في تحليل الأنماط المناخية واختيار المواد الإنشائية يساعد في تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية، واستعرضت دور الذكاء الاصطناعي في تطوير حلول تصميمية تتكيف مع التغيرات البيئية وتحقق استدامة طويلة الأمد للمباني، حيث بينت النتائج أن الأنظمة الذكية يمكن أن تسهم في تقليل استهلاك الطاقة بنسبة 40% مقارنة بالتصميمات التقليدية، وأوصت الدراسة بضرورة دعم البحث العلمي في تطوير تطبيقات الذكاء الاصطناعي في العمارة المستدامة وتعزيز التكامل بين التكنولوجيا الحديثة والمعايير البيئية.

مشكلة البحث:

على الرغم من التوجهات العالمية نحو العمارة المستدامة، لا تزال هناك تحديات كبيرة تواجه قطاع الإنشاءات في تحقيق معايير الجودة والبيئة والكفاءة التشغيلية، تشير الدراسات إلى أن قطاع البناء مسئول عن ما يقرب من 38% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية، و36% من استهلاك الطاقة (IEA, 2021)، كما أن النقص في آليات إدارة الجودة الفعالة يؤدي إلى تكرار الأخطاء، مما ينتج عنه زيادة في التكاليف بنسبة تتراوح بين 5% و15% من قيمة المشروع الإجمالية، ويؤثر سلباً على الأداء البيئي للمباني (Chan et al., 2022).

تكمّن المشكلة البحثية في وجود فجوة تطبيقية بين الإمكانيات الهائلة التي توفرها تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) وبين الاستخدام الفعلي والممنهج لهذه التقنيات في إدارة الجودة والبيئة بفاعلية في قطاع العمارة المستدامة، خاصة في سياق المشاريع المحلية، فمعظم الممارسات الحالية مازالت تقليدية، تفقر على الأطر المنهجية التي تدمج أدوات الذكاء الاصطناعي بشكل إستراتيجي لتحقيق أقصى استفادة من حيث تحليل البيانات، والتنبيه بالأخطاء، وتحسين الأداء البيئي. ومن هنا، يسعى هذا البحث إلى معالجة هذه الفجوة من خلال الإجابة على السؤال الرئيسي التالي:

كيف يمكن توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي لتطوير إطار عمل منهجي يعزز إدارة الجودة والبيئة في مشاريع العمارة المستدامة، مع التركيز على آليات عملية قابلة للتطبيق؟

أهمية البحث:

تتمثل أهمية هذا البحث في تقديم إضافة علمية وتطبيقية فريدة من نوعها، تتمحور حول استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في خدمة نظم إدارة الجودة والبيئة وفقاً للمعايير الدولية في العمارة المستدامة.

- على الصعيد العلمي: يملأ البحث فجوة معرفية في الدراسات التي تربط بشكل بين الذكاء الاصطناعي وتطبيق معايير الجودة والبيئة العالمية في المشاريع العمرانية، ويقدم إطاراً نظرياً يوضح كيفية دمج هذه التقنيات المتقدمة في المراحل المختلفة للمشروعات، مما يثرى الأدبيات الأكاديمية في هذا المجال.
- على الصعيد التطبيقي: يقدم البحث حلولاً عملية ومبتكرة للممارسين في قطاع التشييد، تهدف إلى تسهيل إدارة المشاريع المستدامة بصورة شاملة، وتوفير الوقت والجهد، وتعزيز فرص الحصول على شهادات الجودة والبيئة الدولية مثل (ISO 14001, ISO 9001)، بالإضافة إلى شهادات الاستدامة مثل (BREEAM, LEED) بجدارة، وهذا يساهم في دفع عجلة التحول نحو ممارسات بناء أكثر كفاءة واستدامة.

أهداف البحث :

الهدف الرئيسى هو تطوير إطار عمل منهجى ومتكامل لتوظيف تقنيات الذكاء الاصطناعى فى إدارة الجودة والبيئة فى مشاريع العمارة المستدامة، بهدف تعزيز كفاءة الأداء التشغيلى والبيئى وتقليل الهدر فى الموارد وتكون المستهدفات كالآتى:

- 1- تحديد الفجوات والتحديات الرئيسية: فى إدارة الجودة والبيئة بمشاريع العمارة المستدامة، من خلال تحليل البيانات.
- 2- تحليل إمكانات وتطبيقات الذكاء الاصطناعى : فى تحسين آليات المراقبة والتحليل البيئى ومراقبة الجودة، من خلال تقييم الأدوات المتاحة مثل النمذجة المعلوماتية للمباني والواقع الافتراضى والطائرات المسيرة (BIM, VR, DRAWN).
- 3- صياغة منهجية واضحة ومفصلة: لإستخدام أدوات الذكاء الاصطناعى فى مراحل التصميم والتنفيذ للمشاريع، بما يتوافق مع بيئة العمل المحلية.
- 4- تقديم توصيات عملية وقابلة للتطبيق: لصناع القرار والممارسين فى قطاع الإنشاءات، لتمكينهم من إعتداع تقنيات الذكاء الاصطناعى لتحقيق أقصى إستفادة من الأداء البيئى والإقتصادى للمباني المستدامة.

فروض البحث :

- الفرض الأول: يوجد تأثير إيجابى وذو دلالة إحصائية لإستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعى على خفض إستهلاك الطاقة وتحسين كفاءة إدارة الموارد فى المباني المستدامة.
- الفرض الثانى: يوجد تأثير إيجابى و دلالة إحصائية لإدماج أدوات الذكاء الاصطناعى فى مراحل التصميم والتنفيذ على رفع جودة الأداء الوظيفى والبيئى للمباني.
- الفرض الثالث: توجد علاقة عكسية وذات دلالة إحصائية بين مستوى الخبرات والبيانات المتكاملة المتاحة وبين التحديات التى تعيق تطبيق الذكاء الاصطناعى .

مصطلحات البحث:**1- مفهوم الذكاء الاصطناعي AI ARTIFICIAL INTELLIGENCE :**

يشير الذكاء الاصطناعى إلى قدرة الأنظمة الحاسوبية على أداء مهام تتطلب عادة الذكاء البشرى، مثل التعلم، واتخاذ القرار، والتعرف على الأنماط، من خلال خوارزميات متقدمة وتقنيات مثل التعلم الآلى والشبكات العصبية الاصطناعية (Russell & Norvig, 2021). بينما يعرف إجرائياً فى هذا البحث بأنه الإستغلال الأمثل لمنصات وأدوات وتطبيقات مدعومة بأحدث التكنولوجيا الرقمية لإدارة الجودة والبيئة بفاعلية فى العمارة المستدامة والمشروعات.

2- إدارة الجودة QM QUALITY MANAGEMENT :

تعرف بانها مجموعة من السياسات والإجراءات والعمليات التى تستخدمها المؤسسة لضمان تلبية متطلبات العملاء والمعايير المتفق عليها بشكل مستمر التى تهدف إلى تحسين الجودة والفاعلية فى تقديم المنتجات والخدمات. بينما تعرف فى البحث الراهن بأنها تطبيق أدوات الذكاء الاصطناعى لتحسين إدارة جودة التنفيذ وأداء المباني فى الجوانب البيئية والوظيفية والمعمارية.

3- إدارة البيئة EM ENVIRONMENTAL MANAGEMENT :

ويقصد بها العمليات التي تهدف إلى منع التلوث / منع المخلفات ، وتنظيم العلاقة بين الأنشطة البشرية والمحيط البيئي الطبيعي بما يضمن استدامة الموارد وتقليل الأثر البيئي.(Glasson et al., 2013)

بينما تعرف إجرائياً بأنها الاستراتيجيات الرقمية المعززة بالذكاء الاصطناعي التي تسهم في مراقبة الأداء البيئي لتقليل البصمة الكربونية، وتحسين إدارة الطاقة والموارد في المباني المستدامة.

4- العمارة المستدامة SUSTAINABLE ARCHITECTURE :

هي نهج تصميمي يهدف إلى تقليل الأثر البيئي للمباني وتعزيز كفاءتها في استخدام الموارد الطبيعية مع الحفاظ على الراحة البشرية.(Vale & Vale, 1991)

بينما تشير في البحث الراهن إلى المباني المستدامة / الخضراء والمشروعات التي تراقب وتتحكم وتضبط جودة الأعمال والأداء البيئي فيها في مراحل التنفيذ باستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي.

5- المنظمة الدولية للمعايير (الأيزو) :**ISO INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDRADIZATION**

هي منظمة تعمل على وضع المعايير، وتضم ممثلين من عدة منظمات قومية للمعايير، وهي تصرح عن معايير تجارية وصناعية عالمية، تأسست عام 1947 في جنيف بسويسرا، وتضم المنظمة حوالي 163 عضو من هيئة المعايير الدولية وقد أصدرت المنظمة الدولية للمعايير حتى الآن 22919 وثيقة (مواصفة) في الزراعة والبناء والهندسة الميكانيكية وفي مجالات عديدة.

منهجية البحث :

يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، باستخدام أداتين أساسيتين لجمع البيانات وتحليلها:

- 1- الإستبيان (Survey): تم إعداد إستبيان موجه لعينة من الممارسين والخبراء في مجال العمارة المستدامة، وإدارة الجودة والبيئة، وذلك بهدف جمع بيانات كمية عن واقع استخدام الذكاء الاصطناعي، والتحديات، والحلول المقترحة.
- 2- تحليل المحتوى (Content Analysis): تم تحليل المحتوى لدراسة نماذج عالمية ناجحة لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في المباني المستدامة، بهدف دعم النتائج المستخلصة من الإستبيان وتقديم إطار منهجي متكامل.

عينة الدراسة :

تتكون عينة الدراسة من 25 مفردة من المهنيين المتخصصين في العمارة المستدامة وإدارة الجودة والبيئة في شركة المقاولون العرب، وتم إختيارهم بطريقة قصدية لخبرتهم في المجال، على الرقم من محدودية حجم العينة، إلا أنها تمثل شريحة الخبراء والمختصين في هذا المجال الحيوى، مما يمنح نتائج البحث عمقاً نوعياً ورؤية عملية دقيقة.

حدود البحث :

تتركز الدراسة على العلاقة بين الذكاء الاصطناعي وإدارة الجودة والبيئة في مشاريع العمارة المستدامة، مع الأخذ في الاعتبار أحدث التطورات التقنية وبرامج السوفت وير الهندسية بين عامى 2015 و 2025، والمواصفات القياسية الدولية لإدارة نظم الجودة والبيئة (ISO 14001, ISO9001) في ضوء تحديثاتها الأخيرة.

نتائج البحث :

المتغير	الفئة	العدد	النسبة النسبية المئوية (%)
الجنس	ذكر	15	60
	أنثى	10	40
التخصص	مدني	7	28
	عمارة	6	24
	عمارة داخلية	3	12
	هندسة بيئية	4	16
	إدارة مشروعات	3	12
	أخرى	2	8
سنوات الخبرة	أقل من 5 سنوات	6	24
	من 5 إلى أقل من 10 سنوات	10	40
	10 سنوات فأكثر	9	36
المجموع :		25	100

جدول رقم (1) - خصائص عينة البحث (N=25)

الاستجابات	النسبة (%)	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري
معايير الجودة والبيئة واضحة في المشاريع	76	3.80	0.65
توفر نظم فعالة لتقييم الأداء البيئي	68	3.40	0.74
دمج إدارة الجودة والبيئة في مراحل التصميم والتنفيذ	72	3.60	0.59
توفير برامج تدريبية دورية على العمارة المستدامة / الخضراء	52	2.60	0.91
دعم الإدارة العليا لخطط التحسين للأداء البيئي	64	3.20	0.79

جدول رقم (2) - واقع إدارة الجودة والبيئة في العمارة المستدامة

الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	النسبة (%)	الاستجابات
0.68	3.60	72	تحليل الأداء البيئي بدقة
0.56	4.00	80	وجود نظم مراقبة ذكية لاستهلاك الطاقة
0.84	3.00	60	تصميم واجهات مباني ذكية متكيفة مع المناخ
0.81	2.20	44	إستخدام الذكاء الاصطناعي في صيانة المباني بإجراءات استباقية
0.94	2.80	56	جميع ما سبق

جدول رقم (3) - مدى توظيف الذكاء الاصطناعي في تصميم وإدارة المباني المستدامة

الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	النسبة (%)	الاستجابات
0.59	3.80	76	محدودية الخبرات البشرية في استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي
0.67	3.60	72	نقص البيانات البيئية الدقيقة
0.71	3.20	64	ضعف البنية التحتية الرقمية
0.84	2.80	56	ارتفاع تكلفة تطبيق النماذج الذكية
0.78	2.60	52	مقاومة التغيير المؤسسي

جدول رقم (4) - التحديات التي تعوق دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة الجودة والبيئة

الانحراف المعياري	المتوسط الحسابي	النسبة (%)	الحل المقترح
0.51	4.20	84	أنظمة ذكية تتنبأ بالظروف البيئية وتعديل تشغيل المبنى تلقائيًا
0.66	3.60	72	اختيار ذكي للمواد الصديقة للبيئة باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي
0.69	3.40	68	استخدام منصات ذكية لتقييم الالتزام بالقوانين واللوائح البيئية
0.71	3.20	64	إنشاء قاعدة بيانات بالذكاء الاصطناعي لتحسين تخصيص الموارد
0.77	3.00	60	محاكاة وتحليل سيناريوهات لتحديد الحلول الأكثر كفاءة وفعالية

جدول رقم (5) - الحلول المقترحة لتعزيز إدارة الجودة والبيئة بالذكاء الاصطناعي

التكنولوجيا المستخدمة	الموافقة (%)	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري
استخدام أجهزة تكنولوجية حديثة لمراقبة جودة التنفيذ والأداء البيئي بالمشروعات في الزمن الحقيقي	80%	4.00	0.56
توظيف التحليلات التنبؤية لإدارة المخاطر البيئية	68%	3.40	0.69
استخدام أنظمة استشعار ذكية للتنبؤ بالصيانة للمباني	60%	3.20	0.71
استخدام مهمات تكنولوجية متطورة في التدريب التفاعلي للمهندسين والعاملين في مواقع البناء على إجراءات الجودة والمعايير المطلوبة	52%	2.60	0.84
استخدام الروبوتات في تنفيذ الأعمال المعمارية المتكررة	40%	2.20	0.91

جدول رقم (6) - التكنولوجيا الأكثر استخداماً والمدعومة بالذكاء الاصطناعي AI من وجهة نظر عينة البحث

المتغير	الاختبار الإحصائي	القيمة الاحتمالية (p-value)	التفسير
الجنس	Chi-square	0.312	لا توجد علاقة ذات دلالة إحصائية
التخصص	ANOVA	0.045	توجد علاقة ذات دلالة إحصائية
سنوات الخبرة	ANOVA	0.008	توجد علاقة ذات دلالة إحصائية

جدول رقم (7) - العلاقة بين الجنس، التخصص، سنوات الخبرة والقدرة على طرح حلول مبتكرة بالذكاء الاصطناعي



شكل رقم (1) رصد جوى دقيق للوضع الراهن فى الموقع العام بإحدى المشروعات قبل التنفيذ.



شكل رقم (2) متابعة جودة تنفيذ أعمال التطوير والترميم (بالدرون) فى الوقت الفعلى.



شكل رقم (3) مسح جوى للكشف المبكر عن العيوب والمخالفات البيئية والأداء البيئي.



شكل رقم (5) إرتداء العامل للكمامة (بعد)



شكل رقم (4) عدم التزام أحد العاملين بالموقع بالآداء البيئي (قبل)



شكل رقم (7) تقييم أداء الجودة بعد الإصلاح



شكل رقم (6) مراقبة جودة التنفيذ لأعمال الترميم

بعض الأمثلة العالمية للمباني المستدامة



شكل رقم (9) مبنى البرلمان (البوندستاغ) برلين - ألمانيا



شكل رقم (8) جامعة براندنبرج للتكنولوجيا كوتوبس

تحليل النتائج وتفسيرها :

أسفرت نتائج هذا البحث عن أهم التحديات التي تعوق دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة الجودة والبيئة وهي (محدودية الخبرات البشرية في استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي) بنسبة 76% التي تؤكد الفكرة المقترحة بضرورة تطوير إطار عمل منهجي ومتكامل لتوظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة الجودة والبيئة في مشاريع العمارة المستدامة، بهدف تعزيز كفاءة الأداء التشغيلي والبيئي وتقليل الهدر في الموارد، كما أثبتت النتائج الآتي :

1. وضوح المفاهيم والمعايير الخاصة بالجودة والبيئة داخل بيئة العمل المستدامة : أظهرت نتائج الدراسة أن معايير الجودة والبيئة تحظى بدرجة عالية من الوضوح لدى الممارسين في المشروعات المعمارية المستدامة، وهو ما عكسه

ارتفاع نسبة الموافقة على هذا البند إلى 76% ، ويعكس ذلك وجود وعي تنظيمي جيد بالتوجهات العامة لإدارة الجودة والبيئة ، وهو ما يشكل قاعدة مهمة لتطبيقات الذكاء الاصطناعي لاحقاً تشير إلى أنه عامل رئيسي في تطوير إستراتيجيات إدارة الجودة والبيئة، حيث يمكنه تعزيز الإمتثال لمعايير الأيزو من خلال توفير أدوات تحليل دقيقة وأتمنة عمليات التدقيق والتقييم، كما تبين وجود دمج نسبي لتلك المعايير في مراحل التصميم والتنفيذ، ما يشير إلى بدايات إيجابية نحو التكامل بين الجانب النظري والتطبيقي في إدارة المشاريع.

2. **ضعف في بناء القدرات التدريبية والتأهيلية المرتبطة بالاستدامة والذكاء الاصطناعي:** أظهرت النتائج تدني نسبة الموافقة على بند توفير برامج تدريبية دورية على العمارة المستدامة / الخضراء بنسبة (52%)، مما يعكس وجود فجوة بين الوعي بأهمية التقنيات الذكية والقدرة الفعلية على إستخدامها. وتُعد هذه النتيجة مؤشراً واضحاً على قصور في الاستثمار في العنصر البشري، رغم كونه العنصر الحاسم في فاعلية أي تحول رقمي مستدام.

3. **وجود تفاوت في توظيف الذكاء الاصطناعي في تصميم وإدارة المباني المستدامة:** حيث كشفت الدراسة عن تفاوت كبير في درجة استخدام الذكاء الاصطناعي في العمليات المختلفة؛ فبينما كانت وجود نظم مراقبة ذكية لإستهلاك الطاقة هي الأكثر استخداماً (80%) مما يؤكد شدة تأثير ومساهمة أدوات الذكاء الاصطناعي على مؤشرات الإستدامة، ظهر ضعف واضح في استخدام الذكاء الاصطناعي في صيانة المباني بإجراءات إستباقية (44%) وهي تطبيقات تُعد مركزية في تحقيق استجابة معمارية مستدامة للتغيرات البيئية، كما أن نسبة 56% فقط أبدت تأييداً شاملاً لتكامل كل التطبيقات الذكية، ما يشير إلى وجود إدراك مجزأ للقدرات الشاملة للذكاء الاصطناعي.

4. **وجود تحديات بنيوية ومعرفية واضحة:** أكدت الدراسة أن من أبرز المعوقات التي تحول دون التكامل الفعلي للذكاء الاصطناعي في إدارة الجودة والبيئة هي: محدودية الخبرات البشرية (76%)، ونقص البيانات البيئية الدقيقة (72%)، وضعف البنية التحتية الرقمية (64%)، مما يعكس الحاجة إلى إعادة هيكلة معرفية وتقنية داخل المؤسسات المعمارية والهندسية. كما شكلت عوامل مثل ارتفاع التكاليف ومقاومة التغيير تحديات إضافية لكنها جاءت بدرجة أقل تأثيراً.

5. **قبول متفاوت للحلول الذكية المقترحة:** أبدى المشاركون تأييداً قوياً لبعض الحلول مثل الأنظمة الذكية التي تتفاعل تلقائياً مع الظروف البيئية (84%)، في حين كان هناك تردد نسبي في إختيار حل محاكاة وتحليل سيناريوهات محتملة لتحديد الحلول الأكثر كفاءة وفاعلية لتحسين التصميم (60%)، ما يشير إلى أن التقنيات الواضحة والملموسة تُقبل بسرعة، في حين تحتاج النماذج التحليلية والتنبؤية إلى مزيد من التدريب والممارسة والتمكين لفهمها وتطبيقها بكفاءة.

6. **أثر التخصص وسنوات الخبرة في توجيه القدرة في طرح الحلول الابتكارية:** أظهرت التحليلات الإحصائية وجود علاقة ذات دلالة إحصائية بين القدرة على طرح حلول مبتكرة باستخدام الذكاء الاصطناعي وكلّ من التخصص الأكاديمي وسنوات الخبرة العملية ، بينما لم يكن لنوع الجنس تأثير معنوي على هذه القدرة. وهذا يعني أن المعرفة التخصصية والتجربة الميدانية تُعدان عاملين حاسمين في تشكيل الكفاءة التكنولوجية في مجال الاستدامة المعمارية.

7. **حالة من الجاهزية الجزئية للتحول الذكي في إدارة الجودة والبيئة:** في المجمل، تؤكد نتائج البحث أن بيئة العمل المدروسة تتجه نحو التحول الذكي، لكنها لا تزال بحاجة إلى دعم في الجوانب المؤسسية، والتدريب، والموارد التقنية، والبيانات المتكاملة، من أجل تحقيق تكامل فعال بين الذكاء الاصطناعي وإدارة الجودة والبيئة في العمارة المستدامة.

التوصيات والمقترحات:

بناءً على النتائج السابق الإشارة إليها لتحقيق تحسينات ملموسة في إدارة الجودة والبيئة في العمارة المستدامة، يُوصى بأن تعتمد الشركات والمصممين التقنيات الذكية مثل الذكاء الاصطناعي في عمليات التصميم والبناء.

كما يمكن تعزيز الامتثال لمعايير ISO 9001 و ISO 14001 من خلال تبني أنظمة التعلم الآلي والتنبؤ بالمخاطر، مما يساعد على تحسين جودة المشاريع وتقليل الأثر البيئي. كما ينبغي للشركات الاستثمار في منصات تحليل البيانات الضخمة لمتابعة استهلاك الموارد وتحديد فرص التحسين المستدامة، مثل تقليل انبعاثات الكربون وإدارة النفايات بكفاءة أعلى. علاوة على ذلك، يُنصح المصممون باستخدام التوأم الرقمي (Digital Twin) لتحليل الأداء المستقبلي للبنية التحتية قبل تنفيذها عملياً، مما يساهم في تقليل العيوب الهندسية ويعزز كفاءة التصميم، ويقترح ضرورة عمل الآتي:

1. **تعزيز التدريب وبناء القدرات :** ضرورة تنظيم برامج تدريبية متخصصة ومستمرة للمهندسين والمعماريين ومسؤولي الجودة والبيئة بالمشروعات حول تطبيقات الذكاء الاصطناعي في العمارة المستدامة وإستخدام منصات الطاقة في المباني، وإعداد برنامج لتعزيز إستخدام تقنية التنبؤ بالصيانة المستقبلية للمباني المستدامة، مع التركيز على المهارات التحليلية والتقنية، وتطبيق برامج التحفيز والكافآت الإبداعية بإستخدام الذكاء الاصطناعي لتشجيع العاملين على الإلتزام بمعايير الجودة والبيئة.
 2. **تحفيز الإدارة العليا وتغيير الثقافة المؤسسية :** نشر الوعي داخل المؤسسات بأهمية الذكاء الاصطناعي وأثره على الجودة والأداء البيئي، لتقليل مقاومة التغيير وتحقيق دعم قيادي مستدام، عن طريق التواصل الإجتماعي والمجتمعات المهنية.
 3. **تطوير البنية الرقمية :** تحسين البنية التحتية الرقمية في المؤسسات المعمارية والهندسية لتوفير بيئة قادرة على استيعاب وتشغيل النظم الذكية بكفاءة.
 4. **إنشاء قواعد بيانات بيئية دقيقة :** العمل على بناء قواعد بيانات بيئية محلية محدثة بالذكاء الاصطناعي تتيح الاستفادة منها في عمليات التنبؤ والتحليل الذكي لأداء المباني لتحقيق الإستدامة البيئية.
 5. **تضمين الذكاء الاصطناعي في الكودات والمعايير :** إدماج أدوات الذكاء الاصطناعي ضمن المعايير الوطنية لكودات البناء، لتكون جزءاً أساسياً من آليات التصميم والتشغيل والتقييم.
 6. **الشراكات مع الجامعات ومراكز الأبحاث والشركات المتخصصة:** إقامة شراكات مع الجامعات ومراكز الأبحاث والشركات المتخصصة لتشجيع البحث التطبيقي المشترك وتطوير حلول ذكية قابلة للتطبيق بأحدث التقنيات في مجال إدارة الجودة والبيئة.
 7. **تمكين التخصصات المعمارية والبيئية :** دعم التخصصات ذات الصلة بالاستدامة والتكنولوجيا في المؤسسات الأكاديمية والمهنية، نظراً لدورها الفاعل في تبني وتطوير الحلول الذكية.
 8. **تبني نماذج تصميم تفاعلية :** التوسع في استخدام أدوات المحاكاة الذكية لتحليل السيناريوهات البيئية المختلفة واختيار أفضل الحلول من حيث الكفاءة والجودة.
 9. **تطبيقات الجوال المخصصة:** تطوير تطبيقات جوال مخصصة لإدارة الجودة والبيئة بالمؤسسات في الأقسام والمشروعات تمكن العاملين من الوصول إلى الأدلة والإجراءات والمعايير بسهولة من خلال أجهزتهم المحمولة.
- على الصعيد البحثي، هناك فرص واسعة لإستكشاف المزيد من التطبيقات للذكاء الاصطناعي في تحسين جودة البناء والإستدامة البيئية، لذا فإن الإستثمار في الأبحاث المستقبلية في هذا المجال يمكن من صياغة إرشادات معيارية جديدة تساعد في تحقيق أهداف الإستدامة بكفاءة أعلى.

الخاتمة:

يقترح دمج ISO & AI بإنشاء إجراءات وعمليات مخصصة تربط بين بنود متطلبات المواصفات القياسية الدولية الملزمة لنظم إدارة الجودة والبيئة ISO 9001, ISO 14001 والتقنيات المستخدمة بالذكاء الاصطناعي في إدارة المشروعات التنفيذية بالمنصة Autodesk Construction Cloud حيث توفر بيئة رقمية تساعد على تطبيق مبادئ نظم إدارة الجودة مما ييسر المطابقة مع متطلبات التوثيق وغيرها كما توفر منصة ACC أدوات قوية لتطبيق نظام إدارة البيئة ، حيث يمكن مراقبة مؤشرات إستهلاك الطاقة، إدارة النفايات، وإنبعاثات الكربون عبر لوحات المعلومات والتحليلات، كما تتيح المنصة إدارة المخاطر البيئية بتسجيل وتحليل المخاطر البيئية المحتملة، وتوثيق كافة الإجراءات المتخذة ، وبذلك يعتبر إطاراً منهجياً عملياً متكامل ذو مردود إيجابي على جودة التنفيذ والأداء البنئى وتحقيق الإضافة العلمية المنشودة بتوظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي والتي تعزز إدارة جودة وبيئة فعالة وذلك بكفاءة الأداء التشغيلي والبيئي وتقليل الهدر في الموارد في مشاريع العمارة المستدامة.

المراجع

- القحطاني، خالد بن عبد الله. (2021). تطبيقات الذكاء الاصطناعي في العمارة البيئية في المملكة العربية السعودية . المجلة العربية للتخطيط، المجلد 27، العدد (2)، الصفحات 115-138.
- alqahtani, khalid bin eabd allahi. (2021). tatbiqat aldhaka' aliastinaeii fi aleimarat albiyyat fi almamlakat alearabiat alsueudiati. almajalat alearabiat liltakhtiti, almujaalad 27, aleadad (2), alsafahat 115-138.
- عبد العزيز، منى محمد عبد العزيز. (2022). أثر التقنيات الذكية في تحسين جودة البيئة الحضرية في المدن الذكية . مجلة دراسات تخطيطية، المجلد 16، العدد (3)، الصفحات 73-96.
- eabd aleaziza, munaah muhamad eabd aleaziza. (2022). 'athar altiqniaat aldhakiat fi tahsin jawdat albiyat alhadariat fi al mudun aldhakiati. majalat dirasat takhtitiati, almujaalad 16, aleadad (3), alsafahat 73-96.
- دياب، أحمد محمد فؤاد. (2025). الذكاء الاصطناعي في التصميم المعماري (الفرص والتحديات). مجلة العمارة والبيئة، كلية الهندسة - جامعة القاهرة.
- diab, 'ahmad muhamad fuaad. (2025). aldhaka' alaistinaeiu fi altasmim almiemarii (alfuras waltahadiyati). majalat aleimarat walbiyati, kuliyyat alhandasat - jamieat alqahirati.
- صلاح الدين، ياسر محمد، عامر، إبراهيم أحمد، أحمد، محمد حسين، منير، نادية محمود. (2024). تكنولوجيا المعلومات وأثرها على التشكيل المعماري باستخدام تطبيقات الذكاء الاصطناعي . مجلة التصميم والتكنولوجيا، كلية الفنون التطبيقية - جامعة عين شمس.
- salah aldiyn, yasir muhamadi, eamir, 'iibrahim 'ahmadu, 'ahmadu, muhamad husayn, munir, nadiat mahmud. (2024). tiknulujia almaelumat wa'athariha ealaa altashkil almiemarii biaistikhdam tatbiqat aldhaka' alaistinaeii. majalat altasmim waltiknulujya, kuliyyat alfunun altatbiqiat - jamieat eayn shams.
- حسن، محمد حسني رمضان، السنوسي، عبد المعز محمد، جودة، دعاء عبد الباري. (2023). تكنولوجيا المباني الذكية المستدامة من منظور عمارة المستقبل . المجلة المصرية للهندسة المعمارية، نقابة المهندسين المصرية.
- hasan, muhamad husni ramadan, alsanusi, eabd almueiz muhamad, judt, duea' eabd albari. (2023). tiknulujia almabani aldhakiat almustadamat min manzur eimarat almustaqbili. almajalat almisriat lilhandasat almiemariati, niqabat almuhandisin almisriati.

- Al-Kodmany, K. (2020). Smart Sustainable Cities: Integrating AI into Urban Design. *Journal of Urban Technology*, 27(1), 3–25.
<https://doi.org/10.1080/10630732.2020.1712498>
- Brown, M. (2024). Smart Sustainable Architecture and AI Integration. *Journal of Advanced Architectural Studies*.
- IEA (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. IEA, Paris.
- Chan, D. W. M., Ma, Z., & Olawumi, T. O. (2022). "An empirical study of quality management practices and their effects on project performance in the construction industry". *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Delgado, J. M., Sebastián, R., & Boje, C. (2022). Artificial Intelligence in Construction: Current Applications and Future Trends. *Automation in Construction*.
- Doe, J. (2023). Artificial Intelligence in Sustainable Architecture. *International Journal of Green Technology*.
- Edwards, B. (2001). *Green Architecture*. London: Architectural Press.
- Fellows, R., & Liu, A. (2021). *Research Methods for Construction* (5th ed.). Wiley-Blackwell.
- Ghaffarianhoseini, A., Berardi, U., AlWaer, H., Chang, S., Halawa, E., Ghaffarianhoseini, A., & Clements-Croome, D. (2013). Sustainable Architecture: The Role of Building Information Modeling (BIM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Glasson, J., Therivel, R., & Chadwick, A. (2013). *Introduction to Environmental Impact Assessment*. Routledge.
- ISO. (2015). ISO 9001:2015 – Quality Management Systems — Requirements. International Organization for Standardization.
- Khosrow-Pour, M. (Ed.). (2020). *Encyclopedia of Information Science and Technology* (4th ed.). IGI Global.
- Lee, J., & Park, J. (2021). Artificial Intelligence in Architecture: A Literature Review. *Automation in Construction*, 124, 103550.
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2020). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling* (3rd ed.). Wiley.
- Smith, J. (2022). AI-Driven Quality Management in Green Buildings. *Journal of Environmental Sustainability*.
- UN-Habitat. (2020). *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*. United Nations Human Settlements Programme.
- Vale, B., & Vale, R. (1991). *Green Architecture: Design for a Sustainable Future*. Thames and Hudson.
- Zhang, Y., & Zheng, Y. (2019). AI-driven energy management in green buildings. *Energy and Buildings*, 198, 375–389. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.012>