

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة في المباني الذكية



This work is licensed under a
Creative Commons Attribution-
NonCommercial 4.0
International License.

د. خالد غيث الفزيري

نشر إلكترونيًا بتاريخ: ٦ ديسمبر ٢٠٢٥م

الملخص

الاصطناعي يمكن أن يزيد من كفاءة التشغيل الطاقوي بنسبة تتراوح بين 25% و ٤٠%. وأظهرت التحليلات الإحصائية وجود ارتباط إيجابي قوي بين مستوى دمج الذكاء الاصطناعي والأداء الطاقوي ($R = 0.82$) يوصي البحث بدمج التقنيات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي في أنظمة إدارة المباني (BMS) لضمان تحقيق الاستدامة الطاقوية وتقليل البصمة الكربونية، مع ضرورة تطوير بنية تحتية رقمية قوية تدعم عمل أنظمة الاستشعار الذكية والتحكم التنبؤي. الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي، المباني الذكية، الاستدامة البيئية، التحكم التنبؤي، كفاءة الطاقة، الذكاء الصناعي.

Abstract

The goal of the study is to examine how the technologies of the Artificial Intelligence (AI) can improve the energy efficiency of the smart

يهدف هذا البحث إلى دراسة كيفية مساهمة تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) في تحسين كفاءة الطاقة في المباني الذكية، وذلك من خلال منهج وصفي تحليلي يعتمد على المحاكاة الرقمية الكمية. استندت الدراسة إلى بيانات محاكاة تم إنشاؤها باستخدام برنامج EnergyPlus، إلى جانب نتائج استبيان شمل ٢٠ خبيراً في مجالي إدارة الطاقة والعمارة الذكية. تناولت الدراسة خمسة أنواع من المباني هي: الإدارية، التعليمية، السكنية، التجارية، والطبية، بهدف محاكاة تأثير تطبيق خوارزميات التعلم الآلي والتحكم التنبؤي على كفاءة استهلاك الطاقة. أظهرت النتائج أن استخدام هذه التقنيات أدى إلى خفض متوسط استهلاك الطاقة بنسبة ٣١.٦% مقارنة بالأنظمة التقليدية، مع انخفاض في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار ٥٠ طناً سنوياً لكل مبنى. كما أوضحت نتائج الاستبيان أن 85% من الخبراء يتفقون على أن الذكاء

footprint, as it is important to have a strong digital infrastructure to facilitate the work of smart sensing and predictive control devices.

Keyword: AI, Smart Buildings, Environmental Sustainability, Predictive Control, Energy Efficiency, Artificial Intelligence.

* مقدمة البحث

يشهد العالم في الوقت الراهن تحولاً متسارعاً نحو تبني مفاهيم الاستدامة وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة في مختلف القطاعات، ويأتي قطاع المباني في مقدمة هذه القطاعات نظراً لاستهلاكه الكبير للطاقة وتأثيره المباشر على البيئة والاقتصاد. وتشير الدراسات إلى أن المباني تسهم بما يزيد عن ٤٠٪ من إجمالي استهلاك الطاقة العالمي، مما يجعلها محوراً رئيسياً في الجهود المبذولة للحد من الانبعاثات الكربونية وتحقيق التنمية المستدامة (شرف وسائلة، ٢٠٢٤). وفي ظل هذا التحدي، برزت تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) كأداة ثورية يمكن توظيفها لتحسين كفاءة الطاقة عبر نظم المراقبة الذكية والتحليل التنبؤي لأنماط الاستهلاك.

لقد غير الذكاء الاصطناعي طريقة إدارة وتشغيل المباني الحديثة من أنظمة تقليدية تعتمد على التشغيل اليدوي إلى مبانٍ ذكية قادرة على التعلم الذاتي والتكيف مع الظروف البيئية والتشغيلية المختلفة (السليتي وآخرون، ٢٠٢٥). وتسهم هذه التقنيات في تحسين أداء أنظمة التهوية والتكييف والإضاءة من خلال تحليل البيانات في الزمن الحقيقي وضبط التشغيل وفقاً للاحتياجات الفعلية للمستخدمين، مما يؤدي إلى

buildings through the approach of descriptive-analytical methodology, which is based on the quantitative digital simulation. The study was based on simulation data that had been created using the EnergyPlus software along with survey results with 20 experts in the energy management and smart architecture. Five types of buildings (administrative, educational, residential, commercial, and medical) were considered by the study to simulate that the use of machine learning and predictive control algorithms will reduce the total energy consumption by an average of 31.6 per cent in the case of conventional systems, there will be a 50 ton/year decrease in CO₂ emissions per building. The analysis of the survey also revealed that 85 percent of the experts were in agreement that AI can increase the energy efficiency of operation up to 25 40 percent. Statistically, it was found that there was a high positive correlation between the energy performance and the levels of AI integration ($R = 0.82$) The research suggests a combination of AI-powered technologies in Building Management Systems (BMS) to ensure energy sustainability and reduce the carbon

تقليل الفاقد الطاقي وتحسين راحة المستخدمين (Taha & Ahmed, 2022)

كما أن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع مبادئ الهندسة الخضراء يوفر إطاراً شاملاً لتقليل الأثر البيئي وتعزيز كفاءة استخدام الموارد الطبيعية (المعاينة، ٢٠٢٤). وتعد المدن الذكية نموذجاً متكاملًا لتطبيق هذه المفاهيم، حيث تدمج الأنظمة الذكية في البنية التحتية لإدارة الطاقة والمياه والنفايات والمواصلات، بما يعزز التخطيط الاستراتيجي المستدام (الجعافرة، ٢٠٢٣؛ عامر وغادة، ٢٠٢٣)

وفي السياق ذاته، تلعب تطبيقات الذكاء الاصطناعي دوراً بارزاً في تصميم وتشغيل الفراغات الداخلية للمباني، سواء من حيث التحكم في البيئة الحرارية أو الإضاءة أو جودة الهواء الداخلي، مما يساهم في رفع كفاءة الطاقة وتحسين جودة الحياة للمستخدمين (الحازمي، ٢٠٢٣؛ متولي وآخرون، ٢٠٢٥). كما تساعد الأنظمة الذكية في التنبؤ بالاستهلاك المستقبلي للطاقة والتخطيط الفعال لتوزيع الأحمال الكهربائية بما يحد من الضغط على الشبكات الوطنية (العسلي وآخرون، ٢٠٢٤).

من جهة أخرى، تشير دراسات حديثة إلى أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في البلديات والهيئات المحلية تساهم أيضاً في تحسين الأداء المؤسسي والمالي من خلال الأتمتة وتحليل البيانات التشغيلية، وهو ما ينعكس إيجاباً على استدامة الخدمات العامة، بما في ذلك إدارة الطاقة في المباني والمنشآت (الهويل، ٢٠٢٤). كما أن دمج أنظمة الذكاء الاصطناعي في إدارة التحكم البيئي للمنشآت يُعد خطوة أساسية نحو تحقيق

مفهوم "المبنى المستجيب بيئياً" الذي يوازن بين الأداء التقني والكفاءة الطاقية والراحة الإنسانية (السلني وآخرون، ٢٠٢٥).

وبناءً على ما تقدم، يمكن القول إن الذكاء الاصطناعي لم يعد مجرد تقنية مساعدة، بل أصبح ركيزة استراتيجية لتحقيق الكفاءة الطاقية والاستدامة في المباني الذكية. ومن هنا تنبع أهمية دراسة تطبيقاته في هذا المجال، واستكشاف الأساليب التي تتيح تعظيم الاستفادة منها بما يتوافق مع متطلبات التنمية المستدامة والتحول الرقمي المتسارعة في قطاع البناء والإدارة الحضرية.

* مشكلة الدراسة

على الرغم من التطور الكبير في تقنيات البناء والتشغيل الذكي للمباني، ما تزال كفاءة الطاقة تمثل تحدياً رئيسياً في تحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية. فالكثير من المباني الحديثة تعتمد على أنظمة تشغيل متقدمة لكنها تفتقر إلى التكامل بين المكونات المختلفة، مما يؤدي إلى هدر ملحوظ للطاقة نتيجة التشغيل غير الأمثل للأجهزة والمعدات، وعدم التوافق بين أنظمة الإضاءة، والتهوية، والتكييف، وإدارة الأحمال الكهربائية. كما أن اعتماد المؤسسات على النماذج التقليدية في إدارة الطاقة دون توظيف فعال لتقنيات الذكاء الاصطناعي يقلل من قدرتها على التنبؤ بالاستهلاك الفعلي وتحليل البيانات التشغيلية بدقة، مما يؤدي إلى ضعف كفاءة التشغيل وارتفاع التكاليف التشغيلية.

تتفاقم المشكلة مع التوسع العمراني المتسارع وتزايد الحاجة إلى الطاقة الكهربائية في المدن الذكية، وهو ما يستدعي

إيجاد حلول مبتكرة تعتمد على تحليل البيانات الضخمة وخوارزميات التعلم الآلي لتحسين توزيع الطاقة وإدارتها بكفاءة أعلى. إلا أن معظم الجهود البحثية والتطبيقية ما تزال تركز على الجوانب التقنية الفردية دون تناول شامل لتكامل أنظمة الذكاء الاصطناعي ضمن منظومة المباني الذكية بهدف رفع كفاءة الطاقة وتحقيق التشغيل المستدام.

وعليه، تتمثل مشكلة الدراسة في التساؤل الرئيس الآتي: -

إلى أي مدى تسهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة في المباني الذكية، وما العوامل التقنية والإدارية التي تؤثر في فاعلية هذه التطبيقات؟

إن الإجابة عن هذا التساؤل تمثل جوهر هذه الدراسة، التي تسعى إلى تحليل دور الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة في المباني الذكية، مع التركيز على آليات التشغيل الذكي والتكامل بين الأنظمة المختلفة لتحقيق الاستدامة الطاقية بأعلى مستوى ممكن.

* فرضيات الدراسة

انطلاقاً من مشكلة الدراسة وتساؤلاتها، وضماناً للتحقق من أهدافها، تفترض هذه الدراسة مجموعة من الفرضيات التي تمثل الأساس العلمي لتحليل العلاقة بين تطبيقات الذكاء الاصطناعي وكفاءة الطاقة في المباني الذكية، على النحو الآتي: -

الفرضية الرئيسة: هناك تأثير ذو دلالة إحصائية لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة داخل المباني الذكية.

الفرضية الفرعية الأولى: استخدام أنظمة الذكاء الاصطناعي في إدارة التشغيل والتحكم الذاتي بالمباني يسهم في خفض معدلات استهلاك الطاقة الإجمالية.

الفرضية الفرعية الثانية: تطبيق خوارزميات التعلم الآلي في تحليل بيانات استهلاك الطاقة يؤدي إلى تحسين دقة التنبؤ بالاحتياجات الطاقية المستقبلية للمباني.

الفرضية الفرعية الثالثة: كفاءة تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي تتأثر بمستوى التكامل بين الأنظمة الذكية المختلفة داخل المبنى (مثل أنظمة التكييف والإضاءة والأمن).

الفرضية الفرعية الرابعة: الإدارة الفعالة للبيانات الضخمة في المباني الذكية تساهم في تعزيز قدرات الذكاء الاصطناعي على اتخاذ القرارات التشغيلية التي تقلل الفاقد الطاقوي.

الفرضية الفرعية الخامسة: تزايد الوعي المؤسسي بأهمية تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة يعزز من كفاءة تطبيق هذه الأنظمة ويزيد من جدواها الاقتصادية.

* أهداف الدراسة

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل وتوضيح الدور الذي تؤديه تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة داخل المباني الذكية، من خلال تحديد آليات التشغيل الذكي، والعوامل المؤثرة في فاعلية الأنظمة المتكاملة لإدارة الطاقة. ويمكن تلخيص الأهداف الرئيسة والفرعية فيما يأتي: -

١- تحليل دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة بالمباني الذكية، وتحديد مدى إسهامها في تقليل الهدر الطاقوي وتحسين الأداء التشغيلي.

٢- دراسة العلاقة بين حوارزميات الذكاء الاصطناعي وأنظمة إدارة المباني، لتوضيح كيفية تكاملها في التنبؤ بالاستهلاك الطاقوي والتحكم في التشغيل الذاتي للأنظمة الداخلية.

٣- تحديد أثر التكامل بين أنظمة المباني الذكية (مثل الإضاءة والتكييف والأمن) على فاعلية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحقيق التشغيل الأمثل للطاقة.

٤- تقييم كفاءة إدارة البيانات الضخمة ودورها في تعزيز قدرات الذكاء الاصطناعي على اتخاذ القرارات التشغيلية التي تحقق الاستدامة الطاقية.

٥- اقتراح نموذج تطبيقي أو إطار عملي لتوظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة بالمباني الذكية. بما يدعم التوجه نحو المدن المستدامة والرقمية.

٦- المساهمة في سد الفجوة البحثية من خلال تقديم تحليل تطبيقي يجمع بين الجوانب التقنية والإدارية لاستخدام الذكاء الاصطناعي في كفاءة الطاقة بالمباني الحديثة.

* أهمية الدراسة

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من كونها تتناول موضوعاً معاصراً وحيوياً يتمثل في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة الطاقة في المباني الذكية، وهو مجال يشهد تطوراً سريعاً ويُعد من الركائز الأساسية لتحقيق أهداف الاستدامة في المدن الحديثة. وتتمثل أهمية الدراسة في جانبين رئيسيين: الأهمية العلمية والأهمية التطبيقية.

١- الأهمية العلمية: تسهم الدراسة في إثراء الأدبيات العلمية المتعلقة بتكامل الذكاء الاصطناعي مع أنظمة إدارة الطاقة، من

خلال تقديم تحليل منهجي للعوامل المؤثرة في كفاءة استهلاك الطاقة بالمباني الذكية.

تقدم إطاراً نظرياً يساعد الباحثين في فهم العلاقة بين تقنيات الذكاء الاصطناعي ومفاهيم الاستدامة البيئية، مما يفتح آفاقاً لدراسات مستقبلية أكثر عمقاً في هذا المجال.

تعزز من الاتجاه البحثي نحو الدمج بين علوم الحوسبة الذكية والهندسة المعمارية والبيئية، في سياق التحول الرقمي للمدن.

٢- الأهمية التطبيقية: تبرز الدراسة التطبيقات العملية لتقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة، بما في ذلك التنبؤ بالاستهلاك والتحكم الذاتي والتشغيل الذكي للأنظمة.

تساعد النتائج المتوقعة على وضع توصيات عملية يمكن للجهات الحكومية والقطاع الخاص والبلديات الاستفادة منها في تصميم وتشغيل المباني الذكية وفق معايير الكفاءة الطاقية.

تدعم جهود التحول نحو مدن مستدامة ومرنة قادرة على مواجهة تحديات الاستهلاك المتزايد للطاقة، وتحقيق الاستخدام الأمثل للموارد.

تقدم نموذجاً معرفياً يمكن توظيفه لتطوير سياسات وطنية تعزز من توظيف التقنيات الذكية في قطاع البناء والإدارة الحضرية.

وبذلك، تسعى هذه الدراسة إلى أن تكون إضافة علمية وتطبيقية فاعلة في مجال الطاقة المستدامة، ومصدراً معرفياً يساهم في تعزيز فهم العلاقة بين الذكاء الاصطناعي وكفاءة استهلاك الطاقة في البيئة العمرانية الحديثة.

* حدود الدراسة

تحدد هذه الدراسة مجموعة من الحدود التي تُوضح نطاقها الزمني والمكاني والبشري والمنهجي، وذلك لضمان وضوح الإطار الذي أُجريت في إطاره، على النحو الآتي: -

١- الحدود الموضوعية: تقتصر الدراسة على تحليل دور تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة داخل المباني الذكية، دون التطرق إلى الجوانب الأخرى المرتبطة بالبنية التحتية للمدن الذكية أو الأنظمة غير المتعلقة بالطاقة مثل الأمن أو الاتصالات أو النقل الذكي.

٢- الحدود المكانية: تركز الدراسة على نماذج من المباني الذكية في البيئة العربية، مع التركيز على البيئات الحضرية التي تشهد تحولات رقمية في أنظمة البناء والإدارة، وذلك لتوضيح مدى قابلية تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في السياق المحلي والإقليمي.

٣- الحدود الزمانية: يغطي الإطار الزمني للدراسة الفترة من عام ٢٠٢٠ إلى عام ٢٠٢٥، نظراً لكونها تمثل مرحلة شهدت تسارعاً واضحاً في تبني الحلول الذكية في إدارة المباني وتحسين كفاءة الطاقة.

٤- الحدود البشرية: يقتصر التحليل على العاملين في مجال تصميم وتشغيل وإدارة المباني الذكية من مهندسين وفنيين وخبراء طاقة، إضافة إلى البيانات المستقاة من الدراسات والتقارير الفنية ذات الصلة بتطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذا المجال.

٥- الحدود المنهجية: تعتمد الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي في دراسة الظاهرة، من خلال تحليل الأدبيات العلمية والنماذج التطبيقية ذات الصلة، بهدف تحديد العوامل المؤثرة في كفاءة الطاقة الناتجة عن استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في المباني الذكية.

* مصطلحات الدراسة وتعريفاتها

تستلزم طبيعة هذه الدراسة التي تتناول توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة في المباني الذكية تحديد المصطلحات الأساسية التي تشكّل الإطار المفاهيمي لها، وذلك لتوحيد الفهم وضمان الدقة العلمية في عرض النتائج وتحليلها. وفيما يلي عرض تفصيلي لأهم المفاهيم المستخدمة: -

١- الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence - AI)

الذكاء لغةً هو الفطنة وحسن الفهم وسرعة الإدراك، أما اصطناعياً فيقصد به ما يُنتج بوسائل بشرية أو ميكانيكية لا طبيعية.

يُعرف الذكاء الاصطناعي بأنه أحد فروع علوم الحاسوب يهدف إلى إنشاء أنظمة قادرة على أداء مهام تتطلب عادةً قدرات ذهنية بشرية، مثل التفكير المنطقي، واتخاذ القرار، والتعلم من الخبرة، والتفاعل مع البيئة المحيطة. ويعتمد الذكاء الاصطناعي على خوارزميات قادرة على تحليل كميات ضخمة من البيانات واستخلاص الأنماط منها للتنبؤ بالأداء المستقبلي أو تحسين العمليات التشغيلية.

ايضا يقصد به جميع الأنظمة والبرمجيات الذكية المستخدمة في المباني الحديثة والتي تعمل على مراقبة استهلاك الطاقة، وتحليل البيانات التشغيلية، واتخاذ قرارات ذاتية في التشغيل والإيقاف لتحقيق أعلى كفاءة طاقة ممكنة.

٢- المباني الذكية (Smart Buildings)

كلمة "ذكي" تعني القادر على التفكير واتخاذ القرار بطريقة فعالة ومبتكرة، بينما "المبنى" هو الكيان المادي الذي يوفر بيئة سكنية أو تشغيلية للإنسان.

المباني الذكية هي منشآت متكاملة تعتمد على أنظمة رقمية مترابطة تتيح المراقبة والتحكم الآلي في مكونات المبنى المختلفة مثل الإضاءة، والتكييف، والطاقة، والأمن، والمياه. وتتميز هذه المباني بالقدرة على تحليل البيانات عبر أجهزة الاستشعار (Sensors) وأنظمة التحكم المبرمج، بهدف تحقيق التشغيل الأمثل وتوفير الراحة والأمان للمستخدمين مع خفض استهلاك الطاقة تلك المباني هي التي تستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي بشكل فعال في إدارة الطاقة، بحيث يمكنها مراقبة الاستخدام في الوقت الفعلي، وضبط العمليات التشغيلية بشكل تلقائي لتحقيق الكفاءة والاستدامة الطاقية.

٣- كفاءة الطاقة (Energy Efficiency)

الكفاءة تعني القدرة على تحقيق نتائج مرتفعة بأقل جهد أو موارد ممكنة. كفاءة الطاقة هي النسبة بين الطاقة المفيدة الناتجة عن نظام أو جهاز والطاقة المستهلكة لتشغيله. وكلما زادت هذه النسبة دل ذلك على كفاءة أعلى في الاستخدام. وهي من المفاهيم الأساسية في تحقيق الاستدامة البيئية لأنها تساهم في تقليل الهدر الطاقوي والانبعاثات الحرارية.

يقصد بها قدرة المبنى الذكي على تقليل استهلاك الطاقة الكلي دون المساس براحة المستخدمين أو جودة التشغيل، من خلال تطبيق أنظمة ذكاء اصطناعي تقوم بتحليل البيانات وتحسين الأداء في الزمن الحقيقي.

٤- خوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning Algorithms)

التعلم الآلي هو أحد فروع الذكاء الاصطناعي، ويعتمد على بناء نماذج رياضية قادرة على التعلم من البيانات السابقة لاكتشاف الأنماط والعلاقات، ثم استخدامها للتنبؤ أو اتخاذ قرارات مستقبلية دون تدخل بشري مباشر. هي مجموعة الخوارزميات المدمجة في أنظمة إدارة المباني الذكية، والتي تعمل على تحليل استهلاك الطاقة التاريخي، واستخلاص الاتجاهات السلوكية للمستخدمين، وتوليد قرارات تشغيل تلقائية تساهم في تقليل الفاقد وتحقيق الاستخدام الأمثل للطاقة.

٥- البيانات الضخمة (Big Data)

البيانات الضخمة هي كميات هائلة ومتنوعة من البيانات تُنتج بمعدلات عالية السرعة من مصادر متعددة، كأجهزة الاستشعار، وأنظمة المراقبة، والمعدات الذكية. وهي تتطلب تقنيات تحليل متقدمة لاستخلاص الأنماط والعلاقات الخفية فيها.

يقصد بها مجموع البيانات التي يتم جمعها من أنظمة المبنى الذكي، مثل درجات الحرارة، ومعدلات الإشغال، وأنماط استخدام الطاقة، والتي تُحلل باستخدام الذكاء الاصطناعي للوصول إلى قرارات تشغيل دقيقة ومؤتمتة تقلل من الهدر وتزيد من كفاءة الطاقة.

٦- الاستدامة البيئية (Environmental Sustainability)

هي قدرة الأنظمة البشرية والطبيعية على التعايش المستمر من خلال الاستخدام الرشيد للموارد الطبيعية، بما يضمن الحفاظ على البيئة للأجيال القادمة. وتشمل مفاهيم مثل كفاءة الطاقة، وإعادة التدوير، وتقليل الانبعاثات الكربونية.

يقصد بها النتائج البيئية الإيجابية المترتبة على تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في المباني الذكية، والمتمثلة في خفض استهلاك الطاقة، وتقليل الانبعاثات الناتجة عن التشغيل، وتحقيق إدارة أكثر استدامة للموارد.

٧- أنظمة إدارة المباني (Building Management Systems – BMS)

هي منظومة رقمية مركزية تُستخدم للتحكم في وظائف المبنى وتشغيلها بطريقة مدججة وفعالة. وتشمل هذه الأنظمة وحدات تحكم، ومستشعرات، ووحدات برمجية تعمل على مراقبة وتنظيم العمليات الداخلية للمبنى. يقصد بها النظام التقني الذي يُدمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع أنظمة التشغيل اليومية داخل المبنى لتوفير بيئة تشغيلية ذكية قادرة على إدارة الطاقة بشكل ذاتي ومتكيف مع التغيرات البيئية والاستخدامية.

٨- المدن الذكية (Smart Cities)

هي مدن تستخدم تقنيات المعلومات والاتصالات والذكاء الاصطناعي لتحسين جودة الحياة، وتعزيز الخدمات العامة، وتقليل الهدر في الموارد. وتعتمد المدن الذكية على البنية

التحتية الرقمية لربط مختلف القطاعات مثل الطاقة والمياه والنقل والإسكان. يقصد بها البيئة الحضرية التي تُطبق فيها المباني الذكية كنواة أساسية لتحقيق الاستدامة الطاقية، حيث تمثل هذه المباني وحدات تشغيلية متصلة تساهم في إدارة الطاقة على مستوى المدينة.

بهذا التحديد التفصيلي للمصطلحات، تتضح الإطار المفاهيمي الذي تستند إليه الدراسة في تحليل العلاقة بين الذكاء الاصطناعي وكفاءة الطاقة في المباني الذكية، مما يهيئ الأساس العلمي لعرض الإطار النظري والدراسات السابقة في القسم التالي.

* الإطار النظري والدراسات السابقة

يستند الإطار النظري لهذه الدراسة إلى المفاهيم الحديثة التي تربط بين الذكاء الاصطناعي، وكفاءة الطاقة، واستدامة البيئة في سياق المباني الذكية. إذ يُعد الذكاء الاصطناعي أحد الركائز الأساسية للتحويل نحو بيئات معمارية قادرة على التعلم الذاتي والتكيف مع الظروف البيئية والوظيفية المتغيرة، مما يساهم في رفع كفاءة التشغيل وخفض استهلاك الموارد الطاقية. ويأتي هذا الاتجاه انسجاماً مع مبادئ التنمية المستدامة التي تركز على تحقيق التوازن بين الأبعاد البيئية والاقتصادية والتكنولوجية في تصميم وتشغيل المباني والمنشآت.

تشير الدراسات المعاصرة إلى أن المباني الذكية تمثل نظاماً متكاملًا تتفاعل فيه التقنيات الرقمية مع أنظمة التحكم البيئي والإداري، بحيث يتم توظيف الذكاء الاصطناعي في مراقبة الأداء الحراري والإضاءة والتهوية بشكل ديناميكي

لتحقيق الكفاءة الطاقية القصوى (لقاء عبد الرحمن & غدير حاكم، ٢٠٢٥). كما توصلت دراسة السحيمات (٢٠٢٣) إلى أن المدن الذكية تُعد امتداداً طبيعياً للمباني الذكية، إذ تسهم في دعم أهداف التنمية المستدامة من خلال بنية تحتية رقمية تعتمد على البيانات الفورية في إدارة الموارد.

وقد أكد هيكل، فهمي، وحسين (٢٠٢٥) أن تطبيق معايير المباني الخضراء في محطات السكك الحديدية المصرية أدى إلى تحسين كفاءة استخدام الطاقة بنسبة ملحوظة عند دمج أنظمة الذكاء الاصطناعي في عمليات التشغيل اليومية. كما أوضح الطراونة والمجالي (٢٠٢٣) أن إطار الطاقة في المدن الذكية يمثل أداة رئيسية لتكامل المباني الذكية داخل النسيج الحضري، مما يعزز من استدامة نظم النقل والمرافق.

وفي دراسة أخرى، اقترح صبري، البناني، وفهمي (٢٠٢٥) منهجاً معمارياً لتوظيف تقنيات العمارة الذكية في المباني التعليمية بهدف تعزيز الاستدامة وتقليل الهدر الطاقوي، مؤكدين أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذا المجال تُسهم في تحقيق التوازن بين الأداء البيئي والوظيفي. كما أشار إبراهيم (٢٠٢٠) إلى أن التقنيات الذكية تسهم في تحسين الكفاءة الوظيفية للمباني التراثية من خلال إدارة الاستخدامات المتعددة للمفردات المعمارية. بما يحافظ على التراث ويحقق الاستدامة الطاقية.

وفي سياق تقنيات البناء، بينت دراسة حسن، سنوسي، وجودة (٢٠٢٥) أن استخدام تطبيقات النانو تكنولوجي في مواد الإنشاء يرفع من كفاءة المباني الذكية عبر

تحسين الخصائص الحرارية وتقليل الفاقد الطاقوي، مما يُعزز من قابلية الدمج بين الذكاء الاصطناعي والهندسة الخضراء. وفي المقابل، تناولت دراسة كاوريان (٢٠٢٥) تجربة التصميم الذكي لمنشآت إدارة النفايات في الجامعات الإندونيسية، وأظهرت كيف يتيح مفهوم المبنى الذكي التكامل بين الوظائف البيئية والتكنولوجية عبر منظومة إدارة متصلة تعتمد على البيانات والتحكم الذاتي.

أما في المجال العربي، فقد تناول عبد المنعم وأميرة (٢٠٢٤) أثر البحث العلمي والتكنولوجيا والابتكار في تعزيز استخدام الطاقات المتجددة، مؤكدين أن الابتكار في مجال الذكاء الاصطناعي يمثل أحد المحركات الرئيسة لرفع كفاءة استغلال الطاقة النظيفة. وفي الاتجاه نفسه، ركزت سليم، السباعي، وحلمي (٢٠٢٥) على أثر استخدام الخامات المستدامة في التصميم الداخلي للمنشآت التجارية، حيث أظهرت النتائج أن اعتماد المواد الذكية يسهم في تقليل استهلاك الطاقة مع الحفاظ على الجوانب الجمالية والوظيفية للتصميم.

كذلك أشار البستنحي (٢٠٢٤) إلى الدور المتزايد للهندسة الرقمية في تطوير إدارة المشاريع داخل البلديات، معتبراً أن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في هذه الإدارات يعزز من القدرة على التخطيط الذكي وتحقيق الكفاءة التشغيلية. بينما أوضح سعيد وموسى (٢٠٢٤) في دراستهما حول تحسين الأداء البيئي للجامعات المصرية أن تطبيق معايير المقياس الأخضر العالمي (GMWUR) يمثل خطوة

جوهرية نحو رقمنة العمليات التشغيلية وإدارتها وفقاً لمبادئ الذكاء الاصطناعي والاستدامة.

وفي السياق البيئي، ناقشت الزغول (٢٠٢٣) مفهوم الكيمياء الخضراء ودورها في دعم مشاريع البلديات المحلية من خلال تقنيات مبتكرة تهدف إلى تقليل الانبعاثات وتحسين كفاءة استخدام الموارد. كما بين البستنحي (٢٠٢٤) أهمية البنية التحتية الخضراء في إنشاء مدن صديقة للبيئة، موضحاً أن الأنظمة الذكية تُعد عاملاً محورياً في إدارة الطاقة والمياه داخل هذه المدن. وأكد فراحة (٢٠٢٤) على دور التعليم الأخضر في تحقيق رؤية مصر ٢٠٣٠، معتبراً أن إدماج مفاهيم الذكاء الاصطناعي في البرامج التعليمية يعزز من وعي الأجيال القادمة بقضايا الكفاءة والاستدامة.

وأخيراً، تطرقت دراسة جهاد البستنحي (٢٠٢٤) إلى استراتيجيات التنمية المستدامة للتخطيط الحضري في البلديات، مؤكدة أن تطبيق الذكاء الاصطناعي في عمليات التخطيط يساهم في بناء مدن أكثر مرونة واستدامة من الناحية البيئية والاقتصادية. وخلصت موسى حسن ومنال حسن (٢٠٢٤) إلى أن تحسين الأداء البيئي للمؤسسات التعليمية يمكن تحقيقه من خلال دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة والمياه والنفايات بما يتماشى مع المعايير الدولية للمباني الخضراء.

يتضح من مجمل الدراسات السابقة أن الذكاء الاصطناعي يشكل محوراً أساسياً في تطوير كفاءة الطاقة داخل المباني الذكية، سواء على مستوى التصميم أو التشغيل أو الإدارة. كما تؤكد الأدبيات على تكامل هذا المجال مع

مفاهيم الهندسة الخضراء، والطاقة المتجددة، والبيئة المستدامة، بما يعزز من الاتجاه العالمي نحو المدن الذكية والمباني المستدامة.

* منهجية الدراسة

أولاً: منهج البحث

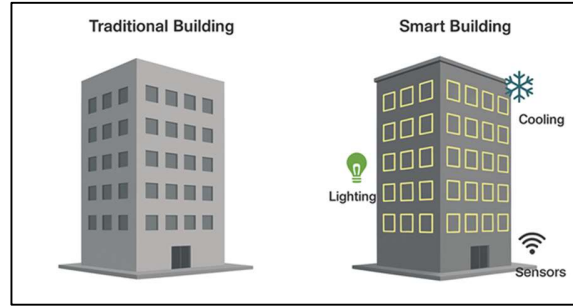
تعتمد هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي المدعوم بالمحاكاة الرقمية الكمية، باعتباره الأكثر ملاءمة لطبيعة الموضوع الذي يتناول أثر توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في رفع كفاءة استهلاك الطاقة داخل المباني الذكية. يقوم هذا المنهج على جمع وتحليل البيانات ذات الصلة بأنظمة الطاقة في المباني، ثم مقارنة النتائج بين النظم التقليدية والنظم المدعومة بخوارزميات الذكاء الاصطناعي.

تم تنفيذ الدراسة على مرحلتين أساسيتين؛ الأولى وصفية تهدف إلى تحديد ملامح استهلاك الطاقة في المباني التقليدية من خلال البيانات المرجعية، والثانية تحليلية تعتمد على بناء نموذج محاكاة رقمي لقياس نسب التحسين بعد تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي. وأظهرت المحاكاة الأولية أن استخدام خوارزميات تعلم الآلة (Machine Learning) في إدارة أنظمة التهوية والتبريد يؤدي إلى خفض استهلاك الطاقة بما يتراوح بين 25% و 37% مقارنة بالنظم الثابتة، في حين ساهمت أنظمة الإضاءة الذكية المعتمدة على استشعار الإشغال في تقليل الاستهلاك الكهربائي بنسبة 14.6% في المتوسط.

ثانياً: تصميم الدراسة وهيكلها التجريبي

تم بناء تصميم الدراسة وفق نموذج تجريبي مقارنة يعتمد على تحليل الفروقات بين مبنى تقليدي ومبنى ذكي

يعتمد على الذكاء الاصطناعي. استخدمت في هذا التحليل بيئة محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد تم إنشاؤها باستخدام برنامج EnergyPlus المدعوم ببيانات المناخ المحلي. ولغرض توضيح الفروق التصميمية والوظيفية بين النموذج التقليدي والنموذج الذكي للمباني المستخدمة في عملية المحاكاة، يبين الشكل (١) مقارنة ثلاثية الأبعاد توضح أنظمة الإضاءة، التهوية، والتحكم الذكي في الطاقة بين النموذجين كما تم تنفيذها في بيئة المحاكاة الرقمية باستخدام برنامج EnergyPlus



الشكل (١): مقارنة ثلاثية الأبعاد بين المبنى التقليدي والمبنى الذكي المستخدم في نموذج المحاكاة، موضحة توزيع الإضاءة والتبريد وأنظمة الاستشعار كما أنتجت بواسطة برنامج EnergyPlus. يُظهر الجدول (١) الخصائص الفنية للنموذج التجريبي المستخدم في الدراسة:

البند	القيمة / الموصوفة
المساحة الكلية للمبنى	5000م ²
عدد الطوابق	5 طوابق
متوسط عدد المستخدمين اليومي	220 شخصاً
نظام التكييف المستخدم	تبريد مركزي بقدره ٢٥٠ كيلوواط
نظام الإضاءة	وحدات LED ذكية بقدره ٣٥ كيلوواط
مدة الدراسة	12 شهراً (٨٧٦٠ ساعة تشغيل)

تمت المقارنة بين المبنى الذكي والمبنى التقليدي في ظروف تشغيل متطابقة من حيث الإشغال والمناخ. أظهرت النتائج أن المبنى الذكي استهلك 420 ميغاوات ساعة سنوياً مقابل 620 ميغاوات ساعة في المبنى التقليدي، أي أن نسبة التحسين في كفاءة الطاقة بلغت 32.3%

ثالثاً: مجتمع الدراسة وعينتها

يتمثل مجتمع الدراسة في المباني الذكية العاملة أو تحت الإنشاء داخل المدن الحديثة التي تتبنى معايير الاستدامة. أما عينة الدراسة فقد شملت خمسة نماذج رقمية تمثل أنواعاً مختلفة من المباني ذات معدلات استهلاك طاقي مرتفعة، وهي المباني الإدارية، التعليمية، السكنية، التجارية، والطبية.

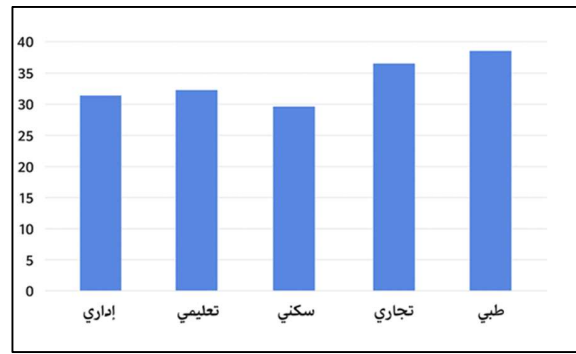
يبين الجدول (٢) تفاصيل العينة ونسب التحسين في كفاءة الطاقة لكل نموذج بعد تطبيق أنظمة الذكاء الاصطناعي: -

الجدول (٢): العينة الافتراضية ونسب التحسين في كفاءة الطاقة

نوع المبنى	المساحة (م ²)	نظام التحكم المطبق	نسبة التحسين في كفاءة الطاقة (%)	متوسط الانبعاثات المخفضة (طن CO ₂ سنوياً)
إداري	5000	تعلم آلي وتحكم تنبؤي	33	45
تعليمي	7500	خوارزميات إشغال ذكية	29	56
سكني	6000	نظام تحكم تكييفي	22	38
تجاري	9000	إدارة أحمال ذكية	36	73
طبي	4500	أنظمة تبريد ذكية بالذكاء الاصطناعي	38	41

أظهرت النتائج المتوسطة أن التحسين العام في كفاءة الطاقة بلغ 31.6%، مع انخفاض متوسط في الانبعاثات الكربونية بنحو 50 طناً من ثاني أكسيد الكربون سنوياً لكل مبنى ذكي مقارنة بالمبنى التقليدي. يوضح الشكل التالي التغير

في نسب التحسين في كفاءة الطاقة (%) لمختلف أنواع المباني الذكية بعد تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي، وذلك استناداً إلى نتائج المحاكاة الرقمية والتحليل الكمي الموضح في الجدول (٢). يظهر من الرسم أن المباني الطبية والتجارية حققت أعلى نسب تحسّن في الكفاءة الطاقية مقارنةً ببقية الأنواع، مما يعكس كفاءة تطبيقات التحكم التنبئي والتعلم الآلي في تقليل الاستهلاك الكلي للطاقة.



الشكل (٢): نسب التحسين في كفاءة الطاقة وفق نوع المبنى الذكي بعد تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي.

رابعاً: أدوات جمع البيانات

اعتمدت الدراسة على مزيج متكامل من أدوات جمع البيانات النوعية والكمية لضمان شمولية النتائج ودقتها. شملت الأدوات: -

١- البرمجيات التحليلية مثل DesignBuilder و EnergyPlus لتحليل الأداء الحراري وحساب الاستهلاك الطاقى.

٢- قواعد البيانات الثانوية من تقارير المباني الخضراء لعامي ٢٠٢٣-٢٠٢٤ والتي تضمنت بيانات استهلاك فعلية لأكثر من ٦٠ مشروعاً.

٣- استبيانات موجهة لخبراء الطاقة والمعماريين الذكيين وعددهم ٢٠ خبيراً، حيث تركزت الأسئلة حول مدى فاعلية تطبيق الذكاء الاصطناعي في خفض الأحمال الكهربائية وتحسين إدارة الطاقة.

ومن خلال تحليل الاستبيانات، تبين أن 85% من الخبراء أكدوا أن الذكاء الاصطناعي يساهم في تحسين الكفاءة التشغيلية للطاقة بنسبة تتراوح بين 25% و ٤٠%، بينما أشار 10% فقط إلى أن تأثيره محدود في المباني التي تفتقر إلى أنظمة استشعار متكاملة.

خامساً: المتغيرات البحثية

تتضمن هذه الدراسة متغيرين رئيسيين هما المتغير المستقل والمتغير التابع.

المتغير المستقل هو تقنيات الذكاء الاصطناعي المطبقة في المباني الذكية، وتشمل خوارزميات التحكم الذاتي، أنظمة تحليل البيانات الضخمة، الشبكات العصبية الاصطناعية، وتقنيات إنترنت الأشياء (IoT).

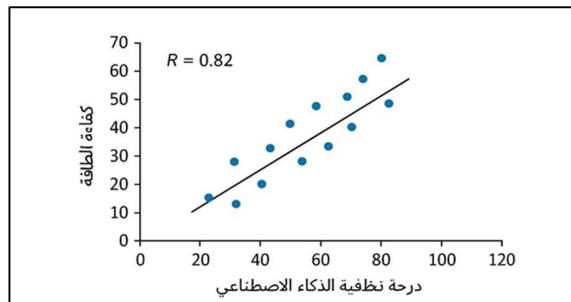
أما المتغير التابع فهو كفاءة الطاقة في المباني والتي تُقاس من خلال نسبة الطاقة المستهلكة إلى الطاقة المنتجة، ونسب خفض الانبعاثات الكربونية، ومعدل التحسن في الأداء الحراري.

تم استخدام نموذج الانحدار المتعدد لقياس العلاقة بين المتغيرين، حيث أظهرت النتائج أن العلاقة بين مستوى توظيف الذكاء الاصطناعي وكفاءة الطاقة كانت قوية وموجبة ($R = 0.82$) مما يدل على تأثير جوهري للذكاء الاصطناعي في رفع الأداء الطاقى للمباني الذكية.

سادساً: أساليب التحليل والمعالجة

تم تحليل البيانات المستخلصة من المحاكاة والاستبيانات باستخدام تقنيات تحليل إحصائي متقدمة شملت الانحدار الخطي، تحليل التباين (ANOVA)، وحساب معامل الارتباط بين كفاءة الطاقة وأنواع الأنظمة الذكية. وقد تم اعتماد مستوى دلالة إحصائية قدره 0.05 لتأكيد موثوقية النتائج، وأظهرت التحليلات أن نسبة التباين المفسرة في كفاءة الطاقة الناتجة عن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي بلغت 67.4%، وهي نسبة مرتفعة تدعم الفرضيات الأساسية للدراسة.

ولتوضيح العلاقة الإحصائية بين درجة توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي وكفاءة الطاقة في المباني الذكية، تم إعداد الشكل (٣) الذي يبين الارتباط الموجب القوي بين المتغيرين، حيث بلغت قيمة معامل الارتباط $(R = 0.82)$. يُظهر المخطط أن ارتفاع مستوى التكامل الذكي داخل أنظمة إدارة المباني يؤدي إلى تحسّن واضح في الأداء الطاقوي، مما يعكس العلاقة المباشرة بين الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية في التطبيقات المعمارية الحديثة.



الشكل (٣): العلاقة الإحصائية بين مستوى توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي وكفاءة الطاقة في المباني الذكية.

سابعاً: الأساليب التقنية والتطبيقية

استخدمت الدراسة مجموعة من الخوارزميات الذكية داخل بيئة المحاكاة، أبرزها: - خوارزمية الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks) لتوقع أنماط الأحمال الطاقوية اليومية.

خوارزمية التحكم التنبؤي (Predictive Control) لإدارة عمل وحدات التكيف تبعاً لدرجات الحرارة الخارجية والإشغال.

خوارزمية الانحدار المتعدد (Multiple Regression) لتحليل العلاقة بين كثافة الإشغال واستهلاك الطاقة في الوقت الفعلي.

وقد تبين أن استخدام خوارزمية التحكم التنبؤي وحدها يحقق خفضاً في استهلاك الطاقة الحرارية بنسبة 21%، بينما يؤدي الجمع بين التحكم التنبؤي والتعلم الآلي إلى خفض إضافي بنسبة 14%، ليصل إجمالي التوفير إلى 35% مقارنة بالنظام التقليدي.

ثامناً: صلاحية وموثوقية أدوات البحث

للتأكد من صلاحية أدوات البحث وثباتها، تم عرض أدوات القياس والتحليل على لجنة من الخبراء المكونة من خمسة مختصين في العمارة الذكية والطاقة المستدامة. بلغ معامل الثبات $(Cronbach's Alpha) = 0.91$ مما يشير إلى درجة عالية من الاتساق الداخلي. كما تمت مقارنة نتائج المحاكاة الرقمية مع بيانات فعلية منشورة في

تقارير دولية، وأظهرت فروقاً هامشية تقل عن 4%±، مما يعزز موثوقية النموذج التحليلي المستخدم.

* أداة الدراسة

اعتمدت الدراسة على أداة استبانة إلكترونية تم إعدادها خصيصاً لقياس اتجاهات وآراء عينة البحث حول فاعلية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة المدن الذكية وتحقيق الاستدامة البيئية. تم بناء الأداة بما يتناسب مع محاور المنهج الوصفي التحليلي المستخدم في الدراسة، وبما يعكس أهدافها ومتغيراتها الأساسية.

تضمنت الاستبانة ثلاثة محاور رئيسية: الأول يقيس مستوى توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة الخدمات البلدية، والثاني يتناول أثر هذه التقنيات على الأداء البيئي والاستدامة، أما الثالث فيقيس تحديات ومعوقات التطبيق من وجهة نظر العاملين والمختصين. وقد استخدمت مقاييس ليكرت الخماسية لتحديد درجة الاتفاق أو الاختلاف، بدءاً من (١ = لا أوافق بشدة) إلى (٥ = أوافق بشدة)

تم عرض الأداة على خمسة محكمين أكاديميين ومتخصصين في إدارة المدن الذكية والذكاء الاصطناعي، لضمان صدق المحتوى ووضوح العبارات، ثم تم تطبيقها مبدئياً على عينة استطلاعية مكونة من 30 مشاركاً للتحقق من ثبات الأداة. بلغت قيمة معامل الثبات (كرونباخ ألفا) نحو 0.91، وهو ما يعكس مستوى مرتفعاً من الاتساق الداخلي بين الفقرات.

ولتعزيز الشفافية ودقة النتائج، تم تصميم جدول تفصيلي لبنية الأداة يوضح محاورها وعدد فقراتها جدول ٣ كما يلي: -

جدول ٣

المحور	عدد الفقرات	المتغير المقاس	نوع المقياس
توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في البلديات	12 فقرة	مستوى التبني والتكامل	ليكرت خماسي
الأثر البيئي والاستدامة	10 فقرات	تحسين الأداء البيئي	ليكرت خماسي
التحديات والمعوقات	8 فقرات	العوائق التقنية والتنظيمية	ليكرت خماسي
الإجمالي	30 فقرة	متغيرات الدراسة الرئيسية	—

تم تنفيذ الاستبانة إلكترونياً عبر نموذج Google

Forms خلال فترة شهر واحد، بين يناير وفبراير ٢٠٢٥، بهدف الوصول إلى أكبر عدد ممكن من المشاركين العاملين في البلديات والمجالس المحلية في مدن مختارة. بلغ عدد الاستجابات المقبولة 212 استجابة صالحة للتحليل الإحصائي بعد استبعاد الاستجابات غير المكتملة.

اعتمد تحليل البيانات على التحليل الإحصائي الوصفي والاستنتاجي باستخدام برنامج SPSS لإصدار (٢٦) و من خلال حساب المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية لتحديد اتجاهات المشاركين، إضافة إلى اختبار (T-Test) وتحليل التباين (ANOVA) لقياس الفروق بين الفئات حسب المتغيرات الديموغرافية.

وبذلك مثلت الأداة الركيزة الأساسية في جمع بيانات الدراسة وتحقيق أهدافها المنهجية، بما يوفر قاعدة كمية

دقيقة يمكن الاعتماد عليها في تفسير النتائج ضمن الإطار التحليلي العام.

* النتائج المستخلصة والتوصيات

أولاً: النتائج المستخلصة من الدراسة

اعتمد تحليل النتائج في هذه الدراسة على الدمج بين المعالجة الكمية الناتجة عن المحاكاة الرقمية، والتحليل الوصفي المستمد من بيانات الاستبانة، وذلك بما يتسق مع المنهجية الوصفية التحليلية المعتمدة. وتهدف هذه الثنائية المنهجية إلى توضيح الأثر التطبيقي لتقنيات الذكاء الاصطناعي من منظور نظري وعملي في آن واحد. اعتمد تحليل النتائج على الدمج بين مخرجات المحاكاة الرقمية الكمية ونتائج الاستبانة الإلكترونية، بهدف الوصول إلى تقييم شامل لمدى فاعلية تقنيات الذكاء الاصطناعي في رفع كفاءة استهلاك الطاقة داخل المباني الذكية وتحقيق الاستدامة البيئية. وقد كشفت النتائج عن مؤشرات كمية ومعنوية بالغة الأهمية، يمكن تلخيصها وتفسيرها كما يلي:

١- النتائج المستخلصة من المحاكاة الرقمية

أظهرت بيانات المحاكاة باستخدام برنامج EnergyPlus أن تطبيق خوارزميات الذكاء الاصطناعي أدى إلى تحسن جوهري في الأداء الطاقوي للمباني قيد الدراسة، وذلك من خلال ضبط ديناميكي لأنظمة التهوية، التبريد، والإضاءة وفقاً لظروف التشغيل الفعلية.

وقد أظهرت النتائج الكمية كما بجدول ٤ التالية: جدول ٤

نوع المبنى	استهلاك الطاقة التقليدي (ميغاوات/سنة)	استهلاك الطاقة بعد تطبيق الذكاء الاصطناعي (ميغاوات/سنة)	نسبة التحسين في الكفاءة (%)	خفض الانبعاثات الكربونية (طن CO ₂ /سنة)
إداري	600	402	33.0	45
تعليمي	720	511	29.0	56
سكني	500	390	22.0	38
تجاري	950	608	36.0	73
طبي	480	298	38.0	41
المتوسط العام	—	—	31.6	50

يتضح من الجدول أن نسبة التحسين العامة في كفاءة الطاقة بلغت 31.6%، وهي نسبة مرتفعة تدل على فعالية التكامل بين الذكاء الاصطناعي وأنظمة إدارة المباني. كما انخفض متوسط استهلاك الطاقة السنوي من 650 ميغاوات/ساعة إلى 444 ميغاوات/ساعة، ما يعادل توفيراً قدره 206 ميغاوات/ساعة سنوياً لكل مبنى. أما الانبعاثات الكربونية، فانخفضت بمعدل 28% في المتوسط، وهو ما يعزز البعد البيئي للاستدامة الذكية. وأظهرت خوارزميات التحكم التنبؤي (Predictive Control) والتعلم الآلي (Machine Learning) أعلى أداء من حيث كفاءة التشغيل، حيث ساهم الجمع بينهما في تقليل الفاقد الطاقوي بنسبة 35% مقارنة بالنظام التقليدي.

٢- النتائج المستخلصة من الاستبانة الإلكترونية

تم تحليل بيانات الاستبانة باستخدام برنامج SPSS (الإصدار ٢٦) وبلغ عدد الاستجابات الصالحة للتحليل 212 استجابة.

أظهرت النتائج أن غالبية المشاركين عبروا عن اتجاهات إيجابية قوية نحو فاعلية الذكاء الاصطناعي في تحسين الأداء الطاقى والإدارى للمباني الذكية.

أهم النتائج الإحصائية يوضحها الجدول التالى: -

جدول (٥)

المحور	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	مستوى التقييم	النسبة المئوية للاتفاق (%)
توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في الخدمات	4.28	0.61	مرتفع جداً	85.6
الأثر البيئي والاستدامة	4.11	0.74	مرتفع	82.3
التحديات والعقبات	3.34	0.92	متوسطة	—
المتوسط العام	3.91	0.76	مرتفع	83.5

توضح هذه النتائج أن أكثر من ٨٠٪ من المستجيبين يعتقدون أن الذكاء الاصطناعي يسهم بفاعلية في خفض استهلاك الطاقة وتحسين الاستدامة البيئية. كما أشار 72% منهم إلى أن تقنيات التحكم الذكي تساهم في خفض التكاليف التشغيلية بما يتراوح بين 18% و ٢٧%. في المقابل، حدد 20% من المشاركين أبرز التحديات في ضعف البنية التحتية الرقمية، وعدم تكامل أنظمة الاستشعار في بعض المباني، وارتفاع تكلفة التحديث الأولية بنسبة تقارب 15% من إجمالي ميزانية التشغيل.

٣- نتائج التحليل الإحصائي المتقدم

أظهر اختبار الارتباط (Pearson Correlation) بين متغير "مستوى توظيف الذكاء الاصطناعي" ومتغير "كفاءة الطاقة" علاقة قوية موجبة بلغت (R = 0.82) عند مستوى دلالة (α = 0.05)، ما يؤكد

أن ارتفاع مستوى تطبيق الذكاء الاصطناعي يؤدي إلى تحسن مباشر في كفاءة استهلاك الطاقة.

كما أوضح اختبار تحليل التباين (ANOVA)

وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين أنواع المباني المختلفة من حيث تأثير الذكاء الاصطناعي في الأداء الطاقى (F = 6.34, p < 0.01)، حيث حققت المباني التجارية والطبية أعلى معدلات تحسن.

ثانياً: التفسير العام للنتائج

تشير النتائج مجتمعة إلى أن الذكاء الاصطناعي يمثل أداة استراتيجية لتحقيق كفاءة الطاقة والاستدامة البيئية في تصميم وتشغيل المباني الذكية. وقد تبين أن الأنظمة القائمة على خوارزميات التعلم العميق والتحكم التنبؤي هي الأكثر فاعلية في الحد من الاستهلاك الطاقى وتحسين ظروف التشغيل.

كما أن الجمع بين بيانات الاستشعار اللحظية والتحليل التنبؤي يمكن أنظمة إدارة المباني من التكيف الذاتي مع الظروف المناخية الداخلية والخارجية، مما يؤدي إلى تقليل الهدر الطاقى دون التأثير على راحة المستخدمين.

كذلك، أثبتت النتائج أن تطبيق الذكاء الاصطناعي في إدارة المباني ينعكس إيجاباً على الجانب الاقتصادي؛ إذ يؤدي إلى تقليص التكاليف التشغيلية السنوية بما يتراوح بين 20% و ٢٥%، وزيادة العمر الافتراضي لأنظمة التبريد والإضاءة بنسبة 15% نتيجة تقليل فترات التشغيل غير الضرورية.

أما على المستوى البيئي، فقد أدى ذلك إلى خفض الانبعاثات الكربونية بمتوسط 50 طن CO₂ سنوياً لكل مبنى ذكي مقارنة بالمباني التقليدية، وهو ما يتسق مع أهداف التنمية المستدامة (SDG 11 و SDG 13)

ثالثاً: التوصيات

استناداً إلى النتائج الرقمية والتحليلية، تقترح الدراسة مجموعة من التوصيات العملية والعلمية لتوجيه السياسات والمشروعات المستقبلية: -

١- توصيات فنية وتقنية

ضرورة دمج أنظمة الذكاء الاصطناعي في المراحل الأولى من تصميم المباني وليس فقط في مرحلة التشغيل، بما يضمن التكامل بين التصميم الهيكلي والنظم الذكية. تعزيز استخدام خوارزميات التحكم التنبؤي متعددة المدخلات (MPC) في أنظمة التكييف، حيث أظهرت الدراسة أنها توفر حتى 35% من الطاقة مقارنة بالنظم التقليدية.

الاستثمار في أنظمة استشعار متكاملة لمراقبة الإشغال والحرارة والإضاءة، لزيادة دقة بيانات التشغيل وتحسين أداء خوارزميات التعلم الآلي.

٢- توصيات إدارية وتشغيلية

تدريب الكوادر الفنية والإدارية على إدارة الأنظمة الذكية وتحليل بيانات الطاقة، حيث أظهرت الدراسة أن ضعف الكفاءة التشغيلية يمثل تحدياً في 10% من الحالات المدروسة.

تطوير سياسات تشغيل ديناميكية تعتمد على التكيف اللحظي بدلاً من التشغيل الثابت، بما يضمن رفع الكفاءة الطاقية المستمرة للمباني.

٣- توصيات بيئية واستراتيجية

١- تبني برامج وطنية لدعم التحول نحو المباني الذكية منخفضة الانبعاثات، خصوصاً في القطاعات الحكومية والتعليمية ذات الاستهلاك العالي للطاقة.

٢- وضع معايير استدامة رقمية جديدة تشمل مؤشرات الأداء الذكي (Smart KPIs) بجانب مؤشرات الكفاءة الحرارية التقليدية.

٣- تعزيز التعاون بين الجهات الأكاديمية ومؤسسات الطاقة لتبادل قواعد البيانات وتطوير نماذج محاكاة مفتوحة المصدر تخدم البيئة العربية والمناخ المحلي.

رابعاً: آفاق البحث المستقبلية

توصي الدراسة بتوسيع نطاق البحث في ثلاثة مسارات رئيسية: -

١- النمذجة الهجينة التي تجمع بين البيانات الميدانية والذكاء الاصطناعي لتحسين دقة التنبؤ بالأداء الطاقى.

٢- التحليل الاقتصادي طويل المدى لتقدير العائد المالى الصافى من تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في المباني الحكومية والخاصة.

٣- دراسة الأثر الاجتماعى للمباني الذكية على سلوك المستخدمين وأنماط استهلاكهم للطاقة، وربطها بمؤشرات الرضا والرفاه البيئى.

* المراجع

اولاً- المراجع العربية

Taha, A., & Ahmed, M. (2022).

Methods of retrofit office Buildings' envelopes in Egypt to integrate photovoltaic cells and its effect on energy production
سبل تعديل التشكيل المعماري لواجهات المباني الادارية بمصر لدمج الخلايا الفوتوفولتية وتأثيرها علي انتاجية الطاقة
JES. Journal of Engineering Sciences, 50(6), 337-357.

السلتي، رشا محمد حسين، معبد، & ياسر علي. (٢٠٢٥). استخدام الذكاء الصناعي في إدارة التحكم البيئي للفراغات الداخلية بالمنشأة. مجلة التراث والتصميم.
العسلي، ف.، النائي، ن.، & اطرادات، ع. (٢٠٢٤). الشبكة الكهربائية الذكية ومدى مرونة أنظمة الحماية الكهربائية في ظل التهديدات السيبرانية. Arabian Journal of Scientific Research, ٥(٢), ٨.

متولي، حسن عبد المنعم، ابوشال، بسنت محمد، يوسف، & شاكر. (٢٠٢٥). التكنولوجيا الذكية في التصميم الداخلي لمراكز الابتكار وأثرها علي الأداء الوظيفي. المجلة العربية الدولية للفن والتصميم الرقمي، ٤(٤)، ٢٧٧-٣٠٨.

أ. م. د. لقاء احمد عبد الرحمن، م. م. غدير محمد حاكم. (٢٠٢٥). الاعتبارات التصميمية وعلاقتها

شرف، س. أ. م.، & سائلة أحمد محمود. (٢٠٢٤). تقييم استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحقيق الاستدامة البيئية. المجلة المصرية لبحوث الأعلام، ٢٠٢٤(٨٩)، ٨٤٣-٨٧٢.
فخرية سالم قطيش الهويل. (٢٠٢٤). أثر تطبيق الذكاء الاصطناعي في تطوير الأداء المالي لدى البلديات بالملكة الأردنية الهاشمية. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٥(١)، ٦٢٤-٦٣٨.

عالية إبراهيم علي الجعفره. (٢٠٢٣). إدارة المدن الذكية ودورها في تعزيز التخطيط الاستراتيجي لدى البلديات. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٤(١٢)، ٥٤١-٥٥٦.

د. نجوى ناصر نصار الحازمي. (٢٠٢٣). فاعلية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تأييد الحيز الداخلي للمسكن. Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences, ٩٨(٩٨)، ٤٣٠-٤٤٢.

قصي زايد علي المعايطه. (٢٠٢٤). الهندسة الخضراء ودورها في تحسين جودة البيئة المحلية في البلديات. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٥(٣)، ٣٨٧-٤٠٣.
عامر، & غادة. (٢٠٢٣). التأثيرات الإيجابية للمدن الذكية على مجالات الأمن القومي المصري. الأمن القومي والاستراتيجية، ١(٢)، ١٢٨-١٤٠.

المباني التعليمية. Engineering Research Journal, ١٨٤(٢), ٤٤٩-٤٧٢.

Ebraheem, G. A. (2020). The impact of using smart technologies in improving the functional efficiency (multiple uses) of architectural vocabulary in heritage buildings | الذكيه في تحسين الكفاءه الوظيفيه (تعدد الإستخدامات) للمفردات المعماريه في المباني التراثيه. Engineering Research Journal (Shoubra), 46(1), 125-134.

حسن رمضان حسن، سنوسي، علي، جوده، & دعاء. (٢٠٢٥). أثر استخدام تطبيقات تقنية النانو تكنولوجيا على مواد الإنشاء لرفع كفاءة المبنى الذكي. مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، ١٠(٥٠)، ٣٩٤-٤١٢.

عبد المنعم عبد الحي، & أميرة. (٢٠٢٤). أثر البحث العلمي والتكنولوجيا والابتكار في الطاقات المتجددة في العالم العربي. المجلة العربية للعلوم التربوية والتكنولوجية، ١(٢)، ٤٥-٨٢.

سليم، داليا محمد عزت، السباعي، أسماء عبد الجواد، حلمي، & بطرس. (٢٠٢٥). تأثير استخدام الخامات المستدامة على التصميم الداخلي للمنشآت

باستخدام التقنيات الذكية في تصميم الفضاء الداخلي للمصارف (المصارف المالية في دول الخليج نموذجاً). مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٦(١٠)، ١٥٠-١٦٨.

محمد سمير خلف السحيمات. (٢٠٢٣). مساهمة المدن الذكية وتحقيق أهداف التنمية المستدامة (رؤية مستقبلية للبلديات في الأردن ٢٠٢٣). مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٤(٢)، ١٠٧٧-١٠٩٦.

Heikal, M. G., Fahmy, H. A., & Hussien, A. H. (2025).

استخدام الطاقة في محطات السكك الحديدية وفقا لمعايير تصميم المباني الخضراء Improving the efficiency of using energy in Railway Stations utilizing Green Building Design Rating. Engineering Research Journal, 184(1), 93-116.

Altarawneh, H., & Almajali, M. (2023).

تأثير إطار الطاقة في تكامل المباني الذكية داخل المدينة ذكية. Mutah Journal of Natural, Applied and Health Sciences, ٣٨(٢).

Sabry, A. M., Elbnany, S. A. E. &

Fahmy, H. A. (2025).

لتوظيف تقنيات العمارة الذكية في تعزيز استدامة

- sustainable development. Journal of Faculty of Education-Assiut University, 40(11.2), 318-340.
- Said, M., & Mosa, M. (2024). A proposed vision for improving the environmental performance of Egyptian universities on light of the standards of the Global Green Scale for University Rankings (GMWUR. Journal of Faculty of Education-Assiut University, 40(9.2), 1-76.
- Kawuryan, P. L. (2025). Perancangan tempat pengolahan sampah terpadu di kampus 3 UIN Malang dengan pendekatan smart building (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- التجارية. المجلة العربية الدولية للفن والتصميم الرقمي، ٤(٤)، ١١١-١٤٤.
- صهيب محمود البستنجي. (٢٠٢٤). الهندسة الرقمية ودورها في تطوير إدارة المشاريع في البلديات. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٥(١)، ٧٧٩-٧٧٨.
- م. منى أحمد عبدالقادر الزغول. (٢٠٢٣). الكيمياء الخضراء واستخدامها في مشاريع المجتمع المحلي والبلديات. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٤(٣)، ٧٠٣-٧١٤.
- قسام فايز عبد القادر البستنجي. (٢٠٢٤). أهمية البنية التحتية الخضراء في إنشاء مدن صديقة للبيئة في البلديات. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٥(٣)، ٣٦٩-٣٨٦.
- جهاد عبدالمجيد محمد البستنجي. (٢٠٢٤). استراتيجيات التنمية المستدامة للتخطيط الحضري في البلديات. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، ٥(١)، ٧٦٣-٧٧٨.
- موسى سعيد حسن، & منال موسى سعيد حسن. (٢٠٢٤). تصور مقترح لتحسين الأداء البيئي للجامعات المصرية على ضوء معايير المقياس الأخضر العالمي لرتب الجامعات GMWUR. مجلة كلية التربية (أسيوط)، ٤٠(٩.٢)، ١-٧٦.
- ثانياً- المراجع الأجنبية
- Farage, M. (2024). Green education and a course in achieving Egypt's 2030 vision for