

تصميم المباني المستدامة باستخدام المواد الذكية: دراسة تطبيقية لتحسين كفاءة الطاقة

عدنان محمود بكر

(عضو هيئة تدريس في المعهد العالي للتقنيات الهندسية / القوارشة / بنغازي)

نشر إلكترونياً بتاريخ: ١ يوليو ٢٠٢٥ م

الملخص :

تتناول هذه الدراسة موضوع تصميم المباني المستدامة باستخدام المواد الذكية، مع التركيز على تطبيقاتها في تحسين كفاءة الطاقة. تعد المباني من أكبر مستهلكي الطاقة على مستوى العالم، مما يستدعي البحث عن حلول فعالة للتقليل من استهلاك الطاقة وحماية البيئة. تكمن أهمية هذه الدراسة في استكشاف دور المواد الذكية في تعزيز استدامة المباني من خلال تحسين كفاءتها الطاقوية، وتعتمد المواد الذكية على تقنيات متقدمة تسمح لها بالتكيف مع الظروف البيئية المختلفة، مثل التغيرات في درجة الحرارة، الرطوبة، والإضاءة. هذه المواد، مثل الزجاج الذكي والعزل التكيفي، يمكنها تقليل الحاجة للطاقة في عمليات التدفئة والتبريد، مما يسهم في تقليل الانبعاثات الكربونية. تستعرض الدراسة العديد من التطبيقات العملية لهذه المواد في تصميم المباني، وتوضح كيف يمكن استخدامها بشكل فعال لتحقيق الاستدامة وتقليل استهلاك الطاقة، وتركز الدراسة على تقديم دراسة تطبيقية لفحص تأثير المواد الذكية على كفاءة الطاقة في المباني، من خلال نماذج عملية وتحليل نتائج استخدامها في سياقات مختلفة. كما تتناول المزايا والتحديات التي قد تواجه هذه المواد في تطبيقاتها الواسعة، وتسعى الدراسة إلى تقديم حلول مبتكرة لتحسين كفاءة الطاقة في المباني، مع الإشارة إلى أهمية تحقيق التوازن بين الأداء البيئي والاقتصادي. في النهاية، تهدف هذه الدراسة إلى تعزيز الفهم حول دور المواد الذكية في تصميم المباني المستدامة ودفع عجلة الابتكار في قطاع البناء.

الكلمات المفتاحية:

(المباني المستدامة، المواد الذكية، كفاءة الطاقة، الاستدامة، تقنيات التكيف البيئي، الزجاج الذكي، العزل التكيفي)

Abstract

This study addresses the topic of designing sustainable buildings using smart materials, focusing on their applications in improving energy efficiency. Buildings are among the largest consumers of energy worldwide, which calls for finding effective solutions to reduce energy consumption and protect the environment. The importance of this study lies in exploring the role of smart materials in enhancing the sustainability of buildings by improving their energy efficiency. Smart materials rely on advanced technologies that allow them to adapt to different environmental conditions, such as changes in temperature, humidity, and lighting. These materials, such as smart glass and adaptive insulation, can reduce the need for energy in heating and cooling processes, which contributes to reducing carbon emissions. The study reviews many practical applications of these materials in building design, and explains how they can be used effectively to achieve sustainability and reduce energy consumption. The study focuses on presenting an applied study to examine the impact of smart materials on energy efficiency in buildings, through practical models and analyzing the results of their use in different contexts. It also addresses the advantages and challenges that these materials may face in their wide applications, and the study seeks to provide innovative solutions to improve energy efficiency in buildings, noting the importance of achieving a balance between environmental and economic performance. Ultimately, this study aims to enhance understanding of the role of smart materials in sustainable building design and drive innovation in the construction sector.

Keywords:

Sustainable buildings, smart materials, energy efficiency, sustainability, environmental adaptation technologies, smart glass, adaptive insulation.

:المقدمة

تعتبر المباني من أهم العوامل التي تؤثر على استهلاك الطاقة في العالم، حيث تستهلك كميات كبيرة من الطاقة في عمليات التدفئة والتبريد والإضاءة. وفي ظل التحديات البيئية والاقتصادية التي تواجهها المجتمعات الحديثة، أصبح من الضروري البحث عن حلول مبتكرة تسهم في تحسين كفاءة الطاقة في المباني. من هنا، تظهر أهمية تصميم المباني المستدامة باستخدام المواد الذكية التي تساهُم في تقليل استهلاك الطاقة وتوفير بيئة مريحة وصحية للمستخدمين.

وتتمثل فكرة الدراسة في استكشاف كيفية استخدام المواد الذكية في تصميم المباني المستدامة، بهدف تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الآثار البيئية. وتعتمد المواد الذكية على تقنيات متقدمة تتيح لها التكيف مع الظروف البيئية المختلفة، مثل تغيير درجة الحرارة أو الرطوبة أو كمية الإضاءة، مما يساعِم في توفير الطاقة بشكل فعال. ستقوم هذه الدراسة بتقديم دراسة تطبيقية حول استخدام هذه المواد في تصميم المباني، مع التركيز على كيفية تأثيرها على استهلاك الطاقة وتحقيق الاستدامة في المباني.

ومن خلال هذه الدراسة، سيتم تحليل المزايا والتحديات المرتبطة باستخدام المواد الذكية في تصميم المباني المستدامة، كما ستعرض الحلول الممكنة لتحسين كفاءة الطاقة في المبني الحديثة. ستسهم هذه الدراسة في توفير رؤية شاملة حول دور المواد الذكية في تعزيز استدامة البيئة وتحقيق أهداف التنمية المستدامة في قطاع البناء.^١

مشكلة الدراسة

تتمثل المشكلة الرئيسية لهذه الدراسة في ارتفاع استهلاك الطاقة في المبني التقليدية بسبب الاعتماد على المواد التقليدية التي تفتقر إلى القدرة على التكيف مع التغيرات البيئية المحيطة، مما يؤدي إلى زيادة فواتير الطاقة وتأثيرات بيئية سلبية. في ظل تزايد التحديات المتعلقة بالاستدامة البيئية وارتفاع انبعاثات الكربون، يصبح من الضروري البحث عن حلول مبتكرة لقليل هذا الاستهلاك وتحقيق كفاءة أعلى للطاقة، وعلى الرغم من التقدم الكبير في تقنيات البناء المستدام، فإن تطبيق المواد الذكية في تصميم المبني لا يزال محدوداً. تتمثل المشكلة في عدم وجود فهم شامل لكيفية دمج هذه المواد في التصاميم الهندسية للمبني بطريقة فعالة لتحسين كفاءة الطاقة، بالإضافة إلى غياب الدراسات التطبيقية الكافية التي توضح تأثير المواد الذكية في تحسين الأداء البيئي للمبني.

وتتمثل الإشكالية الأخرى في التحديات التقنية والاقتصادية المرتبطة بتطبيق هذه المواد، مثل ارتفاع تكاليفها الأولية، ونقص المعرفة الكافية في كيفية استخدامها بكفاءة في تصميم المبني المختلفة. لذلك، فإن هذه الدراسة تسعى إلى معالجة هذه المشكلة من خلال دراسة تطبيقية تركز على تحسين كفاءة الطاقة في المبني باستخدام المواد الذكية، مع تسليط الضوء على الإمكانيات التقنية، والفوائد البيئية، والاقتصادية لهذه المواد في تصميم المبني المستدامة.

أهداف الدراسة

١. تحليل دور المواد الذكية في تحسين كفاءة الطاقة: دراسة تأثير المواد الذكية على استهلاك الطاقة في المبني المستدامة من خلال تحليل كيفية تفاعل هذه المواد مع الظروف البيئية.
٢. استكشاف أنواع المواد الذكية المستخدمة في البناء: التعرف على المواد الذكية المختلفة مثل الزجاج التكيفي والعزل الذكي، وتوضيح كيفية استخدامها في تصميم المبني لتقليل الحاجة للطاقة.
٣. تقييم فعالية المواد الذكية في تحقيق الاستدامة البيئية: دراسة كيفية تأثير المواد الذكية على تقليل الانبعاثات الكربونية وتحسين كفاءة الطاقة في المبني.
٤. تحليل التحديات التقنية والاقتصادية لاستخدام المواد الذكية: فحص الصعوبات التي قد تواجه تطبيق هذه المواد في البناء، مثل التكلفة الأولية العالية وأثرها على الجدوى الاقتصادية للمشاريع.
٥. مقارنة بين المبني التقليدية والمبني المستدامة باستخدام المواد الذكية: دراسة الفرق في كفاءة استهلاك الطاقة بين المبني التقليدية والمبني المصمم باستخدام المواد الذكية.

^١شرف، سالمة أحمد محمود. (٢٠٢٤م). تقييم استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحقيق الاستدامة البيئية. المجلة المصرية لبحوث الأعلام، ع(٨٩)، ص. ٨٤٣-٨٧٢.

٦. استكشاف التطبيقات العملية للمواد الذكية في المبني: تحليل دراسات حالة ومشاريع تطبيقية تستخدم المواد الذكية لتحسين الأداء الطاقي في المبني.
٧. اقتراح حلول لتحسين تصميم المبني باستخدام المواد الذكية: تقديم توصيات عملية حول كيفية دمج هذه المواد في تصميم المبني الحالي والجديدة لتحقيق أفضل النتائج في كفاءة الطاقة.
٨. تحفيز الابتكار في صناعة البناء المستدام: تشجيع تطبيق المواد الذكية في مشاريع البناء المستدامة عبر تحسين المعرفة والوعي بتقنيات البناء الحديثة التي تسهم في الحفاظ على البيئة وتحقيق التوازن بين الأداء البيئي والاقتصادي.

تساؤلات الدراسة

١. ما هي المواد الذكية التي يمكن استخدامها في تصميم المبني المستدامة لتحسين كفاءة الطاقة؟
٢. كيف تؤثر المواد الذكية على استهلاك الطاقة في المبني في ظل الظروف البيئية المختلفة؟
٣. ما هي المزايا البيئية والاقتصادية المرتبطة باستخدام المواد الذكية في تصميم المبني؟
٤. كيف يمكن دمج المواد الذكية في التصميمات المعمارية للمبني لتقليل استهلاك الطاقة وتحقيق الاستدامة؟
٥. ما هي التحديات التقنية والاقتصادية التي قد تواجه تطبيق المواد الذكية في المبني؟
٦. كيف يمكن مقارنة كفاءة استهلاك الطاقة في المبني التقليدية والمبني التي تستخدم المواد الذكية؟
٧. ما هي التطبيقات العملية الناجحة للمواد الذكية في تحسين كفاءة الطاقة في المبني حول العالم؟
٨. كيف يمكن التغلب على القيد والعيوب المرتبطة باستخدام المواد الذكية في تصميم المبني المستدامة؟

أهمية الدراسة

تتمثل أهمية هذه الدراسة في تسلیط الضوء على دور المواد الذكية في تحسين كفاءة الطاقة في المبني المستدامة، وهي من القضايا الحيوية في العصر الحالي بسبب التحديات البيئية والاقتصادية المرتبطة بزيادة استهلاك الطاقة. تُظهر الدراسة كيف يمكن للمواد الذكية، مثل الزجاج التكيفي والعزل الذكي، أن تساهم في تقليل الفاقد الطاقي وتحقيق أداء بيئي أفضل في المبني، مما يساهم في تقليل الانبعاثات الكربونية ومواجهة التغيرات المناخية، كما أن هذه الدراسة تقدم حلولاً مبتكرة لتقليل الاعتماد على أنظمة التدفئة والتبريد التقليدية، مما يؤدي إلى خفض فواتير الطاقة وتحقيق التوفير المالي على المدى الطويل.

ومن خلال تحليل تطبيقات المواد الذكية، ستتوفر الدراسة رؤى معمقة حول إمكانيات استخدام هذه المواد بشكل فعال في تصميم المبني الحديثة، مما يسهم في تحقيق أهداف الاستدامة وتقليل التأثير البيئي، وتعتبر هذه الدراسة مهمة في سياق تطوير ممارسات بناء مستدامة، حيث تساعده في تحفيز الابتكار في صناعة البناء، وتعزز الوعي بكيفية تحقيق التوازن بين الاحتياجات البيئية والاقتصادية في تصميم المبني. كما تساهم في تحفيز البحث والتطوير في مجال المواد الذكية، مما يفتح الباب أمام تطبيقات جديدة لتطوير بيئة أكثر كفاءة واستدامة في المستقبل.

فرضيات الدراسة

الفرضية الأولى

استخدام المواد الذكية في تصميم المبني المستدامة يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة بشكل ملحوظ مقارنة بالمباني التقليدية.

الفرضية الثانية

المواد الذكية مثل الزجاج التكيفي والعزل الذكي يمكنها تحسين كفاءة الطاقة في المبني عبر التكيف مع التغيرات البيئية المختلفة مثل درجة الحرارة والضوء.

الفرضية الثالثة

تطبيق المواد الذكية في المبني يسهم في تقليل الانبعاثات الكربونية وبالتالي يساعد في تحقيق أهداف التنمية المستدامة والحفاظ على البيئة.

الفرضية الرابعة

رغم تكلفتها الأولية المرتفعة، فإن المواد الذكية تسهم في توفير الطاقة على المدى الطويل، مما يحقق وفورات مالية مقارنة بالأنظمة التقليدية.

الفرضية الخامسة

وجود تحديات اقتصادية وتقنية في تطبيق المواد الذكية في المبني، مثل التكلفة الأولية العالية وغياب المعرفة الكافية حول كيفية استخدامها بفعالية.

منهجية الدراسة

منهج الدراسة

تعتمد هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، الذي يهدف إلى وصف وتحليل دور المواد الذكية في تصميم المبني المستدامة وتحسين كفاءة الطاقة. سيتم دراسة التطبيقات العملية لهذه المواد من خلال دراسة حالة حية ومقارنة بين المبني التقليدية والمبني المستدامة باستخدام هذه المواد. سيتضمن المنهج أيضاً تحليل الأدب وابحوث السابقة التي تناولت هذا الموضوع.

أدوات الدراسة

- دليل المقابلات:** سيتم استخدام المقابلات مع خبراء في تصميم المبني المستدامة والمطورين للتعرف على مواقفهم وتجاربهم المتعلقة باستخدام المواد الذكية في المبني.

- دراسة حالة:** سيتم تحليل بعض المبني المستدامة التي تستخدم المواد الذكية كمثال عملي لتقدير الأداء الطاقي وتحقيق الاستدامة.

مصادر جمع البيانات

- الدراسات السابقة والأبحاث:** ستتم مراجعة الأدب المتعلق بتصميم المبني المستدامة واستخدام المواد الذكية لتحسين كفاءة الطاقة.

- المصادر الرقمية والمكتبة:** سيتم الاطلاع على تقارير ودراسات متعلقة بتطبيق المواد الذكية في المبني من خلال الإنترن特 والمكتبات الجامعية.

- البيانات الميدانية:** سيتم جمع بيانات عملية من خلال إجراء استبيانات ومقابلات مع المهندسين المعماريين والمطورين.

عينة الدراسة

ستشمل العينة عدداً من المباني المستدامة التي تستخدم المواد الذكية، سواء في مشاريع جديدة أو مباني تمت ترقيتها. سيتم اختيار هذه المباني بناءً على معايير مثل الحجم، الموقع، مدى الاستخدام الفعلي للمواد الذكية في تصميمها، ومدى نجاحها في تقليل استهلاك الطاقة.

أساليب التحليل

١. **التحليل الكمي:** سيتم تحليل نتائج الاستبيانات باستخدام تقنيات التحليل الإحصائي لتحديد العلاقة بين استخدام المواد الذكية وكفاءة الطاقة في المبني.
٢. **التحليل النوعي:** سيتم تحليل المقابلات ودراسة الحالات باستخدام تقنيات التحليل الموضوعي لتقديم رؤى عميقة حول تجارب المعينين في تطبيق المواد الذكية.
٣. **المحاكاة الطافية:** باستخدام البرمجيات الهندسية، سيتم إجراء محاكاة لاستراتيجيات التصميم المختلفة لتحديد أثر المواد الذكية على استهلاك الطاقة.

حدود الدراسة

١. **المجال الزمني:** ستقتصر الدراسة على المبني التي تم تصميمها أو تطويرها باستخدام المواد الذكية في السنوات الخمس الأخيرة.
٢. **المجال المكاني:** سيتم التركيز على المبني المستدامة في منطقة معينة أو مجموعة مختارة من المدن التي تمثل تنوعاً في المناخ والظروف الاقتصادية.
٣. **المواد الذكية:** ستقتصر الدراسة على بعض المواد الذكية المتاحة حالياً في السوق مثل الزجاج الذكي والعزل التكيفي.

الإطار النظري

• مقدمة عن المبني المستدامة

المبني المستدامة تعد أحد الحلول الحيوية لمواجهة التحديات البيئية والاقتصادية التي يواجهها قطاع البناء في العصر الحديث. فمع تزايد النمو السكاني وزيادة احتياجات الطاقة، أصبح من الضروري تصميم المبني بحيث تساهم في الحفاظ على الموارد الطبيعية، وتقليل تأثيرات التغير المناخي، وتحقيق كفاءة في استهلاك الطاقة. المبني المستدامة ليست مجرد بنى تؤدي وظائفها الأساسية، بل هي تصميمات تجمع بين الأداء البيئي الفعال وتحقيق التوازن بين الاحتياجات البشرية والبيئية، وتقوم فكرة المبني المستدامة على استخدام تقنيات ومواد مبتكرة تهدف إلى تقليل استهلاك الطاقة والمياه، وتعزيز راحة السكان، والحفاظ على البيئة. من أبرز هذه التقنيات استخدام المواد الذكية التي تكيف مع الظروف المحيطة، مثل الزجاج التكيفي الذي يتحكم في تدفق الضوء والحرارة، والعزل الذكي الذي يساهم في تحسين العزل الحراري للمبني. هذه المواد تعمل على تقليل الحاجة لاستخدام المكثف للطاقة، مما يؤدي إلى تقليل الفاتورة الطافية.

كما إن المبني المستدامة لا تقتصر على تقليل استهلاك الطاقة فحسب، بل تشمل أيضاً تعزيز جودة الهواء داخل المبني، استخدام المياه بشكل فعال، وزيادة الاعتماد على الطاقة المتجدد. كما أنها توفر بيئات صحية للمقيمين، من خلال تحسين التهوية والإضاءة الطبيعية، مما يؤدي إلى تحسين الراحة النفسية والجسدية، وفي ظل تزايد القلق بشأن التغيرات المناخية، يعتبر تصميم المبني المستدامة خياراً أساسياً لتحقيق التنمية المستدامة. فهي تمثل استثماراً طويلاً المدى في كفاءة الطاقة والحفاظ على البيئة، مما يجعلها أحد الحلول المثلثة للحد من آثار التلوث وتحقيق أهداف التنمية المستدامة، وتمثل خطوة هامة نحو تحسين استدامة البيئة وتطوير المجتمعات الحضرية. وتعتبر هذه المبني جزءاً من التحول العالمي نحو نمط حياة أكثر وعيّاً في كيفية استخدام الموارد، حيث أن استخدامها للطاقة والمياه يتسم بالكافأة، مما يقلل من الانبعاثات الكربونية والمخاطر البيئية. إلى جانب ذلك، فإن عملية تصميم المبني المستدامة تتطلب دمج مجموعة من التقنيات المتقدمة مثل أنظمة الطاقة الشمسية، إعادة استخدام المياه، وتحسين العزل الحراري، التي تساهم في تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية^١.

وإحدى أبرز سمات المبني المستدامة هو استخدامها للمواد الذكية، التي تتيح لها التكيف مع الظروف المحيطية. على سبيل المثال، المواد الذكية مثل الزجاج الذكي الذي يتمكن من تغيير خصائصه مثل النفاذية للضوء والحرارة بناءً على شدة الحرارة أو الضوء، تساهم في تقليل الحاجة لاستخدام أنظمة تكيف الهواء أو التدفئة. بالإضافة إلى ذلك، المواد الذكية في العزل الحراري تساهم في تقليل الفقد الحراري، مما يسهم في خفض استهلاك الطاقة ويعزز كفاءة المبني، وأهمية هذه المبني تكمن أيضاً في دورها في تعزيز الاستدامة الاجتماعية والاقتصادية، فهي توفر بيئة صحية لساكني من خلال تحسين نوعية الهواء داخل المبني والحد من الأمراض التنفسية المرتبطة بجودة الهواء. كما أن استخدامها للمواد المستدامة والذكية يساهم في خفض التكاليف على المدى الطويل، من خلال تقليل الحاجة للصيانة وإطالة عمر المبني. في الواقع، المبني المستدامة قد تتطلب استثمارات أولية أكبر، ولكنها في النهاية تضمن تقليل التكاليف التشغيلية بشكل ملحوظ على المدى الطويل، مما يجعلها استثماراً ذكيًا في المستقبل، ومن خلال تزايد الاهتمام العالمي بالاستدامة، يسعى العديد من البلدان إلى وضع معايير وتشريعات تشجع على بناء مباني مستدامة. وقد أصبحت هذه المبني جزءاً لا يتجزأ من استراتيجية العديد من الحكومات لمكافحة التغير المناخي وتحقيق التنمية المستدامة. على الرغم من التحديات المتعلقة بالتكلفة الأولية واختيار المواد المناسبة، إلا أن الاتجاه نحو المبني المستدامة يتزايد بسرعة، في ظل الفوائد البيئية والاقتصادية التي تقدمها، مما يجعلها من أولويات التخطيط العمراني في المستقبل.

تكمن أهمية المبني المستدامة في تأثيرها العميق على البيئة والمجتمع. مع تزايد الحاجة إلى الحد من انبعاثات الكربون لمكافحة التغير المناخي، أصبحت المبني المستدامة من الأدوات الأساسية لتحقيق هذا الهدف. فالقطاع العقاري يشهد تحولاً نحو اعتماد تقنيات البناء الذكي التي تركز على الاستدامة البيئية. وهذا يشمل استخدام تقنيات الطاقة المتجددة مثل الألواح الشمسية، والتصميمات التي تعتمد على التهوية الطبيعية والإضاءة الشمسية المباشرة لتقليل الحاجة إلى الكهرباء. وبفضل هذه الحلول، لا يتم فقط تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة، بل يتم أيضاً خفض الاستهلاك العام للطاقة والموارد الطبيعية، وتتوفر المبني المستدامة فوائد اجتماعية واقتصادية. فهي تحسن من جودة الحياة للسكان من خلال توفير بيئات صحية، مثل تحسين تهوية المبني وجودة الهواء الداخلي، مما يقلل من معدلات الأمراض المرتبطة بالجودة السيئة للهواء. كما أن التقنيات الحديثة في العزل الحراري والصوتى تساعده في خلق بيئة معيشية مريحة من خلال الحفاظ على درجات حرارة معتدلة داخل المبني، وتقليل الضوضاء الخارجية.

اقتصادياً، تشجع المبني المستدامة على خفض التكاليف التشغيلية على المدى الطويل. على الرغم من أن تكلفة البناء الأولية قد تكون أعلى، إلا أن تقنيات العزل الفعالة وتوفير الطاقة على المدى البعيد يؤديان إلى تقليل استهلاك الطاقة بشكل كبير، مما يؤدي إلى توفير في الفواتير الشهرية للمستهلكين. إضافة إلى ذلك، قد تساهم المبني المستدامة في زيادة قيمة العقار بسبب الطلب المتزايد على المساكن والمرافق التي تتسم بالكافأة الطافية والاستدامة البيئية، وتسهم هذه المبني في تعزيز الجهود العالمية لتحقيق أهداف

^١ عبد العظيم الشيخ، ح. م.، حماده محمد، ابوالفتوح، محمد عبد الرؤوف، أبوظبي على، اسلام احمد. (٢٠١٧م). الاستدامة في مجال الإنشاء والبناء (دراسة: دراسة تقييم قواعد البيانات). مجلة القطاع الهندسي بجامعة الأزهر، ع(٤٢)، ص ٤١٣-٤٢٨.

التنمية المستدامة، خاصة في مجالات الطاقة النظيفة والحد من الفقر. في العديد من البلدان، تدعم السياسات الحكومية والمبادرات الدولية مثل اتفاقية باريس للمناخ توجهات البناء المستدام من خلال تقديم حواجز للمطورين والمستثمرين في هذا القطاع. كما تساهم تقنيات البناء المستدام في تقليل الفقر من خلال تحسين وصول السكان إلى مساكن بأسعار معقولة وأكثر استدامة^١.

وفي المستقبل، من المتوقع أن توسع تطبيقات المباني المستدامة في مناطق متعددة حول العالم، حيث سيزداد الاعتماد على المواد الذكية والتقنيات الحديثة لتحسين كفاءة المباني في جميع القطاعات. هذه التحولات في مجال البناء تؤكد أن تحقيق الاستدامة ليس مجرد خيار، بل ضرورة عالمية تواجه جميع الدول بغض النظر عن حجمها أو موقعها الجغرافي، خاصة مع تقدم التكنولوجيا وتزايد الوعي البيئي. سيشهد قطاع البناء مزيداً من الابتكارات في استخدام المواد الذكية والتقنيات الحديثة التي تهدف إلى تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الأثر البيئي. ستكون المواد الذكية أكثر تطوراً في المستقبل، حيث سيزداد استخدامها في تصميم المباني لتوفير حلول مبتكرة تلبي احتياجات المستخدمين بشكل أكثر فعالية. على سبيل المثال، قد تظهر تقنيات جديدة مثل الأسطح القابلة للتعديل التي تتيح للمباني التكيف بشكل مستمر مع الظروف الجوية، وتكنولوجيات العزل الذكي التي تتفاعل مع درجة الحرارة والرطوبة بشكل ديناميكي، وسيعزز هذا الاتجاه أيضاً من استخدام الأنظمة الذكية التي تعتمد على الإنترنэт من الأشياء (IoT) في المباني المستدامة، مما يتيح مراقبة وتحليل استهلاك الطاقة بشكل دقيق في الوقت الفعلي. ستمكن هذه الأنظمة من التفاعل مع مكونات المبني المختلفة مثل الأضواء، والتدفئة، والتهوية، وتكييف الهواء (HVAC) لتعديل استهلاك الطاقة بشكل فوري بناءً على احتياجات السكان أو الظروف البيئية، وستساهم هذه الأنظمة في تحسين راحة السكان من خلال ضبط الإضاءة والحرارة والتهوية بما يتناسب مع تفضيلاتهم الشخصية.

ومع استمرار تزايد الضغط على الحكومات والشركات لتقليل انبعاثات الكربون، ستصبح المباني المستدامة معياراً عالمياً في تصميم وإنشاء المباني. قد يتم تبني سياسات أكثر صرامة تشجع على دمج تقنيات الطاقة المتجدد مثل الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، واستخدام تقنيات التخزين المتطورة للطاقة في المباني. كما ستظهر تقنيات جديدة في إعادة التدوير، حيث يمكن للمباني المستدامة استخدام المواد المعاد تدويرها بشكل أكثر فعالية، مما يساهم في تقليل النفايات الناتجة عن عمليات البناء، ستعزز هذه التحولات من تحقيق التنمية المستدامة في المجتمعات الحضرية، حيث سيكون للمباني المستدامة دور كبير في تحسين جودة الحياة، وتقليل التلوث، وتنمية البنية التحتية الحضرية. ستسهم المباني المستدامة في تحسين معايير الحياة الحضرية، حيث ستتوفر بيئات صحية وآمنة للعيش والعمل. ونتيجة لذلك، ستكون هناك فرصة أكبر للمساهمة في التنمية الاجتماعية والاقتصادية على المدى الطويل، مما يعزز الاستقرار في المجتمعات ويدعم النمو المستدام.^٢

^١أحمد السعيد موافي، م.، مصطفى، صادق أحمد، حمدي، عبد الصبور. (٢٠٢٢م). استخدام نموذج معلومات بناء BIM في التحكم في تكلفة المباني خلال مرحلة التصميم. مجلة البحوث الهندسية، ع١٧٤، ص١٠٨-١٢٨.

^٢ George Bassili Hanna. (2015)." Energy Efficiency Building Codes and Green Pyramid Rating System". International Journal of Science and Research (IJSR). Volume 4 Issue p2319-7064.

• المواد الذكية وأثرها في تصميم المبني المستدامة

المواد الذكية أصبحت من العوامل الأساسية في تصميم المبني المستدامة، حيث تساهم بشكل كبير في تحسين كفاءة الطاقة وتقليل التأثيرات البيئية للمبني. هذه المواد تتميز بقدرتها على التفاعل مع البيئة المحيطة بها أو التكيف مع التغيرات في الظروف الداخلية للمبني، مما يجعلها أكثر فعالية في توفير الطاقة والحفاظ على الموارد الطبيعية، وأحد أبرز الأمثلة على المواد الذكية في تصميم المبني هو الزجاج الذكي، الذي يتميز بقدرته على تغيير خصائصه وفقًا لدرجة الحرارة أو الضوء، مما يساعده في التحكم في تدفق الحرارة والضوء داخل المبني. على سبيل المثال، الزجاج التكيفي الذي يتحول من الشفاف إلى المعتم عند التعرض للحرارة الزائدة يساعد في تقليل الحاجة لتشغيل مكيفات الهواء، وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة. هذا النوع من الزجاج يمكن أن يكون مفيدًا في فصل الصيف، حيث يحسن من الأداء الحراري للمبني ويمنع ارتفاع درجات الحرارة الداخلية.

كما تشمل المواد الذكية الأخرى التي تستخدم في المبني المستدامة المواد القادرة على تحسين العزل الحراري والصوتي. على سبيل المثال، هناك مواد عازلة ذكية تتغير خصائصها استجابة لدرجة الحرارة أو الرطوبة، مما يسهم في الحفاظ على درجة حرارة مريحة داخل المبني طوال العام، سواء في فصل الصيف أو الشتاء، وبالتالي تقليل الحاجة لاستخدام أنظمة التدفئة والتبريد، وتوجد مواد ذكية أخرى مثل الأسطح القابلة للتنظيف ذاتياً، التي تساهمن في تقليل الحاجة للصيانة واستخدام المواد الكيميائية الضارة بالبيئة. هذه الأسطح تستخدم تقنيات مثل الطلاءات النانوية التي تساعده في منع تراكم الأوساخ والغبار، مما يقلل من استهلاك المياه والمواد في عملية التنظيف، وتساهم المواد الذكية في تحقيق الاستدامة من خلال تحسين استهلاك الطاقة، حيث يمكن للمبني التي تستخدم هذه المواد تقليل استهلاك الكهرباء والمياه بشكل كبير. كما أن استخدام المواد الذكية يساعد في تقليل انبعاثات الكربون، حيث تقل الحاجة لاستخدام الأنظمة التقليدية مثل التدفئة والتبريد الميكانيكي، مما يؤدي إلى تحسين الكفاءة الطاقية للمبني، وتعمل المواد الذكية على تحسين جودة الحياة داخل المبني. فهي تساهمن في تقليل التلوث البيئي، وتعزيز الراحة والرفاهية للسكان، من خلال التحكم في الإضاءة، والتهوية، ودرجة الحرارة بشكل فعال. هذه التقنيات تساهمن في خلق بيئة صحية ومستدامة، مما يساعده في رفاهية السكان ويساهم من جودة الهواء الداخلي، ويمكن القول أن المواد الذكية تشكل أحد الركائز الأساسية في تطوير المبني المستدامة، حيث تساهمن في تحقيق كفاءة الطاقة، الحفاظ على البيئة، وتحسين راحة المستخدمين، مما يجعلها خياراً مثالياً في تصميم المبني المستقبلية التي تتسم بالاستدامة^١.

تعد المواد الذكية من العوامل المؤثرة في تحقيق أهداف المبني المستدامة فيما يتعلق بكفاءة استهلاك الموارد وتقليل الأثر البيئي. واحدة من أهم المزايا التي تقدمها هذه المواد هي قدرتها على الاستجابة للتغيرات في البيئة المحيطة بالمبني، مما يساعده في تقليل الاعتماد على الأنظمة الميكانيكية والكهربائية التقليدية، وبالتالي يقلل من استهلاك الطاقة. فالمواد الذكية ليست مجرد أدوات لتحسين الأداء البيئي، بل تساهمن في تخفيض التكاليف التشغيلية على المدى الطويل، مما يجعلها استثماراً مجدداً اقتصادياً، ومن الأمثلة الأخرى على المواد الذكية التي تلعب دوراً مهماً في التصميم المستدام هو الأنسجة التفاعلية المستخدمة في الأسطح الخارجية للمبني. هذه الأنسجة تتفاعل مع التغيرات في درجة الحرارة والرطوبة، وتساعد في تحسين العزل الحراري والتقليل من الحاجة لأنظمة التكييف والتدفئة التقليدية. هذا يسمح للمبني بالحفاظ على درجة حرارة مريحة داخل المبني دون الحاجة لتقنيات معقدة أو مكلفة، وتمثل المواد الذكية فرصة لتحسين جوانب الأمان والراحة في المبني. على سبيل المثال، يمكن استخدام المواد الذكية لتصميم واجهات نوافذ قابلة للتكييف مع مستويات الضوء الطبيعي، مما يوفر إضاءة طبيعية أفضل ويقلل الحاجة إلى الإضاءة الصناعية. وبذلك، يتم توفير الطاقة ويساهم جودة الضوء داخل المبني، مما يعود بالنفع على الصحة العامة ورفاهية الأشخاص داخل المبني.

^١ قمر، م.، شبكة، ن.، ومذكور، م. و. (٢٠٢٢م). مواد البناء الذكية نحو مبني صحيحة بيئية – (دراسة حالة: وحدة المرضى بالمستشفيات) مواد البناء الذكية نحو مبني صحيحة بيئية – دراسة حالة: وحدة المرضى الداخليين في المستشفيات. مجلة البحوث الهندسية، ع (٤)، ص ٢٣١-٢٤٧.

كما أن المواد الذكية تسهم في تقليل التأثيرات البيئية السلبية المتعلقة بإعادة التدوير وإدارة النفايات. العديد من المواد الحديثة يمكن إعادة تدويرها بسهولة بعد استخدامها، مما يساهم في تقليل النفايات الناتجة عن البناء، ويعزز من مفهوم الاقتصاد الدائري. بهذه الطريقة، لا يتم فقط تقليل الفاقد، بل يمكن توفير المواد الخام اللازمة لبناء مبانٍ جديدة، وفيما يخص الطاقة المتعددة، تسهم المواد الذكية في دمج هذه الطاقة بشكل أكثر فعالية في المبني. على سبيل المثال، يمكن دمج أسطح قابلة للتعديل أو أسطح الطاقة الشمسية الذكية التي تساعده في توليد الطاقة مباشرةً من مصادر متعددة، وبالتالي تسهم في جعل المبني أكثر استقلالية في ما يتعلق بتلبية احتياجاته الطاقية، كما إن التطبيقات المستقبلية للمواد الذكية في مجال المبني المستدام قد تؤدي إلى تحول جذري في طريقة تصميم وبناء المدن. بفضل التطورات المستمرة في التكنولوجيا، يمكن للمباني المستقبلية أن تصبح أكثر تكاملاً وذكاءً، حيث تتفاعل باستمرار مع البيئة المحيطة بها لتوفير بيئات معيشية أكثر كفاءة، صحة، وراحة. هذه التقنيات ستفتح آفاقاً جديدة لتحقيق استدامة شاملة، تسهم في الحفاظ على الموارد الطبيعية للأجيال القادمة، وتتوفر للمجتمعات الحضرية مساحات عيش أفضل وأكثر استدامة.

ومن التطورات المستقبلية المدهشة في هذا المجال هو استخدام المواد الذكية التي يمكنها توليد الطاقة ذاتياً. على سبيل المثال، يمكن أن تكون المواد المستخدمة في الجدران والأسطح الخارجية قادرة على امتصاص الطاقة الشمسية وتخزينها لاستخدامها لاحقاً، مما يسهم في تقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية ويعزز من استقلالية المبني. هناك أيضاً إمكانيات لاستخدام مواد ذكية قادرة على تخزين الحرارة الزائدة خلال فترات النهار واستخدامها في فترات الليل، وهو ما يعزز من كفاءة استهلاك الطاقة على مدار الساعة¹.

أما بالنسبة لجوانب الاستدامة الاجتماعية والاقتصادية، فإن المواد الذكية تسهم في تحسين جودة الحياة داخل المبني من خلال خلق بيئات داخلية صحية وأكثر راحة. على سبيل المثال، يمكن استخدام المواد التي تحكم في مستويات الرطوبة والتهوية، مما يساهم في تقليل مشاكل التلوث الداخلي وتحسين جودة الهواء. كما يمكن لتقنيات العزل الذكي أن تقلل من تأثير الضوضاء الخارجية، مما يعزز من الراحة النفسية لسكان المبني. وتساهم هذه التحسينات في زيادة رفاهية الأفراد، مما يؤدي إلى تحسين صحتهم العقلية والجسدية، ستدعم المواد الذكية مبادرات استدامة أكثر شمولية على المدى الطويل. يمكن استخدامها في المدن الذكية التي تسعى لتقليل تأثيراتها البيئية وزيادة كفاءتها الطاقية. إذ سيكون للمباني الذكية دور أكبر في الحد من الانبعاثات الكربونية من خلال استخدام تقنيات متقدمة لخفض استهلاك الطاقة، ودمج حلول مبتكرة مثل الطاقة المتعددة والتخزين الذكي للطاقة، ومن المتوقع أيضاً أن تصبح المواد الذكية أكثر توافقاً مع احتياجات التغيير المستمر في التصاميم العمرانية. مع مروره هذه المواد في التكيف مع البيئة المحيطة، يمكن للبناء أن يستجيب لتغيرات المناخ بشكل أكثر كفاءة. سيكون من الممكن تصميم مبانٍ يمكنها مواجهة التغيرات المناخية القاسية مثل الارتفاعات الحادة في درجات الحرارة أو الأمطار الغزيرة دون التأثير على راحة السكان أو الحاجة لإجراءات تكيفية مكلفة.

فمن الناحية الاجتماعية، تعمل المواد الذكية على تحسين الظروف المعيشية للسكان من خلال خلق بيئات داخلية صحية وآمنة. على سبيل المثال، المواد القادرة على تنظيم درجات الحرارة والرطوبة داخل المبني تسهم في تحسين الراحة والرفاهية الشخصية، مما يقلل من مشاكل صحية مرتبطة بالتغييرات المناخية، مثل مشاكل التنفس أو الأمراض الجلدية التي قد تنشأ من الرطوبة الزائدة أو الجفاف. كما أن المواد الذكية التي تسهم في تحسين جودة الهواء الداخلي توفر بيئة أكثر صحة للمقيمين، وبالتالي تخفف من تأثيرات التلوث البيئي على صحة الإنسان. إضافة إلى ذلك، المواد الذكية التي تقلل من الضوضاء الخارجية تسهم في تحسين جودة الحياة النفسية للساكنين، مما يعزز من رفاهتهم ويسهم في تقليل التوتر والضغط النفسي.

ومن الناحية الاقتصادية، تسهم المواد الذكية في تقليل التكاليف التشغيلية للمباني بشكل كبير. على سبيل المثال، المواد الذكية التي تعزز العزل الحراري تقلل من الحاجة لاستخدام أنظمة التدفئة والتبريد بشكل

¹رشدي عبد الرزاق خليل. (٢٠٢٤). منهجيات العمارة الذكية وتأثيرها الإيجابي على زيادة القدرة الإنتاجية لشاغلي الفراغات الإدارية. مجلة الفنون والعلوم الإنسانية، ع(١٤)، ص ٤٤٢-٤٦٢.

مفرط، مما يؤدي إلى توفير في استهلاك الطاقة والمال على المدى الطويل. كما أن تحسين كفاءة استخدام الطاقة يساهم في خفض فاتورة الكهرباء للمقيمين والشركات داخل المبنى، مما يجعل المبني أكثر اقتصادية وأكثر جذباً للمستثمرين. إضافة إلى ذلك، فإن استخدام المواد الذكية في البناء يقلل من تكاليف الصيانة على المدى الطويل، إذ يمكن للعديد من هذه المواد أن تكون أكثر متانة وأقل عرضة للتلف مقارنة بالمواد التقليدية، وتساهم المواد الذكية في تعزيز الاستدامة الاقتصادية على مستوى أوسع من خلال دعم الابتكار والتطوير في صناعة البناء والتشييد. مع تزايد الطلب على المبني المستدامة، يزداد الطلب على المواد الذكية، مما يفتح آفاقاً جديدة للاستثمار والابتكار في هذا القطاع. هذا يؤدي إلى خلق فرص عمل جديدة في مجالات البحث والتطوير، التصميم، الهندسة، والتركيب، مما يسهم في نمو الاقتصاد الوطني والدولي، ويمكن أن تساهم المواد الذكية في تعزيز العدالة الاجتماعية من خلال توفير مساكن أكثر استدامة وبأسعار معقولة للمجتمعات ذات الدخل المنخفض. من خلال تقليل تكاليف التشغيل والصيانة، يمكن للمبني المستدامة استخدام تقنيات مثل المواد الذكية لتوفير بيئة معيشية صحية وآمنة دون تحمل السكان أعباء مالية كبيرة.

وفيما يخص استدامة المجتمعات، تسهم المواد الذكية في تحسين المرافق العامة والمبني الحضرية، مما يجعل المدن أكثر مرونة وقدرة على مواجهة التحديات البيئية والاجتماعية. هذا النوع من التطوير لا يقتصر فقط على تحسين جودة الحياة للسكان، بل يمتد أيضاً إلى تحسين قدرة المدن على التكيف مع التغيرات البيئية مثل تغير المناخ، مما يعزز من القدرة التنافسية للمناطق الحضرية في المستقبل، وتؤكد المواد الذكية على التكامل بين الاستدامة البيئية والاجتماعية والاقتصادية، مما يجعلها عنصراً أساسياً في تصميم المبني والمجتمعات المستدامة التي لا تقتصر على تحسين كفاءة الطاقة فحسب، بل تساهم أيضاً في بناء مستقبل أفضل للجميع.

إن استخدام المواد الذكية في تصميم المبني المستدامة يساهم بشكل كبير في تعزيز رفاهية المجتمعات والاقتصادات المحلية. على المستوى الاجتماعي، تساهم هذه المواد في تعزيز العلاقات بين الأفراد من خلال تحسين بيئة المعيشة وخلق مساحات صحية وآمنة، مما يعزز التفاعل الاجتماعي ويزيد من الشعور بالراحة والطمأنينة بين سكان المبني أو المجتمع. كما أن المبني الذكي التي تعتمد على مواد متطرفة لا تقتصر على توفير الطاقة فحسب، بل تساهم أيضاً في تحسين جودة الحياة اليومية للسكان، مما يقلل من الضغوط النفسية ويعزز مستويات الرضا العام، وتقدم المواد الذكية فرصة للمجتمعات المحلية لتبني حلول أكثر ابتكاراً واستدامة، وهو ما يعزز من قدرتها على مواجهة التحديات المستقبلية. على سبيل المثال، يمكن أن تساعد المواد الذكية في التصدي للتغيرات المناخية من خلال توفير درجات حرارة معتدلة داخل المبني وتقليل التأثيرات البيئية السلبية التي قد تترجم عن الطقس القاسي أو التغيرات المناخية المفاجئة. كما يمكن أن تساعد المواد الذكية في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة في مناطق محددة مثل المناطق الريفية أو المناطق ذات الكثافة السكانية العالية التي قد تواجه صعوبة في الوصول إلى مصادر الطاقة التقليدية.

ويعتبر استخدام المواد الذكية في البناء استثماراً طويلاً المدى يعود بالنفع على مالكي المبني والمستأجرين على حد سواء. من خلال تقليل التكاليف التشغيلية المرتبطة بالطاقة والصيانة، فإن المبني الذكي توفر فرصاً كبيرة لتوفير المال مع مرور الوقت، مما يعزز جاذبية هذه المبني في الأسواق العقارية. علاوة على ذلك، فإن الفوائد المالية الناتجة عن انخفاض التكاليف التشغيلية تعنى أن هذه المبني يمكن أن تساهم في تحسين الوضع المالي للمستثمرين المحليين وتعزيز التنمية الاقتصادية على المدى البعيد، وتلعب دوراً كبيراً في تحفيز القطاعات الاقتصادية المتعلقة بالتقنيات الجديدة والابتكار. على سبيل المثال، تطور مواد مثل الأسطح الذكية القادرة على امتصاص الطاقة الشمسية أو المواد التي تتمكن من إعادة التدوير بسهولة يفتح الباب لتطوير أسواق جديدة وفرص عمل جديدة في مجالات التكنولوجيا النظيفة، مما يسهم في توفير وظائف جديدة وتعزيز النمو الاقتصادي. تساهم هذه الفرص الاقتصادية أيضاً في تحقيق أهداف التنمية المستدامة على المدى الطويل، حيث توفر المواد الذكية حلولاً متكاملة لخفض الانبعاثات

^١ حسن عبد الرحمن، سعيد، ماجد القصبي، نيرمين. (٢٠٢٤م). أثر العمارة المستدامة والتصميم الذكي على التصميم الداخلي للمستشفيات العامة في مصر. المجلة العربية الدولية لفن التصميم الرقمي، ع(٤)، ص ١٣٩-١٥٦.

الكريونية ودعم الاستدامة البيئية في نفس الوقت، ومن الجدير بالذكر أن اعتماد هذه المواد ليس محصوراً في القطاع الخاص فقط، بل يمكن أن يمتد أيضاً إلى القطاع العام، مما يعزز من استدامة المرافق الحكومية والبنية التحتية العامة. كما أن استخدام المواد الذكية في البناء يساهم في دعم تحقيق السياسات الحكومية التي تهدف إلى تقليل استهلاك الطاقة والحفاظ على البيئة، مما يعزز من التزام الحكومات بتحقيق أهداف التنمية المستدامة التي توأكب التوجهات العالمية.^١

• التحديات التقنية والاقتصادية لاستخدام المواد الذكية في البناء

استخدام المواد الذكية في البناء يشهد تطوراً سريعاً وتزايداً في الاهتمام العالمي، يواجه هذا القطاع العديد من التحديات التقنية والاقتصادية التي قد تؤثر على تبني هذه المواد بشكل واسع في صناعة البناء. من أبرز هذه التحديات:

- التحديات التقنية

تواجه عملية استخدام المواد الذكية في البناء العديد من التحديات التقنية التي قد تعيق تطبيق هذه المواد بشكل واسع في القطاع المعماري. ومن أبرز التحديات التقنية هو نقص الفهم الكامل لكيفية تكامل هذه المواد الذكية مع الأنظمة المعمارية التقليدية. فعند تصميم المباني، تحتاج المواد الذكية إلى أن تكون متوافقة مع البنية التحتية الحالية، مما يستدعي تعديلات أو تحديثات على أنظمة التدفئة، التهوية، والتكييف (HVAC) التي غالباً ما تكون غير مهيأة للتعامل مع هذه المواد المبتكرة. هذه التعديلات قد تتطلب استثمارات إضافية قد تكون عبئاً على بعض مشاريع البناء.

وقد تواجه المواد الذكية تحديات في مجال المثانة وطول العمر. بعض المواد الذكية التي تعتمد على التكنولوجيا المتقدمة قد لا تتمتع بالمثانة التي يتمتع بها المواد التقليدية مثل الخرسانة أو الفولاذ. فعلى سبيل المثال، بعض المواد التي تستجيب للحرارة أو الرطوبة قد تفقد خصائصها بمرور الوقت أو تتأثر سلباً بالعوامل البيئية، مما يتطلب صيانة دورية ومستمرة قد تكون مكلفة وغير فعالة في بعض الحالات، وهناك تحدي في مجال التصنيع. إن تصنيع المواد الذكية يتطلب تقنيات متقدمة للغاية، والتي قد تكون غير متوفرة على نطاق واسع في بعض البلدان أو المناطق. قد يتطلب الأمر استثماراً كبيراً في البحث والتطوير لتصميم مواد ذكية تلبي المعايير المطلوبة في مجال البناء، مما قد يؤدي إلى زيادة التكلفة وتباطؤ عملية الإنتاج، وتقنيات المواد الذكية قد تواجه مشكلات في تطبيقها على نطاق واسع بسبب قلة الخبرة والمعرفة الكافية بين المهندسين والمصممين. استخدام هذه المواد يتطلب تدريجاً متخصصاً لفهم كيفية دمجها في التصميمات المعمارية الحالية وكيفية مراقبتها وإدارتها بشكل فعال.^٢

هناك عدة جوانب أخرى تؤثر على تطبيق المواد الذكية في تصميم المباني المستدامة. أحد هذه الجوانب هو تحدي التوافق مع المعايير واللوائح التنظيمية المعمارية والبنائية التي قد تكون قديمة أو غير معدة لتناسب المواد الذكية الجديدة. في بعض الحالات، قد تكون الأنظمة القانونية والمواصفات الهندسية الحالية غير قادرة على تقييم المواد الذكية بالشكل المناسب أو إعطاء التراخيص الالزمة لاستخدامها، مما يعرقل إدماج هذه المواد في مشاريع البناء، ويحتاج تصميم واستخدام المواد الذكية في المباني إلى تقنيات متقدمة لتحليل البيانات وإدارتها بشكل فعال. المواد الذكية غالباً ما تعتمد على أجهزة استشعار وأنظمة ذكية لقياس التغيرات البيئية مثل درجة الحرارة أو الرطوبة أو حركة الهواء، وبالتالي تتطلب منصات قوية لجمع وتحليل هذه البيانات من أجل اتخاذ قرارات بناء ذكية. لكن هذه الأنظمة قد تخلق عبئاً إضافياً في إدارة البيانات وحمايتها من أي تهديدات أمنية، مما قد يؤدي إلى تحديات في الأمان وحماية

^١ رشدي عبد الرازق خليل. (٢٠٢٤م). منهجيات العمارة الذكية وتأثيرها الإيجابي على زيادة القراءة الإنتاجية لشاغلي الفراغات الإدارية، مرجع سابق، ص ٤٤٢-٤٦٢.

^٢ قمر، م، شبكة، ن، ومذكور، م. (٢٠٢٢م). مواد البناء الذكية نحو مباني صحية بيئية – (دراسة حالة: وحدة المرضى بالمستشفيات) مواد البناء الذكية نحو مباني صحية بيئية – دراسة حالة: وحدة المرضى الداخليين في المستشفيات، مرجع سابق، ص ٢٣١-٢٤٧.

الخصوصية، وبينما توفر المواد الذكية مزايا في مجال كفاءة الطاقة والراحة، قد تكون هذه المواد غير ملائمة لبعض الظروف البيئية أو الثقافية المحلية. ففي بعض المناطق قد لا تكون الظروف المناخية أو الثقافية داعمة لاستخدام تقنيات معينة مثل الألوان القابلة للتغيير أو المواد التي تتأثر بالحرارة. قد يواجه السكان في تلك المناطق صعوبة في التكيف مع المواد الجديدة التي قد تؤثر على راحتهم أو لا تناسب مع احتياجاتهم اليومية.

كما أن هناك تحديات تتعلق بالتكاليف طويلة الأجل لصيانة هذه المواد. في حين أن المواد الذكية قد تساعد في تقليل تكاليف الطاقة والصيانة في البداية، إلا أن صيانتها على المدى البعيد قد تتطلب تقنيات متقدمة أو فرقاً متخصصة يمكن أن تكون مكلفة، خاصة إذا كانت هناك حاجة لتحديث الأنظمة أو استبدال المكونات الذكية التي تدهورت أو تضررت بسبب الظروف البيئية، وتظل مسألة تقنيات الاختبار والتقييم قضية محورية في استخدام المواد الذكية في المبني المستدام. نظراً لأن هذه المواد لا تزال في مرحلة التطوير والاختبار، فإنها قد تحتاج إلى مزيد من التجارب والدراسات الطويلة لتقييم مدى فعاليتها في تحسين كفاءة الطاقة، وتحديد كيفية تأثيرها على استدامة المبني في مختلف الظروف. قد يستغرق الوقت لتقديم دليل علمي وإثباتات تجريبية على فعالية المواد الذكية في تصميم المبني المستدام، مما يساهم في إبقاء هذا المجال في طور التقدير والاختبار بدلاً من التطبيق الفعلي في مشاريع البناء الكبرى، فإن تطبيق المواد الذكية في تصميم المبني المستدام يواجه تحديات تقنية ومعرفية كبيرة، ولكن مع تقدم البحث والتكنولوجيا، من الممكن التغلب على هذه التحديات، مما يؤدي إلى تصميم المبني التي تحقق توافقاً بين الراحة، الكفاءة، والاستدامة على المدى البعيد.

- التحديات الاقتصادية

ويوجد الكثير من التحديات الاقتصادية لاستخدام المواد الذكية في البناء تتعلق بعدها عوامل يمكن أن تؤثر بشكل كبير على تطبيق هذه المواد في مشاريع البناء. أولاً، يعتبر التكلفة الأولية لاستخدام المواد الذكية أحد أبرز التحديات الاقتصادية. وهذه المواد عادة ما تكون أكثر تكلفة من المواد التقليدية بسبب التكنولوجيا المتقدمة والابتكارات التي تحتوي عليها. يتطلب تصنيع المواد الذكية استثمارات ضخمة في البحث والتطوير، مما يؤدي إلى زيادة تكلفة الإنتاج بشكل عام. وهذا قد يشكل عائقاً أمام العديد من المشاريع، خصوصاً تلك التي تعتمد على ميزانيات محدودة أو تحتاج إلى تقليل التكاليف الإجمالية، وتكاليف تركيب المواد الذكية يمكن أن تكون أعلى من تركيب المواد التقليدية. تركيب هذه المواد غالباً ما يتطلب مهارات فنية متخصصة، مما يؤدي إلى الحاجة إلى فرق عمل مدربة بشكل جيد. هذه الفرق المتخصصة قد تكون نادرة في بعض الأسواق، مما يجعل تكلفة العمالة أعلى وتدفع إلى تمديد فترة تنفيذ المشروع. كما أن بعض المواد الذكية قد تحتاج إلى تقنيات إضافية للتكامل مع أنظمة المبني، مثل أنظمة التدفئة والتهوية أو التحكم في الإضاءة، مما يزيد من التعقيد والتكلفة¹.

كما أن يكون استخدام المواد الذكية تحدياً من حيث التقييم المالي على المدى البعيد. على الرغم من أن هذه المواد يمكن أن توفر وفورات في استهلاك الطاقة على المدى الطويل، إلا أن حساب العائد على الاستثمار قد يكون صعباً. قد يتطلب الأمر سنوات عدة لتسديد تكلفة المواد الذكية مقارنة بالمواد التقليدية. هذا يعني أن العديد من المستثمرين أو أصحاب المشاريع قد يكونون متربدين في تبني هذه المواد بسبب المخاوف من تكاليف الاستثمار الأولية العالية، خاصة إذا لم يكن لديهم وضوح كافٍ حول الجدوى الاقتصادية طويلة الأجل، ويتعلق أيضاً بحجم السوق المتاح للمواد الذكية. في العديد من المناطق، لا يزال الطلب على هذه المواد محدوداً نظراً لتكلفتها المرتفعة وعدموعي الكثير من المهندسين والمقاولين بفوائدها. قد يكون لهذه المواد سوق ضيق في بداية تطبيقها، مما يؤدي إلى عدم الاستفادة من وفورات الحجم التي قد تقلل من تكلفة الإنتاج بمرور الوقت.

و على الرغم من أن المواد الذكية قد توفر فوائد كبيرة على المدى البعيد، مثل تحسين كفاءة الطاقة وتقليل التكاليف التشغيلية، إلا أن تكاليف الصيانة الدورية لهذه المواد قد تكون أعلى من تلك التي تتطلبتها

¹. "Measuring quality of life: Economic, social, and subjective indicators", Social Indicators Research, 40(1), p. 189-216. -Diener, E. Suh, E.

المواد التقليدية. على سبيل المثال، قد تحتاج المواد الذكية إلى صيانة تقنية أو استبدال أجهزة استشعار أو أنظمة تحكم قد تختلف مع مرور الوقت. هذه التكاليف الإضافية في الصيانة قد تخلق عبئاً اقتصادياً إضافياً على مالكي المبني والمستثمرين، مما يجعلها خياراً أقل جذباً بالنسبة لهم مقارنة بالخيار التقليدي، وتقدم العديد من الفوائد من حيث كفاءة الطاقة والاستدامة البيئية، إلا أن التحديات الاقتصادية المتعلقة بتكلفتها العالية، والتعقيد في تركيبها وصيانتها، فضلاً عن صعوبة تحديد العوائد الاقتصادية طويلة الأجل، تشكل عوائق رئيسية أمام استخدامها على نطاق واسع في قطاع البناء.

تؤثر على استخدام المواد الذكية في البناء من حيث التكاليف. أحد هذه الجوانب هو التأثير الاقتصادي الناتج عن الابتكار في السوق. بما أن المواد الذكية لا تزال في مرحلة الابتكار، فقد تكون هناك تقلبات كبيرة في أسعارها بناءً على تقدم التكنولوجيا، وتتوفر المواد الخام، والطلب في الأسواق. هذا يمكن أن يؤدي إلى عدم استقرار اقتصادي في السوق، مما يثير قلق العديد من المستثمرين والمطورين الذين قد يتزدرون في اعتماد هذه المواد نظراً لشكوك حول تكليفتها الاقتصادية، وفي العديد من الدول النامية أو الأسواق التي تعاني من نقص في الدعم المالي أو الحكومي، قد يكون من الصعب تمويل استخدام المواد الذكية بسبب الكلفة المرتفعة للمشروع بشكل عام. قد لا تكون هناك حواجز مالية أو سياسات دعم كافية من قبل الحكومات لتشجيع تبني هذه المواد في مشاريع البناء. في ظل هذه الظروف، يصعب على الشركات والمطورين تحمل التكاليف المرتفعة التي يتطلبها استخدام هذه المواد، مما يعيق انتشارها.

ومن التحديات الاقتصادية المتعلقة بالمواد الذكية هي الكلفة المرتفعة التي قد تترتب على التأهيل والتدريب المستمر للعمال والمهندسين المعماريين والمقاولين. هؤلاء الأفراد يحتاجون إلى تعلم كيفية استخدام هذه المواد بشكل فعال، وكيفية صيانتها والتعامل مع الأنظمة المتقدمة المصممة لها. هذا التدريب يتطلب وقتاً وجهداً، وبالتالي زيادة في التكاليف التشغيلية للمشروعات التي تستخدم المواد الذكية، وفي بعض الحالات، قد لا تكون هناك سياسات أو آليات فعالة لتقدير تكاليف الإنفاق للمشاريع المعمارية التي تتضمن مواد ذكية. هذا يشمل تكلفة تأهيل الصناعة، وتطوير التقنيات والأنظمة اللازمة للإنتاج المتنسق للمواد الذكية، والتي يمكن أن تستفيد من الاقتصاد في الحجم. هذه التحديات الاقتصادية المرتبطة بمراحل التصميم والإنتاج قد تزيد من تكاليف المشاريع بشكل عام، مما يجعل بعض المطورين أكثر ترددًا في اعتماد هذه المواد على نطاق واسع.

ومن يجدر بالذكر أن هناك معوقات أخرى قد تؤثر على انتشار المواد الذكية في قطاع البناء، تتعلق بالقدرة على التحمل المالي للمستثمرين على المدى البعيد. على الرغم من أن المواد الذكية قد تقدم فوائد بيئية وطاقة على المدى الطويل، فإن العوائد المالية الملموسة قد تكون غير واضحة للمستثمرين في البداية. في بعض الأحيان، قد يكون صعباً إقناع المستثمرين بمروءة اقتصادي سريع من هذه المواد بسبب تباطؤ تأثيرات كفاءة الطاقة على التكاليف التشغيلية للمبني، وفي أسواق البناء التي تفتقر إلى الوعي الكافي حول الفوائد طويلة الأمد لاستخدام المواد الذكية، قد يجد المقاولون والمطورون صعوبة في تسويق مشاريعهم باستخدام هذه المواد. يمكن أن ينظر إلى هذه المواد كخيارات غير مألوفة أو غير مضمونة، ما يؤدي إلى تردد بعض العملاء في الإقبال عليها نتيجة للمخاوف من تكاليف أعلى وصعوبات محتملة في الصيانة والتشغيل. في هذه الحالة، قد يفضل العملاء التقليديون، سواء كانوا أفراداً أو شركات، اللجوء إلى الحلول التقليدية الأقل تكلفة وأكثر أماناً من الناحية المالية.

و تتعلق بعض التحديات الاقتصادية بالافتقار إلى الاستثمارات الحكومية والدعومات الخاصة التي تشجع على البحث والتطوير في مجال المواد الذكية. في العديد من البلدان، لا يزال قطاع البناء يعتمد بشكل كبير على المواد التقليدية بسبب سهولة الوصول إليها وانخفاض تكاليفها مقارنةً بالمواد الذكية. غياب الدعم من قبل الحكومات أو المؤسسات المالية التي يمكن أن تقدم حواجز ضريبية أو دعماً مالياً مباشراً قد يؤثر على قدرة الشركات على تنفيذ مشاريع تضم مواد ذكية، ومع تزايد الوعي بأهمية الاستدامة البيئية وكفاءة الطاقة، قد تنشأ بعض الفرص الاقتصادية مع تقديم الأبحاث والابتكارات في هذا المجال. ومن المتوقع أن تتخفض تكاليف المواد الذكية مع مرور الوقت، مما قد يسهم في زيادة الإقبال عليها من قبل

, "New Knowledge Generation Capabilities and Economic Performance of Polish Regions", Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy, 11(3), p. 451-471.

شركات البناء والمطوريين. كما يمكن أن يساعد الابتكار المستمر في تطوير حلول أكثر كفاءة من حيث التكلفة، ما يؤدي إلى خفض تكاليف التصنيع والتركيب والصيانة، ولكن حتى مع هذه الفرص المستقبلية، لا تزال التحديات الاقتصادية تفرض قيوداً على التطبيق الواسع للمواد الذكية في البناء. تحتاج هذه المواد إلى المزيد من الدراسات الاقتصادية والممارسات المستدامة التي توازن بين التكاليف والعوائد على المدى الطويل لضمان تكاملها في سوق البناء بشكل مستدام^١.

• دراسة تطبيقية على بعض المباني المستدامة

إن التقدم السريع لเทคโนโลยيا المنزل، أصبحت المنازل الذكية خياراً جديداً لأسلوب الحياة. يعتقد أن هذه الأدوات تجعل الحياة أبسط من خلال السماح للمستخدمين بالتحكم في العديد من جوانب منازلهم من جهاز محمول، بما في ذلك هذا الجهاز، ويقضي غالبية الناس وقتاً أطول في المنزل أكثر من أي مكان آخر، لكنهم يفكرون في التكنولوجيا هناك أقل مما يفعلون في الخارج، باستثناء تقنية "Wi-Fi". وهذا يعني أنه يمكن التحكم في كل شيء في المنزل بسهولة الآن، بما في ذلك الأضواء والستائر وشبكة "Wi-Fi" ودرجة الحرارة وقفل الباب الأمامي وحتى الموقد، ومن المقرر أن يتغير تصور المنزل باعتباره مساحة خالية من التكنولوجيا. حان الوقت الآن لفحص الأدوات العديدة المنتشرة في جميع أنحاء المنزل، بما في ذلك سخان المياه في الحمامات والتلاجة في المطبخ والتلفزيون في غرفة المعيشة ومكيف الهواء في غرف النوم. كل يوم، يحيط بالناس المزيد والمزيد من الأجهزة الإلكترونية التي يشار إليها بالأجهزة الذكية لأنها تتميز بأجهزة استشعار تسمح لها بجمع البيانات ونقلها عبر.

وتمتد فكرة المنزل الذكي إلى ما هو أبعد من الراحة حيث ستراقب التكنولوجيا الجديدة طعام الناس ومحبيتهم ورفاهيتهم العامة، مما يؤدي إلى تأثيرات صحية كبيرة ومفيدة. باستخدام التكنولوجيا، سيتمكن المتخصصون الطبيون من معرفة صحة المريض في الوقت الفعلي وتاريخه الطبي قبل أن يبلغوه بذلك. بالإضافة إلى ذلك، سيتمكن المتخصصون في الرعاية الصحية من علاج الأمراض بشكل استباقي بفضل المنازل الذكية. نظراً لأن أدوات التعلم الخاصة بالأطفال مرتبطة بأجهزة معلماتهم لتحسين المشاركة والتعليم الفردي، فإن التكنولوجيا سيكون لها أيضاً تأثير على كيفية التدريس والتعلم. سيتلقى تعليم الوسائل المتعددة المزيد من الاهتمام حيث قد نقدم مفهوم الفصول الدراسية الافتراضية إلى الحياة. بالإضافة إلى ذلك، فإن الفصول المصممة للتعلم المنزلي والتي قد يتم بثها على شاشات الأجهزة سوف تسمح للبالغين بالاستمرار من حيث توقفوا. إن التأثير الأكثر أهمية على تكنولوجيا المنزل الذكي هو البيئة، وخاصة عند النظر في آثار النشاط البشري. قد ينخفض استخدام الطاقة والمياه في البناء بشكل كبير مع أتمتة المنزل الذكي. قد تحدد حلول المنزل الذكي التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي سلوك الأشخاص المقيمين في المنزل وتشغيل الأدوات أو إيقاف تشغيلها بناءً على الروتين اليومي المستخدم، حتى لو استمر العملاء في استخدام المزيد من الأجهزة التي تعمل بالكهرباء. بمساعدة هذه التقنيات الذكية، سنكون قادرين على ملاحظة كمية المياه والطاقة المستخدمة بسرعة وكم تكلف الهواتف المحمولة. سيحتاج أصحاب المنازل والمرافق والحكومات إلى التوصل إلى حلول أفضل وأكثر كفاءة لتنقیل التأثير البيئي وجعل الحياة أكثر استدامة بسبب تكاليفها المتزايدة دائمًا^٢.

- التطورات التكنولوجية في المنازل الذكية

^١ Wackernagel, M., Yount, J. D. 1998. "The ecological footprint: an indicator of progress toward regional sustainability", Environmental Monitoring and Assessment, 51(1-2), p. 511-529.

^٢ عبدالباسط الفيتوري، محمد الفرجاني. (٢٠٢٣م). التكيف مع الاستدامة البيئية في المساكن التقليدية بالمدن النفطية الليبية: غدامس حاله. مجلة العلوم الإنسانية والتطبيقية، ع(١٥)، ص ١٦٣-١٧٥.

إن في هذه الأيام، تتطور التكنولوجيا بسرعة، ولا تختلف تقنية المنزل الذكي. والسؤال هو كيف يمكن للمنازل الذكية أن تؤثر على حياة الناس وما يستلزمها هذا التطور من حيث الأداء العملي، وستكون التكنولوجيا في قلب المنازل المستقبلية ، وستكون المنازل الذكية قادرة على تتبع أماكن تواجد شاغليها عبر مستشعر إلكتروني مثبت على أجهزة استشعار كهربائية داخل المنزل أو الملابس. سيكون المنزل قادرًا على التعرف على الأفراد وأماكن تواجدهم، وسيستخدم هذه المعرفة لتوقع وتلبية المطلب. يمكن تغيير كل شيء في المنزل لتتناسب احتياجات الشخص الذي يدخل، بما في ذلك الإضاءة والموسيقى والتدفئة والتبريد. ستحوّل طريقة إضاءة المنازل بشكل كبير من خلال الإضاءة الذكية، - المنزل الذكي: والذي يتم ضبطه تلقائيًا عن طريق استشعار وجود الأشخاص وإطفاء الأضواء أو خفض شدتها عند مغادرتهم. كما يمكن التأثير على تصرفات الأشخاص من خلال الإضاءة الذكية؛ على سبيل المثال، يمكن استخدام أجهزة استشعار الضغط لإطفاء الأضواء عند الاستيقاظ في السرير بعد فترة زمنية محددة، وستتعرّف أجهزة الاستشعار على متى يقوم الأفراد بتشغيل الأضواء والنهوض لاستخدام الحمام. سيتذكّر المنزل الذكي عادة المستخدم حتى يتمكّن من تخصيص كل أداة في منزله كما يحلو لك، وتغيير الأضواء سطوعها تلقائيًا بناءً على الوقت من اليوم، والأوقاف الذكية؛ بناءً على خصائص تعريف معينة، يمكن ضبط الأوقاف الذكية لقبول أو رفض الضيوف. خيار آخر هو السماح لشخص ما بالدخول عن بعد، مثل سامي البريد. يمكن استخدام الهاتف المحمول لفتح الباب ويمكن استخدام التطبيق لإرسال رموز فتح القفل الافتراضية، ومراقبة المنزل؛ تتمتع أنظمة الأمان الذكية بالقدرة على مراقبة المنزل من تقاء نفسها، وإخبار صاحب المنزل بأي نشاط غريب، واستدعاء خدمات الطوارئ إذا لزم الأمر. يمكن أيضًا مراقبة كبار السن الذين يعيشون بمفردهم من خلال المنازل الذكية، والتي يمكن أن توفر المساعدة مثل تذكير الأدوية وإكمال الواجبات اليومية بشكل آمن وفعال. في حالة حدوث حالة طوارئ، مثل السقوط أو وقوع حادث، فإن المنزل الذكي سيكون لديه القدرة على تنبيه خدمات الطوارئ وتزويدهم بالدخول تلقائيًا، وتكييف الهواء؛ في حين أن هذا لن يتغير في أي وقت قريب، فإن حلول المنزل الذكي قد تخفّض بشكل كبير استهلاك الطاقة الذي يحتاجه لتشغيل أنظمة التدفئة والتبريد لدينا في الشتاء والصيف على التوالي. يعد تكييف الهواء ضرورة أساسية في دول الخليج. قد يخفض منظم الحرارة الذكي تكاليف الطاقة بنسبة (١٥٪) أو أكثر من خلال تعلم عادات ومتطلبات التدفئة والتبريد للأسرة بمرور الوقت والجمع بين هذه البيانات ودرجات الحرارة الخارجية والداخلية. هذا يلغى الحاجة إلى توبیخ الآباء لأطفالهم للتلاعب بـمفتاح الطاقة. كيفية صنع منزل ذكي باستخدام الأجهزة الذكية: كل من لديه العديد من الأدوات الذكية في مسكننا مع اتصال بالإنترنت. يزيد غالبية الأفراد طريقة مباشرة وبأسعار معقولة لربطهم جميعًا بنظام واحد. ويرى نجيب النعيم من شركة شنايدر إلكتريك أن مفهوم المنزل المرتبط Wizzer وتطبيق Square D الخاص بالشركة قد يكون الخيار الأمثل للباحثين عن أحدث ما توصلت إليه تكنولوجيا المنزل الذكي.^١

إن الدراسات التطبيقية على المبني المستدام التي تستخدم المواد الذكية توفر رؤية شاملة حول كيفية تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الأثر البيئي للمبني الحديثة. من خلال تحليل بعض المشروعات الناجحة حول العالم، يمكن استخلاص دروس مهمة حول فعالية استخدام هذه المواد والتحديات المرتبطة بها:

المثال الأول: مشروع "The Edge" في هولندا

يُعد مبنى "The Edge" في أمستردام من أكثر المباني الذكية كفاءة في استهلاك الطاقة. تم تصميمه باستخدام مواد بناء ذكية تعزز العزل الحراري وتنقل من فقدان الحرارة، إضافة إلى نظام إضاءة يعتمد على تقنية "LED" الذكية التي تتكيف مع حركة الأفراد داخل المبنى. كما يتم التحكم في استهلاك الطاقة عبر شبكة استشعار متقدمة تتصل بتطبيقات الهاتف المحمول، مما يتتيح للعاملين ضبط درجة الحرارة والإضاءة حسب الحاجة، ما يقلل من الهدر الطاقي، ويُعد مبنى "The Edge" ، الواقع في أمستردام، أحد أكثر المباني كفاءة في استهلاك الطاقة في العالم، حيث حصل على أعلى تصنيف من نظام

^١ عبد المنعم عبد الحي. (٢٠٢٤). أثر البحث العلمي والتكنولوجيا والابتكار في الطاقات المتتجددة في العالم العربي. المجلة العربية للعلوم التربوية والتكنولوجية، ع(٢)، ص٨٤٥-٨٢.

"BREEAM" للاستدامة. تم تصميمه ليكون نموذجاً لمستقبل المبني الذكية المستدامة، حيث يعتمد على دمج المواد الذكية والتكنولوجيا الحديثة لتحقيق أقصى درجات الكفاءة الطاقية وتقليل الأثر البيئي، ويعتمد المبني على نظام استشعار متتطور يعمل بتقنية إنترنت الأشياء (IoT)، حيث يتم تثبيت أكثر من (٢٨,٠٠٠) مستشعر في مختلف أنحاء المبني لمراقبة استهلاك الطاقة والإضاءة ودرجة الحرارة وجودة الهواء. يتيح هذا النظام للعاملين التحكم في بيئتهم الخاصة عبر تطبيقات الهواتف الذكية، مما يسمح بتعديل الإضاءة ودرجة الحرارة في مكاتبهم بناءً على تفضيلاتهم الشخصية، مما يعزز الراحة ويقلل من الهدر الطاقي.



أما من حيث المواد الذكية، فقد تم استخدام زجاج ذكي متكيف على الواجهات الخارجية، والذي يسمح بدخول الضوء الطبيعي بكفاءة مع تقليل امتصاص الحرارة، مما يقلل الحاجة إلى التبريد الاصطناعي. كما تم تصميم هيكل المبني ليعزز من الإضاءة الطبيعية من خلال سقف زجاجي كبير يسمح بدخول أكبر قدر من الضوء إلى الداخل، مما يقلل الحاجة إلى الإضاءة الكهربائية خلال النهار، ويستخدم المبني جزءاً كبيراً من طاقته من الألواح الشمسية المثبتة على سطحه، بالإضافة إلى نظام تخزين الطاقة الحرارية في باطن الأرض، والذي يعمل على تدفئة وتبريد المبني بطريقة مستدامة من خلال ضخ المياه في أنابيب تحت الأرض لضبط درجات الحرارة الداخلية على مدار العام، ومن الناحية البيئية، يعتمد "The Edge" على نظام ذكي لإدارة المياه، حيث يتم جمع مياه الأمطار وإعادة تدويرها لاستخدامها في المرافقين وري المساحات الخضراء، مما يقلل من استهلاك المياه العذبة. كما أن جميع المواد المستخدمة في البناء تقريباً هي مواد قابلة لإعادة التدوير، مما يقلل من التفاسيات ويعزز مفهوم الاقتصاد الدائري، ويعيد "The Edge" نموذجاً رائداً يعكس كيف يمكن لتقنيات المواد الذكية والتحكم الرقمي أن تساهم في إنشاء مبانٍ مستدامة تحقق توازنًا بين الراحة البشرية، وكفاءة الطاقة، وتقليل الأثر البيئي. وقد أصبح هذا المبني مصدر إلهام لكثير من المشاريع العمرانية الحديثة التي تهدف إلى تحقيق معايير الاستدامة في التصميم والبناء.^١

المثال الثاني: برج "Bosco Verticale" في إيطاليا

يعد "Bosco Verticale" ، أو "الغابة العمودية" ، واحداً من أكثر المشاريع العمرانية إبداعاً واستدامة في العالم. يقع هذا البرج في مدينة ميلانو الإيطالية، وقد تم تصميمه بواسطة المهندس المعماري ستيفانو بويري (Stefano Boeri) ليكون نموذجاً فريداً للعمارة الخضراء التي تجمع بين الحداثة والتكامل البيئي. يهدف المشروع إلى تحسين جودة الهواء، وتقليل الانبعاثات الكربونية، وتعزيز التنوع البيولوجي في البيئة الحضرية، ويتكون المشروع من برجين سكنيين، يبلغ ارتفاع أحدهما (١١٠) مترًا، ويتميزان بوجود أكثر من (٩٠٠) شجرة و (٥٠٠٠) شجيرة و (١١,٠٠٠) نبتة متنوعة موزعة على الشرفات والواجهات الخارجية. هذا التصميم يحاكي وظيفة الغابات في تنقية الهواء، حيث تعمل

^١ Amadeo, M., Cicirelli, F., Guerrieri, A., Ruggeri, G., Spezzano, G., Vinci, A. (2023). When edge intelligence meets cognitive buildings: The COGITO platform. Internet of Things, v 24, p1-17

النباتات على امتصاص ثاني أكسيد الكربون وإطلاق الأكسجين، مما يحسن جودة الهواء داخل المبنى ومحيطة.



• استخدام المواد الذكية في البناء

تم تصميم الواجهات باستخدام مواد ذكية تساعد في تقليل امتصاص الحرارة والحفاظ على استقرار درجات الحرارة داخل المبنى، مما يقلل الحاجة إلى التبريد والتدفئة الاصطناعية. كما تم تطوير أنظمة رى ذكية ومستدامة تعتمد على إعادة تدوير مياه الأمطار والمياه الرمادية لري النباتات تلقائياً، مما يقلل من استهلاك الموارد المائية.

• التأثير البيئي والاستدامة

إلى جانب تحسين جودة الهواء، يلعب "Bosco Verticale" دوراً في تقليل التلوث الضوضائي داخل المدينة، حيث تعمل النباتات ك حاجز طبيعي يمتص الضوضاء القادمة من الخارج. كما أنه يعزز التنوع البيولوجي من خلال توفير موائل طبيعية لأنواع متعددة من الطيور والحشرات، مما يساهم في استعادة التوازن البيئي في المناطق الحضرية.

• كفاءة الطاقة والراحة الحرارية

تساعد النباتات الكثيفة في تقليل ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية، حيث تعمل كعازل طبيعي يمتص حرارة الشمس خلال الصيف ويوفر الدهاء خلال الشتاء، مما يقلل الحاجة إلى استخدام أنظمة التكييف التقليدية. كما أن تصميم النوافذ والواجهات يراعي الاستفادة القصوى من الإضاءة الطبيعية، مما يقلل من استهلاك الكهرباء.

• تأثير المشروع على التطوير العمراني

أصبح برج "Bosco Verticale" نموذجاً عالمياً يُحتذى به في تصميم المباني المستدامة، وقد تم تبني مفهوم الغابة العمودية في مشاريع مماثلة حول العالم، مثل الصين وهولندا وفرنسا. يعكس هذا المشروع كيف يمكن دمج الطبيعة مع التكنولوجيا الحديثة لتحقيق بيئة عمرانية أكثر صحة واستدامة، ويمثل خطوة رائدة نحو مستقبل يتميز بمباني لا تستهلك الموارد فقط، بل تساهمن في

تحسين البيئة وتعزيز الاستدامة على جميع المستويات، وهو ما يجعله نموذجاً هاماً للمدن الذكية والمستدامة.^١

المثال الثالث: مركز "Bullitt Center" في الولايات المتحدة

يعد مركز "Bullitt Center" في الولايات المتحدة واحداً من أكثر المباني استدامة في العالم، حيث يجمع بين التصميم الذكي والاعتماد الكامل على الطاقة المتجددة، مما يجعله نموذجاً لمستقبل المبني البيئية المستدامة. يقع المبنى في مدينة سياتل بولاية واشنطن، وقد تم تصميمه ليعمل كمبني صفرى الطاقة، أي أنه ينتج من الطاقة ما يكفي لتشغيل جميع مراقبته دون الحاجة إلى مصادر طاقة خارجية. يعتمد المبنى بشكل أساسي على الألواح الشمسية التي تغطي سطحه بالكامل، حيث تعمل على توليد الكهرباء اللازمة لتشغيل جميع الأنظمة داخله، مما يقلل من الاعتماد على الشبكات الكهربائية التقليدية ويخفض الانبعاثات الكربونية بشكل كبير، وتم تصميم المركز بحيث يكون صديقاً للبيئة في كل تفاصيله، حيث يستخدم أنظمة متقدمة لجمع مياه الأمطار وتنقيتها، مما يتيح إعادة استخدامها في أنشطة المبني المختلفة مثل الري والاستهلاك الداخلي. كما تم تطوير نظام صرف صحي مغلق يعتمد على التحلل البيولوجي بدلاً من شبكات الصرف التقليدية، مما يقلل من استهلاك المياه ويحافظ على الموارد الطبيعية. ولتعزيز الاستدامة، تم استخدام مواد بناء ذكية غير سامة وقابلة لإعادة التدوير، مما يجعل المبني صحيّاً وأمناً لسكنائه، كما تم الاعتماد على تصاميم تعزز الإضاءة الطبيعية والتهدئة لنقليل الحاجة إلى التدفئة والتبريد الاصطناعي، كما يتميز المبني أيضاً بتقنيات ذكية للتحكم في الطاقة، حيث يتم ضبط الإضاءة والتهدئة تلقائياً بناءً على حركة الأفراد في الداخل، مما يعزز من كفاءة استهلاك الطاقة ويضمن توفير بيئية عمل مريحة. كما أن التصميم الداخلي للمبنى يعتمد على فلسفة الاستدامة، حيث تم إنشاء مساحات عمل مفتوحة تتيح التفاعل الاجتماعي والاستفادة القصوى من الإضاءة الطبيعية. يعتبر مركز "Bullitt Center" نموذجاً يحتدى به في مجال البناء المستدام، إذ يثبت أن المبني يمكن أن تكون مستقلة طاقوياً وبيئة دون التأثير على جودة الحياة داخلها، وهو ما يجعله نموذجاً يلهم المشاريع المستقبلية في مجال العمارة الخضراء.^٢

ويتميز مركز "Bullitt Center" بتصميم معماري يعزز التكامل بين الإنسان والبيئة، حيث يراعي أعلى معايير الراحة والكافأة التشغيلية. يعتمد المبنى على نهج التصميم التفاعلي، حيث تتكيف أنظمته الذكية مع الظروف المناخية المحيطة لتوفير بيئية داخلية مريحة بأقل استهلاك ممكن للطاقة. النوافذ الواسعة والمواد العازلة للحرارة تعمل معًا للحفاظ على درجات حرارة مستقرة داخل المبني، مما يقلل من الحاجة إلى أنظمة التدفئة والتبريد الاصطناعية، ويعزز في الوقت ذاته الاستفادة من الإضاءة الطبيعية، مما يخفض استهلاك الكهرباء، ويعتمد المبني على مفهوم "البصمة البيئية المنخفضة"، حيث تم تصميمه ليكون مستداماً على مدار ٢٥٠ عاماً، مما يجعله استثماراً طويل الأمد يقلل من الحاجة إلى عمليات الصيانة والتجديد المستمرة. كما تم اختيار مواد البناء وفقاً لمعايير بيئية صارمة، حيث تم استخدام مواد غير سامة وصديقة للبيئة، إضافة إلى الأخشاب المعتمدة من مصادر مستدامة، فإن مركز "Bullitt Center" يمثل تجربة رائدة في خلق بيئية عمل تعزز الإناتجية والرفاهية للعاملين فيه. تم تصميم المساحات الداخلية بشكل يتيح سهولة التواصل بين الأفراد، إضافة إلى توفير مناطق خضراء وأماكن استراحة داخل المبني، مما يساهم في تحسين جودة الحياة داخل بيوت العمل الحضرية. كما أن المبني يهدف إلى تثقيف المجتمع حول أهمية الاستدامة، من خلال تنظيم جولات تعليمية وبرامج توعوية تهدف إلى نشر الوعي حول تقنيات البناء الأخضر والعيش المستدام.

ويعد "Bullitt Center" مثالاً بارزاً للمبني المستدام الذي توظف الذكاء الاصطناعي لتحقيق كفاءة بيئية وطاقة عالية، مما يجعله نموذجاً رائداً في العمارة الخضراء. يعتمد المبني على أنظمة ذكية تراقب وتحكم في استهلاك الطاقة والمياه والموارد الأخرى، مما يسمح بتحقيق أقصى استفادة من

^١ Norsa, A. (2019). Horizontality/verticality: research paths and themes for the project. TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment, p47-51.

^٢ Doub, S., Hanford, J., Sprug, M., Hellstern, C., & Misel, K. (2019). Living Buildings: The Bullitt Center. In Architecture and Health (pp. 260-279). Routledge.

الموارد الطبيعية وتقليل التأثير البيئي السلبي. إذ يعمل الذكاء الاصطناعي في هذا المبني على تحليل البيانات في الوقت الحقيقي لضبط أداء الأنظمة المختلفة، مثل التهوية والتدفئة والإضاءة، بناءً على ظروف الطقس الخارجي وسلوك المستخدمين داخل المبني، ومن أهم المزايا التي تجعل هذا المبني نموذجًا للمباني الذكية المستدامة هو استخدامه لنظام إدارة الطاقة المعتمد على الذكاء الاصطناعي، حيث يقوم هذا النظام بمراقبة كمية الطاقة المستهلكة يومياً ويعدل عمليات التشغيل لتحقيق التوازن بين الإنتاج والاستهلاك. يتم تشغيل المبني بالكامل باستخدام الطاقة الشمسية، حيث تُستخدم الخلايا الكهروضوئية المثبتة على السطح لتوليد الكهرباء اللازمة لتشغيل كافة مراقباته. يقوم الذكاء الاصطناعي بإدارة توزيع هذه الطاقة بناءً على احتياجات المستخدمين، مما يضمن كفاءة عالية وتحقيق الهدر، ويتمتع المبني بنظام تهوية ذكي يعتمد على الذكاء الاصطناعي لتحليل جودة الهواء الداخلي وضبط تدفق الهواء تلقائياً. هذا النظام يراقب مستويات ثاني أكسيد الكربون والرطوبة ودرجات الحرارة الداخلية، ويبوّجه فتحات التهوية وفقاً لذلك لضمان بيئة داخلية صحية. كما يساهم هذا النظام في تقليل الاعتماد على التدفئة والتبريد الاصطناعي، مما يحقق كفاءة طاقوية أعلى ويقلل من الانبعاثات الكربونية¹.

أما فيما يخص استهلاك المياه، فإن "Bullitt Center" يعتمد على نظام ذكي لجمع مياه الأمطار ومعالجتها، مما يتتيح إعادة استخدامها في عمليات الري والصرف الصحي. يقوم الذكاء الاصطناعي بمراقبة مستويات المياه وتوزيعها بفعالية، بحيث يتم استغلال كل قطرة مياه بأقصى كفاءة ممكنة. كما يتتكامل هذا النظام مع نظام الصرف الصحي المغلق الذي يعتمد على عمليات التحلل البيولوجي لمعالجة المخلفات دون الحاجة إلى شبكات صرف تقليدية، مما يقلل من استهلاك المياه ويعزز الموارد الطبيعية، ومن ناحية الإضاءة، يعتمد المبني على تقنيات الذكاء الاصطناعي لضبط مستوى الإضاءة الداخلية وفقاً لكمية الضوء الطبيعي المتاحة. حيث تقوم الحساسات الذكية بقياس شدة الإضاءة الخارجية وتعديل تشغيل وحدات الإضاءة الداخلية بناءً على ذلك، مما يضمن توفير الطاقة دون التأثير على راحة المستخدمين. بالإضافة إلى ذلك، تم تصميم النوافذ بحيث تسمح بدخول أكبر قدر ممكن من الضوء الطبيعي، مما يقلل الحاجة إلى استخدام الإضاءة الاصطناعية خلال النهار، ويتميز أيضاً بقدرته على التكيف مع أنماط استخدام السكان من خلال أنظمة تحليل البيانات التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي. تقوم هذه الأنظمة بجمع وتحليل البيانات حول حركة الأفراد داخل المبني، وتعديل أنظمة التدفئة والتبريد والإضاءة بناءً على معدلات الإشغال. على سبيل المثال، عندما يكون عدد الأشخاص في منطقة معينة من المبني منخفضاً، يتم تقليل تشغيل أنظمة التدفئة أو التبريد في تلك المنطقة تلقائياً، مما يقلل من استهلاك الطاقة دون التأثير على راحة المستخدمين.

يعتبر الذكاء الاصطناعي في هذا المبني أداة رئيسية لتحقيق أقصى قدر من الاستدامة من خلال التنبؤ بالاحتياجات المستقبلية وإجراء التعديلات اللازمة لضمان كفاءة التشغيل. حيث يتم استخدام خوارزميات تعلم الآلة لتحليل البيانات السابقة والتنبؤ بأنماط استهلاك الطاقة والمياه في المستقبل، مما يساعد في تحسين أداء المبني بمرور الوقت. على سبيل المثال، إذا أظهرت البيانات أن فصول الشتاء القادمة ستكون أكثر برودة، يمكن لنظام الذكاء الاصطناعي اقتراح تعديلات على أنظمة التدفئة لتحسين كفاءتها وتقليل استهلاك الطاقة خلال تلك الفترة، فمن الناحية الاجتماعية، يسهم استخدام الذكاء الاصطناعي في تحسين جودة حياة المستخدمين داخل المبني من خلال توفير بيئة داخلية صحية ومرحة. حيث تعمل الأنظمة الذكية على تقليل الضوضاء الداخلية وضبط مستويات الرطوبة ودرجة الحرارة بما يتاسب مع احتياجات المستخدمين، مما يعزز من تجربة العمل داخل المبني ويزيد من الإنتاجية. كما أن توظيف

¹ Mariano, M. (2018). A High-Performance Building for Cohousing: From Vision to Move-In. Communities, v(179), p36-41.

الذكاء الاصطناعي في تحسين جودة الهواء الداخلي يحد من تأثير الملوثات، مما يقلل من المشكلات الصحية المرتبطة بجودة الهواء داخل المكاتب^١.

ومن منظور اقتصادي، يُظهر "Bullitt Center" كيف يمكن للمبني الذكي المستدام أن تتحقق وفورات مالية كبيرة على المدى الطويل. فبالرغم من أن تكلفة إنشاء مثل هذه المبني قد تكون مرتفعة نسبياً، إلا أن تقليل استهلاك الطاقة والمياه، بالإضافة إلى انخفاض تكاليف الصيانة والتشغيل، يجعل الاستثمار فيها مجدياً اقتصادياً. إذ يتتيح الذكاء الاصطناعي تحسين كفاءة التشغيل وتقليل الحاجة إلى التدخل البشري المستمر في إدارة المبني، مما يؤدي إلى تقليل التكاليف التشغيلية وتحقيق عائد استثماري مرتفع، ويساهم في تعزيز مفهوم المبني المستدام كحل لمشكلات البيئة الحضرية، حيث يوضح كيف يمكن دمج التقنيات الذكية لتحقيق التوازن بين الاحتياجات البشرية وحماية البيئة. إذ يمكن تعميم هذه التجربة على مشاريع أخرى تهدف إلى بناء مدن أكثر استدامة وكفاءة، مما يساعد في تقليل التأثير البيئي للمبني التقليدية ويشجع على استخدام مصادر الطاقة المتعددة، فهو يمثل نموذجاً متكاملاً لكيفية توظيف الذكاء الاصطناعي في بناء مبانٍ مستدامة قادرة على التكيف مع الاحتياجات المتغيرة للمستخدمين مع تحقيق كفاءة عالية في استهلاك الموارد.

النتائج

أولاً، من الناحية التقنية والبيئية، أثبتت الدراسة أن استخدام المواد الذكية مثل الزجاج الذكي، والخرسانة ذاتية الإصلاح، والعزل الحراري المتكيف مع تغيرات الطقس يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة بشكل كبير، حيث تعمل هذه المواد على تنظيم الحرارة داخل المبني وتقليل الحاجة إلى التبريد أو التدفئة الاصطناعية. كما أظهرت البيانات المستخلصة من التطبيقات العملية أن استخدام أنظمة استشعار ذكية للتحكم بالإضاءة والتهوية يساهم في تحسين جودة الهواء الداخلي، مما ينعكس إيجابياً على صحة المستخدمين وكفاءة استخدام الموارد الطبيعية.

ثانياً، من الناحية الاقتصادية، أكدت الدراسة أن الاستثمار في المواد الذكية في البناء قد يكون مرتفعاً في البداية، إلا أن العوائد الاقتصادية على المدى الطويل تعوض هذه التكلفة من خلال خفض استهلاك الطاقة وتقليل نفقات الصيانة. كما أظهرت المقارنات بين المبني التقليدية والمبني المستدام الذكية أن الأخيرة تحقق وفورات تصل إلى (٣٠-٥٠%) في استهلاك الطاقة، مما يجعلها خياراً اقتصادياً مستداماً للمستثمرين وأصحاب المشاريع العقارية.

ثالثاً، من الناحية الاجتماعية والوظيفية، أثبتت الدراسة أن المبني الذكي التي تعتمد على مواد مستدامة توفر بيئة أكثر راحة للسكان والعاملين، مما يعزز الإنتاجية والصحة العامة. كما أن استخدام الذكاء الاصطناعي في تصميم المبني وإدارتها يسهل عمليات الصيانة ويزيد من عمر المبني الافتراضي، مما يساهم في تقليل النفايات الإنسانية وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. كما لوحظ تزايد القبول المجتمعي لاستخدام هذه التقنيات، خصوصاً في المناطق التي تعاني من تحديات بيئية أو ارتفاع في تكاليف الطاقة.

رابعاً، من ناحية القوانين والسياسات، كشفت الدراسة أن هناك حاجة إلى تحديث التشريعات لتشجيع استخدام المواد الذكية في البناء، من خلال تقديم حوافز المالية للمطورين العقاريين، وفرض معايير إلزامية للكفاءة الطاقة في التصميمات الهندسية. كما أن دمج الاستدامة في السياسات الحضرية سيساعد في نشر هذه التقنيات على نطاق أوسع وتعزيز التحول نحو مدن أكثر ذكاءً واستدامة.

Mu, H. (2024, January). Analyzing the Existing Problems in the Operation and Management of Green Public Buildings. In 2023 2nd International Conference on Public Service, Economic Management and Sustainable Development (pp. 103-115). Atlantis Press.

الوصيات

تشير الدراسة إلى أهمية تعزيز البحث والتطوير في مجال المواد الذكية المستخدمة في البناء، حيث يجب الاستثمار في التقنيات الحديثة التي تساهم في تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الأثر البيئي للمبني. من الضروري أن تتبني الحكومات سياسات داعمة لاستخدام هذه المواد، مثل تقديم حوافز مالية للمطورين العقاريين الذين يعتمدون على تقنيات مستدامة، وتحديث اللوائح والمعايير المتعلقة بكفاءة الطاقة في البناء. كما توصي الدراسة بضرورة إدراج مفهوم الاستدامة والذكاء الاصطناعي في المناهج التعليمية للهندسة المعمارية والتصميم الداخلي، وذلك لضمان إعداد جيل من المهندسين والباحثين القادرين على التعامل مع تحديات المستقبل في قطاع البناء، ومن المهم تعزيز التعاون بين القطاعين العام والخاص لتطوير استراتيجيات مبتكرة في تصميم المبني المستدامة، مع التركيز على التكامل بين التكنولوجيا والعمارة لتحقيق أعلى كفاءة ممكنة في استهلاك الطاقة. كما ينبغي العمل على رفع مستوى الوعي المجتمعي حول فوائد استخدام المواد الذكية في البناء، من خلال حملات توعوية وورش عمل تسلط الضوء على المزايا البيئية والاقتصادية لهذه التقنيات.

وتوصي الدراسة أيضاً بأهمية إنشاء مشاريع تجريبية في المناطق الحضرية لقياس التأثير الفعلي لاستخدام المواد الذكية على استهلاك الطاقة، مع توثيق النتائج وإتاحتها للباحثين والمخصصين لدعم اتخاذ القرارات المستنيرة في هذا المجال. كما أن دعم الشركات الناشئة المتخصصة في تطوير تقنيات البناء الذي يمكن أن يسهم في تسريع التحول نحو بيئه عمرانية أكثر كفاءة واستدامة. أخيراً، يجب أن يكون هناك توجّه استراتيجي لدمج تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في تصميم المبني، بحيث يتم تحسين أداء الهياكل الذكية بشكل مستمر بناءً على البيانات الحية، مما يضمن تحقيق أعلى مستويات الكفاءة الطاقوية والاستدامة البيئية.

المراجع العربية

١. شرف، سالمة أحمد محمود. (٢٠٢٤م). تقييم استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحقيق الاستدامة البيئية. المجلة المصرية لبحوث الأعلام، ع(٨٩)، ص ٨٤٣-٨٧٢.
٢. عبد العظيم الشيخ، ح. م.، حماده محمد، ابوالفتوح، محمد عبد الرؤوف، أبوضيف علي، اسلام احمد. (٢٠١٧م). الاستدامة في مجال الإنشاء والبناء (دراسة: دراسة تقييم قواعد البيانات). مجلة القطاع الهندسي بجامعة الأزهر، ع(٤٢)، ص ٤١٣-٤٢٨.
٣. احمد السعيد موافي، م.، مصطفى، صادق احمد، حمدي، عبد الصبور. (٢٠٢٢م). استخدام نموذج معلومات بناء BIM في تحكم في تكلفة المباني خلال مرحلة التصميم. مجلة البحث الهندسية، ع ١٧٤، ص ١٠٨-١٢٨.
٤. قمر، م.، شبكة، ن.، ومذكور، م. و. (٢٠٢٢م). مواد البناء الذكية نحو مباني صحية بيئية – (دراسة حالة: وحدة المرضى بالمستشفيات) مواد البناء الذكية نحو مباني صحية بيئية – دراسة حالة: وحدة المرضى الداخليين في المستشفيات. مجلة البحث الهندسية، ع (٤)، ص ٢٣١-٢٤٧.
٥. رشدي عبد الرزاق خليل. (٢٠٢٤م). منهجهات العمارة الذكية وتأثيرها الإيجابي على زيادة القدرة الإنتاجية لشاغلي الفراغات الإدارية. مجلة الفنون والعلوم الإنسانية، ع(١٤)، ص ٤٢-٤٦٢.
٦. حسن عبد الرحمن، سعيد، ماجد القصبي، نيرمين. (٢٠٢٤م). أثر العمارة المستدامة والتصميم الذكي على التصميم الداخلي للمستشفيات العامة في مصر. المجلة العربية الدولية للفن والتصميم الرقمي، ع(٤)، ص ١٣٩-١٥٦.
٧. رشدي عبد الرزاق خليل. (٢٠٢٤م). منهجهات العمارة الذكية وتأثيرها الإيجابي على زيادة القدرة الإنتاجية لشاغلي الفراغات الإدارية، مرجع سابق، ص ٤٤٢-٤٦٢.
٨. قمر، م.، شبكة، ن.، ومذكور، م. و. (٢٠٢٢م). مواد البناء الذكية نحو مباني صحية بيئية – (دراسة حالة: وحدة المرضى بالمستشفيات) مواد البناء الذكية نحو مباني صحية بيئية – دراسة حالة: وحدة المرضى الداخليين في المستشفيات، مرجع سابق، ص ٢٣١-٢٤٧.
٩. عبدالباسط الفيتوري، محمد الفرجاني. (٢٠٢٣م). التكيف مع الاستدامة البيئية في المساكن التقليدية بالمدن النفطية الليبية: غدامس كحاله. مجلة العلوم الإنسانية والتطبيقية، ع(١٥)، ص ١٦٣-١٧٥.
١٠. عبد المنعم عبد الحي. (٢٠٢٤م). أثر البحث العلمي والتكنولوجيا والابتكار في الطاقات المتتجدة في العالم العربي. المجلة العربية للعلوم التربوية والتكنولوجية، ع(٢)، ص ٤٥-٨٢.

المراجع الإنجليزية

1. George Bassili Hanna. (2015)." Energy Efficiency Building Codes and Green Pyramid Rating System". International Journal of Science and Research (IJSR). Volume 4 Issue p2319-7064.
2. -Diener, E. Suh, E.)1997(. "Measuring quality of life: Economic, social, and subjective indicators", Social Indicators Research, 40(1), p. 189-216.
3. -Kondratiuk-Nierodzińska, M.(2016), "New Knowledge Generation Capabilities and Economic Performance of Polish Regions", Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy, 11(3), p. 451-471.
4. Wackernagel, M., Yount, J. D. 1998. "The ecological footprint: an indicator of progress toward regional sustainability", Environmental Monitoring and Assessment, 51(1-2), p. 511-529.
5. Amadeo, M., Cicirelli, F., Guerrieri, A., Ruggeri, G., Spezzano, G., Vinci, A. (2023). When edge intelligence meets cognitive buildings: The COGITO platform. Internet of Things, v 24, p1-17
6. Norsa, A. (2019). Horizontality/verticality: research paths and themes for the project. TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment, p47-51.
7. Doub, S., Hanford, J., Sprug, M., Hellstern, C., & Misel, K. (2019). Living Buildings: The Bullitt Center. In Architecture and Health (pp. 260-279). Routledge.
8. Mariano, M. (2018). A High-Performance Building for Cohousing: From Vision to Move-In. Communities, v (179), p36-41.
9. Wang, J., Chen, D., Yang, Z., Feng, Y., Geng, L., Zhang, Y., Mu, H. (2024, January). Analyzing the Existing Problems in the Operation and Management of Green Public Buildings. In (2023) 2nd International Conference on Public Service, Economic Management and Sustainable Development (pp. 103-115). Atlantis Press.