Journal of Al-Azhar University Engineering Sector

Vol. 20, No. 74, January 2025, 338- 350

INNOVATIVE DESIGN AND BUILDING TECHNIQUES AS AN INTRODUCTION TO LOW ENERGY ARCHITECTURE

Heba Abdel Salam Youssef

Department of Architecture, Pyramids Higher Institute of Engineering and Technology

***Correspondence:** enghebayousef19@gmail.com

Citation:

H.A.Youssef, "Innovative Design And Building Techniques As An Introduction to Low Energy Architecture", Journal of Al-Azhar University Engineering Sector, vol. 20, pp. 338 - 350, 2025.

Received: 22 August 2024

Revised: 26 September 2024

Accepted: 22 October 2024

Doi: 10.21608/auej.2024.316695.1706

Copyright © 2025 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International Public License (CC BY-SA 4.0)

ABSTRACT

Environmental responsibility has become a pivotal force in architecture shaping the contemporary landscape of building practices. Demand for low-carbon, energy-efficient buildings has surged against the backdrop of pressing global challenges such as climate change and the depletion of natural resources. This has led to the emergence of the field of low-carbon architecture, a discipline that not only cares about aesthetics but also prioritizes environmental harmony and energy conservation. The study therefore provides a comprehensive review of innovative design and construction techniques in low-carbon architecture in general, with a particular focus on strategies that enhance energy efficiency. As the world grapples with the need to mitigate the environmental impact of urban expansion, architects are increasingly turning to forward-thinking solutions to create buildings that not only meet the functional and aesthetic needs of occupants but also address the planet's concerns. The study explores a range of approaches, from passive design principles that harness natural elements to advanced technologies that optimize energy consumption. By examining the integration of sustainable materials, construction methodologies, and advanced technologies, this review aims to provide a nuanced understanding of how innovative design and construction techniques can contribute to the creation of environmentally responsible structures. From the use of recycled materials to the integration of renewable energy sources, every aspect of green architecture is examined for its potential to revolutionize the way we envision, design, and build structures in the 21st century. Navigating this exploration, our goal is to contribute to the growing body of knowledge that informs and inspires construction professionals, policymakers, and researchers. By synthesizing current trends, challenges, and achievements, this review seeks to pave the way for a sustainable future where architecture seamlessly blends with the environment.

KEYWORDS: Zero carbon, Sustainable Building, Sustainable, Zero emissions.

التصميم المبتكر وتقنيات البناء كمدخل للعمارة منخفضة الطاقة

هبة عبدالسلام يوسف

قسم الهندسة المعمارية – معهد الأهرامات العالي للهندسة والتكنولوجيا

البريد الإليكتروني للباحث: enghebayousef19@gmail.com

الملخص

أصبحت المسؤولية البيئية قوة محورية في مجال الهندسة المعمارية تشكل المشهد المعاصر لممارسات البناء. وقد ارتفع الطلب على المباني منخفضة الكربون والموفرة للطاقة على خلفية التحديات العالمية الملحة مثل تغير المناخ واستنزاف الموارد الطبيعية. مما أدى إلى ظهور مجال الهندسة المعمارية منخفضة الكربون، وهو نظام لا يهتم بالناحية الجمالية فحسب، بل يعطي أيضًا الأولوية للتناغم البيئي والحفاظ على الطاقة. لذا قدمت الدراسة مراجعة شاملة لتقنيات التصميم والبناء المبتكرة في مجال العمارة منخفضة الكربون بشكل عام والتركيز بشكل خاص على الاستراتيجيات التي تعزز كفاءة الطاقة. بينما يتصارع العالم مع ضرورة التخفيف من الأثر البيئي للتوسع الحضري، يتجه المعماريون بشكل متزايد إلى حلول تفكير تقدمي لإنشاء مباني لا تلبي الاحتياجات الوظيفية والجمالية للشاغلين فحسب بل تتعامل أيضًا مع مشكلات الكوكب.وتستكشف الدراسة مجموعة من الأساليب، بدءًا من مبادئ التصميم السالب التي تسخر العناصر الطبيعية إلى التقنيات المتقدمة التي تعمل على تحسين استهلاك الطاقة. من خلال دراسة تكامل المواد المستدامة ومنهجيات البناء والتقنيات المتطورة، تهدف هذه المراجعة إلى توفير فهم دقيق لكيفية مساهمة تقنيات التصميم والبناء المبتكرة في إنشاء هياكل مسؤولة بيئيًا. من استخدام المواد المعاد

تدويرها إلى دمج مصـــادر الطاقة المتجددة، يتم فحص كل جانب من جوانب العمارة الخضـــراء لقدرته على إحداث ثورة في الطريقة التي نتصور بها، ونصمم، ونبني الهياكل في القرن الحادي والعشرين. والتنقل في هذا الاستكشاف، هدفنا هو المساهمة في المعرفة المتنامية التي تُعلم وتلهم المهنيين في صـناعة البناء والتشـييد وواضـعي السـياسـات والباحثين. من خلال تجميع الإتجاهات والتحديات والإنجازات الحالية، وتسعى هذه المراجعة إلى تمهيد الطريق لمستقبل مستدام حيث تتناغم الهندسة المعمارية بسلاسة مع البيئة.

الكلمات المفتاحية : صفرية الكربون ، العمارة الخضراء ، المباني المستدامة ، الإستدامة ، صافي إنبعاثات.

١- المقدمة:

أصـبح خفض الإنبعاث الكربوني بالمباني من الإعتبارات الحتمية في ممارسـات البناء المعاصـرة، مدفوعة بالقلق العالمي المتصـاعد بشأن الإخلال بالتوازن البيئي وإستهلاك الطاقة. لذا تقدم هذه الدراسة مراجعة شاملة لتقنيات التصميم والبناء المبتكرة المستخدمة في مجال الهندسة المعمارية منخفضة الكربون لتعزيز كفاءة الطاقة. وتتعمق الدراسة في دمج مبادئ التصميم المستدام، مع التركيز على أهمية تقليل البصمة الكربونية للمباني. يوجد إستراتيجيات متنوعة مثل التصميم السلبي والأسطح الخضراء وأنظمة العزل الفعالة لإنشاء مباني تستغل الموارد الطبيعية بذكاء. لا تقلل هذه التقنيات من إستهلاك الطاقة فحسب، بل تساهم أيضًا في توفير بيئة داخلية أكثر صحة. كما تلعب مواد البناء المبتكرة دورًا محوريًا في العمارة منخفضة الطاقة، مع التركيز على استخدام المواد المعاد تدويرها والمحلية المصدر. وتشير الدراسة الي التقنيات الحديثة مثل الخرسانة الحيوية والمواد ذاتية المعالجة، والتي لا تعزز المرونة الهيكلية فحسب، بل تجسد أيضًا سمات صديقة للبيئة. علاوة على ذلك، تتم مناقشـــة اســـتخدام أنظمة البناء المتقدمة، مثل الشـــبكات الذكية وأنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء الموفرة للطاقة، لتحسين أداء الطاقة طوال دورة حياة المبنى. كما تسلط الدراسة الضوء على أهمية مصادر الطاقة المتجددة، مع التركيز على دمج الألواح الشـمسـية وتوربينات الرياح وغيرها من حلول الطاقة المسـتدامة في التصـاميم المعمارية. إن تكامل هذه التقنيات لا يعزز الإكتفاء الذاتي من الطاقة فحسب، بل يساهم أيضًا في التخفيض الشامل لإنبعاث الغازات الدفيئة. في النهاية، تتضمن الدراسة إستكشافًا شاملاً للعلاقة التكافلية بين العمارة منخفضـة الكربون وكفاءة الطاقة. من خلال دراسـة تقنيات التصـميم والبناء المتطورة، وبذلك تسـعى الدراسـة إلى تقديم رؤى يمكن أن تلهم الممارسات المستقبلية في مجال العمارة وتعزيز نهج مستدام يكافح المخاوف البيئية.

٢- المشكلة البحثية:

علي الرغم من السـعي الدائم علي إيجاد تقنيات تسـاعد علي حل المشـكلات البيئية وذلك لحماية البيئة والحفاظ علي الموارد والتي يتم تطويرها كل فترة تبعا للمعطيات والمتغيرات، إلا أنها لم تعطي الإهتمام بمؤشـر خفض الإنبعاثات الكربونية بالمباني كمؤشـر أسـاسـي أو معيار منفصل، وهذا ما يدعي للتسأول عن مدي توافر الإستراتيجيات والتقنيات المتاحة نحو تحقيق أهداف العمارة منخفضة الكربون، وهذا ما يتطلب الدراسة والمراجعة لتحديد التقينات المتاحة علي مستوي الهندسة المعمارية.

٣- الهدف من البحث:

يهدف البحث الي دراسـة لتقنيات التصـميم والبناء المبتكرة في مجال العمارة، مع التركيز بشـكل خاص على الإسـتراتيجيات التي تعزز كفاءة الطاقة نحو الخفض من الإنبعاثات خلال دورة الحياة للمباني. وذلك للسـعى إلى سـد الفجوة بين النظرية والتطبيق، وتوفير فهم عملي لكيفية تنفيذ تقنيات التصميم والبناء المبتكرة لإنشاء مباني ليست جذابة بصريًا فحسب، بل أيضًا مسؤولة بيئيًا وموفرة للطاقة.

٤- المباني منخفضة الكربون:(Zero Carbon Building (ZCB

يعبر المصـــطلح عن المباني منخفضـــة الكربون/ الطاقة، كما يســـتخدم المصـــطلح ZCB في بعض الأحيان بالتبادل مع العديد من المصـــطلحات ذات الصـــلة مثل البناء المســـتدام والبناء الأخضـــر. كما حددت دراســـة إســـتقصـــائية أجرتها منظمة لدعم العمل المشـــترك EPBD(Energy Performance of Building Directive)في عام ٢٠٠٨م ١٧ مصطلح مستخدم لوصف المباني منخفضة الكربون والطاقة علي مستوي العالم، ثم تم تزايد ذلك في تقرير العمل التالي للمنظمة، والذي قدم ٢٣ مصطلحًا مختلفًا لـــوصف المباني عالية الأداء للطاقة، وقد علق Erhorn and Erhorn Kluttig بأن هذه المصـطلحات، يمكن تصـنيفها على أنها تشـير إلى نطاق أوسـع وهو كما يلي [١٠]:

- إســـتهلاك منخفض للطاقة(منشـــأ منخفض الطاقة، موفر للطاقة، طاقة منخفض للغاية، طاقة بدون تدفئة، بدون طاقة ومكتفي ذاتيًا للطاقة).
- إنبعاثات منخفضة (منشأ خالٍ من الإنبعاثات ، خالٍ من الكربون).
- الجوانب المستدامة أو الخضراء (المباني البيئية، المباني الخضراء، المباني المستدامة، المباني والمناخ الحيوي: المبني النشط أو الفعال).

يمكن تصنيف المصطلح بإستخدام بعدين أساسين هما الطاقة والكربون تبعا للجانب الوصفي أو الأنشطة، وسيتم عرضها كما يلي[١٢]:

- المصـطلحات القائمة على الكربون/ الطاقة ضـمن نطاق محدد السـياق، مقسـم إلى قائم على إنبعاثات الكربون مثل ZCB وبناء إنبعاثات صفرية، وتستند إلى إستهلاك الطاقة مثلZEB .
- المصطلحات القائمة علي الكربون/ الطاقة ضمن نطاق السياق العام، على سبيل المثال دورة حياة ZCB وZEB .
- مصـــطلحات واســـعة النطاق مع نطاق أوســـع من الكربون/ الطاقة في ســـياق معين، على ســـبيل المثال المباني المعتمدة لـ BREEAM، البناء المستدام، البناء الأخضر والبناء البيئي وغيرها.

وفقا لتقرير العمل المنسق تم تعريف المبانيZCB على أنها المباني التي تسعي الي ترشيد إستهلاك الطاقة وبالتالي (تعمل علي خفض معدل إنبعاثات الكربون الصادرة عنها)، أو يمكن إعتبارها أنها مباني متوازنة سنويًا. في هذه الحالة سوف تستمر المباني تستهلك الطاقة، ولكنها تنتج في فترة زمنية واحدة من العام على الأقل نفس القدر من الطاقة التي تحتاجها خلال العام بأكمله.

٥- العلاقة بين العمارة منخفضة الكربون وكفاءة الطاقة بالمباني:

يخضع مجال الهندسة المعمارية لتحول عميق حيث يواجه التحديات الملحة التي يفرضها تغير المناخ، واستنزاف الموارد، والتدهور البيئي. تقليديا كانت الهندسة المعمارية مرادفة لإنشاء مباني غالبا ما تعطي الأولوية لمبادئ التصميم والوظيفة. ومع ذلك فقد شهد القرن الحادي والعشرون تحولًا نموذجيًا، مما أجبر المهندسين المعماريين على تبني نهج أكثر شمولية يعطي الأولوية للمسؤولية البيئية[٣]. فالعمارة ليست معزولة عن الأزمة البيئية العالمية. وهي في الواقع جزء لا يتجزأ من الحل. إن تقاطع العلاقة بين الهندسة المعمارية والمسؤولية البيئية يؤكد بأن البيئة المبنية تساهم بشكل كبير في إنبعاثات الكربون وإستهلاك الطاقة وإستنزاف الموارد. ومع تسارع التحضر في جميع أنحاء العالم أصبح الطلب على المباني منخفضة الكربون والموفرة للطاقة أمرًا ملحًا بشكل متزايد[٥].

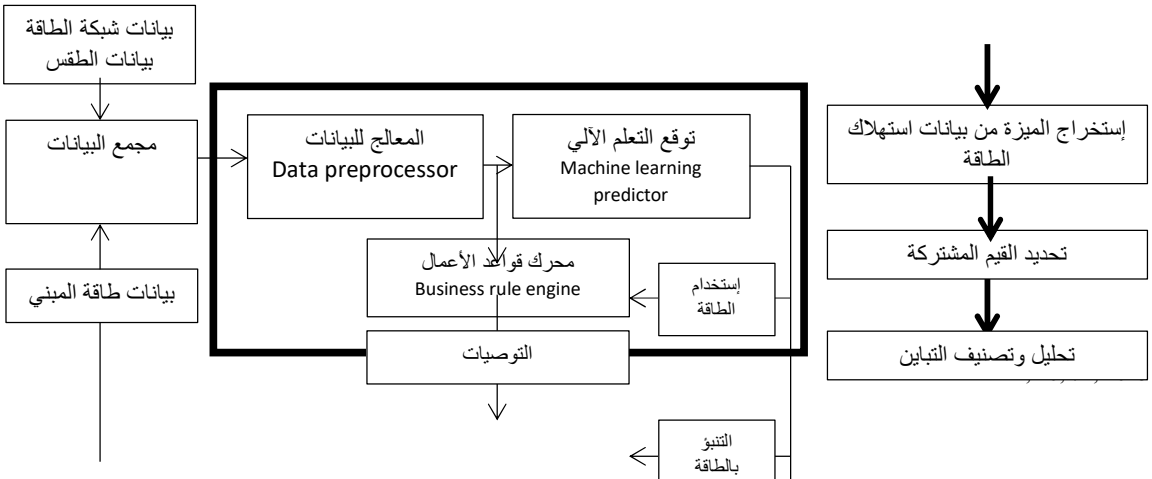
وفي السياق العالمي الحالي، لا يمكن المبالغة في التأكيد على ضرورة إنشاء المباني منخفضة الكربون. حيث يعد قطاع البناء مساهمًا رئيسيًا في إنبعاثات الغازات الدفيئة بنسبة ٣٩٪ من إجمالي الانبعاثات العالمية وفقًا لوكالة الطاقة الدولية[٧]. يمتد التأثير البيئي للمباني إلى ما هو أبعد من إنبعاثات الكربون التشغيلية ليشمل الكربون المتجسد في المواد وعمليات البناء كثيفة الإستهلاك للطاقة. علاوة على ذلك، فإن الطلب المتزايد على الطاقة، إلى جانب الطبيعة المحدودة لمصادر الطاقة التقليدية، يستلزم إعادة تقييم كيفية تصميم المباني وتشييدها وتشغيلها. كما إن المباني منخفضة الكربون لا تخفف الضرر البيئي فحسب، بل تعالج أيضًا الأهداف الأوسع المتمثلة في أمن الطاقة والمرونة والحفاظ على الموارد. كما إنها توفر طريقًا نحو إنشاء مناظر طبيعية حضرية تكون مسؤولة بيئيًا وقابلة للحياة إقتصاديًا على المدى الطويل [١٦]. الغرض الأساسي من هذه الدراسة هو تقديم مراجعة شاملة للتصميم وتقنيات البناء المبتكر المستخدمة في العمارة منخفضة الكربون مع التأكيد على دورها في تعزيز كفاءة الطاقة [١٨].

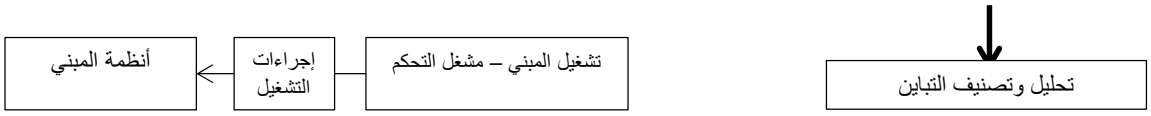
٦- مبادئ التصميم السلبي:

يعد التصميم السلبي من أسس العمارة منخفضة الكربون، حيث يعتمد على العناصر والمبادئ الطبيعية لتحسين كفاءة استخدام الطاقة داخل المباني. على عكس الأنظمة النشطة التي تتطلب تدخلًا ميكانيكيًا أو إلكترونيًا، يستفيد التصميم السلبي من الصفات المتأصلة للموقع والمناخ والمواد لإنشاء فراغات مريحة وموفرة للطاقة [١١]. و يعد التصميم الشمسي السلبي إستراتيجية أساسية تتضمن توجيه المباني لتحقيق أقصى قدر من إكتساب الطاقة الشمسية خلال أشهر الشتاء وتقليلها خلال فصل الصيف. ويتم تحقيق ذلك من خلال وضع النوافذ والأجزاء البارزة وعناصر التصميم الأخرى بشكل إستراتيجي لإلتقاط أو حجب أشعة الشمس. كما إن توظيف التهوية الطبيعية ينطوي على تصميم المباني لتسهيل حركة الهواء دون الحاجة إلى أنظمة ميكانيكية، يتضمن ذلك غالبًا النوافذ وفتحات التهوية الموضوعة بشكل إستراتيجي وإستخدام الرياح السائدة لتعزيز تدفق الهواء والحفاظ على بيئة داخلية مريحة [٨]، يؤدي تعظيم الضوء الطبيعي من خلال وضع النوافذ وتصميمها المدروس إلى تقليل الحاجة إلى الإضاءة الإصطناعية. لا يقلل ضوء النهار من إستهلاك الطاقة فحسب، بل يعزز أيضًا رفاهية الشاغل وإنتاجيته [٢٣].

يتضمن التصميم السلبي مواد ذات كتلة حرارية عالية، مثل الخرسانة أو الحجر لإمتصاص الحرارة وتخزينها وإطلاقها ببطء. ويساعد ذلك على تنظيم درجات الحرارة الداخلية عن طريق تقليل تقلبات درجات الحرارة، خاصة في المناطق ذات الظروف المناخية المختلفة. يساهم التصميم السلبي في تقليل آثار الكربون وتخفيف التأثير البيئي للمباني. يعمل التصميم السلبي الذي تم تنفيذه جيدًا على تعزيز الراحة الداخلية من خلال الحفاظ على درجات حرارة ثابتة، وتحسين الإضاءة الطبيعية، وتعزيز دوران الهواء النقي.

تتأثر فعالية التصميم السلبي بالظروف الخاصة بالموقع، مثل الجغرافيا والمناخ والمباني المحيطة، مما يشكل تحديات في مواقع معينة. قد يتطلب تنفيذ الإستراتيجيات السلبية تحولا في الممارسات المعمارية التقليدية. في حين أن التصميم السلبي يؤدي غالبًا إلى توفير التكاليف على المدى الطويل، فإن تكاليف التنفيذ الأولية قد تكون أعلى، مما يشكل تحديًا لبعض المشاريع ذات الميزانيات المحدودة [٢٠]. بالتالي تقف مبادئ التصميم السلبي في طليعة العمارة منخفضة الكربون، وتجسد التآزر والعلاقة بين السكن البشري والبيئة الطبيعية. ومن خلال تسخير العناصر الطبيعية بذكاء، فإن التصميم السلبي لا يعزز كفاءة إستخدام الطاقة فحسب، بل يعزز أيضًا التعايش المتناغم بين البيئات المبنية والنظم البيئية التي تعيش فيها. على الرغم من وجود تحديات، إلا أن الفوائد العديدة تؤكد أهمية دمج إستراتيجيات التصميم السلبي في مستقبل العمارة منخفضة الكربون بيئة مبنية أكثر إستدامة.





الشكل ١يوضح سير العمل التنبؤي لتحسين طاقة البناء والخطوط العريضة لتحديد القيم ونمذجة ملفات تعريف استهلاك الطاقة اليومية. [١٨]

٧- المواد المستدامة وطرق البناء:

تلعب مواد البناء المستدامة دورًا محوريًا في تقليل التأثير البيئي للبناء، ويعد إستخدام المواد المعاد تدويرها حجر الزاوية في ممارسات البناء المستدامة. يتضمن ذلك إعادة إستخدام مواد مثل الخشب المعاد تدويره، والفولاذ المعاد تدويره، والزجاج المعاد تدويره، وتحويلها من مدافن النفايات وتقليل الطلب على الموارد بشكل كبير. كما يعد الخشب المستصلح الذي يتم الحصول عليه من المباني المفككة أو التي تم إنتشالها من تطبيقات أخرى، بمثابة بديل صديق للبيئة للأخشاب الجديدة [١٤]. ومن خلال إعادة إستخدام الأخشاب الموجودة، يمكن لصناعة البناء أن تساهم في الحفاظ على الغابات وتقليل البصمة الكربونية المرتبطة بقطع الأشجار ومعالجة الأخشاب الجديدة، كما إن إستخدام الفولاذ المعاد تدويره في البناء يخفف من الأثر البيئي لإنتاج الصلب، الذي يستهلك الكثير من الطاقة. حيث يمكن صهر الفولاذ الخردة من الهياكل المهدمة أو المنتجات منتهية الصلاحية وإعادة تشكيلها إلى مكونات هيكلية، مما يوفر المتانة والقوة مع انخفاض البصمة البيئية.

تعزيز إستخدام الموارد المتاحة محليا وهذا لا يدعم الإقتصادات المحلية فحسب، بل يقلل أيضًا من إستهلاك الطاقة والإنبعاثات المرتبطة بالنقل. إن استخدام الحجر والأخشاب من المناطق المجاورة يقلل من التأثير البيئي المرتبط بالنقل لمسافات طويلة. يتوافق استخدام المواد الأصلية في موقع البناء أو المناطق المجاورة له مع مبادئ الإستدامة ويعزز الإرتباط بين البيئة المبنية وسياقها الطبيعي [٢٤].غالبًا ما يتضمن البناء إستخدام الركام مثل الحصى والرمل. إن إختيار الركام من مصادر محلية لا يقلل فقط من البصمة الكربونية المرتبطة بالنقل ولكنه يدعم أيضًا الإستخراج المسؤول لهذه المواد من المحاجر القريبة. يمثل البناء المعياري نقلة نوعية في منهجيات البناء، مع التركيز على الكفاءة وتقليل النفايات. يتضمن هذا النهج إنشاء مكونات المبنى خارج الموقع في بيئة خاضعة للرقابة قبل تجميعها في الموقع . [٢٥]

إن مواد وأساليب البناء المستدامة لها دور محوري في معالجة التحديات البيئية التي تفرضها ممارسات البناء التقليدية. يساهم دمج المواد المعاد تدويرها وإستخدام الموارد من مصادر محلية في توفير مجموعة مواد أكثر إستدامة، مما يقلل من إعتماد الصناعة على المواد الخام ويقلل من الإنبعاثات المرتبطة بالنقل. وفي الوقت نفسه، تعمل أساليب البناء المبتكرة مثل البناء المعياري والتصنيع المسبق على تبسيط العمليات، وتعزيز كفاءة الموارد، والتأكيد على التزام الصناعة بالممارسات الصديقة للبيئة. ومع استمرار تطور قطاع البناء، فإن تبني هذه المواد والأساليب المستدامة أمر بالغ الأهمية لتعزيز بيئة بناء مرنة ومسؤولة بيئيًا.

٨- التقنيات المتقدمة في العمارة الخضراء:

برزت التطورات التكنولوجية كمحفزات قوية لتحقيق كفاءة عالية في إستخدام الطاقة. ويقف إبتكاران رئيسيان، وهما الشبكات الذكية وأنظمة التشغيل الآلي للمباني، في بداية هذه الرحلة التحويلية [٩]. تمثل الشبكات الذكية نقلة نوعية في طريقة توليد الطاقة وتوزيعها وإستهلاكها داخل البيئة المبنية. تستفيد هذه الشبكات الكهربائية الذكية من تقنيات الإتصالات والمعلومات المتقدمة لتحسين إستخدام الطاقة وتعزيز موثوقية الشبكة ودمج مصادر الطاقة المتجددة بسلاسة. تتضمن الشبكات الذكية أنظمة الإستجابة للطلب التي تمكن المباني من التفاعل مع الشبكة الكهربائية بشكل ديناميكي. ويسمح ذلك بإجراء تعديلات في الوقت الفعلي على إستهلاك الطاقة بناءً على ظروف الشبكة وتقلبات الأسعار وتوافر الطاقة المتجددة. ومن خلال دمج مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في الشبكة، تسهل الشبكات الذكية الإنتقال نحو نظام بيئي أكثر إستدامة للطاقة. يمكن للمباني المجهزة بتقنيات الشبكة الذكية تسخير الطاقة المتجددة وتوزيعها بكفاءة، مما يقلل الإعتماد على مصادر الطاقة التقليدية. [١٥]

تجسد أنظمة أتمتة البناء (BAS) الترابط بين التكنولوجيا والهندسة المعمارية، مما يوفر تحكمًا مركزيًا في أنظمة البناء المختلفة لتحسين الأداء وإستخدام الطاقة. تتضمن BAS أنظمة إدارة طاقة متطورة تقوم بمراقبة وتحليل وتنظيم إستهلاك الطاقة داخل المبنى. يتضمن ذلك التحكم في أنظمة الإضاءة والتدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC) بناءً على الإشغال والوقت من اليوم والظروف البيئية. تكتشف أجهزة الإستشعار المتقدمة وأدوات التحكم التكيفية داخل أنظمة التشغيل الآلي للمبنى مستويات الإشغال وتضبط الإضاءة ودرجة الحرارة والتهوية وفقًا لذلك [٢١]. وهذا لا يعزز كفاءة إستخدام الطاقة فحسب، بل يساهم أيضًا في توفير بيئة داخلية أكثر راحة وإستجابة.

تمثل الخرسانة الحيوية نهجا لمواد البناء المستدامة، حيث تقدم العمليات البيولوجية لتعزيز متانة ومرونة الهياكل الخرسانية. تحتوي الخرسانة الحيوية على بكتيريا أو كائنات دقيقة قادرة على إنتاج الكالسيت، وهو معدن يمكنه ملء الشقوق في الخرسانة مع مرور الوقت. لا تعمل خاصية الشفاء الذاتي المتأصلة هذه على إطالة عمر الهياكل الخرسانية فحسب، بل تقلل أيضًا من الحاجة إلى الصيانة والإصلاحات المتكررة. تتضمن بعض تركيبات الخرسانة الحيوية كائنات حية دقيقة تمتص ثاني أكسيد الكربون بشكل فعال أثناء عملية الإنتاج، وتعمل كمخزن للكربون. تعمل هذه الوظيفة المزدوجة على موائمة الخرسانة الحيوية مع أهداف تقليل إنبعاثات الكربون المرتبطة بإنتاج الخرسانة التقليدية[٦].

وبعيدًا عن الخرسانة الحيوية، تشمل المواد ذاتية الشفاء فئة أوسع من المواد المبتكرة المصممة لإصلاح الضرر بشكل مستقل مع مرور الوقت. غالبًا ما تشتمل مواد الشفاء الذاتي على كبسولات دقيقة تحتوي على عوامل علاجية. عند حدوث ضرر، تنفجر هذه الكبسولات

الدقيقة، مما يؤدي إلى إطلاق عوامل الشفاء لإصلاح الشقوق وتخفيف نقاط الضعف الهيكلية. تساهم البوليمرات التي تتمتع بالقدرة على إعادة تنظيم بنيتها الجزيئية إستجابة للضرر في قدرات الشفاء الذاتي للمواد [١]. تعمل هذه الجودة التكيفية على تعزيز مرونة الهياكل وطول عمرها في مواجهة الضغوطات البيئية.

إن إدخال التقنيات المتقدمة في الهندسة المعمارية الخضراء يدفع الصناعة نحو مستويات غير مسبوقة من الإستدامة وكفاءة الطاقة. تُحدث الشبكات الذكية وأنظمة أتمتة المباني ثورة في طريقة تفاعل المباني مع شبكات الطاقة، مما يؤدي إلى تحسين الإستهلاك ودمج المصادر المتجددة بسلاسة. ومن ناحية أخرى، تبشر التكنولوجيا الناشئة مثل الخرسانة الحيوية والمواد ذاتية الشفاء بعصر جديد من المتانة وكفاءة إستخدام الموارد، وتَعِد بإعادة تشكيل نسيج مواد البناء ذاته. ومع إستمرار تطور هذه التقنيات، فإنها تمتلك القدرة على إعادة تعريف مشهد العمارة الخضراء، وتقديم حلول تتوافق مع مقتضيات المسؤولية البيئية والسعي إلى بيئة مبنية أكثر استدامة.

٩- تكامل الطاقة المتجددة:

يمثل دمج مصادر الطاقة المتجددة في التصاميم المعمارية تحولاً محورياً نحو بيئة مبنية أكثر إستدامة ووعياً بالبيئة. ومن خلال تسخير قوة الموارد المتجددة، يمكن للمباني أن تساهم بشكل فعال في الحد من إنبعاثات الكربون وتعزيز كفاءة إستخدام الطاقة بشكل عام. تعتبر الألواح الشمسية، أو الخلايا الكهروضوئية، حجر الزاوية في تكامل الطاقة المتجددة في الهندسة المعمارية. تلتقط هذه الألواح ضوء الشمس وتحوله إلى كهرباء، مما يوفر مصدر طاقة نظيفًا ومستدامًا. تدمج التصاميم المعمارية بشكل متزايد الألواح الشمسية في هياكل المباني، من أسطح المنازل إلى الواجهات، مما يؤدي إلى دمجها بسلاسة في الجوانب الجمالية والوظيفية للبناء. تأخذ الخلايا الكهروضوئية المدمجة في البناء التكامل الشمسي خطوة أخرى إلى الأمام من خلال دمج العناصر الشمسية بسلاسة في العناصر المعمارية المختلفة.

تمثل توربينات الرياح وجهًا آخر لتكامل الطاقة المتجددة، خاصة في المناطق التي تتمتع بموارد الرياح الكافية. يتم أخذ توربينات الرياح ذات المحور العمودي (VAWT) في الإعتبار بشكل متزايد في المناطق الحضرية نظرًا لتصميمها المدمج وقدرتها على تسخير الرياح من أي إتجاه. تتكيف التصاميم المعمارية لدمج VAWTs على أسطح المنازل أو دمجها في هيكل المبنى، مما يوفر مصدرًا إضافيًا للطاقة المتجددة. يستكشف المهندسون المعماريون تصميمات مبتكرة تستفيد من أشكال الرياح المدمجة في الهندسة المعمارية للمبنى. هذه الهياكل لا تولد الكهرباء فحسب، بل تساهم أيضًا في المظهر الجمالي للمبنى. يُظهر دمج أشكال الرياح إمكانية التآزر بين إنتاج الطاقة المستدامة والإبداع المعماري [٢].

يؤدي دمج مصادر الطاقة المتجددة إلى تعزيز إستدامة البناء بشكل عام من خلال تعزيز إستقلالية الطاقة وكفاءتها. تعمل الألواح الشمسية وتوربينات الرياح على توليد الكهرباء النظيفة في الموقع، مما يقلل الإعتماد على مصادر الطاقة التقليدية ويقلل من التأثير البيئي المرتبط بتوليد الطاقة المعتمدة على الوقود الأحفوري. أحد أهم تأثيرات تكامل الطاقة المتجددة هو التخفيض الكبير في لإنبعاثات الكربون. ومن خلال الإعتماد على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، يمكن للمباني أن تساهم في التخفيف من تغير المناخ عن طريق تجنب إطلاق الغازات الدفيئة المرتبطة بإنتاج الطاقة التقليدية. ويتماشى هذا مع الجهود العالمية للإنتقال نحو مستقبل منخفض الكربون ومستدام. كما يسمح تكامل الطاقة المتجددة بتطوير مباني الطاقة الإيجابية والطاقة الإيجابية[١٧]. تولد المباني ذات صافي الصفر من الطاقة نفس القدر الذي تستهلكه، مما يحقق التوازن بين إنتاج الطاقة وإستهلاكها.

تعمل المباني المجهزة بمصادر الطاقة المتجددة على تعزيز المرونة والموثوقية في مواجهة إنقطاع شبكات الطاقة التقليدية [١٣]. ومن خلال توليد الكهرباء في الموقع، يمكن لهذه المباني الإستمرار في العمل بشكل مستقل أثناء انقطاع الشبكة، مما يضمن العمليات الحيوية ويحافظ على درجة من الإكتفاء الذاتي. وتذهب مباني الطاقة الإيجابية إلى أبعد من ذلك، حيث تنتج طاقة أكثر مما تحتاج إليه وتساهم في إعادة الطاقة الزائدة إلى الشبكة. تجسد هذه المفاهيم قدرة المباني ليس فقط على أن تكون موفرة للطاقة ولكن أيضًا على أن تكون مساهمًا نشطًا في النظام البيئي للطاقة.وفي حين أن الإستثمار الأولي في البنية التحتية للطاقة المتجددة قد ينطوي على تكاليف، فإن الجدوى الإقتصادية على المدى الطويل أمر مقنع. يساهم تقليل الإعتماد على شبكة الكهرباء وتوليد الإيرادات المحتملة من خلال صادرات الطاقة الزائدة في تحقيق وفورات مالية طويلة الأجل، مما يجعل تكامل الطاقة المتجددة خيارًا مستدامًا إقتصاديًا.

إن دمج مصادر الطاقة المتجددة في التصاميم المعمارية يمثل قفزة تحويلية نحو المباني المستدامة والمرنة. إن التآزر بين التقنيات المبتكرة مثل الألواح الشمسية وتوربينات الرياح مع الإبداع المعماري لا يعزز الجاذبية الجمالية للمبنى فحسب، بل يضعه أيضًا كمشارك نشط في الدفع العالمي نحو إعتماد الطاقة المتجددة. ويؤكد التأثير على إستدامة البناء بشكل عام، بدءًا من تقليل إنبعاثات الكربون إلى تعزيز إستقلال الطاقة، على أهمية دمج حلول الطاقة المتجددة في المشهد المعماري. ومع إستمرار تطور هذا الإتجاة، فإنه لديه القدرة على إعادة تعريف جوهر المباني - من الهياكل السلبية إلى المساهمين الديناميكيين في مستقبل أكثر إستدامة ووعيًا بالبيئة.

١٠- دراسات الحالة:

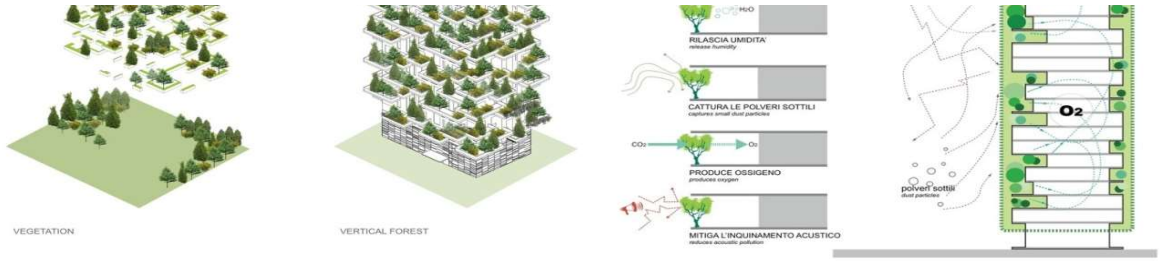
شـكل (٢) الغابة العمودية Bosco Verticale، ميلانو، Stefano

تقدم دراســـات الحالة الواقعية رؤى قيمة حول التطبيق العملي ونجاح تقنيات التصميم والبناء المبتكرة في مجال الهندسة المعمارية الخضراء. يتيح لنا فحص المشـــاريع المثالية فهم كيفية ترجمة هذه التقنيات من النظرية إلى الممارسة، وتشكيل بيئات مبنية مستدامة. تعدBosco Vertical ، أو الغابة العمودية، مثالًا مبدعًا للهندسة المعمارية الخضراء في المناطق الحضرية. تم تصميم هذه الأبراج السكنية من قبل شركةStefano Boeri Architects ، وهي تضم مساحات خضراء واسعة، بما في ذلك الأشجار والشجيرات، في كل شرفة. ويهدف المشروع إلى مواجهة الزحف العمراني، والحد من تلوث الهواء، وتعزيز التنوع البيولوجي. يمكن دمج المناظر الطبيعية العمودية بنجاح في البيئات الحضرية عالية الكثافة، مما يعزز الإستدامة دون التضحية بمساحات المعيشة. يساهم دمج النباتات للمباني في تحسين جودة الهواء ويوفر موطنًا للحياة البرية في المناطق الحضرية.

شكل (٣) موقع عام Bosco Verticale يوضح نسبة المسطحات الخضراء والإهتمام بهذا الجانب البيئي بالمشروع. [٢٦]

شكل (٤) يوضح تعزيز المبني بالأشجار والشجيرات في كل شرفة لإضافة اللمسة الطبيعية والجمالية الي جانب الحد من التلوث.[٢٦]

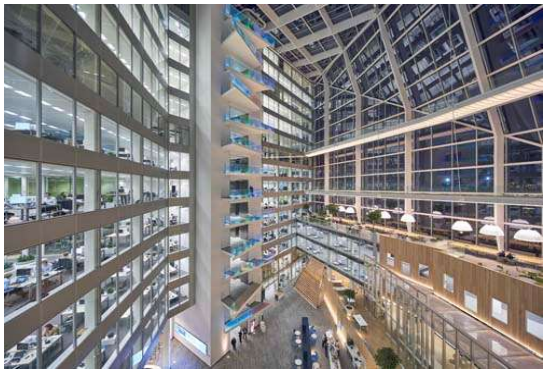
شكل (٦) The Edge ، هولندا، PLP Architecture، ٢٠١٥. [٢٧]



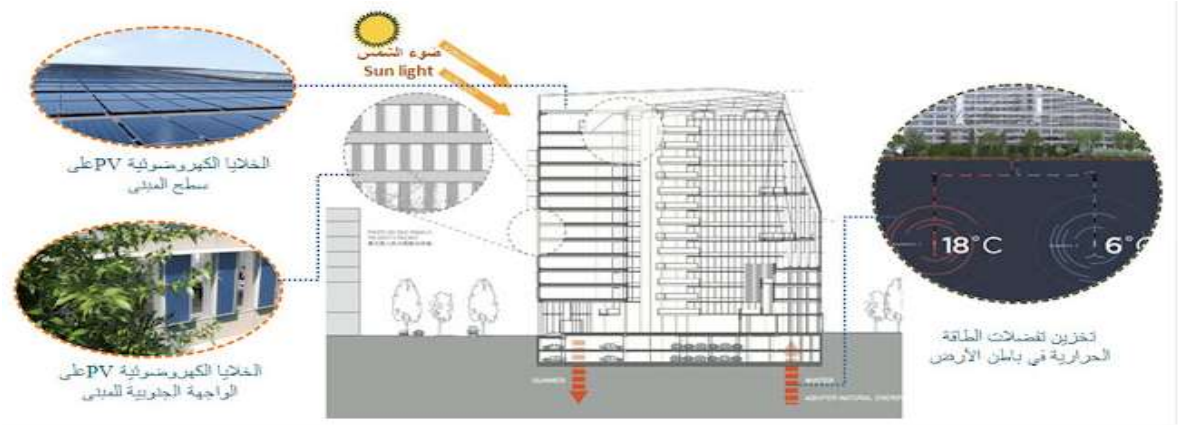
شكل (٥) يوضح نسبة المسطحات الخضراء علي المستوي الرأسي للمشروع ومردود ذلك علي المعالجة البيئة من خفض معدل الإنبعاث الكربوني الناتج عن عملية البناء الضوئي للنباتات المستخدمة بشرفات المبني. [٢٦]

The Edge، وهو مبنى مكاتب مبتكر في أمستردام صممته شركةPLP Architecture، يجسد كفاءة إستخدام الطاقة من خلال التصميم والتكنولوجيا المتطورة. يشتمل المبنى على ميزات مثل إضاءة LED سريعة الإستجابة وأنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء الموفرة للطاقة والألواح الشمسية على السطح. كما أنها تستخدم نظام إضاءة ذكيًا يتم ضبطه بناءً على الإشغال وظروف الإضاءة الطبيعية. تساهم أنظمة أتمتة المباني المتقدمة بشكل كبير في كفاءة الطاقة من خلال تحسين الإضاءة والتدفئة والتبريد بناءً على الظروف في الوقت الفعلي . الإستخدام الإستراتيجي لمصادر الطاقة المتجددة، مثل الألواح الشمسية، يعزز الإستدامة الشاملة للمبنى. يتطلب تنفيذ التقنيات المتقدمة واجهة متكاملة وسهلة الإستخدام لضمان التحكم والإدارة الفعالة. قد تشكل التكاليف الأولية المرتبطة بدمج الأنظمة المتطورة تحديات مالية، ولكن توفير الطاقة على المدى الطويل يمكن أن يعوض هذه النفقات.

شكل رقم (٧) إستخدام الخلايا الشمسية علي الحائط الجنوبي للمبني . [٢٧]



شكل رقم (٨) إستخدام الغلاف المزدوج بمبني The Edge مع فناء داخلي بإرتفاع ١٥دور . [٢٧]



شكل رقم (٩) يوضح المعالجة الإيجابية المستخدمة بالمشروع للحد من الإنبعاثات الكربونية والخفض في إستهلاك الطاقة . [٢٧]

الم
الشمس إلى المناطق المظلله. يعطي هذا المشروع الاولويه لمبادئ التصميم الحيوي، مما يحقق صله بين ساعليه والطبيعه. تساهم عناصر التصـميم الحيوية في رفاهية شـاغلي المبنى من خلال تعزيز الاتصـال بالطبيعة وتحسـين بيئة المعيشـة والعمل بشـكل عام. يمكن للطرق المبتكرة لإضـاءة النهار، مثل المروحيات، تحسـين توزيع الضـوء الطبيعي داخل المباني. إن الحفاظ على المسـاحات الخضـراء وضـمان حيويتها في المباني الشاهقة يتطلب الإهتمام الدقيق بالري وتكوين التربة والصيانة المستمرة.

تؤكد المشـــاريع الناجحة على أهمية إتباع نهج شـــامل يأخذ في الإعتبار الجوانب الجمالية والوظيفية. يعد التآزر بين التصـــميم المعماري والتكنولوجيا ومبادئ الإستدامة أمرًا بالغ الأهمية للهندسة المعمارية الخضراء الفعالة. إن إعطاء الأولوية لتجربة المستخدم أمر بالغ الأهمية. يجب أن توفر المباني التي تشتمل على ميزات مستدامة أيضًا بيئة مريحة وعملية وممتعة من الناحية الجمالية لشاغليها. توضح دراسات الحالة الناجحة التأثير الإيجابي للهندسة المعمارية الخضراء على المجتمعات. تساهم المشاريع التي تعطي الأولوية للمسؤولية البيئية ورفاهية المجتمع في بناء نسيج حضري مستدام ومرن[٤]. يمكن أن تشكل التكاليف الأولية المرتبطة بالتصميم المبتكر وتقنيات البناء عائقًا كبيرًا. إن تأمين الدعم المالي وإظهار الفوائد طويلة المدى أمر ضروري للتغلب على هذا التحدي. إن الصيانة المستمرة للميزات الخضراء والأنظمة الموفرة للطاقة والتقنيات المتقدمة تشكل تحديات. يجب على مالكي ومديري المباني وضع خطط صيانة قوية لضمان طول عمر العناصر المستدامة وفعاليتها. قد يواجة تنفيذ التقنيات المبتكرة تحديات تنظيمية، مما يتطلب من المهندسين المعماريين والمطورين التنقل في عمليات الترخيص المعقدة. ويعد التعاون مع الهيئات التنظيمية والسلطات المحلية أمرًا بالغ الأهمية للتغلب على هذه العقبات. إن تثقيف الجمهور حول فوائد الهندسة المعمارية الخضراء وكسب القبول للتصاميم المبتكرة قد يمثل تحديات. تعد مشاركة المجتمع والتواصل الشفاف أمرًا حيويًا لمعالجة المخاوف والحصول على الدعم.

دراسات الحالة في العالم الحقيقي بمثابة توجهات عملية لدمج التصميم المبتكر وتقنيات البناء في الهندسة المعمارية الخضراء. من خلال الخوض في النجاحات والدروس المستفادة والتحديات التي تواجهها مشاريع مثل Bosco Verticale، The Edge و One Central Park، نكتسب فهمًا دقيقًا للإمكانات التحويلية للهندسة المعمارية المستدامة. تؤكد دراسات الحالة هذه على أهمية اتباع نهج شامل، وتصميم يركز على المستخدم، والتخفيف الإستباقي للتحديات لتمهيد الطريق لمستقبل تكون فيه الهندسة المعمارية الخضراء مرادفة لكل من المسؤولية البيئية ورفاهية الإنسان.

١١- النتائج

- إتحاد الإبتكار والإستدامة والمرونة لإعادة تعريف البيئة المبنية للحفاظ علي البيئة ومستقبل الحياة علي الأرض.
- يؤكد التصميم الحيوي على دمج العناصر والأنماط الطبيعية في البيئة المبنية.
- التآزر بين التصميم المعماري والتكنولوجيا ومبادئ الإستدامة أمرًا بالغ الأهمية للهندسة المعمارية الخضراء الفعالة.
- يمثل التقدم في تقنيات تخزين الطاقة والإعتماد الواسع النطاق للشبكات الذكية أدوارًا محورية في تحقيق هذه الرؤية.
- استكشاف ودمج المواد والتقنيات المتقدمة بمثابة اتجاه محدد في العمارة الخضراء المستقبلية. من المواد ذاتية الشفاء إلى الواجهات المستجيبة التي تتكيف مع الظروف البيئية، يساعد علي تعزيز متانة المباني وكفاءتها واستدامتها.
- الإبتكارات في مواد مثل الألواح الشمسية الشفافة والخرسانة السلبية للكربون قد تعيد تشكيل مشهد البناء منخفض الكربون.
- تقنية التوأم الرقمي يحمل إمكانات هائلة لتحسين أداء المباني طوال دورة حياتها.
- تتيح تقنية التوأم الرقمي إجراء تعديلات في الوقت الفعلي لتحقيق الكفاءة المثلى في استخدام الطاقة، والصيانة التنبؤية، وتحسين الأداء العام للمبنى.
- يتطلب الانتقال إلى المباني ذات الطاقة الصافية والإيجابية بنية تحتية قوية وقابلة للتكيف.
- تعمل أساليب البناء المبتكرة مثل البناء المعياري والتصنيع المسبق على تبسيط العمليات، وتعزيز كفاءة الموارد، والتأكيد على التزام الصناعة بالممارسات الصديقة للبيئة.

وفي الختام، فإن مستقبل العمارة وكفاءة استخدام الطاقة يحمل وعوداً هائلة، في ظل إتجاهات مبتكرة مهيأة لتحويل الطريقة التي نتصور بها، ونصمم، ونبني الهياكل. ومع ذلك، فإن معالجة التحديات المتمثلة في الحواجز المالية، والأطر التنظيمية، والوعي العام، والتكامل التكنولوجي، وجاهزية البنية التحتية، والتعاون العالمي أمر بالغ الأهمية. يتطلب التغلب على هذه التحديات جهدًا جماعيًا من صناع السياسات ومحترفي الصناعة والمعلمين والجمهور لخلق بيئة لا يتم فيها تبني الممارسات المستدامة فحسب، بل تصبح أيضًا القاعدة في تشكيل مستقبل البيئة المبنية.

١٢- التوصيات:

- تثقيف الجمهور حول المزايا طويلة المدى للمباني المستدامة أمر بالغ الأهمية لتعزيز القبول والدعم، حيث أن جزءًا كبيرًا من الجمهور قد لا يزال يفتقر إلى الفهم الشامل لفوائد وأهمية الهندسة المعمارية الخضراء.
- ضرورة حل الفجوة بين مهارات القوي العاملة والتقدم التكنولوجي السريع للمساعدة علي التكيف والمواكبة. وخاصة في فهم وتنفيذ التكنولوجيات المتطورة.
- الاستثمار في برامج التعليم والتدريب أمرًا ضروريًا للتكامل الناجح للتقنيات المبتكرة.

- ينبغي للحكومات وصناع السياسات أن يعملوا بنشاط على تعزيز وتحفيز العمارة المستدامة من خلال أطر السياسات والحوافز المالية.
- تنفيذ الإعفاءات الضريبية والمنح واللوائح التي تكافئ الممارسات المستدامة مما يساعد علي تسريع اعتماد تقنيات التصميم والبناء المبتكرة.
- تعزيز برامج التعليم والتدريب للمهندسين المعماريين والمهندسين ومحترفي البناء لتعزيز مهاراتهم في الهندسة المعمارية الخضراء.
- دمج الممارسات المستدامة في المناهج الأكاديمية وتوفير فرص التطوير المهني المستمر يمكن أن يضمن وجود قوة عاملة ماهرة قادرة على تنفيذ تقنيات مبتكرة.
- إطلاق حملات توعية عامة لتثقيف المجتمعات حول فوائد العمارة الخضراء.
- بناء فهم عام للمزايا طويلة المدى، سواء من حيث التأثير البيئي أو الرفاهية الشخصية.
- تخصيص الموارد للبحث والتطوير في مجال العمارة الخضراء.
- تمويل المشاريع المبتكرة والمبادرات البحثية إلى اكتشاف مواد وتقنيات ومنهجيات جديدة، مما يزيد من دفع حدود التصميم والبناء المستدام.
- تشجيع الشراكات التعاونية بين القطاعين العام والخاص والأوساط الأكاديمية وأصحاب المصلحة في الصناعة. مما يعزز تبادل المعرفة، ويعزز أفضل الممارسات، ويسرع تنفيذ الهندسة الخضراء على نطاق أوسع.

المراجع :

[1] Abdellatif, S., Elhadi, K. M., Raza, A., Arshad, M., & Elhag, A. B. (2023). A scientometric evaluation of self-healing cementitious composites for sustainable built environment applications. Journal of Building Engineering, 107361.

[2] Ahmed, A., Ge, T., Peng, J., Yan, W. C., Tee, B. T., & You, S. (2022). Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review. Energy and Buildings, 256, 111755.

[3] Albert, M. J. (2022). Beyond continuationism: Climate change, economic growth, and the future of world (dis) order. Cambridge Review of International Affairs, 35(6), 868-887.

[4] Al-Kodmany, K. (2023). Greenery-covered tall buildings: a review. Buildings, 13(9), 2362.

[5] Arora, A., & McIntyre, J. R. (2021). Bio generation: Bio-Inspired Architecture for Regenerative Built Environments. Journal of Civil Engineering Architecture, 6, 1-16.

[6] Bhanusuresh, H. (2023). Study On Bacteria Based Self-Healing Properties Of Bio-ConcreteAn Overview. Journal on Civil Engineering, 13(1).

[7] BRE Global, "BREEAM Multiresidential Assessor Manuals: Technical Guidance Document", 2018, http://www.breeam.org , 2020 .

[8] Cabeza, L. F., & Chàfer, M. (2020). Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review. Energy and Buildings, 219, 110009.

[9] Dileep, G. J. R. E. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. Renewable Energy, 146, 2589-2625.

[10] Erhorn-Kluttig, H. and Erhorn, H.: Terms and definitions used in the EU Member States for High Performance Buildings (2009). Information Paper soon available on the EU portal BUILD UP.

[11] Hegazi, Y. S., Shalaby, H. A., & Mohamed, M. A. (2021). Adaptive reuse decisions for historic buildings in relation to energy efficiency and thermal comfort—Cairo citadel, a case study from Egypt. Sustainability, 13(19), 10531.

[12] Hetherington et al , Zero and low carbon buildings: A driver for change in working practices and the use of computer modeling and visualization , In: 14th International Conference on Information Visualization , 27-29 July 2010, London South Bank University, London, UK. P3.

[13] Hossain, E., Roy, S., Mohammad, N., Nawar, N., & Dipta, D. R. (2021). Metrics and enhancement strategies for grid resilience and reliability during natural disasters. Applied Energy, 290, 116709

[14] Jędrzejczak, P., Collins, M. N., Jesionowski, T., & Klapiszewski, Ł. (2021). The role of lignin and lignin-based materials in sustainable construction–a comprehensive review.International Journal of Biological Macromolecules, 187, 624-650.

[15] Khan, K. A., Quamar, M. M., Al-Qahtani, F. H., Asif, M., Alqahtani, M., & Khalid, M. (2023). Smart grid infrastructure and renewable energy deployment: A conceptual review of Saudi Arabia. Energy Strategy Reviews, 50, 101247.
[16] Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. ... & Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. Environmental Research Letters, 16(7), 073005.
[17] Liu, J., Wu, H., Huang, H., & Yang, H. (2023). Renewable energy design and optimization for a net-zero energy building integrating electric vehicles and battery storage considering grid flexibility. Energy Conversion and Management, 298, 117768.
[18] Maqbool, R., & Jowett, E. (2023). Conserving a sustainable urban environment through energy security and project management practices. Environmental Science and Pollution Research, 30(34), 81858-81880.
[19] Mehmood, M. U., Chun, D., Han, H., Jeon, G., & Chen, K. (2019). A review of the applications of artificial intelligence and big data to buildings for energy-efficiency and a comfortable indoor living environment. Energy and Buildings, 202, 109383.
[20] Menna, C., Felicioni, L., Negro, P., Lupíšek, A., Romano, E., Prota, A., & Hájek, P. (2022). Review of methods for the combined assessment of seismic resilience and energy efficiency towards sustainable retrofitting of existing European buildings. Sustainable Cities and Society, 77, 103556.
[21] Qiang, G., Tang, S., Hao, J., Di Sarno, L., Wu, G., & Ren, S. (2023). Building automation systems for energy and comfort management in green buildings: A critical review and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 179, 113301.
[22] Rane, N. (2023). Role of ChatGPT and similar generative artificial intelligence (AI) in construction industry. Available at SSRN 4598258.
[23] Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Dulaimi, A., Mahmood, D. M., & Sopian, K. (2023). A review of recent improvements, developments, and effects of using phase-change materials in buildings to store thermal energy. Designs, 7(4), 90.
[24] Shooshtarian, S., Maqsood, T., Wong, P. S., Khalfan, M., & Yang, R. J. (2021). Extended producer responsibility in the Australian construction industry. Sustainability, 13(2), 620.
[25] Turner, C., Oyekan, J., & Stergioulas, L. K. (2021). Distributed manufacturing: A new digital framework for sustainable modular construction. Sustainability, 13(3), 1515.
[26] https://www.archdaily. com/777498/bosco-verticale-stefano-boeri-architetti.
[27] https://placetech.net.
[28] https://placetech.net.