IJSSP
المجلة الدولية لنشر الدراسات العلمية
المجلد الثلاثون – العدد الثاني – البحث الثاني (ص: 16 - 47)
15 – آب – 2026م
www.ijssp.com ISSN: 2707-5184 International Journal of Scientific Studies Publishing

[العمارة المستدامة في العالم العربي]

إعداد الباحث:
[منصور صفران]
[كلية الهندسة/ قسم هندسة العمارة /جامعة جرش]

تاريخ الاستلام: 18-7-2026م | تاريخ المراجعة: 19-7-2026م | تاريخ القبول: 30-7-2026م | تاريخ النشر: 15-8-2026م

الملخص:
تناولت هذه الدراسة مراجعة علمية شاملة لمفهوم العمارة المستدامة باعتبارها أحد أهم التوجهات الحديثة لمواجهة التحديات البيئية المرتبطة بقطاع البناء والتشييد، الذي يُعد من أكثر القطاعات استهلاكًا للطاقة والموارد الطبيعية وإسهامًا في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. واستعرضت الدراسة تطور مفهوم العمارة المستدامة وعلاقته بالعمارة الخضراء، مع توضيح المبادئ الأساسية التي تقوم عليها، والتي تشمل كفاءة استخدام الطاقة، والإدارة المستدامة للمياه، واختيار مواد البناء منخفضة الأثر البيئي، والتصميم المتوافق مع الموقع والمناخ، وتحسين جودة البيئة الداخلية، وتطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري. كما ناقشت أهم الاستراتيجيات والتقنيات المستخدمة في تطبيق العمارة المستدامة، مثل التصميم السلبي، والطاقة المتجددة، وأنظمة إدارة الطاقة الذكية، ونمذجة معلومات البناء (BIM)، والتوأم الرقمي، إضافة إلى استعراض أبرز أنظمة تقييم المباني المستدامة، ومنها (LEED, BREEAM, Estidama). وركزت الدراسة على عدد من الاتجاهات الحديثة الداعمة للاستدامة، شملت التصميم البيوفيلي ودوره في تعزيز صحة المستخدمين ورفاهيتهم، والمباني صفرية الطاقة، والأسطح والجدران الخضراء، إضافة إلى دور التحول الرقمي والذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في تحسين كفاءة تشغيل المباني وإدارة الموارد. وتبين أن تحقيق الاستدامة في قطاع البناء لم يعد يعتمد على تطبيق تقنية منفردة، وإنما يتطلب تكاملًا بين التصميم المناخي، وكفاءة استخدام الموارد، والطاقة المتجددة، والتقنيات الرقمية، والأنظمة الذكية، مع مراعاة الجوانب البيئية والاقتصادية والاجتماعية طوال دورة حياة المبنى. كما أوضحت الدراسة أن نجاح العمارة المستدامة يرتبط بوجود سياسات وتشريعات داعمة، واعتماد أنظمة تقييم مناسبة للظروف المحلية، وتعزيز الابتكار والتعاون بين مختلف التخصصات الهندسية، بما يسهم في تطوير مبانٍ ومدن أكثر كفاءة ومرونة وقدرة على تحقيق أهداف التنمية المستدامة وخفض الانبعاثات الكربونية مستقبلًا.

الكلمات المفتاحية: العالم العربي، نمذجة معلومات المباني (BIM)، الاقتصاد الدائري، كفاءة الطاقة، المباني الخضراء، الطاقة المتجددة، العمارة المستدامة.

IJSSP

المجلة الدولية لنشر الدراسات العلمية
المجلد الثلاثون – العدد الثاني – البحث الثاني (ص: 16 - 47)
15 – آب – 2026م

www.ijssp.com ISSN: 2707-5184 International Journal of Scientific Studies Publishing

[Advancing Sustainable Architecture in the Arab World]

Researcher:

Mansour Safran [1, *]

[1]Department of Architecture, Faculty of Engineering, Jerash University, Jerash 26150, Jordan; safranmansour@gmail.com; m.safran@jpu.edu.jo
***Corresponding author(s). E-mail(s): safranmansour@gmail.com; m.safran@jpu.edu.jo**

Abstract:

The construction and building maintenance industries, which are considered the largest energy consumers and polluters, have a considerable potential for environmental improvement, and thus sustainable building design is a target for long-term sustainable engineering. This study aims to consolidate the principals, technologies and trends that are defining sustainable architectural development, with a particular focus on applicability within the Arab region. The paper investigates the development of sustainable architecture and its association with green building ideology, while assessing several design fundamentals of sustainable development; energy efficiency, sustainable water management, environmentally friendly material selection, climate-based design, indoor environmental quality and circular use of resources. The review further investigates the integration of advanced technologies that are transforming the built environment, including passive design strategies, digital twin technology, renewable energy systems, building information modeling, intelligent building management systems, artificial intelligence, and the internet of things. Furthermore, widely accepted sustainability assessment systems such as LEED, BREEAM and Estidama are reviewed in terms of the enhancement of the building performance and its role towards sustainable urbanization. Contemporary solutions on the permeability of the building envelope, including biophilic design, net-zero energy buildings, and green roofs and living walls are also discussed as state of the art for improving environmental performance and occupant health, comfort and resilience. The analysis demonstrates that sustainable architecture extends beyond the application of individual technologies and instead requires an integrated framework that combines climate-responsive planning, efficient resource management, renewable energy deployment, digital innovation, and intelligent operational systems across the entire building life cycle.

Keywords: Arab World, Building Information Modeling (BIM), Circular Economy, Digital Twin, Energy Efficiency, Green Buildings, Renewable Energy, Sustainable Architecture.

1. المقدمة

شهد العالم خلال العقود الأخيرة تزايدًا ملحوظًا في الضغوط البيئية الناتجة عن النمو السكاني المتسارع، والتوسع الحضري، والارتفاع المستمر في الطلب على الطاقة والموارد الطبيعية، الأمر الذي أدى إلى تفاقم العديد من المشكلات البيئية، وفي مقدمتها التغير المناخي، وارتفاع انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، واستنزاف الموارد الطبيعية (قصي زايد علي المعايطة, 2024). ويُعد قطاع البناء والتشييد من أكثر القطاعات تأثيرًا في البيئة، نظرًا لاستهلاكه كميات كبيرة من الطاقة والمواد الخام والمياه، إضافة إلى مساهمته الكبيرة في الانبعاثات الكربونية والنفايات الناتجة عن عمليات الإنشاء والتشغيل والهدم (نوره, 2025). وتشير أحدث التقارير الصادرة عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة إلى أن قطاع المباني والإنشاءات استهلك نحو 32% من إجمالي الطاقة العالمية وأسهم بحوالي 34% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالطاقة والعمليات الصناعية، مما يجعله أحد أهم القطاعات المستهدفة لتحقيق أهداف الحياد الكربوني والتنمية المستدامة (UNEP and GlobalABC, 2025).

وفي ظل هذه التحديات، برز مفهوم العمارة المستدامة (Sustainable Architecture) بوصفه أحد أهم الاتجاهات الحديثة في التصميم المعماري، حيث يهدف إلى تقليل التأثيرات البيئية للمباني طوال دورة حياتها، بدءًا من مرحلة التخطيط والتصميم، مرورًا بعمليات التنفيذ والتشغيل والصيانة، وانتهاءً بإعادة الاستخدام أو إعادة التدوير(قصي زايد علي المعايطة, 2024). ويعتمد هذا المفهوم على تحقيق التوازن بين الجوانب البيئية والاقتصادية والاجتماعية من خلال تحسين كفاءة استخدام الطاقة والمياه، والاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة، واختيار مواد بناء منخفضة الأثر البيئي، بالإضافة إلى توفير بيئة داخلية صحية وآمنة للمستخدمين. وقد أصبح هذا التوجه أحد المحاور الرئيسة لتحقيق أهداف التنمية المستدامة والحد من آثار التغير المناخي في قطاع البناء(نوره, 2025).

ولا تقتصر العمارة المستدامة على توظيف التقنيات الحديثة فحسب، بل تقوم على تبني نهج متكامل يأخذ في الاعتبار الخصائص المناخية للموقع، وكفاءة استخدام الموارد، وتقليل النفايات، وتعزيز جودة البيئة الداخلية، مع مراعاة الجوانب الاقتصادية والاجتماعية للمبنى طوال دورة حياته (نوره, 2025). وقد ساهم التطور التكنولوجي خلال السنوات الأخيرة في تعزيز هذا التوجه من خلال تطوير المباني الذكية، وأنظمة إدارة الطاقة، والمباني صفرية الطاقة، والأسطح والجدران الخضراء، بالإضافة إلى تطبيقات التصميم البيوفيلي التي تهدف إلى دمج العناصر الطبيعية داخل البيئة المبنية بما ينعكس إيجابًا على صحة المستخدمين وراحتهم النفسية والإنتاجية (نوره, 2025).

وفي منطقة الشرق الأوسط، تزداد أهمية العمارة المستدامة بسبب الظروف المناخية الحارة والجافة، وارتفاع الطلب على الطاقة المستخدمة في التبريد، ومحدودية الموارد المائية في العديد من الدول (عبدالله شعيرية وأخرون, 2024). وقد دفع ذلك العديد من الحكومات إلى تبني استراتيجيات وطنية للبناء المستدام، وتطوير أنظمة تقييم محلية، وتنفيذ مشاريع رائدة تعتمد على مبادئ الاستدامة، مثل مدينة مصدر في دولة الإمارات العربية المتحدة (امل اسمر زبون و محمد صباح حسن, 2024)، وجامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية في المملكة العربية السعودية (العنزي واخرون, 2018)، ومركز قطر الوطني للمؤتمرات (المهندي و عبدالله إبراهيم, 2023)، والتي تمثل نماذج تطبيقية لدمج التقنيات الحديثة مع مبادئ التصميم المستدام بهدف تحسين الأداء البيئي للمباني وتقليل استهلاك الموارد.

نتيجة لذلك، يهدف هذا البحث إلى تقديم مراجعة علمية شاملة لمفهوم العمارة المستدامة، واستعراض مبادئها الأساسية واستراتيجيات تطبيقها، مع التركيز على أحدث التقنيات المستخدمة في تحسين كفاءة الطاقة والمياه، واستخدام المواد المستدامة، والتصميم البيوفيلي، والمباني صفرية الطاقة، إضافة إلى مناقشة أبرز التحديات التي

تواجه تطبيق العمارة المستدامة، واستعراض عدد من النماذج التطبيقية التي توضح دورها في تحقيق التنمية العمرانية المستدامة.

2. مفهوم العمارة المستدامة والعلاقة بينها وبين العمارة الخضراء

ظهرت العمارة المستدامة (Sustainable Architecture) استجابةً للتحديات البيئية والاقتصادية والاجتماعية التي رافقت التوسع العمراني السريع خلال العقود الأخيرة، حيث أصبح من الضروري تطوير أساليب تصميم وإنشاء وتشغيل المباني بطريقة تقلل من استهلاك الموارد الطبيعية وتحد من التأثيرات البيئية السلبية، مع المحافظة على جودة البيئة الداخلية ورفاهية المستخدمين. ويُنظر إلى العمارة المستدامة بوصفها نهجًا متكاملًا يهدف إلى تحقيق التوازن بين احتياجات الإنسان الحالية والمحافظة على حقوق الأجيال القادمة في الموارد الطبيعية، بما يتوافق مع مفهوم التنمية المستدامة الذي قدمته لجنة برونتلاند عام 1987 (WCED, 1987; Kibert, 2022).

وتُعرَّف العمارة المستدامة بأنها عملية تصميم وإنشاء وتشغيل المباني بطريقة تحقق أعلى مستويات الكفاءة البيئية والاقتصادية والاجتماعية طوال دورة حياة المبنى، بدءًا من مرحلة اختيار الموقع والتصميم، مرورًا بعمليات الإنشاء والتشغيل والصيانة، وانتهاءً بإعادة الاستخدام أو إعادة التدوير بعد انتهاء العمر الافتراضي للمبنى. ويشمل هذا النهج تقليل استهلاك الطاقة والمياه، واستخدام المواد المستدامة، والاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة، وتحسين جودة البيئة الداخلية، وتقليل الانبعاثات الكربونية والنفايات الناتجة عن قطاع البناء (Kibert, 2007; Ding, 2008).

وتؤكد الدراسات الحديثة أن مفهوم العمارة المستدامة تجاوز كونه مجموعة من الحلول التقنية المنفصلة، ليصبح فلسفة تصميمية متكاملة تعتمد على دراسة العلاقة بين المبنى والمناخ المحلي والبيئة المحيطة، بحيث يتم استغلال الموارد الطبيعية المتاحة بكفاءة، مثل الإضاءة الطبيعية، والتهوية الطبيعية، والطاقة الشمسية، بما يقلل الحاجة إلى الأنظمة الميكانيكية التقليدية ويخفض استهلاك الطاقة خلال مرحلة التشغيل، والتي تمثل الجزء الأكبر من الأثر البيئي للمباني طوال دورة حياتها (بهجت و حسام, 2023).

ويرتبط مفهوم العمارة المستدامة ارتباطًا وثيقًا بمفهوم العمارة الخضراء(Green Architecture) ، ويستخدم المصطلحان أحيانًا بالتبادل في الأدبيات العلمية، إلا أن العديد من الباحثين يميزون بينهما من حيث نطاق التطبيق (Safran et al., 2025). فالعمارة الخضراء تركز بصورة رئيسة على تقليل التأثيرات البيئية المباشرة للمبنى من خلال تحسين كفاءة الطاقة والمياه، واستخدام مواد بناء صديقة للبيئة، والحد من التلوث والانبعاثات، في حين يُعد مفهوم العمارة المستدامة أكثر شمولًا، إذ يضم إلى جانب البعد البيئي الأبعاد الاقتصادية والاجتماعية والثقافية، مع مراعاة دورة حياة المبنى بالكامل وتأثيره في المجتمع والاقتصاد والبيئة (Shagin et al., 2023).

يمكن اعتبار العمارة الخضراء أحد المكونات الأساسية للعمارة المستدامة، وليست مفهومًا مستقلًا عنها. فالمبنى الأخضر يركز على تحقيق أداء بيئي مرتفع، بينما يسعى المبنى المستدام إلى تحقيق أداء متوازن يشمل الكفاءة البيئية، والجدوى الاقتصادية، وراحة المستخدمين، والمرونة التشغيلية، والقدرة على التكيف مع المتغيرات المستقبلية، بما ينسجم مع أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة، وخاصة الهدف الحادي عشر المتعلق بالمدن والمجتمعات المستدامة (United Nations, 2025).

وقد أدى هذا التطور المفاهيمي إلى انتقال العمارة المستدامة من كونها توجهًا اختياريًا في التصميم إلى أحد المعايير الأساسية في السياسات العمرانية الحديثة، حيث أصبحت العديد من الدول تعتمد تشريعات وأنظمة تقييم للمباني المستدامة، مثل نظام LEED في الولايات المتحدة, ونظام BREEAM في المملكة المتحدة, ونظام Estidama في دولة الإمارات العربية المتحدة، بهدف رفع كفاءة المباني وتقليل تأثيرها البيئي، وتعزيز جودة البيئة العمرانية على المدى الطويل (Doan et al., 2017).

3. مبادىء العمارة المستدامة

تعتمد العمارة المستدامة على مجموعة من المبادئ الأساسية التي تهدف إلى تقليل التأثيرات البيئية للمباني مع تحسين كفاءتها الوظيفية والاقتصادية والاجتماعية. وتمثل هذه المبادئ إطارًا متكاملًا يوجه عملية تصميم المباني وإنشائها وتشغيلها، بحيث يتم تحقيق الاستخدام الأمثل للموارد الطبيعية مع توفير بيئة داخلية صحية ومريحة للمستخدمين (Liu et al., 2022). وتشير الدراسات الحديثة إلى أن نجاح المباني المستدامة لا يعتمد على تطبيق مبدأ واحد، وإنما على تكامل مجموعة من المبادئ التي تغطي مختلف مراحل دورة حياة المبنى، ابتداءً من اختيار الموقع والتصميم، مرورًا بمرحلة التنفيذ، وانتهاءً بالتشغيل والصيانة وإعادة الاستخدام أو إعادة التدوير(Poorisat et al., 2024).

3.1. كفاءة استخدام الطاقة

تُعد كفاءة استخدام الطاقة الركيزة الأساسية للعمارة المستدامة، نظرًا لأن قطاع المباني يُعد من أكبر القطاعات المستهلكة للطاقة عالميًا. ويهدف هذا المبدأ إلى تقليل الطلب على الطاقة دون التأثير في مستوى الراحة الحرارية أو الأداء الوظيفي للمبنى، وذلك من خلال تصميم الغلاف الخارجي للمبنى بصورة تقلل انتقال الحرارة، وتحسين الاستفادة من الإضاءة والتهوية الطبيعية، واستخدام أنظمة ميكانيكية وكهربائية عالية الكفاءة، بالإضافة إلى دمج مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح عند الإمكان. وقد أثبتت العديد من الدراسات أن تحسين كفاءة الطاقة ينعكس بصورة مباشرة على خفض الانبعاثات الكربونية وتقليل تكاليف التشغيل طوال العمر التشغيلي للمبنى (Kumar et al., 2022; Hafez et al., 2023).

3.2. كفاءة إدارة الموارد المائية

تمثل الإدارة المستدامة للمياه أحد المبادئ الرئيسة في تصميم المباني المستدامة، ولا سيما في المناطق التي تعاني من محدودية الموارد المائية. ويهدف هذا المبدأ إلى تقليل استهلاك المياه العذبة من خلال استخدام تجهيزات صحية ذات كفاءة عالية، وإعادة استخدام المياه الرمادية، والاستفادة من مياه الأمطار عند توفرها، إضافة إلى تصميم المساحات الخضراء باستخدام نباتات تتلاءم مع الظروف المناخية المحلية وتحتاج إلى كميات محدودة من الري. وتسهم هذه الإجراءات في تقليل الضغط على الموارد المائية وتحسين كفاءة إدارة المياه داخل المباني (Poorisat et al., 2024).

3.3. اختيار مواد البناء المستدامة

يُعد اختيار مواد البناء من العوامل المؤثرة بصورة مباشرة في الأداء البيئي للمبنى، إذ تمتد آثار هذه المواد إلى مراحل الاستخراج والتصنيع والنقل والاستخدام والتخلص منها بعد انتهاء عمرها التشغيلي. ولذلك تعتمد العمارة المستدامة على استخدام مواد منخفضة البصمة الكربونية، وقابلة لإعادة الاستخدام أو إعادة التدوير، وذات عمر تشغيلي طويل، مع إعطاء الأولوية للمواد المحلية التي تقلل من الانبعاثات الناتجة عن عمليات النقل. كما أصبح تقييم دورة حياة المواد (Life Cycle Assessment) أداةً مهمة في اختيار المواد الأكثر استدامة من الناحية البيئية والاقتصادية (Asdrubali et al., 2024; Abushammala et al., 2026).

3.4. التصميم المتوافق مع الموقع والمناخ

يرتكز التصميم المستدام على دراسة الخصائص المناخية والبيئية للموقع قبل البدء بعملية التصميم، بما يشمل اتجاهات الرياح، ومسار الشمس، ودرجات الحرارة، والرطوبة، وطبيعة التضاريس. ويساعد هذا النهج في تطوير حلول تصميمية تتلاءم مع الظروف المحلية، مثل توجيه المبنى بطريقة تقلل اكتساب الحرارة، واستخدام عناصر التظليل الطبيعية أو المعمارية، وتعزيز التهوية الطبيعية، مما يقلل الاعتماد على أنظمة التبريد والتدفئة الميكانيكية ويرفع كفاءة المبنى البيئية (Kumar et al., 2022; Latha et al., 2023).

3.5. تحسين جودة البيئة الداخلية

تولي العمارة المستدامة اهتمامًا كبيرًا بجودة البيئة الداخلية، لما لها من تأثير مباشر في صحة المستخدمين وإنتاجيتهم وراحتهم النفسية والجسدية. ويشمل ذلك تحسين جودة الهواء الداخلي، وتوفير مستويات مناسبة من الإضاءة الطبيعية، وتحقيق الراحة الحرارية والصوتية، والحد من استخدام المواد التي تطلق مركبات عضوية متطايرة أو ملوثات داخلية. وأظهرت الدراسات أن تحسين جودة البيئة الداخلية يسهم في رفع إنتاجية العاملين وتحسين الأداء التعليمي وتقليل المشكلات الصحية المرتبطة بالمباني المغلقة (Nicolini, 2022; Afful et al., 2023).

3.6. تقليل النفايات وتعزيز الاقتصاد الدائري

أصبح مفهوم الاقتصاد الدائري أحد المبادئ الحديثة المرتبطة بالعمارة المستدامة، حيث يركز على تقليل استهلاك الموارد وتقليل النفايات الناتجة عن عمليات البناء والهدم. ويتحقق ذلك من خلال إعادة استخدام المواد، وتصميم المباني بطريقة تسمح بتفكيك مكوناتها وإعادة تدويرها، وتقليل الفاقد أثناء عمليات التنفيذ، بما يسهم في خفض الأثر البيئي وتحقيق كفاءة أعلى في إدارة الموارد طوال دورة حياة المبنى (Liu et al., 2022; Poorisat et al., 2024).

ومن خلال تكامل هذه المبادئ، تصبح العمارة المستدامة منظومة تصميمية متكاملة تهدف إلى تحقيق التوازن بين الأداء البيئي والاقتصادي والاجتماعي للمباني. كما تمثل هذه المبادئ الأساس الذي تُبنى عليه التقنيات والاستراتيجيات الحديثة المستخدمة في تصميم المباني المستدامة.

4. استراتيجيات وتقنيات تطبيق العمارة المستدامة

لا تقتصر العمارة المستدامة على مجموعة من المبادئ النظرية، وإنما تعتمد على تطبيق استراتيجيات تصميمية وتقنيات هندسية متكاملة تهدف إلى تحسين الأداء البيئي للمباني وتقليل استهلاك الموارد الطبيعية خلال دورة حياتها. وقد ساهم التطور التكنولوجي في العقود الأخيرة في تطوير العديد من الحلول التي تجمع بين التصميم المعماري والأنظمة الهندسية الذكية، مما أدى إلى تحسين كفاءة الطاقة والمياه، وخفض الانبعاثات الكربونية، وتحقيق مستويات أعلى من الراحة البيئية للمستخدمين. وتؤكد الدراسات أن نجاح المباني المستدامة يعتمد على تكامل هذه الاستراتيجيات منذ المراحل الأولى للتصميم، وليس على إضافة تقنيات منفصلة بعد اكتمال المشروع (Pomponi and Moncaster, 2017).

4.1. التصميم السلبي للمباني (Passive Design)

يُعد التصميم السلبي أحد أهم استراتيجيات العمارة المستدامة، إذ يعتمد على الاستفادة من الظروف المناخية الطبيعية للموقع لتقليل الحاجة إلى أنظمة التدفئة والتبريد والإضاءة الصناعية. ويبدأ ذلك من دراسة اتجاهات الشمس والرياح، وتوجيه المبنى بالشكل الذي يحقق أقصى استفادة من الإضاءة الطبيعية والتهوية، مع تقليل اكتساب الحرارة خلال فصل الصيف والحد من فقدانها في الشتاء. كما يشمل التصميم السلبي استخدام عناصر التظليل، والأفنية الداخلية، والكاسرات الشمسية، والواجهات المزدوجة، بما يسهم في تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الراحة الحرارية داخل المبنى (Attia, 2018).

وتشير العديد من الدراسات إلى أن التصميم السلبي يمكن أن يخفض استهلاك الطاقة في المباني بنسبة تتراوح بين 20-50% تبعًا للمناخ ونوعية المبنى، مما يجعله من أكثر استراتيجيات الاستدامة كفاءة من الناحية الاقتصادية والبيئية (Ma et al., 2024).

4.2. دمج مصادر الطاقة المتجددة

يمثل استخدام مصادر الطاقة المتجددة أحد الركائز الأساسية لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وتُعد الطاقة الشمسية أكثر مصادر الطاقة استخدامًا في المباني المستدامة،

سواء لإنتاج الكهرباء باستخدام الخلايا الكهروضوئية (Photovoltaic Systems)، أو لتسخين المياه باستخدام المجمعات الشمسية الحرارية. كما تُستخدم طاقة الرياح والطاقة الجوفية في بعض المشاريع وفقًا لطبيعة الموقع والظروف المناخية (IEA, 2024).

ولا يقتصر نجاح أنظمة الطاقة المتجددة على إنتاج الطاقة فقط، بل يعتمد أيضًا على تقليل الطلب على الطاقة من خلال تحسين كفاءة المبنى، لأن تقليل الاستهلاك يمثل الخطوة الأولى قبل اللجوء إلى إنتاج الطاقة من المصادر المتجددة (IRENA, 2023).

4.3. أنظمة إدارة الطاقة الذكية

أدى التطور السريع في تقنيات إنترنت الأشياء (Internet of Things) والذكاء الاصطناعي إلى ظهور أنظمة إدارة المباني الذكية (Building Management Systems, BMS)، التي تعتمد على أجهزة الاستشعار ووحدات التحكم الرقمية لمراقبة استهلاك الطاقة والمياه والتحكم في أنظمة الإضاءة والتكييف والتهوية بصورة تلقائية وفقًا لاحتياجات المستخدمين. وتساعد هذه الأنظمة في تحسين كفاءة تشغيل المبنى، والكشف المبكر عن الأعطال، وتقليل الهدر في استهلاك الموارد، كما توفر بيانات لحظية يمكن استخدامها في تحسين الأداء البيئي للمبنى بصورة مستمرة (Goldfeder and Sipple, 2024).

4.4. دمج حلول الاقتصاد الدائري

أصبح مفهوم الاقتصاد الدائري (Circular Economy) من الاتجاهات الحديثة في قطاع البناء، حيث يهدف إلى تقليل استهلاك المواد الخام وإطالة العمر التشغيلي للمواد والمنتجات المستخدمة في المباني. ويشمل ذلك إعادة استخدام مكونات المباني، وإعادة تدوير مخلفات البناء والهدم، وتصميم العناصر الإنشائية بحيث يمكن تفكيكها وإعادة استخدامها في مشاريع أخرى. ويسهم هذا النهج في تقليل النفايات والانبعاثات المرتبطة بإنتاج مواد البناء الجديدة، إضافة إلى تقليل استنزاف الموارد الطبيعية (Akanbi et al., 2018).

4.5. التحول الرقمي في تصميم وإدارة المباني

شهد قطاع البناء تطورًا ملحوظًا في استخدام التقنيات الرقمية، ومن أبرزها نمذجة معلومات البناء (Building Information Modeling, BIM)، التي أصبحت أداة رئيسة في تصميم وإدارة المشاريع المستدامة. وتوفر هذه التقنية نموذجًا رقميًا متكاملًا للمبنى يسمح بمحاكاة الأداء الحراري واستهلاك الطاقة والإضاءة الطبيعية قبل تنفيذ المشروع، مما يساعد على اتخاذ قرارات تصميمية أكثر كفاءة وتقليل الأخطاء والهدر أثناء التنفيذ. كما أصبحت تقنيات التوأم الرقمي (Digital Twin) من الاتجاهات الحديثة التي تتيح متابعة أداء المبنى في الوقت الحقيقي وتحسين عمليات التشغيل والصيانة طوال دورة حياته (Lu et al., 2017).
وتشير الدراسات الحديثة إلى أن دمج التصميم السلبي، والطاقة المتجددة، والأنظمة الذكية، وتقنيات الاقتصاد الدائري، والأدوات الرقمية مثل BIM، يمثل الأساس الذي تقوم عليه المباني المستدامة الحديثة، حيث تعمل هذه الاستراتيجيات بصورة تكاملية لتحقيق أعلى مستويات الكفاءة البيئية والاقتصادية والاجتماعية. ومن هذا المنطلق، لم تعد العمارة المستدامة تعتمد على حل واحد أو تقنية محددة، بل أصبحت منظومة متكاملة تستفيد من التطور التقني لتحقيق مبانٍ أكثر كفاءة ومرونة وقدرة على مواجهة التحديات البيئية المستقبلي.

5. أنظمة تقييم المباني الخضراء

مع التوسع في تطبيق مفاهيم العمارة المستدامة على المستوى العالمي، ظهرت الحاجة إلى تطوير أدوات ومعايير موضوعية لقياس الأداء البيئي للمباني وتقييم مدى التزامها بمبادئ الاستدامة. وقد أدى ذلك إلى تطوير العديد من أنظمة تقييم المباني المستدامة (Green Building Rating Systems)، والتي تُستخدم لتقييم أداء المبنى خلال مراحل التصميم والإنشاء والتشغيل، اعتمادًا على مجموعة من المؤشرات المتعلقة بكفاءة الطاقة والمياه، واستخدام المواد، وجودة البيئة الداخلية، وإدارة الموقع، والانبعاثات الكربونية. ولا تقتصر أهمية هذه الأنظمة على منح شهادات اعتماد للمباني، بل تُعد أدوات إرشادية تساعد المهندسين والمصممين على اتخاذ قرارات تصميمية تحقق أعلى مستويات الأداء البيئي والاقتصادي طوال دورة حياة المبنى (Awadh, 2017; Doan et al., 2017).

وتختلف أنظمة التقييم من حيث معاييرها وآليات تطبيقها، إلا أنها تشترك جميعًا في هدف رئيس يتمثل في تقليل التأثيرات البيئية للمباني وتعزيز كفاءة استخدام الموارد الطبيعية. ومن بين أكثر الأنظمة انتشارًا عالميًا نظام LEED الأمريكي، ونظام BREEAM البريطاني، بالإضافة إلى نظام Estidama الذي طُوِّر ليتلاءم مع الظروف البيئية والمناخية في دولة الإمارات العربية المتحدة ومنطقة الخليج العربي (Mattoni et al., 2018).

5.1. نظام LEED

يُعد نظام Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)، الذي طوره المجلس الأمريكي للمباني الخضراء (U.S. Green Building Council)، أكثر أنظمة تقييم المباني المستدامة انتشارًا على المستوى العالمي. ويعتمد النظام على منح نقاط للمبنى وفقًا لمجموعة من المعايير البيئية، ثم يتم تصنيف المبنى إلى أحد مستويات الاعتماد (Platinum, Gold, Silver, Certified) تبعًا لمجموع النقاط المحققة (USGBC, 2023).

ويغطي نظام LEED عدة محاور رئيسة تشمل كفاءة استخدام الطاقة، وترشيد استهلاك المياه، واختيار مواد البناء، وإدارة المخلفات، وجودة البيئة الداخلية، والابتكار في التصميم، إضافة إلى الاعتبارات المتعلقة بموقع المشروع والنقل المستدام. وقد ساهم هذا النظام في توحيد العديد من مفاهيم البناء المستدام، وأصبح مرجعًا عالميًا لتقييم الأداء البيئي للمباني في مختلف القطاعات (USGBC, 2024).

5.2. نظام BREEAM

يُعد نظام Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) أول نظام متكامل لتقييم المباني المستدامة، حيث أُطلق في المملكة المتحدة عام 1990، وما يزال من أكثر الأنظمة استخدامًا في أوروبا. ويقيّم النظام المباني اعتمادًا على مجموعة واسعة من المؤشرات تشمل الطاقة، والمياه، والصحة والراحة، والنقل، والمواد، وإدارة المشروع، واستخدام الأراضي، والتنوع الحيوي، والتلوث، وإدارة النفايات (BRE Global, 2022).

ويمتاز نظام BREEAM بتركيزه على تقييم الأداء البيئي للمبنى خلال دورة حياته الكاملة، مع مراعاة الظروف البيئية المحلية لكل مشروع، الأمر الذي جعله مرجعًا مهمًا في العديد من المشاريع الأوروبية والدولية (Awadh, 2017).

5.3. نظام Estidama

نظرًا لاختلاف الظروف المناخية بين المناطق الجغرافية، ظهرت الحاجة إلى تطوير أنظمة تقييم تتلاءم مع البيئات المحلية. ويُعد نظام Estidama أحد أبرز هذه الأنظمة، حيث طُور في إمارة أبوظبي ضمن إطار رؤية أبوظبي 2030 بهدف تعزيز استدامة المباني والمجتمعات العمرانية في البيئات الصحراوية (Abu Dhabi Urban Planning Council, 2010).

ويعتمد النظام على **نظام اللؤلؤ(Pearl Rating System)**، الذي يقيّم المباني وفق مجموعة من المحاور تشمل الموارد الطبيعية، والطاقة، والمياه، وجودة البيئة الداخلية، والمواد، والابتكار، إضافة إلى الجوانب الثقافية والاجتماعية التي تميز البيئة المحلية. ويتميز Estidama بتركيزه الكبير على ترشيد استهلاك المياه والطاقة، نظرًا لندرة الموارد المائية وارتفاع الأحمال الحرارية في منطقة الخليج العربي (Sheikha, 2024).

على الرغم من اختلاف أنظمة تقييم المباني المستدامة من حيث آليات التطبيق والأوزان النسبية للمعايير، فإنها تشترك في مجموعة من الأهداف الأساسية، تتمثل في تحسين الأداء البيئي للمباني، وخفض استهلاك الطاقة والمياه، وتقليل الانبعاثات الكربونية، وتعزيز جودة البيئة الداخلية. ومع ذلك، تختلف هذه الأنظمة في مدى ملاءمتها للظروف المناخية والتشريعية لكل دولة، الأمر الذي يجعل اختيار النظام المناسب يعتمد على طبيعة المشروع والموقع الجغرافي ومتطلبات الجهات التنظيمية (Berardi, 2012).

ففي حين يتميز نظام LEED بانتشاره العالمي واعتماده في مختلف أنواع المباني، يركز نظام BREEAMبصورة أكبر على تقييم دورة حياة المبنى وتأثيره البيئي الشامل، بينما يوفر نظام Estidama حلولًا أكثر توافقًا مع البيئات الصحراوية من خلال إعطاء أهمية أكبر لإدارة المياه وتقليل الأحمال الحرارية. ولذلك، فإن اختيار نظام التقييم المناسب يُعد جزءًا أساسيًا من استراتيجية تحقيق الاستدامة، وليس مجرد وسيلة للحصول على شهادة اعتماد (Illankoon et al., 2017).

ومن المتوقع أن تشهد أنظمة تقييم المباني المستدامة خلال السنوات المقبلة تطورًا كبيرًا نتيجة دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات الضخمة، مما سيسمح بتقييم الأداء البيئي للمباني بصورة لحظية طوال فترة التشغيل، بدلاً من الاقتصار على مرحلة التصميم أو الإنشاء فقط (Doan et al., 2017).

6. التصميم البيوفيلي (Biophilic Design) في العمارة المستدامة

يُعد التصميم البيوفيلي (Biophilic Design) أحد الاتجاهات الحديثة في العمارة المستدامة، حيث يركز على تعزيز العلاقة بين الإنسان والطبيعة من خلال دمج العناصر الطبيعية والأنماط المستوحاة من الطبيعة داخل البيئة المبنية. وقد ظهر هذا المفهوم نتيجة تزايد الوعي بتأثير البيئة العمرانية على صحة الإنسان ورفاهيته، خاصة مع ارتفاع معدلات التحضر وزيادة الوقت الذي يقضيه الأفراد داخل المباني. ويستند التصميم البيوفيلي إلى مفهوم "الارتباط الفطري بالطبيعة" (Biophilia)، والذي يشير إلى وجود ميل طبيعي لدى الإنسان للتفاعل مع العناصر الطبيعية والبيئات الخضراء، وأن هذا الارتباط يمكن أن يؤدي إلى تحسين الصحة النفسية والجسدية وتعزيز جودة الحياة (Kellert et al., 2011).

ولا يقتصر التصميم البيوفيلي على إضافة عناصر نباتية أو جمالية إلى المباني، بل يمثل منهجًا تصميميًا متكاملًا يهدف إلى خلق بيئات داخلية وخارجية تدعم رفاهية المستخدمين وتحسن تجربتهم داخل الفراغ المعماري. ويشمل ذلك استخدام الضوء الطبيعي، والنباتات، والمياه، والمواد الطبيعية، والإطلالات الخارجية، إضافة إلى اعتماد أشكال وأنماط تصميمية مستوحاة من الطبيعة. ومن خلال هذه العناصر يسعى التصميم البيوفيلي إلى تحقيق توازن بين الاحتياجات الإنسانية والمتطلبات البيئية للمباني، مما يجعله أحد المكونات المهمة ضمن منظومة العمارة المستدامة (Ryan et al., 2014).

وقد اكتسب التصميم البيوفيلي اهتمامًا متزايدًا خلال السنوات الأخيرة نتيجة ارتباطه المباشر بمفهوم المباني الصحية والمستدامة. فبينما تركز العمارة المستدامة بصورة أساسية على تقليل استهلاك الموارد والطاقة وخفض التأثير البيئي للمبنى، يضيف التصميم البيوفيلي بعدًا إنسانيًا يركز على تأثير البيئة المبنية في صحة المستخدمين وسلوكهم وإنتاجيتهم. لذلك أصبح دمج الطبيعة في التصميم المعماري أحد الاتجاهات المهمة لتحقيق مبانٍ لا تتميز فقط بالكفاءة البيئية، وإنما توفر أيضًا بيئات أكثر راحة وملاءمة للإنسان (Ryan et al., 2014).

وتشير الدراسات الحديثة إلى أن قضاء الإنسان فترات طويلة داخل البيئات المغلقة في المدن الحديثة قد أدى إلى انخفاض مستوى الاتصال المباشر بالطبيعة، وهو ما ارتبط بزيادة مستويات الإجهاد النفسي وانخفاض الشعور بالراحة. ومن هنا ظهر التصميم البيوفيلي كاستجابة معمارية تهدف إلى إعادة إدخال العناصر الطبيعية إلى البيئة المبنية، سواء من خلال التصميم الداخلي أو الخارجي، بما يساهم في تحسين الصحة النفسية، وتعزيز التركيز، ورفع مستوى الرضا لدى المستخدمين (Gillis and Gaterslebe, 2015).
كما يرتبط التصميم البيوفيلي بمبادئ الاستدامة من خلال دعمه لبعض الاستراتيجيات البيئية، مثل زيادة الاعتماد على الإضاءة الطبيعية، وتحسين التهوية الطبيعية، وتقليل الاعتماد على الأنظمة الميكانيكية، إضافة إلى تعزيز استخدام المساحات الخضراء داخل المدن. ولذلك لم يعد التصميم البيوفيلي يُنظر إليه كعنصر جمالي فقط، بل أصبح جزءًا من استراتيجية شاملة تهدف إلى تطوير مبانٍ مستدامة تجمع بين الكفاءة البيئية والراحة الإنسانية (Zhong et al., 2022).

6.1. مبادىء التصميم البيوفيلي في العمارة المستدامة

يعتمد التصميم البيوفيلي على مجموعة من المبادئ التصميمية التي تهدف إلى تعزيز الاتصال بين الإنسان والطبيعة داخل البيئة المبنية، وذلك من خلال إدخال العناصر الطبيعية بصورة مباشرة أو غير مباشرة ضمن التصميم المعماري. ولا تقتصر هذه المبادئ على الجانب الجمالي، بل ترتبط بتحسين الأداء البيئي للمباني وتعزيز صحة وراحة المستخدمين. وقد اقترح عدد من الباحثين تصنيفات مختلفة لعناصر التصميم البيوفيلي، إلا أن معظمها يركز على ثلاثة محاور رئيسة تشمل :التجارب الطبيعية المباشرة مثل النباتات والمياه والضوء الطبيعي، والتجارب غير المباشرة للطبيعة مثل استخدام المواد الطبيعية والألوان والأنماط المستوحاة من الطبيعة، إضافة إلى العلاقة الفراغية بين الإنسان والطبيعة مثل توفير الإطلالات الطبيعية والمساحات المفتوحة (Kellert et al., 2011; Ryan et al., 2014).
وتكمن أهمية هذه المبادئ في قدرتها على تحويل المباني من مجرد فراغات وظيفية إلى بيئات داعمة لصحة الإنسان ورفاهيته، حيث تشير الدراسات إلى أن دمج العناصر الطبيعية في التصميم المعماري يمكن أن يقلل مستويات التوتر، ويحسن التركيز، ويرفع مستوى الرضا عن البيئة الداخلية، خصوصًا في المباني التي يقضي المستخدمون فيها فترات زمنية طويلة مثل المكاتب والمستشفيات والمؤسسات التعليمية (Ryan et al., 2014).

6.1.1. الإضاءة الطبيعية والاتصال بالضوء النهاري

تُعد الإضاءة الطبيعية (Natural Lighting) أحد أهم عناصر التصميم البيوفيلي، حيث تهدف إلى تعزيز الاتصال بين المستخدم والدورة الطبيعية للضوء خلال اليوم، إضافة إلى تقليل الاعتماد على الإضاءة الصناعية وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة في المبنى. ويتم تحقيق ذلك من خلال توجيه المبنى وفق حركة الشمس، وتصميم الفتحات والنوافذ بطريقة تسمح بدخول الضوء الطبيعي إلى أكبر قدر ممكن من المساحات الداخلية، بالإضافة إلى استخدام الأفنية الداخلية والأسقف الزجاجية والواجهات الشفافة عند الحاجة. الضوء الطبيعي يلعب دورًا مهمًا في تنظيم الإيقاع اليومي للإنسان (Circadian Rhythm) من خلال التحكم في إفراز الهرمونات المرتبطة بالنوم والنشاط، مما ينعكس على جودة النوم، ومستويات التركيز، والحالة المزاجية. وقد أظهرت الدراسات أن تحسين التعرض للضوء النهاري داخل أماكن العمل يرتبط بزيادة رضا الموظفين وتحسين الأداء والإنتاجية (Aries et al., 2015).
كما يمثل تصميم الإضاءة الطبيعية عنصرًا مشتركًا بين التصميم البيوفيلي والعمارة المستدامة، إذ يساهم في تقليل الأحمال الكهربائية وتحسين الأداء الحراري للمبنى عند دمجه مع استراتيجيات التصميم المناخي المناسبة. لذلك أصبحت دراسة اتجاه المبنى، وعمق الفراغات الداخلية، ومواقع النوافذ والفتحات من العناصر الأساسية عند تصميم المباني المستدامة الحديثة.

6.1.2. دمج النباتات والعناصر الطبيعية

يمثل إدخال النباتات والعناصر النباتية أحد أكثر تطبيقات التصميم البيوفيلي انتشارًا، حيث يهدف إلى إعادة إدخال الطبيعة الحية إلى البيئة المبنية وتعزيز الاتصال المباشر بين المستخدم والعناصر الطبيعية. وتشمل هذه التطبيقات النباتات الداخلية، والحدائق الداخلية، والجدران النباتية، والأسطح الخضراء، إضافة إلى استخدام النباتات المحلية في تصميم المساحات الخارجية للمباني. وتساهم النباتات في تحسين جودة البيئة الداخلية من خلال دورها في تعزيز الراحة البصرية والنفسية، كما يمكن أن تساعد في تحسين بعض خصائص الهواء الداخلي عند استخدامها ضمن أنظمة تصميم مناسبة توفر التهوية الكافية. وتشير الدراسات إلى أن وجود النباتات في أماكن العمل والبيئات التعليمية يرتبط بانخفاض مستويات الإجهاد النفسي وزيادة الشعور بالراحة وتحسين الإدراك الإيجابي للمكان (Gillis and Gaterslebe, 2015).

يمكن أن تسهم النباتات في تحسين أداء المبنى من خلال توفير الظلال وتقليل اكتساب الحرارة، خاصة عند استخدامها في الأسطح والجدران الخضراء. كما تساعد المساحات النباتية الخارجية على تحسين المناخ الحضري وتقليل تأثير الجزر الحرارية الناتجة عن زيادة الأسطح الخرسانية والإسفلتية في المدن.

6.1.3. استخدام المياه والعناصر الطبيعية في التصميم البيوفيلي

يُعد دمج العناصر المائية أحد المبادئ المهمة في التصميم البيوفيلي، حيث يمثل الماء عنصرًا طبيعيًا يرتبط ارتباطًا قويًا بالإدراك الحسي للإنسان ويعزز الشعور بالهدوء والراحة داخل البيئة المبنية. ويشمل ذلك استخدام المسطحات المائية، والنوافير، والشلالات الداخلية، وبرك المياه الخارجية، بالإضافة إلى العناصر المائية المرتبطة بالمناظر الطبيعية المحيطة بالمبنى. ولا يقتصر دور هذه العناصر على الجانب الجمالي، بل يمكن أن تؤثر بصورة إيجابية على التجربة الحسية للمستخدم من خلال الصوت والحركة والانعكاس البصري للمياه (Kellert et al., 2011). وتشير الدراسات إلى أن وجود العناصر المائية في البيئة المعمارية يمكن أن يساهم في تحسين الإدراك النفسي للمكان، وتقليل مستويات التوتر، وتعزيز الشعور بالراحة والاسترخاء. ويعود ذلك إلى ارتباط الماء في الوعي الإنساني بالبيئات الطبيعية، مثل الأنهار والبحيرات والمناطق الساحلية، مما يجعل وجوده داخل المباني أو حولها وسيلة لتعزيز الاتصال بالطبيعة حتى في البيئات الحضرية المغلقة (Ryan et al., 2014).

يجب أن يتم دمج العناصر المائية بطريقة تحقق التوازن بين الفوائد البيئية والوظيفية وبين المحافظة على الموارد المائية. لذلك تعتمد المشاريع الحديثة على تقنيات مثل إعادة تدوير المياه، واستخدام المياه الرمادية المعالجة، وأنظمة التحكم في تدفق المياه، بهدف تقليل الاستهلاك وتحقيق تطبيق أكثر استدامة لهذه العناصر. كما يمكن لبعض التطبيقات المائية، خاصة في المناطق الجافة والحارة، أن تساهم في تحسين الظروف المناخية المحلية من خلال التبريد التبخيري وتقليل الإحساس بدرجات الحرارة المرتفعة عند تصميمها بصورة صحيحة (Pérez-Urrestarazu et al., 2015). وتزداد أهمية دمج العناصر المائية في المشاريع التي تجمع بين التصميم البيوفيلي والاستدامة، حيث يمكن أن تتكامل مع المساحات الخضراء والأسطح النباتية لتكوين أنظمة بيئية صغيرة داخل المدن، مما يعزز جودة البيئة الحضرية ويدعم مفهوم المدن المستدامة.

6.1.4. الاتصال البصري بالطبيعة والإطلالات الخارجية

يمثل الاتصال البصري بالطبيعة (Visual Connection with Nature) أحد المبادئ الأساسية في التصميم البيوفيلي، ويشير إلى تصميم المباني بطريقة تسمح للمستخدمين برؤية العناصر الطبيعية المحيطة مثل الأشجار، والحدائق، والمساحات الخضراء، والمسطحات المائية. ويعتمد هذا المبدأ على توفير علاقة بصرية مستمرة بين الإنسان والبيئة الطبيعية، بما يقلل من الشعور بالعزلة داخل المباني المغلقة ويعزز الراحة النفسية للمستخدمين (Ryan et al., 2014). ويتحقق الاتصال البصري بالطبيعة من خلال مجموعة من الاستراتيجيات المعمارية،

مثل زيادة مساحة النوافذ، وتوجيه الفراغات الداخلية نحو المناظر الطبيعية، وتصميم الأفنية الداخلية، وإنشاء المساحات المفتوحة بين المباني. كما يمكن تحقيق هذا المبدأ من خلال التخطيط العمراني الذي يدمج المساحات الخضراء ضمن المناطق السكنية والتجارية والتعليمية.

وقد أثبتت العديد من الدراسات أهمية الإطلالات الطبيعية في تحسين أداء المستخدمين وصحتهم النفسية. أشارت الدراسات إلى أن توفير الإطلالات الطبيعية يمكن أن يساعد في تقليل الإجهاد الذهني وزيادة الرضا الوظيفي وتحسين الإنتاجية، حيث توفر الطبيعة عاملًا بصريًا يساعد على استعادة الانتباه وتقليل الإجهاد الناتج عن التركيز المستمر في المهام اليومية (Nieuwenhuis et al., 2014). لذلك أصبح توفير الاتصال البصري بالطبيعة عنصرًا مهمًا في تصميم المكاتب والمباني التعليمية والمرافق الصحية الحديثة. يرتبط هذا المبدأ أيضًا بتعزيز استخدام المساحات الخضراء داخل المدن، مما يساهم في تحسين المناخ الحضري، وتقليل تأثير الجزر الحرارية، وزيادة التنوع الحيوي. وبالتالي فإن الاتصال البصري بالطبيعة لا يمثل مجرد عنصر تصميمي لتحسين الشكل الجمالي للمبنى، بل يعد استراتيجية متكاملة تجمع بين الأهداف البيئية والصحية والاجتماعية للعمارة المستدامة.

6.2. دور التصميم البيوفيلي في تحقيق أهداف العمارة المستدامة

لا يقتصر دور التصميم البيوفيلي (Biophilic Design) على إضافة عناصر جمالية إلى البيئة المبنية، بل يمثل استراتيجية تصميمية متكاملة تتوافق مع أهداف العمارة المستدامة من خلال تحقيق التوازن بين الأداء البيئي للمبنى واحتياجات الإنسان الصحية والنفسية. ففي حين تركز العديد من مفاهيم الاستدامة التقليدية على تقليل استهلاك الطاقة والموارد الطبيعية وخفض الانبعاثات الكربونية، يضيف التصميم البيوفيلي بُعدًا إنسانيًا يركز على تحسين العلاقة بين المستخدم والبيئة المحيطة، مما يساهم في تطوير مبانٍ أكثر كفاءة وراحة واستجابة لاحتياجات شاغليها (Kellert et al., 2011).

وتشير العديد من الدراسات إلى أن دمج العناصر الطبيعية داخل المباني، مثل النباتات، والإضاءة الطبيعية، والإطلالات الخضراء، والمواد المستوحاة من الطبيعة، يمكن أن يحقق تأثيرات إيجابية على صحة المستخدمين ورفاهيتهم النفسية. فقد ارتبط وجود العناصر الطبيعية داخل البيئات الداخلية بتقليل مستويات الإجهاد وتحسين التركيز وزيادة الشعور بالراحة والرضا عن المكان. وتبرز أهمية هذه الفوائد بشكل خاص في المباني التي يقضي فيها الأفراد فترات طويلة، مثل المكاتب، والمستشفيات، والمؤسسات التعليمية، حيث يمكن للتصميم البيوفيلي أن يساهم في خلق بيئات أكثر دعمًا للصحة النفسية والإنتاجية (Ryan et al., 2014; Gillis and Gaterslebe, 2015).

كما يساهم التصميم البيوفيلي في تحسين جودة البيئة الداخلية (Indoor Environmental Quality) من خلال تعزيز الاعتماد على الإضاءة الطبيعية وتحسين الاتصال بالهواء والبيئة الخارجية، إضافة إلى دعم مفهوم المباني الصحية التي لا يقتصر تقييمها على كفاءة استهلاك الطاقة فقط، بل يشمل تأثيرها على صحة الإنسان وراحته. وقد أوضحت الدراسات أن تحسين جودة البيئة الداخلية يرتبط بزيادة إنتاجية المستخدمين وتقليل التأثيرات السلبية الناتجة عن قضاء فترات طويلة داخل المباني المغلقة (MacNaughton, 2016).

ومن ناحية أخرى، يمكن أن يدعم التصميم البيوفيلي تحقيق أهداف كفاءة الطاقة في العمارة المستدامة من خلال بعض الاستراتيجيات التصميمية المرتبطة بالطبيعة. فعلى سبيل المثال، يساهم استخدام الإضاءة الطبيعية في تقليل الحاجة إلى الإضاءة الصناعية، بينما تساعد النباتات والأسطح والجدران الخضراء في تحسين الأداء الحراري للمباني من خلال توفير الظلال وتقليل انتقال الحرارة. كما أن دمج التهوية الطبيعية والتصميم المناخي مع العناصر البيوفيليّة يمكن أن يقلل الاعتماد على أنظمة التكييف الميكانيكية، وبالتالي خفض استهلاك الطاقة والانبعاثات المرتبطة بتشغيل المباني (Zhong et al., 2022).

ويمتد تأثير التصميم البيوفيلي إلى المستوى الحضري، حيث يساهم في تعزيز مفهوم المدن المستدامة من خلال زيادة المساحات الخضراء وتحسين جودة البيئة الخارجية. وتعمل الأسطح الخضراء والجدران النباتية والحدائق الحضرية على تقليل تأثير الجزر الحرارية، وتحسين جودة الهواء، ودعم التنوع الحيوي داخل المناطق العمرانية ذات الكثافة العالية. كما توفر هذه العناصر بيئات حضرية أكثر جاذبية وتشجع على التفاعل الاجتماعي وتحسين جودة الحياة للسكان (Zhong et al., 2022).

وبذلك يمثل التصميم البيوفيلي أحد الاتجاهات المهمة في تطور العمارة المستدامة، لأنه يجمع بين الأهداف البيئية والإنسانية في تصميم المباني. فهو لا يهدف فقط إلى تقليل الأثر البيئي للمنشآت، وإنما يسعى إلى إنشاء بيئات عمرانية أكثر صحة وراحة واستدامة من خلال إعادة دمج الطبيعة في الحياة اليومية للإنسان. ولذلك أصبح التصميم البيوفيلي عنصرًا أساسيًا في تطوير المباني المستقبلية التي تجمع بين الكفاءة البيئية وتحسين جودة الحياة.

7. المباني صفرية الطاقة (Zero Energy Buildings) ودورها في تحقيق العمارة المستدامة

تُعد المباني صفرية الطاقة (Zero Energy Buildings, ZEBs) من أبرز تطبيقات العمارة المستدامة الحديثة، حيث تمثل نموذجًا متقدمًا يهدف إلى تحقيق التوازن بين كمية الطاقة التي يستهلكها المبنى والطاقة التي ينتجها من مصادر متجددة خلال فترة زمنية محددة، غالبًا سنة تشغيلية كاملة. ويعتمد مفهوم المبنى الصفري الطاقة على تقليل الطلب على الطاقة أولًا من خلال تحسين كفاءة المبنى وتصميمه وفق المبادئ المناخية، ثم تلبية الاحتياجات المتبقية باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية. ويختلف هذا المفهوم عن المباني التقليدية التي تعتمد بصورة أساسية على شبكات الطاقة الخارجية، إذ تسعى المباني صفرية الطاقة إلى تحقيق قدر أكبر من الاستقلالية وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية ذات الانبعاثات الكربونية المرتفعة (Torcellini et al., 2006).

وقد ظهر مفهوم المباني صفرية الطاقة استجابةً للحاجة العالمية إلى تقليل استهلاك الطاقة في قطاع البناء، والذي يُعد من أكبر القطاعات المستهلكة للطاقة والمسؤولة عن نسبة كبيرة من الانبعاثات المرتبطة بالطاقة. ولذلك أصبحت هذه المباني جزءًا مهمًا من استراتيجيات خفض الانبعاثات وتحقيق أهداف الحياد الكربوني، حيث تجمع بين تقنيات كفاءة الطاقة ومصادر الطاقة المتجددة لتحقيق أداء بيئي مرتفع خلال دورة حياة المبنى (Marszal et al., 2011).

ويعتمد تحقيق صافي الطاقة الصفرية على مجموعة متكاملة من الاستراتيجيات التصميمية والهندسية تبدأ من مرحلة التخطيط والتصميم. وتشمل هذه الاستراتيجيات تحسين الغلاف الخارجي للمبنى من خلال استخدام العزل الحراري المتقدم، والنوافذ عالية الكفاءة، وتقليل التسرب الهوائي، إضافة إلى الاستفادة من التصميم السلبي الذي يعتمد على التوجيه المناسب للمبنى، والإضاءة الطبيعية، والتهوية الطبيعية لتقليل الطلب على أنظمة التدفئة والتبريد. ويُعد تقليل احتياجات المبنى من الطاقة الخطوة الأساسية قبل دمج أنظمة إنتاج الطاقة المتجددة، لأن زيادة كفاءة المبنى تؤدي إلى تقليل حجم الأنظمة المطلوبة وخفض التكلفة الاقتصادية للمشروع (Attia, 2018).

وتُعد أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Photovoltaic Systems) من أكثر التقنيات استخدامًا في المباني صفرية الطاقة، نظرًا لإمكانية دمجها ضمن الأسطح والواجهات لإنتاج الكهرباء اللازمة لتشغيل المبنى. كما يمكن استخدام أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية لتوفير المياه الساخنة، إضافة إلى إمكانية دمج تقنيات أخرى مثل طاقة الرياح الصغيرة أو أنظمة الطاقة الجوفية في المواقع المناسبة. ومع ذلك، فإن نجاح هذه الأنظمة يعتمد بشكل كبير على الظروف المناخية للموقع، وكفاءة التصميم، ومدى توافق إنتاج الطاقة مع نمط استهلاك المبنى (Sartori et al., 2012).

وتوفر المباني صفرية الطاقة العديد من الفوائد البيئية والاقتصادية، حيث تساهم في تقليل استهلاك الوقود الأحفوري وخفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري الناتجة عن قطاع البناء. كما تساعد على تقليل تكاليف

التشغيل على المدى الطويل نتيجة انخفاض الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية، رغم أن تكلفة الإنشاء الأولية قد تكون أعلى مقارنة بالمباني التقليدية بسبب الحاجة إلى تقنيات وأنظمة ذات كفاءة مرتفعة. وتشير الدراسات إلى أن تحليل دورة الحياة الاقتصادية للمبنى يُظهر أن الاستثمارات الأولية في كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة يمكن أن تحقق عوائد اقتصادية مستقبلية من خلال خفض تكاليف التشغيل والصيانة (Sartori et al., 2012).

ولا تقتصر أهمية المباني صفرية الطاقة على الجانب البيئي فقط، بل تمتد إلى تحسين جودة البيئة الداخلية للمستخدمين، إذ تعتمد هذه المباني غالبًا على استراتيجيات تصميمية توفر مستويات أفضل من الراحة الحرارية، وجودة الهواء الداخلي، والإضاءة الطبيعية. كما أن دمج أنظمة التحكم الذكية وإدارة الطاقة يساعد على مراقبة أداء المبنى وتحسين استهلاك الموارد بصورة مستمرة، مما يعزز قدرة المبنى على التكيف مع تغير احتياجات المستخدمين والظروف المناخية (Wang et al., 2024).

وعلى الرغم من المزايا الكبيرة للمباني صفرية الطاقة، إلا أن تطبيقها على نطاق واسع يواجه عددًا من التحديات، من أهمها ارتفاع تكاليف الاستثمار الأولية، والحاجة إلى خبرات متخصصة في التصميم والتنفيذ، وصعوبة تحقيق التوازن بين إنتاج الطاقة واستهلاكها في بعض الظروف المناخية أو المباني ذات الأحمال العالية. كما أن تحقيق صافي الطاقة الصفرية يتطلب تكاملًا بين التصميم المعماري، والهندسة الميكانيكية والكهربائية، وأنظمة إدارة الطاقة، مما يجعل التخطيط المبكر والتعاون بين مختلف التخصصات عاملًا أساسيًا لنجاح المشروع (Marszal et al., 2011).

وفي المناطق ذات المناخ الحار والجاف، مثل منطقة الشرق الأوسط، تمثل المباني صفرية الطاقة فرصة مهمة لتقليل الاستهلاك المرتفع للطاقة الناتج عن أنظمة التبريد وتوفر هذه المناطق ميزة مهمة تتمثل في ارتفاع معدلات الإشعاع الشمسي، مما يجعل دمج أنظمة الطاقة الشمسية خيارًا فعالًا عند دمجه مع استراتيجيات التصميم المناخي والعزل الحراري. لذلك أصبحت العديد من المشاريع الحديثة في المنطقة تتجه نحو تطبيق مبادئ المباني صفرية الطاقة بهدف تحقيق مبانٍ أكثر كفاءة وقدرة على مواجهة تحديات الطاقة والتغير المناخي. وبناءً على ذلك، تمثل المباني صفرية الطاقة أحد أهم الاتجاهات المستقبلية في العمارة المستدامة، إذ تجمع بين تقليل استهلاك الموارد، والاعتماد على الطاقة المتجددة، وتحسين جودة البيئة الداخلية. ومع استمرار تطور تقنيات البناء الذكي والطاقة المتجددة، يُتوقع أن تصبح هذه المباني عنصرًا رئيسيًا في التحول نحو مدن منخفضة الكربون وأكثر استدامة.

8. الأسطح والجدران الخضراء (Zero Energy Buildings) ودورها في تحسين أداء المباني المستدامة

تُعد الأسطح والجدران الخضراء من الحلول المعمارية المستدامة التي تجمع بين الوظائف البيئية والجمالية للمباني، حيث تعتمد على دمج الغطاء النباتي ضمن مكونات المبنى من خلال زراعة النباتات على أسطح المباني أو الواجهات الخارجية والداخلية. وقد أصبحت هذه الحلول جزءًا مهمًا من استراتيجيات العمارة المستدامة نتيجة قدرتها على تحسين الأداء البيئي للمباني، وتقليل الآثار السلبية الناتجة عن التوسع العمراني، خاصة في المدن ذات الكثافة السكانية العالية التي تعاني من نقص المساحات الخضراء وارتفاع درجات الحرارة الناتجة عن ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية (Urban Heat Island Effect) (Berardi et al., 2014).

تُعرّف الأسطح الخضراء بأنها أنظمة إنشائية يتم فيها تغطية جزء أو كامل سطح المبنى بطبقات متعددة تشمل طبقة العزل المائي، وطبقة الحماية، ووسط النمو الزراعي، والنباتات، بحيث تعمل هذه المنظومة كجزء متكامل من أداء المبنى وليس كعنصر جمالي فقط. وتنقسم الأسطح الخضراء عادة إلى أسطح مكثفة Intensive Green) (Roofsتحتوي على تربة أعمق ونباتات أكبر مثل الشجيرات والأشجار الصغيرة، وأسقف ممتدة Extensive) (Green Roofsتعتمد على طبقات زراعية أخف ونباتات منخفضة الاحتياجات مثل النباتات العصارية

والأعشاب، ويختلف اختيار النوع وفقًا لقدرة المبنى الإنشائية، والظروف المناخية، ومتطلبات الصيانة (Oberndorfer et al., 2007).

وتتمثل إحدى أهم فوائد الأسطح الخضراء في تحسين الكفاءة الحرارية للمبنى، حيث تعمل طبقات التربة والنباتات كطبقة عازلة إضافية تقلل انتقال الحرارة عبر السقف. ففي فصل الصيف تساعد النباتات على خفض درجات حرارة سطح المبنى من خلال عملية التبخر والنتح (Evapotranspiration)، مما يقلل الأحمال الحرارية الداخلة إلى المبنى والحاجة إلى استخدام أنظمة التبريد، بينما تساعد في فصل الشتاء على تقليل فقدان الحرارة. وقد أظهرت العديد من الدراسات أن الأسطح الخضراء يمكن أن تسهم في خفض استهلاك الطاقة وتحسين الأداء الحراري للمباني، خاصة في المناطق ذات المناخ الحار (Santamouris, 2014).

كما تلعب الأسطح والجدران الخضراء دورًا مهمًا في الحد من تأثير الجزر الحرارية الحضرية، والتي تنتج عن استبدال المساحات الطبيعية بالأسطح الخرسانية والإسفلتية التي تمتص كميات كبيرة من الإشعاع الشمسي وتعيد إطلاق الحرارة إلى البيئة المحيطة. وتساعد النباتات المستخدمة في هذه الأنظمة على تبريد الهواء المحيط بالمبنى من خلال الظل وعمليات التبخر والنتح، مما يساهم في تحسين المناخ المحلي داخل المناطق الحضرية وتقليل درجات الحرارة المحيطة بالمباني (Shafique et al., 2018).

ومن الفوائد البيئية المهمة للأسطح والجدران الخضراء قدرتها على تحسين إدارة مياه الأمطار، حيث تعمل طبقات النمو النباتي على امتصاص جزء من مياه الأمطار وتخزينها لفترة مؤقتة، مما يقلل كمية المياه المتدفقة إلى شبكات تصريف المياه خلال فترات الهطول الغزير. وتساعد هذه الخاصية على تقليل مخاطر الفيضانات الحضرية وتحسين كفاءة إدارة المياه، إضافة إلى إمكانية استخدام المياه المخزنة في بعض التطبيقات الزراعية أو أنظمة الري عند تصميم النظام بطريقة مناسبة (Berndtsson, 2010).

وعلى الرغم من الفوائد المتعددة لهذه الأنظمة، فإن تطبيقها يواجه بعض التحديات التي يجب أخذها بعين الاعتبار، ومنها التكلفة الأولية للإنشاء، ومتطلبات الصيانة المستمرة، والحاجة إلى أنظمة ري مناسبة، بالإضافة إلى ضرورة اختيار النباتات التي تتلاءم مع الظروف المناخية المحلية وقدرة المبنى الإنشائية. كما أن نجاح الأسطح والجدران الخضراء يعتمد على التصميم المتكامل بين المهندس المعماري والمهندسين المختصين لضمان تحقيق الفوائد البيئية دون التأثير على أداء المبنى أو زيادة استهلاك الموارد.

9. دور التكنولوجيا الذكية والتحول الرقمي في تحقيق العمارة المستدامة

شهد قطاع البناء خلال العقود الأخيرة تحولًا كبيرًا نتيجة التطور المتسارع في التقنيات الرقمية وأنظمة الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء، مما أدى إلى ظهور مفهوم المباني الذكية (Smart Buildings) باعتبارها أحد الاتجاهات الداعمة لتحقيق أهداف العمارة المستدامة. وتعتمد المباني الذكية على استخدام أنظمة متقدمة للمراقبة والتحكم وتحليل البيانات بهدف تحسين أداء المبنى، ورفع كفاءة استخدام الطاقة والمياه، وتقليل الهدر في الموارد، مع توفير بيئة داخلية أكثر راحة وصحة للمستخدمين. وأصبح دمج التكنولوجيا الرقمية مع مبادئ الاستدامة عنصرًا أساسيًا في تطوير المباني الحديثة، حيث لم تعد كفاءة المبنى تعتمد فقط على التصميم المعماري والمواد المستخدمة، بل أصبحت مرتبطة أيضًا بقدرته على التكيف والاستجابة للظروف التشغيلية المتغيرة (Buckman et al., 2014).

تتمثل إحدى أهم تطبيقات التكنولوجيا الذكية في أنظمة إدارة المباني، وهي أنظمة تعتمد على أجهزة الاستشعار ووحدات التحكم الرقمية لمراقبة وتشغيل الأنظمة المختلفة داخل المبنى، مثل الإضاءة، والتدفئة، والتهوية، وتكييف الهواء، وأنظمة الأمن والمياه. وتسمح هذه الأنظمة بضبط تشغيل المعدات وفقًا للاستخدام الفعلي للمبنى، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة التشغيل. فعلى سبيل المثال، يمكن لأنظمة التحكم الذكية تعديل مستوى الإضاءة أو درجة الحرارة تلقائيًا اعتمادًا على وجود الأشخاص داخل الفراغات أو الظروف

المناخية الخارجية، مما يقلل من الطاقة غير الضرورية ويحسن الأداء البيئي للمبنى (Amasyali and El-Gohary, 2018).

ويعد إنترنت الأشياء (Internet of Things, IoT) من التقنيات الحديثة التي ساهمت في تطوير مفهوم المباني المستدامة، حيث يسمح بربط أجهزة الاستشعار والأنظمة المختلفة داخل المبنى بشبكة رقمية قادرة على جمع البيانات وتحليلها في الوقت الحقيقي. وتستخدم هذه البيانات لفهم أنماط استهلاك الطاقة والمياه، والكشف عن الأعطال، وتحسين عمليات التشغيل والصيانة. كما تساعد أنظمة إنترنت الأشياء في الانتقال من الصيانة التقليدية إلى الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance)، حيث يمكن اكتشاف المشكلات قبل حدوثها وتقليل استهلاك الموارد الناتج عن التشغيل غير الفعال للأنظمة (Minoli et al., 2017).

كما أدى التطور في تقنيات الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence, AI) وتحليل البيانات الضخمة (Big Data Analytics) إلى تحسين قدرة المباني على اتخاذ قرارات تشغيلية أكثر كفاءة. إذ يمكن استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات المتعلقة بدرجات الحرارة، والإشغال، واستهلاك الطاقة، والظروف المناخية، ثم اقتراح أو تنفيذ إجراءات تلقائية لتحسين أداء المبنى. وتساهم هذه التقنيات في تحقيق توازن أفضل بين تقليل استهلاك الطاقة والحفاظ على الراحة الحرارية للمستخدمين، وهو أحد الأهداف الأساسية للعمارة المستدامة (Shao et al., 2025).

ومن التقنيات الرقمية المهمة في مجال العمارة المستدامة نمذجة معلومات البناء (Building Information Modeling, BIM)، والتي تمثل منصة رقمية متكاملة تستخدم في تصميم وإدارة المباني خلال مختلف مراحل دورة حياتها. وتسمح تقنية BIM بإنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد يحتوي على معلومات تفصيلية عن مكونات المبنى وأنظمته المختلفة، مما يساعد المصممين والمهندسين على تقييم الأداء البيئي للمشروع قبل التنفيذ. ويمكن من خلال هذه التقنية إجراء محاكاة لاستهلاك الطاقة، وتحليل الإضاءة الطبيعية، وتقييم أداء الغلاف الخارجي للمبنى، مما يساهم في اتخاذ قرارات تصميمية أكثر استدامة وتقليل الأخطاء والهدر أثناء مراحل البناء (Shao et al., 2025).

يمكن استخدام النموذج الرقمي كقاعدة بيانات متكاملة لإدارة المبنى بعد إنشائه. ويساعد ذلك في متابعة حالة المعدات، وتخطيط أعمال الصيانة، وتحسين استخدام الموارد طوال العمر التشغيلي للمبنى. ومع تطور التقنيات الرقمية، ظهر مفهوم التوأم الرقمي (Digital Twin)، الذي يمثل نسخة افتراضية ديناميكية للمبنى مرتبطة بالبيانات الفعلية الناتجة عن أجهزة الاستشعار، مما يسمح بمراقبة الأداء في الوقت الحقيقي وتحسين القرارات التشغيلية بصورة مستمرة (Shao et al., 2025).

كما تلعب التكنولوجيا الذكية دورًا مهمًا في تحسين كفاءة استخدام الطاقة داخل المباني من خلال دمج أنظمة إنتاج الطاقة المتجددة مع أنظمة إدارة الطاقة. فعلى سبيل المثال، يمكن لأنظمة التحكم الذكية إدارة إنتاج الكهرباء من الألواح الشمسية وربطها بأنماط استهلاك الطاقة داخل المبنى، مما يساعد على زيادة الاستفادة من الطاقة المتجددة وتقليل الاعتماد على الشبكات التقليدية. ويكتسب هذا التكامل أهمية خاصة في المباني صفرية الطاقة، حيث يعتمد تحقيق التوازن بين إنتاج الطاقة واستهلاكها على وجود أنظمة دقيقة للمراقبة والتحكم.

كما ساهم التحول الرقمي في تطوير مفهوم التصميم القائم على الأداء(Performance-Based Design) ، والذي يعتمد على استخدام المحاكاة الرقمية لتحليل أداء المبنى قبل إنشائه بدلًا من الاعتماد فقط على الخبرة التقليدية. وتشمل هذه التحليلات تقييم استهلاك الطاقة، والراحة الحرارية، والإضاءة الطبيعية، وجودة الهواء الداخلي، مما يسمح باختيار الحلول التصميمية الأكثر كفاءة بيئيًا واقتصاديًا. ويؤدي ذلك إلى تقليل الحاجة إلى التعديلات بعد التنفيذ وتحسين فرص تحقيق أهداف الاستدامة منذ المراحل الأولى للمشروع (Attia, 2018).

وعلى الرغم من الفوائد الكبيرة للتكنولوجيا الذكية في دعم العمارة المستدامة، فإن تطبيقها يواجه بعض التحديات، من أهمها ارتفاع التكلفة الأولية للأنظمة الذكية، والحاجة إلى كوادر متخصصة لإدارتها وصيانتها، بالإضافة إلى تحديات حماية البيانات والأمن السيبراني نتيجة الاعتماد المتزايد على الأنظمة المتصلة بالشبكات الرقمية. كما أن نجاح هذه التقنيات يعتمد على اختيار الحلول المناسبة لطبيعة المبنى والمستخدمين، إذ لا يعني استخدام التكنولوجيا بالضرورة تحقيق الاستدامة ما لم يتم دمجها ضمن استراتيجية تصميم وتشغيل متكاملة. وبشكل عام، يمثل التحول الرقمي أحد الركائز الأساسية لمستقبل العمارة المستدامة، حيث يوفر أدوات متقدمة لتحسين كفاءة المباني وتقليل استهلاك الموارد وتعزيز قدرتها على التكيف مع الظروف المتغيرة. ومن خلال التكامل بين التصميم المعماري المستدام، والأنظمة الذكية، وتحليل البيانات، والطاقة المتجددة، يمكن تطوير مبانٍ أكثر كفاءة ومرونة وقدرة على تحقيق أهداف التنمية المستدامة وتقليل التأثيرات البيئية لقطاع البناء.

10. أمثلة تطبيقية لمشاريع العمارة المستدامة في العالم العربي والعالم

تمثل المشاريع المعمارية المستدامة التطبيق العملي لمبادئ العمارة الخضراء، إذ توضح كيفية دمج تقنيات كفاءة الطاقة، وإدارة الموارد، والمواد المستدامة، والتصميم المناخي ضمن مشاريع حقيقية أثبتت نجاحها. وقد شهدت العقود الأخيرة تنفيذ العديد من المباني والمدن المستدامة التي أصبحت نماذج مرجعية في مجال البناء الأخضر، سواء في الدول العربية أو على المستوى العالمي. وتتميز هذه المشاريع بتبني حلول متكاملة تهدف إلى تقليل استهلاك الطاقة والمياه، وخفض الانبعاثات الكربونية، وتحسين جودة البيئة الداخلية، بما ينسجم مع أهداف التنمية المستدامة (Kibert, 2022).

10.1. مركز قطر الوطني للمؤتمرات (قطر)

يُعد مركز قطر الوطني للمؤتمرات (Qatar National Convention Centre) أحد أبرز المباني المستدامة في منطقة الشرق الأوسط، وقد افتُتح عام 2011 بتصميم معماري مستوحى من شجرة السدرة، التي تُعد رمزًا للمعرفة والاستدامة في الثقافة القطرية. وقد كلف بناء المبنى حوالي 720 مليون دولار. ويعتمد المبنى على مجموعة من التقنيات البيئية، تشمل الاستفادة القصوى من الإضاءة الطبيعية، وأنظمة متطورة لإدارة الطاقة، إضافة إلى واجهات معمارية توفر التظليل وتحد من اكتساب الحرارة، مما يسهم في تقليل استهلاك الطاقة المستخدمة في التبريد، كما هو مبين في الشكل 1. كما حصل المبنى على شهادة (LEED Gold) تقديرًا لأدائه البيئي وكفاءته في استخدام الموارد (QNCC, 2024; USGBC, 2024).

IJSSP
المجلة الدولية لنشر الدراسات العلمية
المجلد الثلاثون – العدد الثاني – البحث الثاني (ص: 16 - 47)
15 – آب – 2026م
www.ijssp.com ISSN: 2707-5184 International Journal of Scientific Studies Publishing

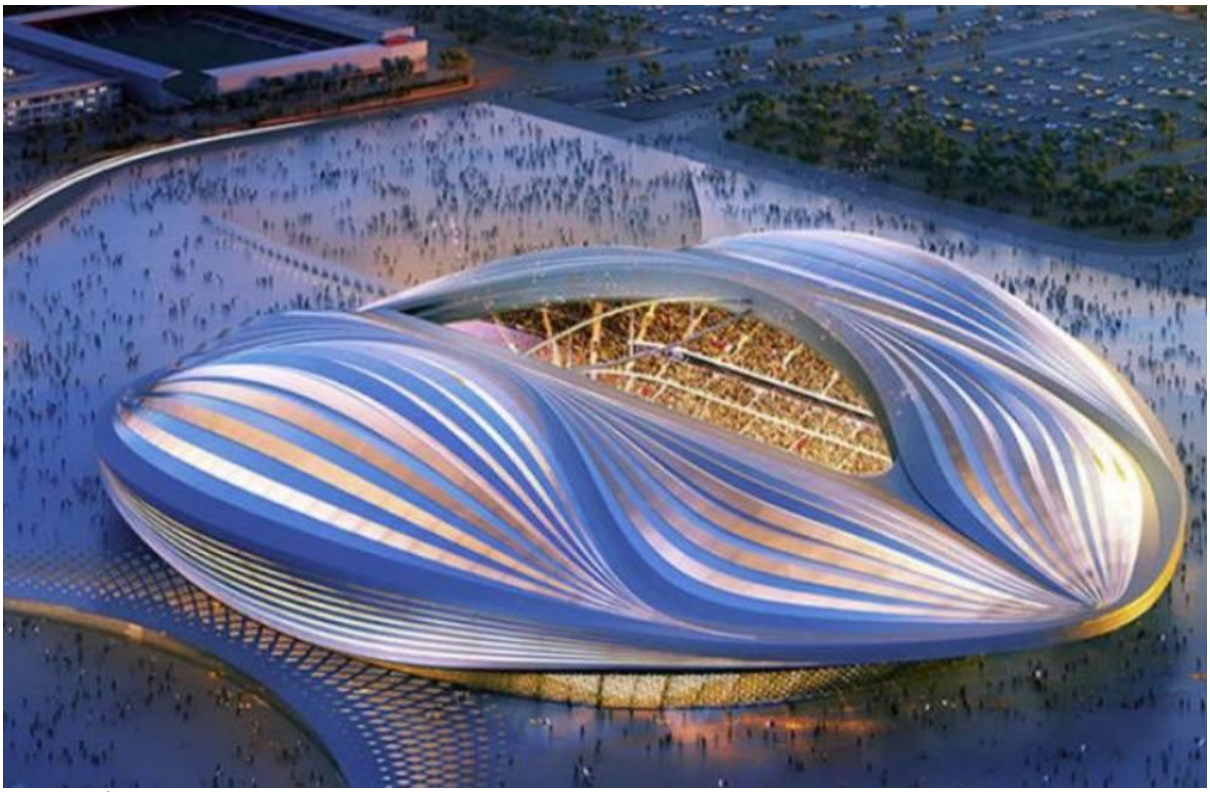


الشكل1: مركز قطر الوطني للمؤتمرات في دولة قطر، ويُظهر التصميم المستوحى من شجرة السدرة واعتماد تقنيات البناء المستدامة.

10.2. ملاعب كأس العالم FIFA قطر 2022

تُعد ملاعب كأس العالم FIFA قطر 2022 من أبرز المشروعات التي طبقت مبادئ العمارة المستدامة في المنطقة، حيث صُممت وفق استراتيجيات تهدف إلى رفع كفاءة الطاقة والمياه، وتقليل الأثر البيئي، وتحقيق الاستدامة خلال مرحلتي الإنشاء والتشغيل. ومن أبرز هذه الملاعب ملعب الوكرة الذي صممته المعمارية زها حديد، واعتمد على أنظمة تبريد عالية الكفاءة، ومواد بناء مستدامة، وإعادة استخدام المياه، إضافة إلى تصميم مرن يسمح بتقليل سعة الملعب بعد البطولة بما يتوافق مع احتياجات المجتمع المحلي، كما هو موضح في الشكل 2. كما حصل الملعب على شهادة (GSAS) للاستدامة، مما يعكس توافقه مع معايير المباني الخضراء (FIFA, 2022; Supreme Committee for Delivery and Legacy, 2022).

IJSSP
المجلة الدولية لنشر الدراسات العلمية
المجلد الثلاثون – العدد الثاني – البحث الثاني (ص: 16 - 47)
15 – آب – 2026م
www.ijssp.com ISSN: 2707-5184 International Journal of Scientific Studies Publishing



الشكل 2: ملعب الوكرة في دولة قطر، أحد الملاعب المستدامة التي استضافت بطولة كأس العالم (FIFA) قطر 2022.

10.3. جامعة الملك عبدالله للعلوم والتكنولوجيا (المملكة العربية السعودية)

تمثل جامعة الملك عبدالله للعلوم والتكنولوجيا(KAUST)، التي افتُتحت عام 2009 على ساحل البحر الأحمر، أحد أكبر مشاريع التعليم المستدام في المنطقة. وقد صُمم الحرم الجامعي ليتلاءم مع المناخ الصحراوي من خلال توجيه المباني للاستفادة من حركة الرياح الطبيعية، واستخدام عناصر التظليل، وتقليل الأحمال الحرارية، بالإضافة إلى تطبيق أنظمة متقدمة لإدارة المياه والطاقة. ويُعد المشروع من أوائل المشاريع الكبرى في المملكة العربية السعودية التي حصلت على شهادة (LEED Platinum)، مما يعكس التزامه بأعلى معايير الاستدامة البيئية (KAUST, 2024; USGBC, 2024). يوضح الشكل 3 الحرم الجامعي لجامعة الملك عبدالله للعلوم والتكنولوجيا.

IJSSP
المجلة الدولية لنشر الدراسات العلمية
المجلد الثلاثون – العدد الثاني – البحث الثاني (ص: 16 - 47)
15 – آب – 2026م
www.ijssp.com ISSN: 2707-5184 International Journal of Scientific Studies Publishing

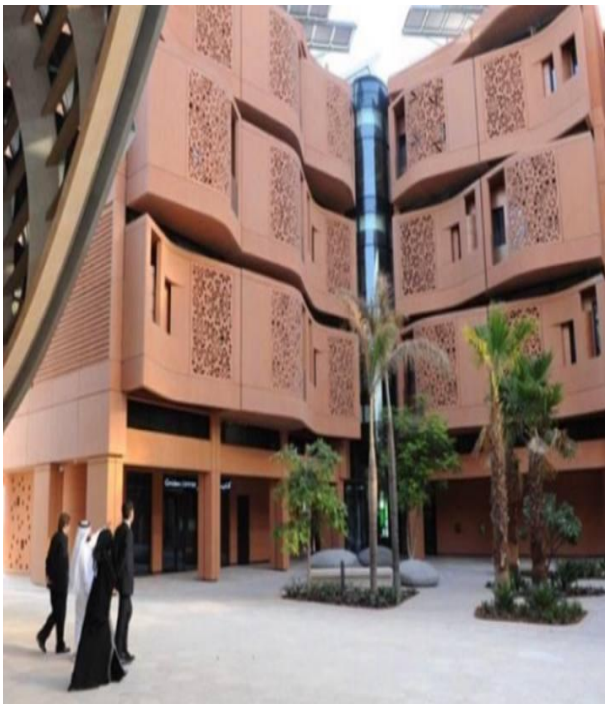


الشكل 3: الحرم الجامعي لجامعة الملك عبدالله للعلوم والتكنولوجيا، ويبين استخدام عناصر التصميم المناخي وتقنيات كفاءة الطاقة.

10.4. مدينة مصدر (الإمارات العربية المتحدة)

تُعد مدينة مصدر في أبوظبي من أشهر نماذج المدن المستدامة عالميًا، حيث أُطلقت بهدف إنشاء مدينة منخفضة الانبعاثات تعتمد بصورة كبيرة على الطاقة المتجددة. وقد روعي في تصميم المدينة استخدام الشوارع الضيقة لتوفير الظلال، وتوجيه المباني للاستفادة من التهوية الطبيعية، إضافة إلى دمج أنظمة الطاقة الشمسية وتقنيات إعادة استخدام المياه وإدارة النفايات وفق مبادئ الاقتصاد الدائري. كما تعتمد المدينة على وسائل نقل منخفضة الانبعاثات، مما يجعلها نموذجًا متكاملًا لتطبيق مبادئ الاستدامة في التخطيط العمراني (Masdar, 2024). شكل 4 يبين مدينة مصدر في أبوظبي، التي تُعد نموذجًا لتطبيق مبادئ المدن المستدامة والطاقة المتجددة.

IJSSP
المجلة الدولية لنشر الدراسات العلمية
المجلد الثلاثون – العدد الثاني – البحث الثاني (ص: 16 - 47)
15 – آب – 2026م
www.ijssp.com ISSN: 2707-5184 International Journal of Scientific Studies Publishing





الشكل 4: مدينة مصدر في أبوظبي.

المناخي وتقنيات كفاءة الطاقة.

10.5. مركز البحرين التجاري العالمي (مملكة البحرين)

يُعد مركز البحرين التجاري العالمي من أوائل ناطحات السحاب في العالم التي دمجت توربينات الرياح ضمن التصميم الإنشائي للمبنى. ويتكون المبنى من برجين يرتبطان بثلاث توربينات هوائية تعمل على توليد جزء من احتياجات المبنى من الكهرباء، إضافة إلى اعتماد واجهات زجاجية عالية الكفاءة تقلل اكتساب الحرارة وتحسن الأداء الحراري للمبنى. ويُبرز هذا المشروع إمكانية دمج الطاقة المتجددة مباشرة في التصميم المعماري للمباني الشاهقة (CTBUH, 2023). شكل 5 يبين مركز البحرين التجاري العالمي الذي يستخدم توربينات الرياح المدمجة في تصميمه لإنتاج الطاقة الكهربائية.



الشكل 5: مركز البحرين التجاري العالمي.

10.6. مطار الكويت الدولي (مبنى الركاب (T2))

يُعد مبنى الركاب الجديد في مطار الكويت الدولي أحد أكبر مشاريع البنية التحتية المستدامة في المنطقة، حيث صُمم وفق معايير (LEED Gold) مع التركيز على تقليل استهلاك الطاقة والمياه. ويتميز المبنى باستخدام الإضاءة الطبيعية، والأسقف ذات الأداء الحراري العالي، وأنظمة الطاقة الشمسية، إضافة إلى أنظمة ذكية لإدارة استهلاك الموارد، بما يتلاءم مع الظروف المناخية الحارة في دولة الكويت (Foster + Partners, 2024). شكل 6 يبين مبنى الركاب الجديد في مطار الكويت الدولي، ويبين توظيف تقنيات التصميم المستدام وكفاءة الطاقة.

IJSSP
المجلة الدولية لنشر الدراسات العلمية
المجلد الثلاثون – العدد الثاني – البحث الثاني (ص: 16 - 47)
15 – آب – 2026م
www.ijssp.com ISSN: 2707-5184 International Journal of Scientific Studies Publishing



الشكل 6: مبنى الركاب الجديد في مطار الكويت الدولي.

10.7. مجمع (ذي جيت) السكني (مصر)

يُعد مجمع "ذي جيت" السكني في القاهرة من المشروعات التي تبنت مفاهيم العمارة المستدامة من خلال دمج الحلول البيئية مع التصميم المعماري، حيث يعتمد على تحسين التهوية الطبيعية والإضاءة النهارية، واستخدام الخلايا الكهروضوئية لإنتاج جزء من احتياجاته من الكهرباء، إضافة إلى الأسطح الخضراء التي تسهم في تحسين العزل الحراري وتقليل استهلاك الطاقة. شكل 7 يبين مجمع "ذي جيت" السكني في مصر (Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH).



الشكل 7: مجمع ذي جيت السكني في مصر.

10.8. معهد مصدر للعلوم والتكنولوجيا (الإمارات العربية المتحدة)

يُعد معهد مصدر للعلوم والتكنولوجيا من أبرز نماذج العمارة المستدامة في المنطقة، إذ يعتمد على التصميم المناخي، والاستفادة من الإضاءة والتهوية الطبيعية، وأنظمة عالية الكفاءة لترشيد استهلاك الطاقة والمياه، مما أسهم في تقليل استهلاك الموارد وتحسين الأداء البيئي للمبنى (Reiche, 2010). شكل 8 يبين معهد مصدر للعلوم والتكنولوجيا في أبوظبي.



الشكل 8: معهد مصدر للعلوم والتكنولوجيا في أبو ظبي.

10.9. سوق أبو ظبي المركزي (الإمارات العربية المتحدة)

يمثل سوق أبوظبي المركزي نموذجًا للمباني التجارية المستدامة، حيث يعتمد على أنظمة التظليل، والتهوية الطبيعية، وتصميم الواجهات بما يقلل من اكتساب الحرارة، الأمر الذي يسهم في خفض استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة الأداء البيئي للمبنى. شكل 9 يبين سوق أبوظبي المركزي في الإمارات العربية المتحدة.



الشكل 9: سوق أبوظبي المركزي في الإمارات العربية المتحدة.

10.10.مسجد خليفة التاجر-دبي (الإمارات العربية المتحدة)

يُعد **مسجد خليفة التاجر** أول مسجد أخضر في دولة الإمارات العربية المتحدة، حيث بُني باستخدام مواد عازلة للحرارة، وزُود بأنظمة للطاقة الشمسية، وإضاءة (LED) عالية الكفاءة، وأنظمة ذكية للتحكم بالإضاءة والتكييف، إضافة إلى أنظمة لترشيد استهلاك المياه، مما أسهم في خفض استهلاك الطاقة والمياه وتحقيق معايير المباني الخضراء. شكل 10 يبين مسجد خليفة التاجر في دبي.



الشكل 10: مسجد خليفة التاجر في دبي.

وتعتمد هذه المشروعات على تقنيات متقدمة تشمل استخدام الطاقة الشمسية، والرياح، والإضاءة الطبيعية، وأنظمة التهوية، وإعادة تدوير المياه، والأسطح الخضراء، بما يجعلها نماذج رائدة في تطبيق مبادئ العمارة المستدامة (Gabr, 2015).

11. النتائج

أوضحت هذه المراجعة أن العمارة المستدامة أصبحت ضرورة أساسية في ظل التحديات البيئية المتزايدة المرتبطة بقطاع البناء، نتيجة ارتفاع استهلاك الطاقة والموارد الطبيعية وزيادة مساهمته في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وقد تبين أن مفهوم الاستدامة في العمارة لم يعد مقتصرًا على تحسين الأداء البيئي للمبنى فقط، بل تطور ليصبح إطارًا شاملًا يوازن بين الجوانب البيئية والاقتصادية والاجتماعية طوال دورة حياة المبنى، بدءًا من مرحلة التخطيط والتصميم وصولًا إلى التشغيل والصيانة وإعادة الاستخدام.

أظهرت الدراسة أن كفاءة الطاقة تمثل أحد أهم مرتكزات العمارة المستدامة، حيث يمكن تحقيق تحسينات كبيرة في أداء المباني من خلال دمج التصميم السلبي، وتحسين الغلاف الخارجي للمبنى، والاستفادة من الإضاءة والتهوية الطبيعية، وتقليل الأحمال الحرارية. كما أن دمج مصادر الطاقة المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع، يمثل استراتيجية فعالة لتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية وخفض الانبعاثات الكربونية، مما يجعل المباني صفرية الطاقة أحد أهم النماذج المستقبلية لتحقيق الحياد الكربوني في قطاع البناء.

كما بينت المراجعة أن الإدارة المستدامة للمياه واختيار مواد البناء منخفضة الأثر البيئي يمثلان عنصرين أساسيين في تحسين الأداء المستدام للمباني. إذ يساهم تطبيق تقنيات إعادة استخدام المياه، واختيار المواد المحلية والقابلة

لإعادة التدوير، وتطبيق مبادئ تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment)، في تقليل استنزاف الموارد الطبيعية وخفض التأثيرات البيئية المرتبطة بعمليات البناء والتشغيل.

وأظهرت النتائج أن التصميم البيوفيلي يمثل تطورًا مهمًا في العمارة المستدامة، لأنه يضيف البعد الإنساني إلى مفهوم الاستدامة من خلال تعزيز العلاقة بين الإنسان والطبيعة. فقد أثبتت الدراسات أن دمج النباتات، والإضاءة الطبيعية، والعناصر المائية، والإطلالات الخارجية، والمواد الطبيعية، لا يساهم فقط في تحسين الجوانب الجمالية للمبنى، بل يؤدي أيضًا إلى تعزيز الراحة النفسية، وتقليل الإجهاد، وتحسين الإنتاجية وجودة البيئة الداخلية للمستخدمين.

كما أكدت الدراسة الدور المتزايد للأسطح والجدران الخضراء في تحسين الأداء البيئي للمباني، خاصة في المناطق الحضرية ذات الكثافة العالية. إذ تساعد هذه الأنظمة في تحسين العزل الحراري، وتقليل تأثير الجزر الحرارية الحضرية، وتحسين إدارة مياه الأمطار، ودعم التنوع الحيوي، مما يجعلها من الحلول الفعالة للتكيف مع آثار التغير المناخي في المدن الحديثة.

وأوضحت المراجعة أن التحول الرقمي يمثل أحد العوامل الرئيسية في تطوير العمارة المستدامة، حيث ساهمت تقنيات مثل أنظمة إدارة المباني الذكية، وإنترنت الأشياء، والذكاء الاصطناعي، ونمذجة معلومات البناء (BIM)، والتوأم الرقمي، في تحسين مراقبة أداء المباني وإدارة استهلاك الطاقة والمياه بصورة أكثر كفاءة. ومع ذلك، فإن الاستفادة الكاملة من هذه التقنيات تتطلب وجود بنية تحتية رقمية مناسبة، وكوادر متخصصة، ومعالجة التحديات المتعلقة بالتكلفة والأمن السيبراني.

وبالنسبة لأنظمة تقييم المباني المستدامة، فقد أظهرت الدراسة أن أنظمة مثل (LEED, BREEAM, Estidama) لعبت دورًا مهمًا في تعزيز تطبيق معايير الاستدامة ورفع مستوى الأداء البيئي للمباني. إلا أن فعالية هذه الأنظمة تعتمد على مدى توافقها مع الظروف المناخية والمحلية، حيث تختلف أولويات الاستدامة بين المناطق الجغرافية المختلفة؛ فعلى سبيل المثال، تزداد أهمية إدارة المياه وكفاءة التبريد في المناطق الحارة والجافة مقارنة بالمناطق ذات المناخ المعتدل.

كما بين تحليل المشاريع التطبيقية في العالم العربي أن العديد من الدول بدأت في تبني مبادئ العمارة المستدامة من خلال مشاريع رائدة مثل مدينة مصدر، وجامعة الملك عبدالله للعلوم والتكنولوجيا، ومركز قطر الوطني للمؤتمرات، ومركز البحرين التجاري العالمي، وغيرها من المشاريع التي أثبتت إمكانية دمج الطاقة المتجددة، والتصميم المناخي، والتقنيات الذكية ضمن المباني الحديثة. وتوضح هذه النماذج أن نجاح العمارة المستدامة في المنطقة يعتمد بشكل كبير على الاستفادة من الخصائص المناخية المحلية وتطوير حلول تصميمية تتناسب مع الظروف البيئية لكل موقع.

وعلى الرغم من التطور الكبير في مجال العمارة المستدامة، لا تزال هناك مجموعة من التحديات التي تحد من انتشارها، ومن أبرزها ارتفاع تكاليف الاستثمار الأولية، والحاجة إلى تطوير التشريعات والمعايير الوطنية، ونقص الخبرات المتخصصة في بعض المناطق، إضافة إلى الحاجة إلى تعزيز التكامل بين مختلف التخصصات الهندسية والمعمارية خلال مراحل التصميم والتنفيذ

المراجع:

قصي زايد علي المعايطة. (2024). الهندسة الخضراء ودورها في تحسين جودة البيئة المحلية في البلديات. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية, 5(3), 387-403.
عبدالله شعيرية, علاء, أسامة صابر, & عبد اللطيف. (2024). الانتقال إلى العمارة الخضراء في السعودية. مجلة دراية: المجلة العلمية للسياسات العامة ودراسات التنمية, 3(1), 33-81.
ا. د. امل اسمر زبون, الباحث, & محمد صباح حسن. (2024). الاستثمار بالمدن الذكية في الأمارات ودوره في تحقيق التنمية المستدامة (مدينة مصدر نموذجا). المجلة العراقية للعلوم الاقتصادية, 19022-176 ,(80. S).
المهندي, & عبدالله إبراهيم. (2023). دراسة تحليلية للموقف التنافسي لمركز قطر الوطني للمؤتمرات قبل وبعد افتتاح مركز الدوحة للمعارض والمؤتمرات.
العنزي, صالح عيد قريطع, العتيبي, & عبدالرحمن عبدالله. مشرف. (2018). دور الجامعات السعودية في تحقيق رؤية المملكة 2030م (Doctoral dissertation, جامعة نايف العربية للعلوم الأمنية).
نوره. (2025). دور العمارة الإسلامية بمدينة القاهرة في تأصيل مفهوم التصميم المستدام في الفترة (358-1213هـ/969-1798م). Bulletin of the Center Papyrological Studies, 42(1), 69-134.
بهجت, & حسام. (2023). اعادة قراءة العمارة المعاصرة-مدخل الاستدامة. مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية, 8(39), 135-144.

المراجع الأجنبية:

Abu Dhabi Urban Planning Council. The Pearl Rating System for Estidama. Abu Dhabi; 2010.
Abushammala, M. F., Almuaythir, S., Al-Zghoul, T. M., & Alazaiza, M. Y. (2026). Waste-to-Energy Technologies in Saudi Arabia: A Case Study and Review of Waste Conversion and Energy Recovery. Energies (19961073), 19(4), 1085.
Afful, A. E., Ayarkwa, J., Acquah, G. K. K., Osei-Asibey, D., & Osei Assibey, A. A. D. (2023). Barriers to incorporation of indoor environmental quality (IEQ) principles into building designs. Engineering, Construction and Architectural Management, 30(6), 2400-2419.
Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., Delgado, M. D., Bilal, M., & Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. Resources, Conservation and Recycling, 129, 175-186.

Amasyali, K., & El-Gohary, N. M. (2018). A review of data-driven building energy consumption prediction studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 1192-1205.

Aries, M. B., Aarts, M. P., & van Hoof, J. (2015). Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment. Lighting Research & Technology, 47(1), 6-27.

Asdrubali, F., Colladon, A. F., Segneri, L., & Gandola, D. M. (2024). LCA and energy efficiency in buildings: Mapping more than twenty years of research. Energy and Buildings, 321, 114684.
Attia, S. (2018). Net Zero Energy Buildings (NZEB): Concepts, frameworks and roadmap for project analysis and implementation. Butterworth-Heinemann.
Awadh, O. (2017). Sustainability and green building rating systems: LEED, BREEAM, GSAS and Estidama critical analysis. Journal of Building Engineering, 11, 25-29.

Berardi, U. (2012). Sustainability assessment in the construction sector: rating systems and rated buildings. Sustainable development, 20(6), 411-424.

Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. Applied energy, 115, 411-428.
Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. Ecological engineering, 36(4), 351-360.
BRE Global. BREEAM International New Construction Technical Manual SD233. 2022.
Buckman, A. H., Mayfield, M., & Beck, S. B. (2014). Smart and Sustainable Built Environment. Environment, 3(2), 92-109.
Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). The Gate Towers / The Gate Residential Project.
CTBUH. (2023). Bahrain World Trade Center. Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
Ding GKC. Sustainable construction-The role of environmental assessment tools. Journal of Environmental Management. 2008, 86(3):451-464.
Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, A., & Tookey, J. (2017). A critical comparison of green building rating systems. Building and Environment, 123, 243-260.
FIFA. (2022). Qatar 2022™: Al Janoub Stadium
Gabr, A. (2015, October 18). 5 Eco-friendly Developments in MENA. Wamda.
Gillis, K., and Gatersleben, B. (2015). A review of psychological literature on the health and wellbeing benefits of biophilic design. Buildings, 5(3), 948-963.
Goldfeder, J., & Sipple, J. (2024). Real-world data and calibrated simulation suite for offline training of reinforcement learning agents to optimize energy and emission in buildings for environmental sustainability.

Hafez, F. S., Sa'di, B., Safa-Gamal, M., Taufiq-Yap, Y. H., Alrifaey, M., Seyedmahmoudian, M., ... & Mekhilef, S. (2023). Energy efficiency in sustainable buildings: a systematic review with taxonomy, challenges, motivations, methodological aspects, recommendations, and pathways for future research. Energy strategy reviews, 45, 101013.
IEA. Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030. International Energy Agency, Paris; 2024.

Illankoon, I. C. S., Tam, V. W., Le, K. N., & Shen, L. (2017). Key credit criteria among international green building rating tools. Journal of cleaner production, 164, 209-220.

International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Energy in Buildings. Abu Dhabi; 2023.

Kellert, S. R., Heerwagen, J., & Mador, M. (2011). Biophilic design: the theory, science and practice of bringing buildings to life. John Wiley & Sons.
Kibert CJ. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2022.
Kibert CJ. The next generation of sustainable construction. Building Research and Information. 2007;35(6):595-601.
Kumar, D., Alam, M., Memon, R. A., & Bhayo, B. A. (2022). A critical review for formulation and conceptualization of an ideal building envelope and novel sustainability framework for building applications. Cleaner engineering and technology, 11, 100555.
Kumar, D., Alam, M., Memon, R. A., & Bhayo, B. A. (2022). A critical review for formulation and conceptualization of an ideal building envelope and novel sustainability framework for building applications. Cleaner engineering and technology, 11, 100555.

Latha, H., Patil, S., & Kini, P. G. (2023). Influence of architectural space layout and building perimeter on the energy performance of buildings: A systematic literature review. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 14(3), 431-474.
Liu, T., Chen, L., Yang, M., Sandanayake, M., Miao, P., Shi, Y., & Yap, P. S. (2022). Sustainability considerations of green buildings: a detailed overview on current advancements and future considerations. Sustainability, 14(21), 14393.
Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., & Li, Y. (2017). Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. Automation in construction, 83, 134-148.
Ma, Q., Qian, G., Yu, M., Li, L., & Wei, X. (2024). Performance of windcatchers in improving indoor air quality, thermal comfort, and energy efficiency: A review. Sustainability, 16(20), 9039.
MacNaughton, P. (2016). Green buildings and health. Harvard University.
Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building–A review of definitions and calculation methodologies. Energy and buildings, 43(4), 971-979.
Masdar. (2024). Masdar City.
Mattoni, B., Guattari, C., Evangelisti, L., Bisegna, F., Gori, P., & Asdrubali, F. (2018). Critical review and methodological approach to evaluate the differences among international green building rating tools. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 950-960.
Minoli, D., Sohraby, K., & Occhiogrosso, B. (2017). IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings—Energy optimization and next-generation building management systems. IEEE Internet of Things Journal, 4(1), 269-283.
Nicolini, E. (2022). Built Environment and Wellbeing—Standards, Multi-Criteria Evaluation Methods, Certifications. Sustainability, 14(8), 4754.
Nieuwenhuis, M., Knight, C., Postmes, T., & Haslam, S. A. (2014). The relative benefits of green versus lean office space: Three field experiments. Journal of Experimental Psychology: Applied, 20(3), 199.
Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. BioScience, 57(10), 823-833.
Pérez-Urrestarazu, L., Fernández-Cañero, R., Franco-Salas, A., & Egea, G. (2015). Vertical greening systems and sustainable cities. Journal of Urban Technology, 22(4), 65-85.
Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. Journal of cleaner production, 143, 710-718.
Poorisat, T., Aigwi, I. E., Doan, D. T., & GhaffarianHoseini, A. (2024). Unlocking the potentials of sustainable building designs and practices: A Systematic Review. Building and Environment, 266, 112069.
Qatar National Convention Centre (QNCC). (2024). Sustainability.
Reiche, D. (2010). Renewable energy policies in the Gulf countries: A case study of the carbon-neutral "Masdar City" in Abu Dhabi. Energy policy, 38(1), 378-382.
Ryan, C. O., Browning, W. D., Clancy, J. O., Andrews, S. L., & Kallianpurkar, N. B. (2014). Biophilic design patterns: emerging nature-based parameters for health and well-being in the built environment. ArchNet-IJAR: International Journal of Architectural Research, 8(2), 62.
Safran, M., Said, I., Abuanzeh, N., Baarimah, A. O., Saleh, S. A., Al-Zghoul, T. M., Mushtaha, A.W., Alawag, A.M., and Alqudah, S. (2025). Impact of green building strategies on environmental, economic, and social outcomes in construction. HighTech Innov. J., 6(4), 1449-1464.

Santamouris, M. (2014). Cooling the cities–a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. Solar energy, 103, 682-703.
Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. Energy and buildings, 48, 220-232.
Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges–A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, 757-773.
Shao, Y., Ma, N., Chen, M., Zhang, C., & Cui, Y. (2025). Machine Learning in Landscape Architecture: A Comprehensive Review of Advancements, Applications, and Future Directions. Buildings, 15(21), 3827.
Sheikha, A. (2024). Evaluating the Impact of Hybrid Ventilation Strategies on Reducing the Cooling Load and Achieving Thermal Comfort of Buildings: Regarding Arid Climate of UAE.
Supreme Committee for Delivery & Legacy. (2022). Sustainability Strategy: FIFA World Cup Qatar 2022™.
Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). Zero energy buildings: a critical look at the definition (No. NREL/CP-550-39833). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO.
U.S. Green Building Council (USGBC). LEED Rating System Overview. Washington, DC; 2024.
U.S. Green Building Council (USGBC). LEED v4.1 Building Design and Construction Reference Guide. Washington, DC; 2023.
United Nations Environment Programme (UNEP), and Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not Just Another Brick in the Wall. UNEP, Nairobi, 2025.
United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations; 2025.
Wang, Y., Hu, B., Meng, X., & Xiao, R. (2024). A comprehensive review on technologies for achieving zero-energy buildings. Sustainability, 16(24), 10941.
World Commission on Environment and Development (WCED). Our Common Future. Oxford University Press, Oxford, UK, 1987.
Zhong, W., Schröder, T., & Bekkering, J. (2022). Biophilic design in architecture and its contributions to health, well-being, and sustainability: A critical review. Frontiers of Architectural Research, 11(1), 114-141.