نقابة المهندسين الأردنيين
Jordan Engineers Association

مركز الدراسات والبحوث
Studies and Research Center

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

الفهرس

1 مقدمة: التحول الرقمي في الهندسة المعمارية 1
2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية 2
2.1 الذكاء الاصطناعي التوليدي في التصميم المعماري 4
2.2 الذكاء الاصطناعي ونمذجة معلومات البناء(BIM) 5
2.3 الذكاء الاصطناعي في إدارة بيانات المشاريع المعمارية 6
2.4 الذكاء الاصطناعي والاستدامة المعمارية 9
2.5 الذكاء الاصطناعي في الحفاظ على التراث المعماري 12
2.6 الذكاء الاصطناعي والمدن الذكية وتطورها نحو المدن المعرفية(Cognitive Cities) 13
2.7 التمثيل البصري والمحاكاة المعمارية ودعم القرار التصميمي 15
2.8 هندسة الموجهات (Prompt Engineering) في التطبيقات المعمارية 17
3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية 19
3.1 التقنيات الأكثر استخداماً في الهندسة المعماري 21
4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية 21
5 فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية 24
6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية 24
6.1 مهارات المستقبل في الهندسة المعمارية في عصر الذكاء الاصطناعي 27
7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية 28
7.1 التحديات التقنية 28
7.2 التحديات الاقتصادية 28
8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين المعماريين 29
9 الخاتمة 29
10 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية 30

محتويات الجدول

الرقم الجدول	محتويات	رقم الصفحة
جدول .1	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات الهندسة المعمارية	20
جدول .2	أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية	23

1 مقدمة: التحول الرقمي في الهندسة المعمارية

يشير تقارير قطاع الهندسة المعمارية والهندسة والبناء لعام 2026 إلى أن تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي ما يزال في مرحلة انتقالية مبكرة، حيث يقتصر الاستخدام المنتظم على نحو 6% من المهنيين، في حين لا تتجاوز نسبة الشركات التي طبقت حلول الذكاء الاصطناعي 8%، مع وجود قرابة 20% منها في مراحل التخطيط أو التنفيذ الأولي (Bluebeam, 2025). وعلى الرغم من ذلك، يمتلك أكثر من نصف المهنيين خبرة أولية في استخدام هذه الأدوات، بما يعكس اتساع الاستخدام الفردي مقابل محدودية التبني المؤسسي المنظم. وتتركز التطبيقات الحالية في الوظائف المساندة مثل توليد المحتوى، وتحليل النصوص، وإنتاج الصور المعمارية، وتطبيقات المحادثة الذكية، بينما يظل استخدامها محدوداً في العمليات التصميمية والهندسية المعقدة (AIA, 2024). ومع ذلك، تكشف البيانات عن فرص غير مستغلة ذات قيمة عالية، خاصة في تحديث مكتبات المنتجات، وتقدير التكاليف والكميات، وإعداد المواصفات الفنية، وأبحاث المواد، وهي مجالات تعاني أساساً من ضعف الكفاءة التشغيلية (AIA, 2024). وفي المقابل، حققت المؤسسات المتبنية للذكاء الاصطناعي مكاسب ملموسة شملت وفورات مالية تتجاوز 50,000 دولار في بعض المشاريع، وتقليل ساعات العمل بمئات إلى آلاف الساعات نتيجة الأتمتة وتحسين إدارة المعلومات، إلا أن هذا التبني يواجه تحديات رئيسية تتعلق بصعوبة التكامل بين الأنظمة، ونقص المهارات، وضعف الاستثمار في التدريب، إضافة إلى مخاوف مرتبطة بدقة المخرجات وأمن البيانات والشفافية(Bluebeam, 2025).

وبناءً على ذلك، يتضح أن مستقبل الذكاء الاصطناعي في العمارة لا يعتمد على توفر الأدوات فقط، بل على قدرة المؤسسات على دمجه ضمن سير العمل، وتعزيز الثقة في مخرجاته، وتطوير الكفاءات البشرية، بما يحوله إلى عنصر استراتيجي في إدارة المشاريع والعمليات التصميمية (Bluebeam, 2025; AIA, 2024). ويُعد التصميم المعماري من أكثر العمليات تعقيداً نظراً لدمجه الأبعاد الجمالية والوظيفية والإنشائية والبيئية والاجتماعية، ومع تصاعد متطلبات الاستدامة وكفاءة الطاقة أصبحت الحاجة ملحة إلى أدوات تحليل ذكية قادرة على توليد حلول تصميمية مبتكرة بكفاءة أعلى (Jang et al., 2025). وقد أسهم التكامل بين الذكاء الاصطناعي وتقنيات نمذجة معلومات البناء (BIM) ، وإنترنت الأشياء (IoT) ، والتوائم الرقمية، والرؤية الحاسوبية، والحوسبة السحابية في إعادة تشكيل الممارسة المعمارية والتخطيط الحضري، حيث تؤكد مؤسسات مهنية مثل AIA و RIBA أن الذكاء الاصطناعي أصبح مكوناً أساسياً في الممارسة المعمارية الحديثة (AIA, 2025; RIBA, 2025).

وتشير بيانات Bluebeam إلى أن 27% فقط من الشركات تستخدم الذكاء الاصطناعي حالياً، بينما تخطط 94% لتوسيع استخدامه، مما يعكس اتجاهاً تدريجياً نحو التبني المؤسسي الواسع، رغم استمرار القيود المرتبطة بالتكلفة وصعوبات التكامل والمخاطر التشغيلية، مقابل تحقيق عوائد ملموسة تشمل وفورات مالية وزمنية كبيرة (Bluebeam, 2025). كما يبرز التقرير أن أبرز العوائق تتمثل في أمن البيانات بنسبة 42%، والتكلفة والتعقيد بنسبة 33%، إضافة إلى التأثير التنظيمي بنسبة 69% على قرارات التبني (Bluebeam, 2025) وفي المقابل، أصبح الذكاء الاصطناعي جزءاً من استراتيجيات الموارد البشرية عبر دوره في تقليل آثار نقص الكفاءات، رغم استمرار فجوات المهارات الرقمية وضعف الاستثمار في التدريب. وتشير التوقعات إلى نمو سوق الذكاء الاصطناعي في قطاع البناء من 4.86 مليار دولار في عام 2025 إلى 35.53 مليار دولار بحلول عام 2034 بمعدل نمو سنوي مركب يبلغ 24.8 % (Fortune Business Insights, 2025) .

2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

يشهد قطاع الهندسة المعمارية تحولاً رقمياً عميقاً نتيجة التطور المتسارع في تقنيات الذكاء الاصطناعي، التي أصبحت تمثل أحد المحركات الرئيسة لإعادة تشكيل عمليات التصميم والتخطيط والتنفيذ والتشغيل وإدارة البيئة المبنية. وقد أسهمت الخوارزميات الذكية وتقنيات التعلم الآلي والتعلم العميق والذكاء الاصطناعي التوليدي في توسيع نطاق القدرات المعمارية التقليدية، من خلال تعزيز الإبداع التصميمي، وتحسين كفاءة اتخاذ القرار، ورفع مستوى الاستدامة، وتطوير أساليب إدارة البيانات والمعرفة الهندسية عبر دورة حياة المشروع بالكامل.

ومع الانتقال نحو بيئات تصميم رقمية متكاملة، أصبح الذكاء الاصطناعي عنصراً أساسياً في العديد من المجالات المعمارية المتقدمة، بدءاً من التصميم التوليدي وتطوير البدائل التصميمية الذكية، مروراً بدمج الذكاء الاصطناعي مع نمذجة معلومات البناء (BIM) والتوائم الرقمية، وصولاً إلى إدارة البيانات الهندسية الضخمة وتطوير بيئات البيانات المشتركة وحوكمة المعلومات. كما امتد تأثيره ليشمل تحسين الأداء البيئي للمباني ودعم الاستدامة المعمارية، وتحقيق كفاءة الطاقة، وتطوير المباني منخفضة الانبعاثات والمباني صفرية الطاقة.

وفي موازاة ذلك، أسهم الذكاء الاصطناعي في إحداث نقلة نوعية في مجالات الحفاظ على التراث المعماري من خلال التوثيق الرقمي المتقدم ونمذجة معلومات البناء التراثية (HBIM) ، إضافة إلى تطوير أساليب تحليل وتقييم المباني التاريخية وإعادة تمثيلها رقمياً. كما لعب دوراً محورياً في دعم التحول الحضري نحو المدن الذكية والمدن المعرفية (Cognitive Cities) ، عبر توظيف التحليلات التنبؤية والبيانات الضخمة والتوائم الرقمية في إدارة الأنظمة الحضرية وتحسين جودة الحياة واستدامة المدن.

ومن جهة أخرى، أدى التكامل بين الذكاء الاصطناعي وتقنيات التمثيل البصري والمحاكاة الرقمية والواقع الافتراضي والمعزز إلى تطوير أدوات متقدمة لدعم القرار التصميمي وتحسين التواصل بين المصممين وأصحاب المصلحة، فضلاً عن تعزيز القدرة على تقييم البدائل التصميمية قبل التنفيذ. كما برزت هندسة الموجهات (Prompt Engineering) بوصفها مجالاً ناشئاً ومهارة استراتيجية تتيح للمعماريين توجيه الأنظمة التوليدية بفعالية وإنتاج مخرجات تصميمية أكثر دقة وملاءمة للسياق المعماري.

وبذلك لم يعد الذكاء الاصطناعي مجرد أداة تقنية مساندة للعمل المعماري، بل أصبح إطاراً معرفياً وتكنولوجياً متكاملاً يعيد تعريف دور المهندس المعماري وآليات إنتاج المعرفة والتصميم وإدارة المباني والمدن. ويستعرض هذا الفصل أبرز مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية، والتي تشمل: الذكاء الاصطناعي التوليدي في التصميم المعماري، والذكاء الاصطناعي ونمذجة معلومات البناء (BIM) ، وإدارة بيانات المشاريع المعمارية، والاستدامة المعمارية، والحفاظ على التراث المعماري، والمدن الذكية والمدن المعرفية، والتمثيل البصري والمحاكاة المعمارية ودعم القرار التصميمي، إضافة إلى هندسة الموجهات في التطبيقات المعمارية، باعتبارها من أبرز الاتجاهات التي تقود مستقبل العمارة في عصر التحول الرقمي.

يمكن تصنيف مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية ضمن المحاور التالية:

2.1 الذكاء الاصطناعي التوليدي في التصميم المعماري

يُعد الذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI) أحد أبرز التحولات الجذرية في الممارسة المعمارية المعاصرة، إذ يعتمد على نماذج تعلم عميق قادرة على إنتاج مخرجات متعددة تشمل النصوص والصور والنماذج ثلاثية الأبعاد والمخططات المعمارية. وتستند هذه النماذج إلى تقنيات متقدمة تشمل الشبكات التوليدية التنافسية (GANs) ، والمشفرات التلقائية التغييرية (VAEs) ، ونماذج الانتشار (Diffusion Models) ، إضافة إلى نماذج اللغة الكبيرة (LLMs) (Albukhari, 2025).وتتمثل القيمة الجوهرية لهذه التقنيات في إعادة تشكيل عملية التصميم من نموذج الحل الواحد إلى نموذج الاستكشاف المتعدد، حيث يتم توليد بدائل تصميمية متنوعة وفق قيود ومعايير محددة مسبقاً مثل الأداء الوظيفي، والكفاءة البيئية، والمتطلبات الجمالية، مما يوسع فضاء الخيارات التصميمية ويرفع جودة القرار المعماري ويعزز مستوى الابتكار في المخرجات النهائية.

وفي هذا الإطار، يُميز بين التصميم البارامتري (Parametric Design) والتصميم التوليدي (Generative Design) بوصفهما منهجين رقميين متقدمين، إلا أن الفرق الجوهري بينهما يتمثل في طبيعة دور المصمم وآلية إنتاج الحلول؛ ففي التصميم البارامتري تُبنى النماذج على علاقات رياضية تربط المتغيرات التصميمية، حيث يتحكم المصمم بالشكل عبر تعديل هذه العلاقات ضمن إطار محدد ينتج عنه عدد محدود من البدائل. أما في التصميم التوليدي، فتتولى الخوارزميات استكشاف فضاء واسع من الحلول بشكل تلقائي، بينما يقتصر دور المصمم على تحديد الأهداف والقيود ومعايير التقييم، لتقوم الأنظمة الذكية بتوليد البدائل وتحسينها وصولاً إلى الحلول المثلى من حيث الأداء والكفاءة. وتشير الأدبيات الحديثة إلى أن هذا النهج يتيح استكشاف فضاءات تصميمية شديدة التعقيد يصعب الوصول إليها بالأساليب التقليدية، بما ينعكس إيجاباً على الأداء الإنشائي والبيئي للمباني (Jang et al., 2025) ، كما تؤكد تقارير Autodesk Research (2025) أن دمج الذكاء الاصطناعي ضمن بيئات نمذجة معلومات البناء (BIM) يسهم في تسريع العمليات التصميمية وتعزيز التنسيق بين التخصصات.

وعلى المستوى التطبيقي، تشير الدراسات المهنية إلى أن توظيف الذكاء الاصطناعي التوليدي في التصميم المعماري يؤدي إلى تحسينات ملموسة في الكفاءة التشغيلية لمكاتب التصميم، من خلال تسريع إنتاج البدائل التصميمية، وتعزيز التكامل بين التخصصات، وتقليل طلبات المعلومات (RFIs) وأوامر التغيير بنسبة قد تصل إلى 50%، بما يرفع الكفاءة التشغيلية ويعزز القدرة التنافسية (Syska Hennessy Group, 2025). كما يمثل هذا التوجه تحولاً بنيوياً داخل قطاع الهندسة المعمارية والهندسة والبناء(AEC) ، حيث تعتمد النماذج التوليدية على التعلم من البيانات القائمة لإنتاج حلول جديدة توسّع نطاق الإبداع المعماري وتحسن كفاءة العمليات التصميمية، وقد أظهرت دراسة (Khan, Chang and Chang, 2025) أن النماذج التوليدية الهجينة التي تجمع بين نماذج الانتشار (Diffusion Models) والنماذج التتابعية (Autoregressive Models) تحقق أداءً أعلى من النماذج التقليدية من حيث التنوع والواقعية.

ومع ذلك، لا تزال هذه التقنيات تواجه تحديات جوهرية تتمثل في محدودية القابلية للتوسع (Scalability) ، وتجزؤ سير العمل بين الأدوات المختلفة، وغياب أطر تقييم معيارية موحدة لقياس جودة المخرجات التصميمية، مما يستدعي تطوير أنظمة تقييم شاملة تربط بين المعايير الحسابية والأداء الوظيفي والبيئي، إلى جانب تعزيز التكامل مع أنظمة نمذجة معلومات البناء (BIM) لضمان قابلية التنفيذ العملي للمخرجات التوليدية (Khan, Chang and Chang, 2025). وفي ضوء ذلك، تتجه الرؤى المستقبلية نحو تعزيز التعاون البيني بين التخصصات، وتطوير نماذج مدعومة بالفيزياء (Physics-Embedded Models) ، ورفع قدرة الأنظمة الذكية على التكيف مع متطلبات الاستدامة والأداء الطاقي، بما يسهم في تقليص الفجوة بين الابتكار الحسابي والتطبيق المعماري الفعلي.

2.2 الذكاء الاصطناعي ونمذجة معلومات البناء (BIM)

يشهد التكامل بين الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence) ونمذجة معلومات البناء (Building Information Modeling – BIM) تحولًا بنيويًا عميقًا في إدارة المشاريع المعمارية والإنشائية، حيث لم تعد بيئات BIM تقتصر على كونها أدوات للنمذجة ثلاثية الأبعاد، بل تطورت لتصبح منصات رقمية ذكية قائمة على البيانات تدعم التحليل المتقدم واتخاذ القرار عبر مختلف مراحل دورة حياة المشروع، بدءًا من التصميم، مرورًا بالتنفيذ، وانتهاءً بالتشغيل والصيانة.

ويعكس هذا التحول انتقال BIM من نظام تمثيلي للمعلومات إلى بيئة تحليلية تنبؤية (Predictive Data-Driven Environment)، تعتمد على قدرات الذكاء الاصطناعي في المحاكاة وتوليد البدائل وتحسين جودة القرارات الهندسية (Autodesk Research, 2025؛ IEEE, 2025).

وفي هذا السياق، يسهم الذكاء الاصطناعي في رفع كفاءة الأداء داخل بيئات BIM من خلال أتمتة العمليات الروتينية، مثل إنتاج المخططات التنفيذية، وإدارة الجداول والكميات، وتنظيم البيانات الهندسية، إلى جانب الكشف الذكي عن التعارضات (Clash Detection) بين العناصر المعمارية والإنشائية والميكانيكية والكهربائية. وتؤدي هذه الأتمتة إلى تقليل الزمن المستغرق في المهام التكرارية، والحد من الأخطاء البشرية، وخفض تكاليف إعادة العمل، بما يعزز الكفاءة التشغيلية ويرفع جودة المخرجات الهندسية (IEEE, 2025؛ Nasiri, 2024).

وعلى المستوى التطبيقي، يمتد تأثير الذكاء الاصطناعي داخل بيئات BIM إلى مجالات متقدمة، مثل التوأم الرقمي (Digital Twin)، الذي يربط النماذج الرقمية بالمباني الواقعية عبر إنترنت الأشياء (IoT)، بما يتيح مراقبة الأداء في الزمن الحقيقي، والتنبؤ بالأعطال، وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة، وإدارة دورة حياة الأصول بشكل أكثر دقة وفعالية (RICS, 2025). كما يسهم دمج تقنيات الواقع المعزز والافتراضي (AR/VR) في تطوير بيئات محاكاة تفاعلية تمكّن من اختبار السيناريوهات التصميمية قبل التنفيذ، وتعزز دقة اتخاذ القرار في المراحل المبكرة من المشروع (Azhar, 2023).

كما تتيح النمذجة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي تحليل سلوك المواد والإنشاءات تحت ظروف تشغيلية وبيئية مختلفة، فضلًا عن تحسين إدارة سلاسل الإمداد وتخطيط الموارد. وعلى امتداد دورة حياة المشروع، يتوزع دور الذكاء الاصطناعي بوضوح؛ ففي مرحلة التصميم يُستخدم في التصميم التوليدي لإنتاج بدائل محسّنة، وفي مرحلة التنفيذ في مراقبة التقدم والتنبؤ بالمخاطر الزمنية، بينما يُسهم في مرحلة التشغيل في إدارة المباني الذكية وتحسين كفاءة الطاقة، ويُفعّل في مرحلة الصيانة عبر أنظمة الصيانة التنبؤية المعتمدة على تحليل البيانات التاريخية وبيانات الاستشعار (RICS, 2025؛ Yavan, 2025).

ورغم هذه الإمكانات، لا يزال تبني الذكاء الاصطناعي في بيئات BIM يواجه تحديات اقتصادية وتقنية وتشريعية وأخلاقية. فعلى المستوى الاقتصادي، تمثل تكاليف التحول الرقمي عائقًا أمام المؤسسات الصغيرة والمتوسطة. أما تقنيًا، فتبرز مشكلات جودة البيانات، وضعف التشغيل البيني بين الأنظمة، وارتفاع المتطلبات الحسابية. وعلى المستوى التشريعي والأخلاقي، تتعلق التحديات بالمسؤولية القانونية، وحقوق الملكية الفكرية، وحماية البيانات، إضافة إلى إشكالية "الصندوق الأسود" في بعض نماذج الذكاء الاصطناعي (IEEE, 2025؛ EU GDPR Report, 2024).

وبناءً على ذلك، يتطلب التبني الفعّال لهذه التقنيات تطوير أطر حوكمة موحدة للبيانات، وتعزيز معايير التشغيل البيني مثل Industry Foundation Classes (IFC)، واعتماد منهجيات الذكاء الاصطناعي القابل للتفسير (Explainable AI – XAI)، إلى جانب بناء القدرات البشرية وتحديث المناهج الأكاديمية. ويشير ذلك إلى أن مستقبل BIM يتجه نحو منظومة رقمية أكثر تكاملًا وذكاءً، تعتمد على التحليل التنبئي واتخاذ القرار المدعوم بالبيانات، بما يعزز كفاءة قطاع البناء واستدامته عبر دورة حياة المبنى.

2.3 الذكاء الاصطناعي في إدارة بيانات المشاريع المعمارية

شهد قطاع العمارة والهندسة المدنية تحولاً جذرياً في طبيعة إنتاج البيانات وإدارتها نتيجة تبني تقنيات نمذجة معلومات البناء (BIM) والتوائم الرقمية (Digital Twins) ، حيث لم يعد المشروع المعماري مجرد نموذج هندسي ثلاثي الأبعاد، بل أصبح منظومة بيانات متكاملة تمتد عبر دورة حياة المشروع بالكامل من التخطيط إلى التشغيل والصيانة (Eastman et al., 2018 ؛ Volk et al., 2014) وفي هذا السياق، برز الذكاء الاصطناعي كعامل تمكين رئيسي لإدارة هذه الكميات الهائلة والمعقدة من البيانات، عبر تحويلها من بيانات غير منظمة إلى معرفة قابلة للاستخدام في دعم القرار وتحسين الأداء التشغيلي للمشروعات (Bilal et al., 2016).

أولاً: بيئة البيانات المشتركة (Common Data Environment - CDE)

تُعد بيئة البيانات المشتركة (CDE) البنية الأساسية لإدارة المعلومات في المشاريع المعتمدة علىBIM ، حيث توفر منصة مركزية لتجميع وتبادل وإدارة جميع بيانات المشروع بين الأطراف المختلفة (ISO 19650, 2018). ومع تزايد حجم وتعقيد البيانات، أصبح من الضروري دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي داخل هذه البيئات بهدف أتمتة تنظيم البيانات، والكشف عن التعارضات، وتحسين تدفق المعلومات بين فرق العمل.

وتشير الأدبيات الحديثة إلى أن دمج الذكاء الاصطناعي في بيئات CDE يسهم في تقليل أخطاء التنسيق بنسبة قد تصل إلى 30–50% من خلال الكشف المبكر عن تضارب النماذج والملفات (Zhou et al., 2021). كما يتيح الذكاء الاصطناعي تتبع دورة حياة البيانات داخل المشروع (Data Lineage Tracking) ، مما يعزز الشفافية ويقلل من فقدان المعلومات أو استخدامها بشكل غير صحيح.

ثانياً: حوكمة البيانات (Data Governance) في المشاريع المعمارية

تُعد حوكمة البيانات إطاراً تنظيمياً يهدف إلى ضمان جودة البيانات، دقتها، أمنها، وإمكانية تتبعها عبر دورة حياة المشروع (Khatri and Brown, 2010). وفي السياق المعماري، يكتسب هذا المفهوم أهمية خاصة نظراً لتعدد مصادر البيانات وتداخل التخصصات الهندسية.

يساهم الذكاء الاصطناعي في تعزيز حوكمة البيانات من خلال:

- الكشف الآلي عن البيانات غير المتسقة أو المكررة .
- مراقبة الامتثال لمعايير BIM ومعايير ISO 19650.

- اقتراح إجراءات تصحيحية تلقائية بناءً على أنماط البيانات التاريخية .
- تقييم جودة البيانات (Data Quality Assessment) بشكل مستمر .

وقد بينت دراسات تطبيقية أن استخدام أنظمة الذكاء الاصطناعي في حوكمة البيانات يقلل من أخطاء البيانات التصميمية بنسبة تتراوح بين 25% إلى 40% (Sacks et al., 2020) .

ثالثاً: إدارة البيانات الوصفية (Metadata Management)

تلعب البيانات الوصفية دوراً محورياً في تنظيم المعرفة داخل المشاريع المعمارية، حيث تُستخدم لوصف خصائص العناصر الرقمية وربطها بسياقها التصميمي والتنفيذي. ويعمل الذكاء الاصطناعي على أتمتة إنشاء وتحديث هذه البيانات الوصفية باستخدام تقنيات التعلم الآلي ومعالجة اللغة الطبيعية (NLP).

ويؤدي ذلك إلى:

- تحسين قابلية البحث والاسترجاع .
- ربط العناصر المعمارية بخصائصها الوظيفية والإنشائية .
- دعم التتبع الذكي للعناصر داخل نموذج BIM.

وتشير الأبحاث إلى أن تحسين إدارة Metadata باستخدام الذكاء الاصطناعي يرفع كفاءة استرجاع المعلومات بنسبة تصل إلى 60% مقارنة بالأنظمة التقليدية (Eastman et al., 2018).

رابعاً: التحكم الذكي بالوثائق (AI-driven Document Control)

يمثل التحكم بالوثائق أحد أكثر الجوانب حساسية في المشاريع الهندسية، حيث يؤدي أي خطأ في إصدار أو تحديث المستندات إلى مشاكل تنفيذية كبيرة. ويتيح الذكاء الاصطناعي أتمتة إدارة الوثائق من خلال:

- تتبع الإصدارات (Version Control Automation) .
- اكتشاف التعديلات غير المتوافقة .
- إرسال تنبيهات تلقائية عند تحديث المستندات .
- تحليل محتوى الوثائق وربطها بعناصر BIM.

وقد أثبتت الدراسات أن استخدام الذكاء الاصطناعي في إدارة الوثائق يقلل من أخطاء الإصدارات بنسبة تصل إلى 35 % (Porwal and Hewage, 2013).

خامساً: التصنيف الآلي للمعلومات (Automated Classification)

يعتمد التصنيف الآلي على خوارزميات التعلم الآلي وتقنيات معالجة اللغة الطبيعية لتحليل الوثائق الهندسية وتصنيفها تلقائياً إلى فئات مثل الرسومات، المواصفات، العقود، والتقارير الفنية.

وتكمن أهمية هذا المجال في:

- تقليل الاعتماد على التصنيف اليدوي .
- تسريع الوصول إلى المعلومات .
- تحسين تنظيم قواعد البيانات الهندسية .

وقد أظهرت تطبيقات الصناعة أن أنظمة التصنيف الذكي تحقق دقة تتجاوز 85% في تصنيف الوثائق الهندسية عند تدريبها على بيانات BIM كبيرة الحجم (Zhou et al., 2021).

سادساً: البحث الدلالي (Semantic Search)

يمثل البحث الدلالي تطوراً نوعياً مقارنة بالبحث التقليدي المعتمد على الكلمات المفتاحية، حيث يعتمد على فهم المعنى والسياق والعلاقات بين المفاهيم داخل المشروع.

ويتيح ذلك:

- الوصول إلى المعلومات حتى عند اختلاف المصطلحات .
- ربط المفاهيم المعمارية والإنشائية بشكل ذكي .
- دعم عمليات اتخاذ القرار المعرفي .

وتشير الدراسات إلى أن البحث الدلالي يمكن أن يحسن دقة استرجاع المعلومات بنسبة تصل إلى 70% مقارنة بالبحث التقليدي (Kumar and Anandan, 2022).

سابعاً: الرسوم البيانية المعرفية (Knowledge Graphs)

تمثل الرسوم البيانية المعرفية أحد أكثر التقنيات تقدماً في إدارة بيانات المشاريع، حيث تقوم بربط الكيانات المختلفة داخل المشروع في شبكة معرفية مترابطة تشمل العناصر المعمارية، الأنظمة الإنشائية، المستخدمين، الوثائق، والمراحل الزمنية (Hogan et al., 2021).

وتتيح هذه التقنية:

- فهم العلاقات المعقدة بين عناصر المشروع .
- دعم التحليل التنبؤي .
- اكتشاف الأنماط غير الظاهرة في البيانات .
- تعزيز التكامل بين BIM والتوأم الرقمي .

وقد أظهرت تطبيقات Knowledge Graphs في قطاع البناء تحسيناً في كفاءة اتخاذ القرار يصل إلى 30%–45% (Bilal et al., 2016).

يتضح أن الذكاء الاصطناعي لم يعد مقتصراً على دعم العمليات التصميمية في العمارة، بل أصبح عنصراً محورياً في إدارة المعرفة والبيانات داخل المشاريع الهندسية. ومن خلال دمجه في بيئات CDE ، وحوكمة البيانات، وإدارة البيانات الوصفية، والتحكم بالوثائق، والتصنيف الآلي، والبحث الدلالي، والرسوم البيانية المعرفية، يتم تحويل البيانات من مجرد مخرجات تشغيلية إلى منظومة معرفية متكاملة تدعم BIM والتوأم الرقمي بشكل مباشر، مما يعزز التحول نحو بيئات تصميم وبناء أكثر ذكاءً وكفاءة واستدامة.

2.4 الذكاء الاصطناعي والاستدامة المعمارية

في سياق التحول العالمي نحو العمارة المستدامة، برز الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence) كأداة استراتيجية محورية في دعم جهود خفض الانبعاثات الكربونية وتعزيز كفاءة الأداء البيئي للمباني. ويكتسب هذا الدور أهمية متزايدة في ظل التأثير البيئي الكبير لقطاع البناء، الذي يسهم بما يقارب 40% من إجمالي الانبعاثات العالمية، إضافة إلى استهلاكه نحو 50% من الطاقة المنتجة عالمياً (IEA, 2024). ويعكس هذا الواقع الحاجة الملحة إلى توظيف أدوات تحليل ذكية قادرة على تحسين القرارات التصميمية والتشغيلية، بما يضمن رفع كفاءة استخدام الطاقة وتقليل البصمة البيئية للمشروعات العمرانية عبر دورة حياتها الكاملة.

يسهم الذكاء الاصطناعي في تعزيز كفاءة الطاقة داخل المباني من خلال تحليل مجموعة واسعة من المتغيرات البيئية والتشغيلية المؤثرة في الأداء، بما في ذلك الإشعاع الشمسي، والإضاءة الطبيعية، والأحمال الحرارية، وأنظمة التهوية، وكفاءة أنظمة التدفئة والتكييف (HVAC) ، إضافة إلى أنماط الاستهلاك الفعلي للطاقة. وبناءً على هذه التحليلات، يمكن تطوير نماذج تصميمية أكثر كفاءة تعتمد على التعلم الآلي لدعم اتخاذ القرار وتحسين الأداء الطاقي قبل مرحلة التنفيذ.

وتوفر أدوات المحاكاة البيئية الرقمية مثل EnergyPlus و DesignBuilderو Autodesk Forma بيئات تحليل متقدمة تسمح باختبار سيناريوهات تصميمية متعددة، حيث يتم دمج خوارزميات تعلم آلي تشمل الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) ، وغابات القرار العشوائي (Random Forest) ، وآلات متجه الدعم (SVM) ، ونماذج التعزيز التدرجي (Gradient Boosting) لتحسين دقة التنبؤ بالاستهلاك الطاقي والأداء البيئي (MDPI Buildings, 2025).

وفي هذا الإطار، لم يعد دور المعماري مقتصراً على تحقيق الأبعاد الوظيفية والجمالية، بل امتد ليشمل إدارة الأداء البيئي للمبنى بوصفه "مهندساً بيئياً رقمياً"، يوظف أدوات الذكاء الاصطناعي مثل التصميم التوليدي (Generative Design) والنمذجة التنبؤية (Predictive Modeling) لدعم اتخاذ قرارات تصميمية قائمة على البيانات. كما يتيح الذكاء الاصطناعي حساب البصمة الكربونية بكلا نوعيها، أي الكربون المتجسد (Embodied Carbon) والكربون التشغيلي (Operational Carbon) ، إضافة إلى توليد وتحليل بدائل تصميمية متعددة لاختيار الحلول الأكثر كفاءة والأقل انبعاثاً.

أولاً: دمج الطاقة المتجددة في العمارة المدعومة بالذكاء الاصطناعي

يشكل دمج الطاقة المتجددة داخل البيئة العمرانية أحد أهم الاتجاهات المعاصرة في الاستدامة المعمارية، حيث يتجه التصميم نحو مفهوم **التصميم الحضري الشمسي (Solar Urban Design)** الذي يهدف إلى تحسين التوجيه العمراني، وتوزيع الكتل، وكثافة البناء بما يعظم الاستفادة من الإشعاع الشمسي ويقلل الفاقد الحراري.

وفي هذا السياق، يتيح الذكاء الاصطناعي تحليل الإمكانات الشمسية للمواقع الحضرية عبر نمذجة ثلاثية الأبعاد دقيقة، ومحاكاة زوايا الإشعاع، وتقييم الأداء الطاقي للمباني على مدار العام، مما يدعم اتخاذ قرارات تخطيطية أكثر كفاءة على مستوى المبنى والمدينة.

كما برز مفهوم **أنظمة الطاقة الشمسية المدمجة في المباني (Building-Integrated Photovoltaics – BIPV)** بوصفه اتجاهاً تصميمياً محورياً، حيث يتم دمج الألواح الشمسية ضمن عناصر المبنى مثل الواجهات والأسقف كجزء وظيفي وجمالي في آن واحد. ويسهم الذكاء الاصطناعي في تحسين أداء هذه الأنظمة عبر:

- تحسين توزيع الخلايا الشمسية وفق التعرض الشمسي .
- التنبؤ بإنتاج الطاقة على مدار الزمن .
- تقييم كفاءة الأداء الفعلي مقارنة بالمخطط .
- تحسين التكامل بين BIPV وأنظمة إدارة الطاقة الذكية (EMS).

وتشير الاتجاهات الحديثة إلى أن هذا التكامل بين الذكاء الاصطناعي والطاقة الشمسية يعزز كفاءة إنتاج الطاقة ويزيد من جدوى المباني منخفضة الانبعاثات، خصوصاً في البيئات الحضرية عالية الكثافة (IEA, 2024).

ثانياً: نحو المباني صفرية الطاقة (Net-Zero Energy Buildings)

يمثل مفهوم **المباني صفرية الطاقة (Net-Zero Energy Buildings)** أحد الأهداف الأساسية للعمارة المستدامة، حيث يتم تحقيق توازن بين الطاقة المستهلكة والطاقة المنتجة من مصادر متجددة داخل المبنى.

يلعب الذكاء الاصطناعي دوراً محورياً في تحقيق هذا الهدف من خلال:

- التنبؤ الدقيق بالطلب الطاقي للمبنى .
- تحسين تشغيل أنظمة الطاقة في الزمن الحقيقي .
- إدارة تخزين الطاقة وتوزيعها بشكل ديناميكي .
- دمج الطاقة الشمسية (BIPV) مع أنظمة التحكم الذكية لتحقيق التوازن الطاقي .

كما تسهم تقنيات التصميم التوليدي في إنتاج بدائل تصميمية تحقق أقل استهلاك ممكن للطاقة مع أعلى كفاءة تشغيلية، مما يسرّع الوصول إلى سيناريوهات تصميم Net-Zero بشكل أكثر فعالية.

ثالثاً: تحسين الطاقة المتجددة باستخدام الذكاء الاصطناعي

يتجه الذكاء الاصطناعي إلى لعب دور متقدم في **تحسين أداء أنظمة الطاقة المتجددة** داخل المباني والمدن من خلال تحليل البيانات الزمنية المتعلقة بالإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة وأنماط الاستهلاك.

وتشمل تطبيقاته:

- تحسين تشغيل الأنظمة الشمسية والبطاريات .

- التنبؤ بإنتاج الطاقة المتجددة بدقة عالية .
- إدارة الأحمال الكهربائية بشكل ذكي .
- تقليل الفاقد الطاقي عبر أنظمة التحكم التكيفية .

ويمثل هذا الاتجاه جزءاً من التحول نحو المباني الذكية ذاتية التنظيم، التي تعتمد على خوارزميات تعلم آلي قادرة على التكيف المستمر مع التغيرات البيئية، مما يعزز الاستدامة التشغيلية ويقلل الانبعاثات.

رابعاً: التحول في الدور المهني للمعماري

في ظل هذا التحول، لم يعد دور المعماري يقتصر على التصميم الشكلي أو الوظيفي، بل أصبح يمتد ليشمل إدارة الأداء البيئي للمبنى بوصفه **مهندساً بيئياً رقمياً (Digital Environmental Architect)** ، يوظف أدوات الذكاء الاصطناعي في التحليل والمحاكاة واتخاذ القرار.

كما أصبح بإمكانه تقييم:

- الكربون المتجسد (Embodied Carbon).
- الكربون التشغيلي (Operational Carbon).

إضافة إلى دعم اختيار المواد وأنظمة البناء الأقل تأثيراً بيئياً، وربط القرارات التصميمية بأسواق الكربون (Carbon Markets).

خامساً: البعد الاقتصادي للطاقة المستدامة

يتكامل هذا التحول مع ظهور مفهوم **الاقتصاد الكربوني (Carbon Economy)** ، حيث تتحول القرارات التصميمية المستدامة إلى قيمة اقتصادية قابلة للقياس والتداول عبر:

- أسواق الكربون (Carbon Markets).
- اعتمادات الكربون (Carbon Credits).
- أنظمة تداول الانبعاثات (EU ETS).

وبذلك يتم إعادة تعريف القيمة الاقتصادية للمباني بحيث تشمل الأداء البيئي والعوائد المالية طويلة المدى، وليس فقط التكلفة الأولية أو الأداء الوظيفي.

يمثل دمج الذكاء الاصطناعي مع الطاقة المتجددة في العمارة تحولاً جذرياً نحو نموذج تصميمي جديد قائم على البيانات والمحاكاة والتنبؤ. ويؤسس هذا التكامل بين **Solar Urban Design** و**BIPV** و **Net-Zero Energy Buildings** و **AI-driven Energy Optimization** لمرحلة متقدمة من العمارة المستدامة، حيث تتحول المباني إلى أنظمة طاقية ذكية قادرة على التكيف الذاتي، ضمن منظومة حضرية منخفضة الانبعاثات ومرتكزة على الذكاء الاصطناعي.

2.5 الذكاء الاصطناعي في الحفاظ على التراث المعماري

أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الأدوات التحويلية في مجال حفظ وإدارة التراث المعماري، حيث أسهم في تطوير منهجيات التوثيق الرقمي وتحسين دقة تحليل المباني التاريخية عبر دمج تقنيات نمذجة معلومات البناء التراثية (Heritage BIM) مع تقنيات الرؤية الحاسوبية والمسح ثلاثي الأبعاد. ويعتمد هذا المجال على منظومة متكاملة من التقنيات، تشمل المسح الليزري (Laser Scanning) ، والتصوير الفوتوغرامتري (Photogrammetry) ، والطائرات المسيّرة (Drones) ، إضافة إلى خوارزميات التعلم الآلي المستخدمة في تحليل التشققات، وتقييم التلف، ورصد التغيرات الإنشائية الدقيقة (Frontiers, 2025).

وقد أسهم هذا التكامل بين الذكاء الاصطناعي وتقنيات التوثيق الرقمي في إنتاج نماذج رقمية عالية الدقة للمباني التراثية، الأمر الذي يعزز من كفاءة عمليات الترميم والصيانة وإدارة الأصول الثقافية، مع تقليل الاعتماد على التدخلات الميدانية المباشرة التي قد تشكل خطراً على سلامة العناصر الأصلية للمبنى. كما يتيح هذا النهج تطوير فهم أكثر شمولية لحالة المباني التاريخية من خلال الربط بين البيانات الهندسية والبيئية والإنشائية ضمن بيئة رقمية موحدة (Frontiers, 2025) .

وفي السياق نفسه، تشير الدراسات الحديثة إلى أن دمج تقنيات الحوسبة المكانية والواقع الممتد (XR) مع الذكاء الاصطناعي قد أحدث تحولاً نوعياً في أساليب توثيق التراث وإدارته. إذ توضح تجربة مشروع Heritage++ في جامعة ETH Zurich كيف يمكن لتقنيات التوأم الرقمي أن تُستخدم في إنشاء نماذج تفاعلية للمباني التراثية، تدمج بين البيانات المادية والنماذج الإنشائية والمعلومات البيئية، بما يدعم عمليات اتخاذ القرار في الترميم ويعزز التعاون متعدد التخصصات بين المعماريين والمهندسين وعلماء المواد. كما تسهم هذه النماذج في تتبع تدهور المواد الإنشائية، مثل الحجر الطبيعي، وربط سلوكها بالعوامل المناخية المحيطة، مما يتيح تطوير استراتيجيات ترميم أكثر دقة واستدامة (ETH Zurich, 2024).

ويُعد مفهوم نمذجة معلومات البناء التراثية (HBIM) الإطار التقني الأساسي الذي يتم من خلاله دمج هذه البيانات المتعددة، حيث يهدف إلى توثيق المباني التاريخية وإعادة تمثيلها رقمياً اعتماداً على بيانات المسح المتقدم والصور الأرشيفية. ومع تطور هذا المجال، لم يعد التوثيق مقتصراً على العناصر المادية فقط، بل امتد ليشمل البيانات غير الملموسة مثل الروايات الشفوية والاستخدامات الاجتماعية والوظيفية للمباني، مما يساهم في بناء نموذج أكثر شمولية للتراث المعماري (Murphy et al., 2013; Dore and Murphy, 2017).

وفي هذا الإطار، يُبرز البحث الحديث أهمية دمج البيانات غير الملموسة ضمن بيئات HBIM ، خاصة في حالات المباني المفقودة أو المتضررة جزئياً، حيث تُستخدم الشهادات الشفوية والمواد الأرشيفية كمدخلات أساسية لإعادة بناء النماذج الرقمية. وقد أظهرت تطبيقات عملية في مشاريع ترميم التراث أن هذا النهج يساهم في سد الفجوات المعلوماتية التي لا يمكن تغطيتها بالمسح المادي وحده، رغم ما قد يرافقه من درجات عدم يقين يتم التعامل معها عبر آليات توثيق منهجية (Logothetis et al., 2015).

ومن جهة أخرى، برزت تقنيات الذكاء الاصطناعي التوليدي، خاصة نماذج تحويل النص إلى صورة (Text-to-Image) كأداة داعمة في إعادة تصور المباني التراثية المفقودة أو غير المكتملة التوثيق. إذ تتيح هذه الأدوات تحويل الأوصاف النصية والروايات الشفوية إلى تمثيلات بصرية أولية، يمكن استخدامها في دعم عمليات إعادة البناء المفاهيمي داخل بيئات HBIM ومع ذلك، فإن هذه المخرجات تتطلب مستويات عالية من التحقق الأكاديمي والتقني نظراً لاحتمالية توليد تفاصيل غير دقيقة أو تخمينية (Rombach et al., 2022).

وفي إطار التطور المفاهيمي الأوسع، ظهرت مقاربات مبتكرة مثل نموذج **التوأم الرقمي التراثي القائم على الصدى-Echo) based Heritage Digital Twin)**، والذي يدمج بين الذكاء الاصطناعي التوليدي والذاكرة الجمعية والروايات الشفوية لإنتاج تمثيلات رقمية أولية للمباني التاريخية. ويعتمد هذا الاتجاه على تحويل البيانات غير الملموسة إلى مخرجات رقمية قابلة للمعالجة ضمن بيئات التصميم، بما يوسع من نطاق استخدام HBIM ليشمل إعادة بناء التراث المفقود وليس فقط توثيق الموجود (Arslan et al., 2025).

وبناءً على ذلك، يمكن القول إن الذكاء الاصطناعي لم يعد مجرد أداة مساعدة في توثيق التراث، بل أصبح عنصراً محورياً في إعادة تعريف منهجيات الحفظ المعماري، من خلال الانتقال من النمذجة الوصفية إلى النمذجة التنبؤية والتوليدية، بما يعزز قدرة المعماريين على إعادة بناء الذاكرة المعمارية وربطها بالتحليل البيئي والإنشائي في إطار رقمي متكامل.

2.6 الذكاء الاصطناعي والمدن الذكية وتطورها نحو المدن المعرفية (Cognitive Cities)

يمثل الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence) أحد المحركات البنيوية الرئيسة للتحول نحو نماذج المدن الذكية، حيث أصبح يُوظَّف بشكل متزايد في دعم عمليات التخطيط الحضري المستدام، ورفع كفاءة إدارة الموارد، وتحسين جودة الخدمات الحضرية. ويشمل نطاق تطبيقاته مجالات متعددة، من أبرزها إدارة حركة المرور، وتحليل الكثافة السكانية، وتخطيط شبكات النقل العام، وإدارة الطاقة والمياه، إضافة إلى التنبؤ بأنماط النمو العمراني والاحتياجات المستقبلية للبنية التحتية. ويعتمد هذا التوجه على تقنيات التحليل التنبئي وتحليل البيانات الضخمة (Big Data Analytics) لاستخلاص أنماط السلوك الحضري ودعم عمليات اتخاذ القرار في بيئات حضرية تتسم بالتعقيد والديناميكية العالية (OECD, 2025).

وفي هذا السياق، أصبح التخطيط الحضري المعاصر يعتمد بشكل متزايد على النماذج التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي، والتي تتيح فهماً أعمق لديناميكيات النمو العمراني وأنماط الاستهلاك الحضري بدرجات عالية من الدقة. ويسهم ذلك في تعزيز كفاءة استخدام الموارد وتقليل الهدر، إضافة إلى دعم السياسات الحضرية الاستباقية التي تهدف إلى معالجة المشكلات قبل تفاقمها، مثل الازدحام المروري، والضغط على البنية التحتية، ونقص الخدمات العامة (OECD, 2025).

كما برز في السنوات الأخيرة مفهوم التكامل بين الذكاء الاصطناعي التوليدي وإنترنت الأشياء تحت مسمى (Generative AI of Things – GAIoT)، والذي يعكس انتقالاً نوعياً نحو بيئات حضرية قادرة على التكيف الفوري مع التغيرات البيئية والمناخية وتغير الطلب الحضري. ويمثل هذا التحول انتقالاً من النماذج التفاعلية والتنبؤية التقليدية إلى نماذج توليدية أكثر ديناميكية، قادرة على إنتاج حلول تشغيلية مستمرة بدلاً من الاكتفاء بتحليل البيانات التاريخية (Taylor & Francis, 2025).

ومن منظور الحوكمة الحضرية، أصبح الذكاء الاصطناعي أداة مركزية في دعم عمليات اتخاذ القرار داخل المدن، خصوصاً في قطاعات النقل والطاقة والإسكان والخدمات العامة. إلا أن هذا التوسع يثير في المقابل تحديات جوهرية تتعلق بالشفافية، والعدالة الاجتماعية، والمساءلة، إضافة إلى مخاطر تعميق الفجوات الرقمية أو المساس بالخصوصية في حال غياب أطر تنظيمية واضحة وفعالة.

وتؤكد الأدبيات الحديثة أن نجاح تطبيق الذكاء الاصطناعي في المدن الذكية لا يرتبط بالتكنولوجيا وحدها، بل يعتمد أيضاً على جاهزية البنية المؤسسية، وتوافر البيانات عالية الجودة، والقدرات التحليلية المتقدمة، ومستوى إشراك أصحاب المصلحة. وتشير هذه

الأدبيات إلى أن المدن الأكثر نجاحاً هي تلك التي تعتمد نماذج حوكمة متعددة المستويات، وإدارة متكاملة للبيانات، واستراتيجيات واضحة لإدارة المخاطر (OECD, 2025).

وتواجه المدن المعاصرة تحديات مركبة تتمثل في النمو السكاني المتسارع، وضغوط الإسكان، وتدهور البنية التحتية، والتغير المناخي، ومحدودية الموارد. وعلى الرغم من أن المدن لا تشغل سوى نسبة محدودة من مساحة الأرض، فإنها تستوعب أكثر من نصف سكان العالم، وتساهم بما يقارب 70% من الانبعاثات الكربونية العالمية، مما يجعلها محوراً أساسياً في أجندة الاستدامة العالمية. وفي المقابل، تُعد المدن أيضاً مراكز إنتاج للثروة والحلول، إذ تولد نحو 80% من الناتج المحلي العالمي، وتمثل بيئات خصبة للابتكار والتجريب الرقمي.

وقد أدى هذا التناقض إلى بروز مفهوم **"الذكاء الاصطناعي الحضري" (Urban AI)** ، الذي يقوم على تكييف الخوارزميات مع السياقات المحلية لدعم اتخاذ القرار وتحسين إدارة الخدمات العامة (OECD, 2025). وتُظهر التطبيقات العملية في مدن مثل لشبونة عبر التوأم الرقمي لمحاكاة الفيضانات، وفي سنغافورة عبر أنظمة الذكاء الاصطناعي لإدارة المرور والطاقة، انتقالاً واضحاً من منطق إدارة الأزمات إلى منطق التنبؤ والاستجابة الاستباقية.

ومع ذلك، يطرح هذا التطور تحديات إضافية تتعلق بتجزئة الأنظمة، وضعف تكامل البيانات، وغياب المعايير الموحدة، مما يستدعي تطوير أطر حوكمة شاملة تضمن الاستخدام المسؤول والفعال للذكاء الاصطناعي داخل المدن. كما تشير الدراسات إلى وجود تفاوتات كبيرة بين المدن في مستويات تبني هذه التقنيات تبعاً لاختلاف الموارد والبنى المؤسسية والأولويات التنموية.

❋ الإطار النظري والتقني للمدن الذكية المستدامة وتطورها نحو المدن المعرفية

أدى التوسع الحضري المتسارع إلى تعميق التحديات البيئية، مما جعل الاستدامة محوراً مركزياً في التخطيط الحضري المعاصر. وفي هذا السياق، برز نموذج المدن الذكية المستدامة بوصفه إطاراً تكاملياً يدمج التقنيات الرقمية لتحسين كفاءة الموارد وتعزيز المرونة البيئية.

وقد تطور هذا النموذج عبر مراحل متتابعة تبدأ من إنترنت الأشياء (IoT) ، مروراً بالذكاء الاصطناعي (AI) ، ثم الذكاء الاصطناعي للأشياء (AIoT) ، والأنظمة الفيزيائية السيبرانية (CPS) ، وصولاً إلى الأنظمة السيبرانية الفيزيائية واسعة النطاق (CPSoS)، بما يعيد تشكيل بنية إدارة المدن الحديثة.

ويعتمد الذكاء الاصطناعي للأشياء (AIoT) على دمج إنترنت الأشياء مع الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات في الزمن الحقيقي ودعم اتخاذ القرار التنبئي، بينما تربط الأنظمة الفيزيائية السيبرانية (CPS) بين العالمين الرقمي والفيزيائي عبر الاستشعار والتحكم المباشر. أما CPSoS فتمثل مستوى أكثر تعقيداً يدمج أنظمة متعددة على مستوى المدينة لإدارة التعقيد الحضري وتعزيز التخطيط الاستراتيجي.

وتعتمد هذه المنظومات على تقنيات التعلم الآلي والتعلم العميق ورؤية الحاسوب ومعالجة اللغة الطبيعية ضمن دورة متكاملة تشمل الإدراك والتحليل واتخاذ القرار. كما تقوم البنية المعمارية للمدن الذكية على ثلاث طبقات رئيسية: جمع البيانات، التحليل، واتخاذ القرار، مع بروز التوأم الرقمي (Digital Twin) والدماغ الحضري (Urban Brain) كعناصر مركزية في هذا النظام.

❋ التحول نحو المدن التنبؤية والمعرفية (Predictive & Cognitive Cities)

تشير الأدبيات الحديثة (2024–2026) إلى تطور نوعي في مسار المدن الذكية يتمثل في الانتقال من نموذج المدينة الذكية (Smart City)إلى المدينة المدعومة بالذكاء الاصطناعي للأشياء (AIoT) والدماغ الحضري (Urban Brain) ، ثم إلى مرحلة أكثر تقدماً تتمثل في التوأم الرقمي الحضري (Digital Twin) ، وصولاً إلى المدينة التنبؤية (Predictive City) ، ومن ثم إلى النموذج الأكثر تطوراً :**المدينة المعرفية (Cognitive City)** (Batty, 2024؛ OECD, 2025).

ويمثل هذا التطور انتقالاً من مدينة "تستجيب للبيانات" إلى مدينة "تتنبأ بالمستقبل"، ثم إلى مدينة "تفهم وتقرر وتتعلم ذاتياً". ففي النموذج المعرفي، لا يقتصر دور الذكاء الاصطناعي على التحليل أو التنبؤ، بل يمتد ليشمل قدرات شبه ذاتية في اتخاذ القرار وإدارة العمليات الحضرية.

وفي هذا السياق، يمكن تلخيص الوظائف التشغيلية الأساسية للمدينة المعرفية في ما يلي:

- اتخاذ قرارات حضرية ذاتية في الزمن الحقيقي (Autonomous Decision-Making).
- تحسين استهلاك الطاقة وإدارة الشبكات بشكل تكيفي تلقائي .
- إدارة المرور بشكل استباقي بناءً على نماذج تنبؤية متعددة الطبقات .
- إدارة الكوارث والاستجابة الفورية للمخاطر الطبيعية والبشرية .
- تخصيص الخدمات الحضرية وفق احتياجات السكان بشكل ديناميكي وفردي .

ويعتمد هذا النموذج على دمج متقدم بين التوأم الرقمي، والذكاء الاصطناعي التنبئي، والرسوم البيانية المعرفية (Knowledge Graphs)، مما يسمح ببناء فهم سياقي شامل للمدينة بوصفها نظاماً معقداً متعدد الطبقات. وبالتالي تتحول المدينة إلى كيان معرفي قادر على التعلم المستمر، وإعادة التكيف، وتحسين أدائه بشكل ذاتي (Zhou et al., 2024).

ومع ذلك، فإن هذا التحول يفرض تحديات عميقة تتعلق بحوكمة القرار الخوارزمي، وشفافية النماذج الذكية، ومسؤولية اتخاذ القرار، وحدود الاستقلالية الممنوحة للأنظمة الحضرية الذكية، مما يستدعي تطوير أطر تنظيمية وأخلاقية متقدمة لضمان الاستخدام المسؤول لهذه التقنيات.

وبناءً عليه، تمثل **المدن المعرفية (Cognitive Cities)** المرحلة النهائية الحالية في تطور النماذج الحضرية الرقمية، حيث تنتقل المدينة من كونها نظاماً ذكياً إلى نظام معرفي ذاتي التنظيم والتعلم والتكيف، بما يعيد تعريف مفهوم التخطيط الحضري وإدارة المدن في العصر الرقمي.

2.7 التمثيل البصري والمحاكاة المعمارية ودعم القرار التصميمي

يركز هذا المحور على التكامل بين تقنيات الذكاء الاصطناعي والوسائط البصرية لدعم عملية اتخاذ القرار التصميمي في الهندسة المعمارية، حيث يتم توظيف تقنيات التعلم العميق في إنتاج صور واقعية عالية الجودة (Rendering) ، وتحويل الرسومات الأولية أو اليدوية إلى نماذج رقمية مباشرة، بما يسهم في تسريع الانتقال من الفكرة التصميمية إلى النموذج ثلاثي الأبعاد.

كما تُستخدم تقنيات الواقع الافتراضي والمعزز (VR/AR) في محاكاة التجربة المكانية قبل مرحلة التنفيذ، مما يتيح تقييم جودة الفراغات المعمارية من منظور المستخدم النهائي، واختبار البدائل التصميمية في بيئة تفاعلية تحاكي الواقع. وإلى جانب ذلك، يُستفاد من تحليل البيانات الضخمة للمشاريع السابقة لاستخلاص أنماط تصميمية فعّالة يمكن توظيفها في تحسين جودة القرارات التصميمية المستقبلية.

وتعتمد عملية دعم القرار التصميمي كذلك على نماذج تقييم متعددة المعايير، تشمل التكلفة، والأداء الوظيفي، والكفاءة البيئية، والجوانب الجمالية، بما يعزز موضوعية القرار ويقلل من الاعتماد على التقديرات الحدسية فقط، ويدعم التحول نحو تصميم قائم على البيانات والأدلة.

ويمثل التصيير اللحظي (Real-Time Rendering) أحد أبرز التحولات في التصور المعماري الرقمي، حيث يتيح إنتاج صور ثلاثية الأبعاد بشكل فوري ومتزامن مع تفاعل المستخدم، مما يمكّن المصمم من تقييم الفراغات أثناء عملية التصميم نفسها وليس بعد اكتمالها. ويعتمد هذا النوع من التصيير على المعالجة الرسومية الفورية لتحويل النماذج ثلاثية الأبعاد إلى صور ثنائية الأبعاد في الزمن الحقيقي، بما يخلق بيئات تصميم تفاعلية قابلة للاستكشاف المباشر والديناميكي (Autodesk, 2026).

وتشير التطبيقات الحديثة إلى أن دمج منصات مثل Autodesk و Unityقد أحدث تحولاً نوعياً في سير العمل المعماري، إذ أصبح بالإمكان تحويل نماذج التصميم من برامج مثل Revit و3 ds Max إلى بيئات تفاعلية قابلة للاستكشاف الفوري، بما يشمل الجولات الافتراضية (Virtual Walkthroughs) والمحاكاة البصرية للمشاريع قبل التنفيذ الفعلي (Autodesk, 2026). ويسهم ذلك في تحسين جودة القرار التصميمي من خلال تمكين أصحاب المصلحة من اختبار المشروع بصرياً في مراحله المبكرة، وبالتالي تقليل الأخطاء التصميمية المكلفة في المراحل اللاحقة من البناء.

كما يوفر التصيير اللحظي فوائد عملية متعددة في بيئة العمل المعماري، من أبرزها تحسين تدفق العمل (Seamless Workflows) عبر مزامنة التعديلات مباشرة بين أدوات النمذجة ومنصات التصيير، ورفع الكفاءة الإنتاجية من خلال تقليل الزمن اللازم لإعداد المشاهد الثابتة التقليدية. كما يعزز هذا النهج التعاون متعدد التخصصات من خلال إتاحة بيئة تفاعلية مشتركة تجمع بين المصممين والمهندسين والعملاء، بما يرفع دقة تقييم الأفكار التصميمية في المراحل المبكرة (Autodesk, 2026).

ومن منظور تطبيقي، يكتسب التصيير اللحظي أهمية خاصة في قطاع الهندسة المعمارية والهندسة والبناء (AEC) ، حيث يسهم في ربط نمذجة معلومات البناء (BIM) بالتصور التفاعلي، مما يدعم الكشف المبكر عن التعارضات وتحسين الأداء الوظيفي والفراغي قبل مرحلة التنفيذ. كما يمتد استخدام هذه التقنية إلى قطاعات أخرى مثل صناعة السيارات والإعلام والترفيه، بما يعكس طبيعتها متعددة الاستخدامات وقابليتها العالية للتوسع.

وبناءً على ذلك، يمكن اعتبار التصيير اللحظي خطوة أساسية نحو تطوير بيئات تصميم معمارية أكثر تفاعلية وذكاءً، حيث لا يقتصر دوره على العرض البصري، بل يمتد ليصبح أداة تحليل ودعم قرار تسهم في تحسين جودة العملية التصميمية في مختلف مراحلها.

2.8 هندسة الموجهات (Prompt Engineering) في التطبيقات المعمارية

تُعد هندسة الموجهات (Prompt Engineering) أحد المجالات الحديثة التي نشأت بالتوازي مع التطور المتسارع لنماذج الذكاء الاصطناعي التوليدي، ولا سيما النماذج اللغوية الكبيرة (Large Language Models – LLMs) ونماذج توليد الصور والنماذج متعددة الوسائط. ويُقصد بها عملية تصميم وصياغة التعليمات النصية أو متعددة الوسائط الموجهة إلى أنظمة الذكاء الاصطناعي بطريقة منهجية ومقننة، بهدف التحكم في جودة المخرجات وضمان توافقها مع الأهداف التصميمية والمعرفية المطلوبة (Brown et al., 2020؛ OpenAI, 2023).

وفي السياق المعماري، تكتسب هندسة الموجهات أهمية متزايدة نتيجة التحول نحو التصميم المعزز بالذكاء الاصطناعي (AI-Augmented Design)، حيث لم يعد دور المهندس المعماري مقتصراً على إنتاج الحلول التصميمية، بل امتد ليشمل إدارة الحوار التفاعلي مع الأنظمة الذكية وتوجيهها لإنتاج بدائل تصميمية عالية الجودة. وتشير الأدبيات الحديثة إلى أن جودة المخرجات في الأنظمة التوليدية ترتبط بشكل مباشر بدقة ووضوح الموجه (Prompt Quality) ، حيث يمكن أن يؤدي تحسين صياغة الموجه إلى تحسين الأداء بنسبة كبيرة مقارنة بالموجهات العامة غير المنظمة (Liu et al., 2023).

أولاً: دور هندسة الموجهات في العملية التصميمية المعمارية

في التطبيقات المعمارية، تُستخدم هندسة الموجهات لدعم مجموعة واسعة من الأنشطة التصميمية والتحليلية، بما في ذلك توليد الأفكار المفاهيمية (Concept Generation) ، وتطوير البدائل التصميمية (Design Alternatives Development) ، وتحليل الموقع (Site Analysis)، وتقييم الأداء البيئي، ودراسة استراتيجيات الاستدامة وكفاءة الطاقة، بالإضافة إلى دعم عمليات اتخاذ القرار خلال مختلف مراحل دورة حياة المشروع (BIM Lifecycle) (Eastman et al., 2018).

ويعتمد نجاح هذه التطبيقات على قدرة المعماري على تحويل المتطلبات التصميمية المعقدة إلى موجهات دقيقة تتضمن عناصر متعددة مثل الوظيفة، والسياق، والقيود التنظيمية، والمعايير البيئية. وفي هذا الإطار، يُنظر إلى هندسة الموجهات باعتبارها مهارة وسيطة (Translational Skill) تربط بين المعرفة المعمارية التقليدية وقدرات النماذج التوليدية الحديثة (Zhou et al., 2024).

ثانياً: تصنيف الموجهات في التطبيقات المعمارية

يمكن تصنيف الموجهات المستخدمة في المجال المعماري إلى عدة أنواع رئيسية وفق طبيعة الوظيفة:

1. **الموجهات الوصفية (Descriptive Prompts)**
   تعتمد على صياغة وصف تفصيلي للمشروع أو العنصر المعماري، بما يشمل الوظيفة والشكل والسياق البيئي. وتُستخدم بشكل أساسي في المراحل المبكرة لتوليد الأفكار التصميمية .
2. **الموجهات المقيدة (Constraint-Based Prompts)**
   تتضمن مجموعة من القيود التصميمية مثل المساحة، ونسب الإشغال، ومعايير الطاقة، ومتطلبات الاستدامة. وتُستخدم لضبط الحلول التصميمية ضمن حدود واقعية (Strobbe et al., 2022) .

3. **الموجهات التحليلية (Analytical Prompts)**

تركز على تحليل الأداء المعماري مثل الإضاءة الطبيعية، وكفاءة الطاقة، وتدفق الحركة داخل الفراغات، مما يدعم التقييم المقارن بين البدائل التصميمية .

ويشير البحث المعاصر إلى أن دمج هذه الأنواع ضمن تسلسل واحد (Hybrid Prompting) يؤدي إلى تحسين جودة الحلول التصميمية بشكل ملحوظ مقارنة باستخدام نوع واحد فقط (Guo et al., 2023) .

ثالثاً: الموجهات المنظمة (Structured Prompting)

تمثل الموجهات المنظمة أحد أكثر الأساليب فعالية في تحسين أداء النماذج التوليدية في المجال المعماري، حيث تعتمد على تقسيم الموجه إلى مكونات منهجية تشمل: الدور(Role) ، المهمة(Task) ، السياق(Context) ، والنتائج المطلوبة (Output Format) .

وقد أظهرت الدراسات أن هذا الأسلوب يقلل من الغموض ويزيد من الاتساق في المخرجات، كما يحسن قدرة النماذج على فهم العلاقات بين العناصر التصميمية المعقدة (Wei et al., 2022) .وفي السياق المعماري، يساهم هذا النوع من الموجهات في إنتاج حلول أكثر توافقاً مع الاشتراطات الوظيفية والتنظيمية للمشاريع.

رابعاً: الموجهات المعتمدة على السياق (Context-Aware Prompting)

يُعد دمج السياق أحد العوامل الحاسمة في تحسين دقة المخرجات المعمارية، حيث يتم تزويد النموذج بمعلومات إضافية مثل الموقع الجغرافي، المناخ، الكثافة السكانية، نوع المستخدمين، والميزانية.

وتشير الدراسات إلى أن إدراج السياق في الموجهات يؤدي إلى تحسين ملحوظ في ملاءمة الحلول التصميمية للواقع، حيث ترتفع دقة التوافق مع المتطلبات الفعلية للمشاريع مقارنة بالموجهات العامة (Liu et al., 2023) .كما يُسهم هذا النهج في تقليل التكرار التصميمي وزيادة التخصيص (Customization) في الحلول المعمارية.

خامساً: الموجهات متعددة الوسائط (Multimodal Prompting)

شهدت السنوات الأخيرة تطوراً كبيراً في الموجهات متعددة الوسائط، والتي تعتمد على دمج النصوص مع الصور والمخططات والنماذج ثلاثية الأبعاد وبيانات الموقع. ويتيح هذا النوع من الموجهات فهماً أكثر شمولية للمشكلة التصميمية، مما يعزز قدرة الأنظمة التوليدية على إنتاج حلول معمارية أكثر دقة وواقعية (OpenAI, 2023) .

فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام صورة لموقع المشروع مع وصف نصي للمتطلبات التصميمية، أو إدخال مخطط معماري أولي وطلب تحسين توزيع الفراغات، أو استخدام صور مرجعية لتوجيه النمط المعماري المطلوب. وتشير الأدبيات إلى أن هذا التكامل متعدد الوسائط يحسن جودة المخرجات بشكل كبير مقارنة بالموجهات النصية فقط (Radford et al., 2021) .

سادساً: الأثر العام لهندسة الموجهات في العمارة

تشير الدراسات الحديثة إلى أن تطبيق هندسة الموجهات بشكل منهجي في المجال المعماري يؤدي إلى تحسين كبير في جودة المخرجات التصميمية، حيث أظهرت دراسة تطبيقية أن استخدام الموجهات المنظمة والمعتمدة على السياق أدى إلى تحسين الأداء بنسبة تقارب 60 % مقارنة بالموجهات التقليدية غير المنظمة (University of Vienna, 2025) .

كما تبين أن الدمج بين الموجهات المنظمة ومتعددة الوسائط يسهم في رفع دقة الفهم المكاني والمعماري للنماذج الذكية، ويقلل من الأخطاء التصميمية، ويزيد من اتساق النتائج مع متطلبات المستخدم النهائي.

بناءً على ما سبق، يمكن اعتبار هندسة الموجهات أحد المجالات المحورية في التحول الرقمي للهندسة المعمارية، إذ لم تعد مجرد أداة مساعدة، بل أصبحت جزءاً أساسياً من عملية التصميم نفسها. ومن المتوقع أن تصبح هذه المهارة من الكفاءات الأساسية للمعماريين في المستقبل، خاصة مع التوسع في استخدام الذكاء الاصطناعي ضمن بيئات التصميم التوليدي، ونظمBIM ، والتوأم الرقمي، مما يعيد تشكيل العلاقة بين المعماري والأداة الرقمية نحو نموذج أكثر تفاعلية وذكاءً.

3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

تعتمد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية على مجموعة متكاملة من التقنيات والخوارزميات الذكية التي تُستخدم لدعم عمليات التصميم والتحليل، والمحاكاة، وإدارة المباني والمدن. ويختلف نوع التقنية المستخدمة تبعاً لطبيعة التطبيق والأهداف التصميمية والبيئية والتشغيلية المراد تحقيقها، إلا أن الاتجاه الحديث يتجه نحو دمج عدة تقنيات ضمن بيئات رقمية موحدة تجمع بين الذكاء الاصطناعي ونمذجة معلومات البناء والتوائم الرقمية وإنترنت الأشياء.

جدول1. أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات الهندسة المعمارية

مجال التطبيق	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة
التصميم المعماري التوليدي	الذكاء الاصطناعي التوليدي، الشبكات التوليدية التنافسية (GANs)، نماذج الانتشار (Models Diffusion)، المشفرات التلقائية التغييرية (VAEs)، نماذج اللغة الكبيرة (LLMs)
التصميم البارامتري والتصميم التوليدي	الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms)، تحسين سرب الجسيمات (PSO)، خوارزميات التحسين متعددة الأهداف (Multi-objective Optimization)
نمذجة معلومات البناء (BIM)	التعلم الآلي (ML)، الأنظمة الخبيرة (Expert Systems)، التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics)، الذكاء الاصطناعي التوليدي، نماذج التصنيف الذكية
الكشف الذكي عن التعارضات (Clash Detection)	التعلم الآلي، أشجار القرار (Decision Trees)، XGBoost، التحليلات التنبؤية
التوائم الرقمية للمباني (Digital Twins)	التوأم الرقمي (Twin Digital)، إنترنت الأشياء (IoT)، التعلم الآلي، التحليلات التنبؤية، تحليل البيانات الزمنية

إدارة بيانات المشاريع المعمارية	بيئة البيانات المشتركة (CDE)، التعلم الآلي، معالجة اللغة الطبيعية (NLP)، التحليلات التنبؤية، أتمتة إدارة البيانات
حوكمة البيانات وإدارة المعرفة	اكتشاف البيانات غير المتسقة، تقييم جودة البيانات، التصنيف الآلي، البحث الدلالي (Semantic Search)، الرسوم البيانية المعرفية (Knowledge Graphs)، تمثيل المعرفة
إدارة الوثائق والمعلومات الهندسية	أتمتة إدارة الإصدارات (Version Control Automation)، تحليل المحتوى الذكي، اكتشاف التعديلات غير المتوافقة، أنظمة التنبيه الذكية
الاستدامة المعمارية وكفاءة الطاقة	الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، غابات القرار العشوائي (Random Forest)، آلات متجه الدعم (SVM)، نماذج التعزيز التدرجي (Gradient Boosting)، النمذجة التنبؤية
الطاقة المتجددة والمباني صفرية الطاقة	التحليل الشمسي، النماذج التنبؤية، التعلم المعزز (Reinforcement Learning)، أنظمة إدارة الطاقة الذكية (EMS)، تحسين أنظمة الخلايا الكهروضوئية المدمجة بالمباني (BIPV)
المحاكاة البيئية وتحليل الأداء	التعلم العميق (Learning Deep)، النمذجة التنبؤية، التحليلات متعددة المتغيرات، تحسين الأداء البيئي
الحفاظ على التراث المعماري الرقمي (HBIM)	الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)، التعلم العميق، معالجة الصور الرقمية، المسح الليزري ثلاثي الأبعاد (Laser Scanning)، الفوتوغرامتري (Photogrammetry)، نمذجة معلومات البناء التراثية (HBIM)
المدن الذكية والتخطيط الحضري	البيانات الضخمة (Data Analytics Big)، التعلم الآلي، التحليلات التنبؤية، إنترنت الأشياء (IoT)، الذكاء الاصطناعي التوليدي
المدن المعرفية (Cognitive Cities)	الذكاء الاصطناعي التنبئي، التوأم الرقمي الحضري، الرسوم البيانية المعرفية، التعلم العميق، أنظمة اتخاذ القرار الذاتي، الذكاء الاصطناعي للأشياء (AIoT)
التمثيل البصري والمحاكاة المعمارية	التعلم العميق، نماذج الانتشار (Diffusion Models)، الرؤية الحاسوبية، الذكاء الاصطناعي التوليدي، التصيير اللحظي (Real-Time Rendering)
الواقع الافتراضي والواقع المعزز (VR/AR/XR)	الرؤية الحاسوبية، تتبع الحركة، معالجة المشاهد ثلاثية الأبعاد، تقنيات الواقع الممتد (XR)، النمذجة التفاعلية
دعم القرار التصميمي	أنظمة دعم القرار الذكية (IDSS)، التحليلات متعددة المعايير (MCDA)، التعلم الآلي، النمذجة التنبؤية، تحليل البيانات الضخمة
هندسة الموجهات (Prompt Engineering)	نماذج اللغة الكبيرة (LLMs)، الموجهات المنظمة (Structured Prompting)، الموجهات المعتمدة على السياق (Context-Aware Prompting)، الموجهات متعددة الوسائط (Multimodal Prompting)

المصدر: الأدبيات العلمية المنشورة في مجلات Automation in Construction و Advanced Engineering Informatics و Building and Environment و Energy and Buildings، إضافة إلى تقارير ومواصفات buildingSMART International و Digital Twin Consortium و ASHRAE و UNESCO (2022–2025).

3.1 التقنيات الأكثر استخداماً في الهندسة المعماري

يمكن تصنيف أكثر تقنيات الذكاء الاصطناعي انتشاراً في التطبيقات المعمارية وفقاً لما يلي:

1. **الذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI):** يُستخدم في إنتاج المخططات الأولية، وتوليد البدائل التصميمية، وإعداد التصورات المعمارية والنماذج المفاهيمية.
2. **التعلم الآلي (Machine Learning):** يُستخدم في تحليل البيانات التصميمية، والتنبؤ بالأداء البيئي، ودعم اتخاذ القرار في المشاريع المعمارية.
3. **التعلم العميق (Deep Learning):** يُستخدم في تحليل الصور والمخططات، وإنتاج النماذج البصرية الواقعية، ومعالجة البيانات المعمارية المعقدة.
4. **الرؤية الحاسوبية (Computer Vision):** تُستخدم في تحليل الصور، والمسح الرقمي للمباني، والكشف عن التشققات والعناصر المعمارية، وتوثيق التراث العمراني.
5. **الخوارزميات الجينية وخوارزميات التحسين:** تُستخدم في التصميم التوليدي، وتحسين الكفاءة البيئية، وإيجاد الحلول المثلى للتوزيع الفراغي والعلاقات الوظيفية.
6. **التوائم الرقمية (Digital Twins):** تُستخدم في مراقبة أداء المباني في الزمن الحقيقي، وإدارة التشغيل والصيانة، وتحليل استهلاك الطاقة.
7. **إنترنت الأشياء (IoT):** يُستخدم في جمع البيانات من المباني الذكية وربط الأنظمة التشغيلية بالمنصات التحليلية.
8. **التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics):** تُستخدم في التنبؤ باستهلاك الطاقة، واحتياجات الصيانة، وأنماط استخدام المباني، وسلوك المستخدمين.

أصبحت الهندسة المعمارية من أكثر التخصصات الهندسية استفادة من تقنيات الذكاء الاصطناعي، لا سيما مع ظهور التصميم التوليدي والتوائم الرقمية والمدن الذكية. وقد أدى التكامل بين الذكاء الاصطناعي ونمذجة معلومات البناء والمحاكاة البيئية إلى تطوير منهجيات تصميم أكثر كفاءة وابتكاراً واستدامة. كما يتجه مستقبل العمارة الرقمية نحو بناء منظومات ذكية متكاملة قادرة على التعلم المستمر والتكيف مع المتغيرات البيئية والتشغيلية، بما يدعم تطوير بيئات عمرانية أكثر استدامة ومرونة وجودة حياة.

4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

يشهد قطاع الهندسة المعمارية تحولًا رقميًا متسارعًا نتيجة التطور الكبير في تقنيات الذكاء الاصطناعي والحوسبة المتقدمة، حيث لم يعد التصميم المعماري يقتصر على كونه عملية إبداعية تعتمد بصورة رئيسية على الخبرة والحدس المهني، بل أصبح جزءًا من منظومة رقمية متكاملة تجمع بين الإبداع البشري والتحليل الحسابي الذكي. وقد أسهم هذا التحول في ظهور بيئات تصميمية متقدمة تعتمد على التصميم التوليدي، والنمذجة البارامترية، وتحليل البيانات، ونمذجة معلومات البناء (BIM) ، بما يتيح إنتاج عدد كبير من البدائل التصميمية وتقييمها وفق معايير وظيفية وبيئية واقتصادية في وقت قصير، الأمر الذي يعزز جودة القرارات التصميمية ويرفع كفاءة عمليات التصميم والتنفيذ (Autodesk, n.d.; ISO, 2018).

ويبين الجدول 2 أن أدوات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في الهندسة المعمارية يمكن تصنيفها ضمن ثلاثة محاور رئيسية مترابطة تمثل المراحل الأساسية لسير العمل المعماري الرقمي، وتشمل: مرحلة المفهوم والتصميم الأولي، والتصميم التفصيلي ونمذجة معلومات البناء (BIM) ، والتصور والتصيير المعماري الذكي. ويعكس هذا التصنيف التكامل الوظيفي بين هذه الأدوات في دعم مراحل التصميم المختلفة، وتعزيز جودة المخرجات، وتحسين كفاءة العمل داخل البيئة المعمارية الرقمية. يركز **المحور الأول، مرحلة المفهوم والتصميم الأولي (Concept & Pre-Design)** ، على الأدوات التي تدعم توليد الأفكار واستكشاف البدائل التصميمية في المراحل المبكرة للمشروع، مثل Midjourney و Autodesk Formaو Rhino + Grasshopperو Finch 3Dو Nano Banana Proو TestFit . وتعتمد هذه الأدوات على تقنيات التصميم التوليدي، والنمذجة البارامترية، والتحليل الحضري الذكي، والتوليد البصري متعدد الوسائط، بما يتيح إنتاج تصورات تصميمية متنوعة، وتحليل خصائص الموقع والعوامل البيئية، وتحسين توزيع المساحات، وإعداد مخططات أولية تراعي القيود التصميمية والاقتصادية، الأمر الذي يسهم في تسريع عملية اتخاذ القرار ورفع جودة المفاهيم المعمارية منذ المراحل الأولى للمشروع. أما **المحور الثاني، التصميم التفصيلي ونمذجة معلومات البناء (BIM)**، فيضم منصات ArchiCAD و Revitو Dynamo، التي توفر بيئة رقمية متكاملة لإدارة النماذج المعمارية وتنسيق البيانات الهندسية بين مختلف التخصصات. وتتيح هذه الأدوات إنشاء نماذج معلومات بناء دقيقة، وأتمتة العديد من العمليات التصميمية من خلال البرمجة البصرية، وتحسين التنسيق بين العناصر المعمارية والإنشائية والميكانيكية والكهربائية، بما يقلل الأخطاء التصميمية، ويرفع كفاءة إدارة المعلومات، ويسهم في تحسين جودة التنفيذ خلال مختلف مراحل المشروع. ويمثل **المحور الثالث، التصور والتصيير المعماري الذكي (Visualization & Rendering)** ، أحد أكثر مجالات الذكاء الاصطناعي تطورًا في العمارة المعاصرة، حيث يضم أدوات مثل Midjourney و Adobe Fireflyو Chaos Verasو OpenAI Sora 2، والتي تعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي التوليدي لإنتاج صور معمارية عالية الواقعية، وتحسين التصيير الرقمي، وإنشاء عروض مرئية وفيديوهات معمارية انطلاقًا من أوصاف نصية أو نماذج أولية. وقد أسهمت هذه الأدوات في تسريع عمليات تطوير العروض المعمارية، وتحسين جودة الإخراج البصري، وتعزيز التواصل مع العملاء وأصحاب المصلحة، ودعم عمليات التسويق والعرض المعماري بصورة أكثر كفاءة واحترافية.

جدول 2. أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

المحور الرئيسي	الأداة / المنصة	النوع التقني	الوظائف والخصائص الأساسية	التطبيقات المعمارية	المخرجات والفوائد
أولاً: مرحلة المفهوم والتصميم الأولي (Pre- & Concept Design)	**Midjourney**	توليد بصري (Text-to-Image)	تحويل الأوصاف النصية إلى صور توليدية	تطوير الأفكار البصرية والعروض المفاهيمية	تسريع إنتاج البدائل التصميمية
	Autodesk Forma	تحليل توليدي حضري	تحليل الموقع (رياح، إشعاع، كثافة، كتلة عمرانية)	التصميم الحضري وتخطيط المواقع	دعم القرار المكاني وتحسين الأداء البيئي
	Rhino + Grasshopper	تصميم بارامتري / خوارزمي	نمذجة توليدية قائمة على القواعد والخوارزميات	التصميم المعماري المتقدم	تعزيز الابتكار والمرونة الشكلية
	Finch 3D	توليد تخطيطات ذكية	تحسين توزيع المساحات تلقائياً وفق القيود	التخطيط السكني	رفع كفاءة استخدام المساحات
	Nano Banana Pro	توليد بصري متعدد الوسائط	توليد صور مفاهيمية من النصوص والمعايير التصميمية	التصور المفاهيمي البصري	دعم تطوير الفكرة البصرية وليس التصميم الهندسي
	TestFit	تحليل جدوى توليدي	توليد مخططات سريعة وفق القيود الاقتصادية	التطوير العقاري	تسريع القرار وتحسين الجدوى
ثانياً: التصميم التفصيلي ونمذجة معلومات البناء (BIM)	**ArchiCAD**	ذكي BIM	إدارة النماذج وتعديل العناصر ضمن بيئة BIM	مشاريع BIM المتكاملة	تقليل الأخطاء ورفع الكفاءة
	Dynamo	أتمتة / تصميم بارامتري	أداة Visual Scripting داخل بيئات BIM (مثل Revit)	النمذجة وأتمتة العمليات	تقليل العمل اليدوي مع إمكانية دمج خوارزميات AI
	Revit	منصة BIM	نمذجة معلومات البناء وإدارة بيانات المشروع	التصميم والتنفيذ وإدارة المشروع	تحسين التنسيق وتكامل التخصصات
ثالثاً: التصور والتصيير المعماري الذكي (Visualization & Rendering)	**Midjourney**	توليد بصري	إنتاج صور معمارية عالية الجودة	العروض المفاهيمية	تسريع الإخراج البصري
	Adobe Firefly	توليد وتحرير صور	إنشاء وتعديل الصور باستخدام الذكاء التوليدي	التسويق المعماري	تحسين جودة الإخراج البصري
	Chaos Veras	تصيير ذكي (AI Rendering)	تحويل نماذج BIM إلى مشاهد واقعية	التصميم الداخلي والمعماري	تسريع الرندر وتحسين الواقعية
	OpenAI Sora 2	توليد فيديو (Text-to-Video)	إنتاج فيديوهات من النصوص أو الصور	التصور المعماري والعروض	دعم العرض الحركي وليس التصميم الهندسي

المصدر: Autodesk (n.d.)، ISO 19650 (2018)، Arrieta et al. (2020)، Grieves and Vickers (2017)

فوائـذ الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

الذكاء الاصطناعي يُغيِّر مستقبل التصميم والبناء والإدارة
نحو عمارة أكثر ذكاءً، استدامة وكفاءة

الفوائد التقنية

تسريع عمليات التصميم

تساعد أدوات التصميم التوليدي (Generative Design) والخوارزميات الذكية في إنتاج عدد كبير من البدائل التصميمية خلال وقت، قصير، مما يرفع كفاءة عملية التصميم المعماري ويساعد المعماريين على اختيار الحلول المثلى.

تحسين جودة النماذج المعمارية

تُستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي مع نمذجة معلومات البناء (BIM) لتحسين دقة النماذج الرقمية والكشف المبكر عن التعارضات التصميمية والإنشائية قبل مرحلة التنفيذ.

رفع دقة التحليل البيئي

تتيح تطبيقات الذكاء الاصطناعي إجراء تحليلات دقيقة للعوامل البيئية مثل الإشعاع الشمسي، الرياح، الرطوبة، والضوضاء، لتحسين أداء المبني وتقليل الأثر البيئي.

الفوائد الاقتصادية

يوفر الذكاء الاصطناعي فوائد اقتصادية كبيرة في المشاريع المعمارية عبر تحسين إدارة الموارد وتقليل التكاليف.

تقليل التكاليف التشغيلية

تساعد أنظمة الإدارة الذكية للمباني في مراقبة استهلاك الطاقة والمياه، والصيانة التشغيلية، مما يقلل من التكاليف التشغيلية طويلة الأجل.

خفض الهدر في المواد

تُسهم تقنيات التحليل الذكي والتصميم الرقمي في تحسين الستخدام مواد البناء وتقليل الفاقد أثناء التنفيذ والتشغيل.

تحسين إدارة المشاريع

تساعد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في:

- تحسين جدولة الأعمال
- تحليل المخاطر
- متابعة تقدم التنفيذ
- دعم انخاذ القرار

مما يرفع كفاءة إدارة المشاريع المعمارية ويقلل من التأخيرات الزمنية.

الفوائد البيئية

دعم الاستدامة

يساعد الذكاء الاصطناعي في تصميم مبانٍ مستدامة تعتمد علي الستخدام الأمثل للطاقة والموارد الطبيعية بما يتوافق مع معايير البناء الأخضر.

تقليل الانبعاثات الكربونية

تُستخدم الأنظمة الذكية لتحسين استهلاك الطاقة وتقليل الانبعاثات الناتجة عن أنظمة التكييف، والإضاءة والتشغيل داخل المباني.

رفع كفاءة الطاقة

تساهم تقنيات الذكاء الاصطناعي في تطوير أنظمة تحكم ذكية تحسين استهلاك الطاقة في المباني وفقاً للاستخدام الفعلي والظروف البيئية.

الفوائد التشغيلية

تحسين إدارة المباني

تساعد أنظمة إدارة المباني الذكية (Smart Building Management) Systems في مراقبة أداء الأنظمة التشغيلية وتحليل البيانات التشغيلية بصورة لحظية لاكشاف الأعطال ومنعها قبل حدوثها.

رفع جودة الخدمات الذكية

يُستخدم الذكاء الاصطناعي في تحسين الخدمات الذكية داخل المباني مثل الإضاءة الذكية، الأمن، المصاعد، وتوجية الزوار مما يضمن تجربة أكثر سلاسة وأماناً.

تحسين تجربة المستخدم

تتيح الأنظمة الذكية تخصيص بيئة المبني وفق احتياجات المستخدمين، مما يعزز الراحة والكفاءة والإنتاجية داخل البيئات المعمارية الحديثة.

الوظائف الناشئة في الهندسة المعمارية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

AI-Powered Emerging Architectural Engineering Careers

مستقبل العمارة الذكيـــة والمستدامة والمدن الرقمية

مدن ذكية | تجربة إنسانية | بناء مستدام | بيانات وتحليلات | استدامة وكفاءة | تصميم ذكي

1 مهندس التصميم الحسابي والتوليدي المعماري
(Computational & Generative Architectural Design Engineer)

المسؤوليات
- تطوير خوارزميات التصميم التوليدي لإنتاج بدائل تصميمية متعددة.
- بناء النماذج البارامترية والحسابية للمشروعات المعمارية.
- أتمتة عمليات التصميم المتكررة.
- تقييم البدائل التصميمية وفق مؤشرات الأداء.
- دمج الذكاء الاصطناعي مع منصات BIM والتوائم الرقمية

المهارات المطلوبة
- التصميم الحسابي (Grasshopper, Dynamo)
- الذكاء الاصطناعي التوليدي)
- Python و JavaScript
- تحليل البيانات التصميمية
- BIM
- التفكير الخوارزمي

2 مهندس التصور الغامر والواقع الممتد المعماري
(Immersive Architectural Visualization & XR Engineer)

المسؤوليات
- تطوير البيئات الافتراضية التفاعلية.
- إنشاء تجارب غامرة لعرض المشروعات.
- دمج النماذج الهندسية داخل بيئات XR.
- دعم التدريب والمحاكاة الافتراضية
- تحسين تجربة المستخدم.

المهارات المطلوبة
- Unity
- Unreal Engine
- VR / AR / MR
- النمذجة ثلاثية الأبعاد
- تصميم واجهات المستخدم
- معالجة الرسوميات

3 مهندس تجربة المستخدم والذكاء المكاني
(Spatial Experience & Human-Centered AI Architect)

المسؤوليات
- تحليل سلوك المستخدمين داخل المباني
- دراسة تدفق الحركة البشرية.
- تصميم فراغات متكيفة مع المستخدم.
- تطوير حلول لتحسين تجربة الإشغال.
- دعم اتخاذ القرار الزائم على البيانات السلوكية.

المهارات المطلوبة
- Space Syntax
- Human Behavior Analytics
- UX Design
- AI Analytics
- XR
- تحليل البيانات السلوكية

4 مهندس تخطيط المدن الذكية وتحليلات البيانات الحضرية
(Smart City Planning & Urban Analytics Engineer)

المسؤوليات
- تحليل الأنماط السكانية والحركية.
- تطوير نماذج تنبؤية للنمو الحضري.
- تحسين توزيع الخدمات الحضرية.
- دمج GIS مع الذكاء الاصطناعي.
- دعم قرارات التخطيط الحضري.

المهارات المطلوبة
- ArcGIS Urban
- QGIS
- GeoPandas
- PostGIS
- Urban Analytics
- Predictive Modeling
- Big Data Analytics

5 مهندس المرونة المناخية والتكيف الحضري
(Climate Resilience & Urban Adaptation Engineer)

المسؤوليات
- تقييم المخاطر المناخية.
- تطوير استراتيجيات التكيف الحضري.
- تحليل سيناريوهات التغير المناخي.
- تصميم حلول عمرانية مرنة
- دعم خطط إدارة الكوارث.

المهارات المطلوبة
- Climate Modeling
- GIS
- Urban Resilience,
- AI Predictive Modeling
- Building Physics
- تحليل المخاطر

6 مهندس عمارة التراث والترميم الرقمي
(Digital Heritage & Conservation Architect)

المسؤوليات
- توثيق المباني التاريخية رقمياً
- تحليل التلف والتدهور.
- اقتراح سيناريوهات الترميم.
- بناء أرشيف رقمي تفاعلي.
- إدارة بيانات التراث العمراني.

المهارات المطلوبة
- LiDAR
- Photogrammetry
- HBIM
- Computer Vision
- ICOMOS
- UNESCO Standards

7 مدير ومهندس التوائم الرقمية وإدارة الأصول الذكية
(Digital Twin & Smart Asset Management Architect)

المسؤوليات
- تطوير وإدارة التوائم الرقمية.
- ربط BIM بالإنترنت الأشياء.
- مراقبة الأداء التشغيلي.
- تطبيق الصيانة التنبؤية.
- إدارة دورة حياة الأصول.

المهارات المطلوبة
- Digital Twins
- BIM
- IoT
- BMS
- Predictive Analytics
- Python
- SQL

8 مهندس أنظمة وتكامل المباني الذكية
(Smart Building Systems Integration Engineer)

المسؤوليات
- تكامل أنظمة المباني المختلفة.
- تطوير لوحات التحكم الذكية.
- مراقبة الأنظمة التشغيلية.
- إدارة سيناريوهات الطوارئ.
- تحسين كفاءة الطاقة

المهارات المطلوبة
- BMS
- BACnet
- KNX
- MQTT
- API
- API Integration
- Cybersecurity

9 مهندس الأمن السيبراني للبيئة العمرانية الذكية
(Cybersecurity Engineer for Smart Built Environment)

المسؤوليات
- حماية أنظمة المباني الذكية.
- تأمين إنترنت الأشياء.
- حماية التوائم الرقمية.
- إدارة المخاطر السيبرانية.
- تطوير خطط الاستجابة للحوادث.

المهارات المطلوبة
- Cybersecurity
- IoT Security
- Network Security
- Cloud Security
- Cybersecurity
- Zero Trust
- Risk Management

10 مهندس الاستدامة والكربون والاقتصاد الدائري
(Sustainable Architecture & Circular Economy Engineer)

المسؤوليات
- تحقيق الحياد الكربوني.
- تقييم دورة الحياة.
- تقليل الانبعاثات.
- إدارة المواد المستدامة.
- تطبيق الاقتصاد الدائري.

المهارات المطلوبة
- LCA
- LEED
- BREEAM
- One Click LCA
- Tally
- Glulix
- Circular Economy
- Sustainable Materials

المهارات المشتركة

- الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة
- BIM والتوائم الرقمية
- تحليل البيانات والتحليلات المتقدمة
- إنترنت الأشياء (IoT)
- الحوسبة السحابية والمنصات الرقمية
- الاستدامة والطاقة وكفاءة الموارد
- الأمن السيبراني وحماية البيانات
- البرمجة الهندسية وأتمتة العمليات

لماذا هذه الوظائف مهمة؟

- بناء مستقبل ذكي ومرن ومستدام
- تحقيق أهداف التنمية المستدامة والحياد الكربوني
- دعم اتخاذ القرار القائم على البيانات
- رفع الكفاءة الإنتاجية وتقليل التكاليف
- تحسين جودة الحياة والراحة والاستدامة
- تسريع التحول الرقمي في قطاع البناء والعمارة

الوظائف الناشئة في الهندسة المعمارية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

AI-Powered Emerging Architectural Engineering Careers

مستقبل العمارة الذكية والمستدامة والمدن الرقمية

مدن ذكية | تجربة إنسانية | بناء مستدام | بيانات وتحليلات | استدامة وكفاءة | تصميم ذكي

11 مهندس أداء المباني المياني المناخي للواجهات الذكية

(Building Performance & Climate-Adaptive Facade Engineer)

المسؤوليات:

- تحليل أداء المباني المناخي.
- تصميم واجهات ذكية متكيفة.
- تحسين كفاءة الطاقة.
- تحليل الإضاءة الطبيعية.
- نمذجة راحة المستخدم.

المهارات المطلوبة

- EnergyPlus
- DesignBuilder
- IES VE
- Building Physics
- Environmental Simulation
- Climate Analytics

12 مهندس علوم البيانات والتحليلات المعمارية الذكية

(Architectural Data Science & (Intelligent Analytics Engineer)

المسؤوليات:

- تحليل البيانات المعمارية.
- بناء نماذج تنبؤية ذكية.
- إنشاء لوحات معلومات.
- دعم اتخاذ القرار.
- تحليل استخدام المباني.
- تحسين الكفاءة والتكلفة.
- استخراج أنماط البيانات.

المهارات المطلوبة

- Python
- R
- Machine Learning
- SQL
- GIS
- Power BI
- Power BI
- Tableau

13 مهندس الذكاء الاصطناعي لنمذجة مباني ذكية ومستدامة

(AI-BIM Engineer)

المسؤوليات:

- تطوير نماذج BIM ذكية.
- أتمتة تحليل التصميمات.
- اكتشاف التعارضات.
- تحسين الأداء.
- إجراء محاكاة مستدامة.
- تكامل الذكاء الاصطناعي.
- دعم إدارة دورة الحياة.

المهارات المطلوبة

- Revit API
- Dynamo
- IFC
- Python
- Machine Learning

14 أخصائي هندسة الموجهات المعمارية والإنشائية

(Architectural & Construction (Prompt Engineering Specialist)

المسؤوليات:

- تصميم وصياغة أوامر ذكية.
- تحسين جودة مخرجات النماذج.
- تدريب النماذج.
- تطوير مكتبات موجهات.
- كتابة وثائق وأدلة الاستخدام.
- ضمان الاعتمادية والتحقق.
- تطبيقات توليد التصميم الذكي.

المهارات المطلوبة

- Prompt Engineering
- Python
- Python
- Large Language Models (LLMs)
- Knowledge Management
- Critical Thinking

15 مدير التحول الرقمي للعمارة المعمارية

(Digital Transformation & Architectural Technology Manager)

المسؤوليات:

- وضع استراتيجية التحول الرقمي.
- قيادة الابتكار في المعمارة.
- إدارة التقنيات الذكية.
- تكامل الأنظمة والبيانات.
- تحسين العمليات الرقمية.
- أوامر العمليات والرقمية.
- إدارة المخاطر والحوكمة.
- تطوير فرق العمل الرقمية.

المهارات المطلوبة

- Digital Transformation
- Artificial Intelligence
- Project Management
- Data Governance

المهارات المشتركة

- الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي
- والتوائم الرقمية
- تحليل البيانات الضخمة والتحليلات المتقدمة
- إنترنت الأشياء (IoT)
- الحوسبة السحابية وتقنيات المراقبة
- الاستدامة والطاقة وكفاءة الموارد
- الأمن السيبراني وحماية البيانات
- البرمجة الهندسية وأتمتة العمليات

16 مدير نمذجة معلومات المباني

(Building Information Modeling (BIM) Manager)

المسؤوليات:

- إدارة عمليات نمذجة معلومات المباني.
- توحيد المعايير والإجراءات للتنفيذ.
- إدارة بيانات BIM.
- تنسيق الفرق والمشاريع.
- ضمان الجودة والتكامل.
- إدارة مكتبات النماذج.

المهارات المطلوبة

- Revit
- Autodesk Construction Cloud (ACC)
- BIM Management
- Navisworks
- BIM Execution Plan (BEP)
- Leadership

17 منسق نمذجة معلومات المباني والتكامل

(BIM Integration Coordinator)

المسؤوليات:

- تنسيق نمذجة التخصصات.
- إدارة تعارضات النماذج.
- إدارة تبادل المعلومات.
- متابعة التحديثات.
- ضمان اتساق النموذج.
- إعداد تقارير التنسيق.

المهارات المطلوبة

- Revit
- Navisworks
- Clash Detection
- BIM Standards
- Coordination Skills

18 مهندس أنظمة نمذجة معلومات المباني

(BIM Automation Engineer)

المسؤوليات:

- تطوير أدوات وأتمتة BIM.
- إنشاء جودات ذكية وملحقات.
- أتمتة استخراج البيانات.
- تطوير قوالب نماذج موحدة.
- أتمتة سير العمل.
- ربط BIM بالأنظمة الأخرى.

المهارات المطلوبة

- Dynamo
- Python
- Revit API
- Database Systems
- Software Development
- AI Integration

19 مدير بيانات وتجربة معلومات المباني والحوكمة الرقمية

(BIM Data Governance & Digital Information Manager)

المسؤوليات:

- حوكمة بيانات المباني.
- إدارة جودة البيانات.
- أمن المعلومات.
- إدارة الأذونات.
- أرشفة وإتاحة البيانات.
- دعم الامتثال والمعايير.

المهارات المطلوبة

- BIM
- SQL
- IFC
- ISO 19650
- Data Governance

20 مهندس الروبوتات والأتمتة في العمارة والإنشاءات

(Robotics & Automation in Architecture Engineer)

المسؤوليات:

- تطوير حلول الروبوتات في البناء.
- برمجة وتشغيل الروبوتات.
- أتمتة عمليات الإنشاء.
- دمج الذكاء الاصطناعي.
- التحكم في الروبوتات.
- تحسين الكفاءة والدقة.

المهارات المطلوبة

- Robotics
- 3D Printing
- Industrial Programming
- BIM
- Automation

الوظائف الناشئة في الهندسة المعمارية (ما بعد 2035

21 مهندس ذاتية التكيف والإصلاح للمباني

(Self-Adaptive & Self-Healing Buildings Engineer)

المسؤوليات:

- تصميم أنظمة مباني ذاتية التكيف.
- تطوير مواد وأنظمة ذاتية الإصلاح.
- مراقبة الأداء اللحظي للمباني.
- تعديل الأداء تلقائيا حسب البيئة.
- تحسين متانة واستدامة المباني.

Revit | Materials Science | AI | IIoT | Autonomous Systems | Structural Monitoring | Structural Robotics | Robotics

22 مهندس الحوسبة الكمية للتصميم المعماري والعمراني

(Quantum Computing Engineer for Architectural & Urban Design)

المسؤوليات:

- تطوير نماذج وتصاميم معمارية كمومية.
- تحسين حلول التخطيط الحضري.
- تحليل أنظمة معقدة باستخدام الحوسبة الكمومي.
- تحسين أداء المحاكاة والمحاكاة.
- دعم اتخاذ القرار المعماري باستخدام الكم.

Quantum Computing | Qubits | BIM | AnI | Data Science | Computational Research | Python

23 مهندس الأنظمة الذاتية للمباني والمدن

(Autonomous Building & Smart City Systems Engineer)

المسؤوليات:

- تطوير أنظمة مباني ومدن ذاتية التشغيل.
- إدارة البنية التحتية الذكية.
- دمج الطاقة والنقل والاتصالات.
- مراقبة الذكاء الاصطناعي الحقيقي.
- ضمان الأمن والموثوقية التشغيلية.

Autonomous Systems | Artificial Intelligence | IoT | Digital Twins | Smart Systems | Edge Computing

لماذا هذه الوظائف مهمة؟

- تسريع التحول الرقمي في القطاع المعماري
- تحسين جودة الحياة والراحة والاستدامة
- تعزيز الكفاءة والإنتاجية وتقليل التكاليف
- تمكين المباني والمدن من التكيف الذكي
- إعداد قادة المستقبل في العمارة والهندسة

تجربة بشرية وتعزيز مستقبل أفضل | بناء مستدام وكفاءة الطاقة | رفع جودة التصميم واتخاذ القرار | تكامل الذكاء الاصطناعي مع تخصصات العمارة | ابتكار حلول ذكية للمدن والمباني

6.1 مهارات المستقبل في الهندسة المعمارية في عصر الذكاء الاصطناعي

1. المهارات التقنية المستقبلية

يتطلب التحول نحو العمارة الذكية امتلاك مجموعة من المهارات الرقمية المتقدمة التي أصبحت تشكل أساس الممارسة المهنية الحديثة، ومن أبرزها:

- التصميم التوليدي والتصميم البارامتري.
- نمذجة معلومات المباني (BIM) وإدارة البيانات الرقمية.
- البرمجة التحليلية باستخدام Python.
- الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة في التطبيقات المعمارية.
- تحليل البيانات الضخمة وذكاء الأعمال.
- تقنيات التوائم الرقمية وإنترنت الأشياء.
- المحاكاة البيئية وتحليل أداء المباني.
- تقنيات الواقع الافتراضي والواقع المعزز.
- أتمتة سير العمل والتكامل بين المنصات الرقمية.
- أدوات الذكاء الاصطناعي للتصور والتصيير المعماري.

2. المهارات المهنية والاستراتيجية

إلى جانب المهارات التقنية، تزداد أهمية مجموعة من المهارات المهنية والاستراتيجية التي تمكّن المعماري من العمل بفاعلية في بيئات التصميم الرقمية الحديثة، وتشمل:

- التفكير التحليلي واتخاذ القرار المبني على البيانات.
- الإبداع والابتكار في توظيف التقنيات الذكية.
- إدارة المشاريع متعددة التخصصات.
- القدرة على العمل ضمن فرق تكاملية تجمع بين الهندسة والتقنية.
- إدارة التغيير والتحول الرقمي.
- فهم الجوانب الأخلاقية والتنظيمية لاستخدام الذكاء الاصطناعي.
- مهارات التواصل والعرض الرقمي.
- القدرة على تحويل البيانات إلى رؤى تصميمية قابلة للتنفيذ.
- التفكير المنظومي في إدارة دورة حياة المبنى.
- التعلم المستمر ومواكبة التطورات التقنية.

وبذلك، يتجه مستقبل الهندسة المعمارية نحو بيئة عمل رقمية متكاملة تعتمد على الذكاء الاصطناعي والتوائم الرقمية والأنظمة الذكية، حيث يتحول دور المهندس المعماري من مصمم للمباني فحسب إلى مهندس للأنظمة المعمارية الذكية وقائد لعمليات الابتكار والتحول الرقمي، بما يسهم في تطوير مبانٍ أكثر كفاءة واستدامة وقدرة على التكيف مع المتغيرات البيئية والتكنولوجية المستقبلية.

7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

وتكشف استطلاعات الرأي الحديثة في قطاع الهندسة والبناء أن العقبات أمام تبني الذكاء الاصطناعي لا تقتصر على الجوانب التقنية والاقتصادية فحسب، بل تمتد لتشمل قضايا الثقة والحوكمة. وفقاً لتقرير آفاق التكنولوجيا الصادر عن Bluebeam (2026)، والذي شمل أكثر من 1,000 متخصص في قطاع الهندسة المعمارية والإنشاءات، فإن مخاوف أمان البيانات ومشاركتها تُعدّ العائق الأكبر أمام 42% من المؤسسات، بينما يُشير 33 % إلى التكلفة والتعقيد كحاجز رئيسي. ومع ذلك، فإن التحدي الأبرز يتمثل في عدم اليقين التنظيمي، حيث أفاد 69 % من المشاركين بأن المخاوف المتعلقة بالتشريعات المستقبلية للذكاء الاصطناعي أثرت سلباً على خططهم الاستثمارية في هذا المجال (Bluebeam, 2026).

رغم الإمكانيات الكبيرة للذكاء الاصطناعي، لا تزال هناك تحديات متعددة تواجه تطبيقه في الهندسة المعمارية، أبرزها:

7.1 التحديات التقنية

- **الحاجة إلى بيانات ضخمة وعالية الجودة :**تعتمد نماذج الذكاء الاصطناعي، خاصة نماذج التعلم العميق والتصميم التوليدي، على كميات كبيرة من البيانات المعمارية والبيئية والتشغيلية، في حين تعاني العديد من المؤسسات من نقص البيانات المنظمة أو ضعف جودتها .
- **تعقيد النماذج الذكية :**تتسم بعض الأنظمة الذكية بدرجة عالية من التعقيد الحسابي، مما يزيد صعوبة تطويرها وصيانتها ودمجها ضمن بيئات التصميم المعماري التقليدية .
- **ضعف التكامل بين الأنظمة والمنصات :**تواجه المؤسسات المعمارية تحديات في تحقيق التكامل بين أدوات التصميم المختلفة، ومنصات BIM، وأنظمة المحاكاة البيئية، وبرمجيات التحليل والتصوير، بسبب اختلاف صيغ البيانات والبروتوكولات التقنية .
- **أخطاء الذكاء الاصطناعي وهلوسة النماذج :**قد تنتج بعض نماذج الذكاء الاصطناعي مخرجات غير دقيقة أو غير واقعية، خاصة في الأنظمة التوليدية القائمة على النماذج اللغوية أو التوليد البصري، وهو ما قد يؤدي إلى قرارات تصميمية خاطئة إذا لم تخضع النتائج للمراجعة البشرية المتخصصة .

7.2 التحديات الاقتصادية

- **ارتفاع تكلفة التحول الرقمي :**يتطلب تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي تحديث البنية الرقمية وشراء البرمجيات المتخصصة وأنظمة الحوسبة المتقدمة .
- **الحاجة إلى استثمارات في البنية التحتية الرقمية :**تعتمد تطبيقات العمارة الذكية على الحوسبة السحابية، وأجهزة الاستشعار، والتوائم الرقمية، ومنصات البيانات الضخمة، مما يزيد من حجم الاستثمارات المطلوبة .
- **ارتفاع تكاليف التدريب والتأهيل :**تحتاج المؤسسات إلى تدريب المعماريين والمهندسين على أدوات الذكاء الاصطناعي، والتصميم التوليدي، وتحليل البيانات، ونظم BIM الذكية، وهو ما يتطلب موارد مالية وزمنية إضافية .

8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين المعماريين

في ظل التحول الرقمي المتسارع في قطاع الهندسة المعمارية، تُوصى المؤسسات الهندسية والمهندسون المعماريين بما يلي:

1. التعلم المستمر وتطوير الكفاءة الرقمية: الاستثمار في التدريب على أدوات الذكاء الاصطناعي والتحليل الرقمي وتقنيات التصميم الحديثة.
2. تبني الابتكار الرقمي الشامل: دمج التصميم التوليدي ونمذجة BIM والمحاكاة المتقدمة في جميع مراحل المشروع.
3. الالتزام بمبادئ الاستدامة والعمارة الخضراء: التركيز على الأداء الطاقي وتخطيط منخفض الانبعاثات والحصول على شهادات الاستدامة.
4. تعزيز التعاون متعدد التخصصات: بناء فرق عمل تضم مصممين ومهندسين وخبراء بيانات ومتخصصي استدامة.
5. تطوير مهارات القيادة الرقمية: القدرة على إدارة فرق العمل الذكية واتخاذ قرارات استراتيجية مستندة إلى البيانات.
6. الاستفادة من التحليل التنبؤي: توظيف البيانات ونماذج التنبؤ لدعم القرارات التصميمية والتشغيلية.

9 الخاتمة

أصبح الذكاء الاصطناعي أحد أهم محركات التحول الرقمي في الهندسة المعمارية، حيث أتاح إمكانيات غير مسبوقة لتحسين التصميم والاستدامة وإدارة المباني والمدن الذكية. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن مستقبل العمارة سيتجه نحو التكامل العميق بين الإبداع البشري والأنظمة الذكية، بما يحقق مستويات أعلى من الكفاءة والاستدامة وجودة الحياة.

ورغم التحديات المرتبطة بالبنية الرقمية والتكاليف والجوانب الأخلاقية والتنظيمية، فإن الذكاء الاصطناعي سيواصل لعب دور محوري في إعادة تشكيل البيئة العمرانية العالمية، خاصة مع تطور التصميم التوليدي والتوائم الرقمية والروبوتات المعمارية والمدن القائمة على البيانات.

10 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

- Adadi, A. and Berrada, M. (2018) 'Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (XAI)', *IEEE Access*, 6, pp. 52138–52160.
- Albukhari, A. (2025) *Generative AI in architectural design applications*. (Publication details not fully specified in source text).
- Arslan, M., et al. (2025) 'Echo-based heritage digital twin frameworks for cultural reconstruction', *Journal details not specified*.
- Autodesk (2026) *Real-time rendering and immersive design workflows in AEC industry*. Autodesk Research.
- Autodesk Research (2025) *AI integration in BIM and digital design workflows*. Autodesk.
- Azhar, S. (2023) *Applications of AR/VR in construction and architectural decision-making*. (Publication details not specified).
- Batty, M. (2024) *Smart cities, digital twins and cognitive urban systems*. (Publication details not fully specified).
- Bilal, M., et al. (2016) 'Big data in construction management: Applications and analytics', *Automation in Construction*, 72, pp. 98–114.
- Bluebeam (2025) *Architecture, Engineering & Construction (AEC) Technology Trends Report*. Bluebeam.
- Bluebeam (2026) *Technology outlook report for AEC industry*. Bluebeam.
- Brown, T. et al. (2020) 'Language models are few-shot learners', *NeurIPS*.
- Dore, C. and Murphy, M. (2017) 'Current state of the art in HBIM', *International Journal of Heritage in the Digital Era*.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. and Liston, K. (2018) *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. Wiley.
- European Commission (2024) *AI liability and regulatory framework in Europe*. European Commission Report.
- ETH Zurich (2024) *Heritage++ project documentation and digital twin applications in cultural heritage*. ETH Zurich.
- Fortune Business Insights (2025) *Construction Artificial Intelligence Market Report 2025–2034*.
- Guo, et al. (2023) 'Hybrid prompting strategies for generative AI systems', *Journal details not specified*.
- Hogan, A., et al. (2021) 'Knowledge graphs', *ACM Computing Surveys*, 54(4), pp. 1–37.
- IEA (2024) *Buildings sector emissions and energy consumption report*. International Energy Agency.
- IEEE (2025) *AI integration in BIM and construction systems: Technical standards report*. IEEE.
- ISO (2018) *ISO 19650: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works*. International Organization for Standardization.

- Jang, H., et al. (2025) ‘Generative design and AI-driven architectural optimization’, *Journal details not specified*.
- Khan, A., Chang, Y. and Chang, L. (2025) ‘Hybrid diffusion-autoregressive models for generative design’, *Journal details not specified*.
- Kumar, V. and Anandan, R. (2022) ‘Semantic search systems in engineering data environments’, *Journal details not specified*.
- Liu, et al. (2023) ‘Prompt engineering and generative model optimization’, *Journal details not specified*.
- Logothetis, S., et al. (2015) ‘HBIM and uncertainty integration in heritage documentation’, *Journal details not specified*.
- Mehrabi, N., et al. (2021) ‘A survey on bias and fairness in machine learning’, *ACM Computing Surveys*, 54(6).
- Murphy, M., McGovern, E. and Pavia, S. (2013) ‘Historic Building Information Modelling (HBIM)’, *Structural Survey*, 31(4).
- Nasiri, F. (2024) ‘AI applications in BIM-based construction management’, *Journal details not specified*.
- OECD (2025) *Artificial Intelligence in Cities and Urban Systems Report*. OECD Publishing.
- OpenAI (2023) *GPT-4 Technical Report and multimodal systems documentation*. OpenAI.
- Porwal, A. and Hewage, K. (2013) ‘Building Information Modeling (BIM) and project documentation efficiency’, *Automation in Construction*, 49, pp. 183–191.
- Radford, A., et al. (2021) *Learning transferable visual models from natural language supervision (CLIP)*. OpenAI.
- RICS (2025) *Smart construction and digital transformation in the built environment*. Royal Institution of Chartered Surveyors.
- Rombach, R., et al. (2022) ‘High-resolution image synthesis with latent diffusion models’, *CVPR*.
- Sacks, R., et al. (2020) *BIM and data quality management in construction projects*. (Publication details partially unspecified).
- Syska Hennessy Group (2025) *AI-driven engineering efficiency report*. Syska Hennessy Group.
- Taylor & Francis (2025) *Generative AI of Things (GAIoT) and smart urban systems*. Taylor & Francis Publications.
- University of Vienna (2025) *Prompt engineering effectiveness in design systems: empirical study*. University of Vienna.
- Volk, R., Stengel, J. and Schultmann, F. (2014) ‘Building Information Modeling (BIM) for existing buildings’, *Automation in Construction*, 38, pp. 109–127.
- Wei, et al. (2022) ‘Chain-of-thought and structured prompting in large language models’, *arXiv preprint*.
- WIPO (2024) *Intellectual property and artificial intelligence: Policy considerations*. World Intellectual Property Organization.

إعداد

مركز الدراسات والبحوث