نقابة المهندسين الأردنيين
Jordan Engineers Association

مركز الدراسات والبحوث
Studies and Research Center

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

الفهرس

1 المقدمة: التحول الرقمي في الهندسة المدنية..... 1

2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 2

2.1 الذكاء الاصطناعي في تحليل المنشآت ومراقبة الصحة الهيكلية 4

2.2 الذكاء الاصطناعي في تكنولوجيا الخرسانة..... 4

2.3 تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التصميم الإنشائي..... 5

2.4 الذكاء الاصطناعي في إدارة مشاريع البناء..... 6

2.5 الذكاء الاصطناعي في الهندسة الجيوتقنية..... 6

2.6 الذكاء الاصطناعي في هندسة الموارد المائية..... 7

2.7 الذكاء الاصطناعي في الصيانة التنبؤية والفحص الآلي..... 7

2.8 الذكاء الاصطناعي في هندسة النقل والمدن الذكية..... 8

2.9 نمذجة معلومات البناء والذكاء الاصطناعي(BIM–AI Integration) 8

2.10 الذكاء الاصطناعي في إدارة مخاطر الكوارث والمرونة الحضرية..... 8

2.11 الذكاء الاصطناعي في إدارة دورة حياة الأصول والبنية التحتية..... 10

2.12 الذكاء الاصطناعي في الاستدامة والتقييم البيئي..... 12

2.13 الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة للمباني والبنية التحتية 14

2.14الذكاء الاصطناعي والروبوتات والإنشاءات الذاتية 15

2.15 الذكاء الاصطناعي في الهندسة المساحية ونظم المعلومات الجغرافية..... 17

3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية 18

4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 20

5 فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 22

6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية 23

6.1 مهارات المستقبل في الهندسة المدنية في عصر الذكاء الاصطناعي 26

7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 27

7.1 التحديات التقنية..... 27

7.2 التحديات الاقتصادية..... 27

8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين المدنيين..... 28

9 الخاتمة..... 28

10 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 29

محتويات الجداول

رقم الجدول	محتويات	رقم الصفحة
جدول .1	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات الهندسة المدنية	19
جدول .2	أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية والبنية التحتية	21

1 المقدمة: التحول الرقمي في الهندسة المدنية

يشهد قطاع الهندسة المدنية تحولاً رقمياً متسارعاً مدفوعاً بالتطورات المتقدمة في تقنيات الذكاء الاصطناعي، التي أصبحت عنصراً محورياً في إعادة تشكيل مختلف مراحل دورة حياة المشاريع الهندسية، بدءاً من التخطيط والتصميم، مروراً بالتنفيذ، وانتهاءً بالتشغيل والصيانة. ولم يعد دور الذكاء الاصطناعي مقتصراً على أتمتة العمليات التقليدية أو دعم الحسابات الهندسية، بل تطور ليشكل منظومة متكاملة تعتمد على تقنيات التعلم الآلي، والتحليل التنبؤي، والرؤية الحاسوبية، والنمذجة الذكية، بما يسهم في رفع كفاءة الأداء وتحسين جودة اتخاذ القرار وتقليل المخاطر والتكاليف التشغيلية (Flood, 2008; Mohri et al., 2018). وتزداد أهمية هذه التقنيات في ظل التحديات العالمية المرتبطة بالنمو الحضري المتسارع، وتغير المناخ، وتعقيد مشاريع البنية التحتية، والحاجة المتزايدة إلى أنظمة عمرانية أكثر استدامة ومرونة وقدرة على التكيف، الأمر الذي أدى إلى توسيع نطاق تطبيقاتها لتشمل التصميم الإنشائي، وإدارة مشاريع البناء، والصيانة التنبؤية، والهندسة الجيوتقنية، وإدارة الموارد المائية، وأنظمة النقل الذكية، والمدن الذكية، ونمذجة معلومات البناء (BIM) (Frontiers, 2025). كما أسهمت هذه التقنيات في تعزيز قدرات تحليل البيانات الضخمة واستخلاص الأنماط والعلاقات الخفية وتحسين دقة التنبؤ بالسلوك المستقبلي للمنشآت والبنية التحتية بما يتجاوز قدرات النماذج الإحصائية التقليدية (Shalev-Shwartz and Ben-David, 2014).

وتؤكد الدراسات التطبيقية الحديثة الجدوى الاقتصادية والتشغيلية لتوظيف الذكاء الاصطناعي في قطاع الهندسة المدنية والإنشاءات، حيث حقق مشروع **Viewridge Medical Office Building** التابع لمؤسسة **Kaiser Permanente** في الولايات المتحدة، والذي اعتمد على منصة **Doxel** القائمة على الرؤية الحاسوبية والذكاء الاصطناعي لمراقبة تقدم الأعمال الإنشائية، زيادةً في إنتاجية العمالة بنسبة **38%** و خفضاً في تكلفة المشروع بنسبة **11%**مقارنة بالميزانية الأولية (Doxel, 2024). كما تشير المؤشرات الدولية إلى انتقال تطبيقات الذكاء الاصطناعي تدريجياً من مرحلة التجريب إلى مرحلة الدمج المؤسسي داخل قطاع التصميم والهندسة والإنشاء (AEC) ، إذ ارتفعت نسبة المؤسسات التي تستخدم هذه التقنيات في مشاريعها من **41% في عام 2024** إلى **59% في عام 2025** ، في حين انخفضت نسبة المؤسسات غير المستخدمة لها من **59% إلى 41 %**خلال الفترة ذاتها، بينما أفاد **53%** من المشاركين بتوقع تبني مؤسساتهم سياسات رسمية للذكاء الاصطناعي خلال العامين المقبلين، وتوقع **47%** زيادة الاستثمارات المخصصة للبحث والتطوير في هذا المجال (RIBA, 2025). وتعكس هذه النتائج وجود فجوة بين الانتشار الإعلامي الواسع للذكاء الاصطناعي ومستوى التبني التشغيلي الفعلي داخل المؤسسات الهندسية، مما يبرز الحاجة إلى تطوير استراتيجيات واضحة لحوكمة البيانات، وبناء القدرات البشرية، وتعزيز البنية التحتية الرقمية لضمان تحقيق قيمة تشغيلية قابلة للقياس بعيداً عن ظاهرة **الضجيج التقني (Technological Hype)** وفي هذا السياق، يتناول هذا الفصل بصورة منهجية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية، والأدوات والتقنيات المستخدمة، وفوائده التشغيلية والفنية، إضافةً إلى الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة والتحديات المرتبطة بالتطبيق، وصولاً إلى تقديم توصيات استراتيجية تدعم الاستخدام الأمثل لهذه التقنيات في الممارسة المهنية الهندسية.

2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

يشهد قطاع الهندسة المدنية تحولاً رقمياً متسارعاً مدفوعاً بالتطورات المتقدمة في تقنيات الذكاء الاصطناعي وتكاملها مع الأنظمة الهندسية الحديثة، مما أسهم في إعادة تشكيل أساليب التصميم والتنفيذ والتشغيل وإدارة البنية التحتية عبر مختلف مراحل دورة حياة المشاريع الهندسية. وأصبح الذكاء الاصطناعي أداةً استراتيجيةً تدعم تحليل البيانات الضخمة، والتنبؤ بالأداء المستقبلي، وأتمتة العمليات الهندسية، وتحسين جودة اتخاذ القرار، بما يعزز كفاءة المنشآت واستدامتها وجدواها الاقتصادية والتشغيلية. ومع التوسع في توظيف تقنيات التعلم الآلي، والتعلم العميق، والرؤية الحاسوبية، والتحليلات التنبؤية، والتوائم الرقمية، لم تعد تطبيقات الذكاء الاصطناعي مقتصرة على معالجة المشكلات الهندسية التقليدية، بل امتدت إلى تطوير منظومات متكاملة لإدارة البنية التحتية الذكية، وتعزيز المرونة الحضرية والاستدامة البيئية، من خلال بناء نماذج هندسية قائمة على البيانات تسهم في التنبؤ بالمخاطر، وتحسين الأداء التشغيلي، وإدارة الموارد بكفاءة ودقة أعلى.

وتشمل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية طيفاً واسعاً من المجالات التخصصية، من أبرزها تحليل المنشآت ومراقبة الصحة الهيكلية، وتكنولوجيا الخرسانة، والتصميم الإنشائي المتقدم، وإدارة مشاريع البناء، والهندسة الجيوتقنية، وهندسة الموارد المائية، والصيانة التنبؤية للبنية التحتية، إضافة إلى هندسة النقل والمدن الذكية، ونمذجة معلومات البناء (BIM) والتوائم الرقمية، وإدارة مخاطر الكوارث وتعزيز المرونة الحضرية، وإدارة دورة حياة الأصول والبنية التحتية، والاستدامة والتقييم البيئي، وإدارة الطاقة للمباني والمنشآت، والروبوتات والإنشاءات الذاتية، والهندسة المساحية ونظم المعلومات الجغرافية. وفي ظل التحديات العالمية المرتبطة بالنمو الحضري المتسارع، وتغير المناخ، وارتفاع تكاليف البنية التحتية، وتزايد الحاجة إلى تحقيق الاستدامة، أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الركائز الأساسية لمستقبل الهندسة المدنية، نظراً لدوره في بناء بنية تحتية أكثر ذكاءً ومرونة واستدامة وقادرة على التكيف مع المتغيرات المستقبلية ودعم التنمية الاقتصادية والاجتماعية على المدى الطويل. وفي هذا السياق، يستعرض هذا الفصل بصورة منهجية أبرز مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية، مع التركيز على التقنيات المستخدمة وآليات تطبيقها والفوائد المتحققة منها، إلى جانب الاتجاهات المستقبلية التي تسهم في إعادة تشكيل الممارسة الهندسية في عصر التحول الرقمي.

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

2.1 الذكاء الاصطناعي في تحليل المنشآت ومراقبة الصحة الهيكلية

تُعد مراقبة الصحة الهيكلية (Structural Health Monitoring – SHM) أحد أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية، حيث تقوم على تحليل البيانات المستمرة المستخلصة من شبكات الاستشعار الذكية بهدف تقييم الحالة الإنشائية للمنشآت ومراقبة أدائها التشغيلي بصورة آنية. ويهدف هذا النهج إلى الكشف المبكر عن العيوب الإنشائية مثل التشققات، والتآكل، والانحرافات الهيكلية، قبل تطورها إلى حالات فشل إنشائي قد تهدد سلامة المنشأة (Kia et al., 2014).

وتعتمد أنظمة SHM الحديثة على دمج تقنيات التعلم الآلي (Machine Learning) والتعلم العميق (Deep Learning) في معالجة وتحليل كميات كبيرة ومتنوعة من البيانات، تشمل الاهتزازات الديناميكية، والاستجابات الإنشائية، والإجهادات والانفعالات، وبيانات الحساسات اللاسلكية، إضافة إلى الصور البصرية والحرارية. ويسمح هذا التكامل بتحويل البيانات الخام إلى مؤشرات تشخيصية دقيقة تعكس الحالة الفعلية للمنشأة.كما أثبت دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع أساليب الاختبارات غير الإتلافية

(Non-Destructive Testing – NDT) مثل الموجات فوق الصوتية (Ultrasonic Testing) والتصوير الحراري (Thermography) فعالية عالية في تحسين دقة اكتشاف العيوب الهيكلية، وتسريع عمليات التشخيص، ودعم استراتيجيات الصيانة الوقائية والاستباقية (Dai et al., 2011).

تُستخدم الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks – ANN) ونماذج آلة المتجهات الداعمة (Support Vector Machines – SVM) في تحليل الأضرار الزلزالية، والتنبؤ بالأعطال الإنشائية، وتحديد مواقع وتركيزات الضرر في الجسور والمباني، إضافة إلى تقييم موثوقية المنشآت الإنشائية تحت مختلف ظروف التشغيل والأحمال البيئية والزمنية (Hirokane et al., 2008; Gonzalez and Zapico, 2008).

2.2 الذكاء الاصطناعي في تكنولوجيا الخرسانة

أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الأدوات التحويلية الرئيسة في مجال تكنولوجيا الخرسانة، حيث أسهم في إعادة تشكيل منهجيات تصميم الخلطات الخرسانية وتحليل خصائصها الميكانيكية والفيزيائية. ويعتمد هذا التحول على بناء نماذج تنبؤية متقدمة قادرة على محاكاة سلوك الخرسانة بدقة عالية، بما يقلل الاعتماد على الاختبارات المخبرية التقليدية التي تتسم بارتفاع الكلفة الزمنية والمالية وصعوبة تمثيل جميع الظروف التشغيلية الممكنة (Zhou et al., 2016). ويعكس ذلك انتقالاً منهجياً من الأساليب التجريبية القائمة على المحاولة والخطأ إلى نماذج قائمة على البيانات والتحليل الحسابي المتقدم.

ويقوم توظيف الذكاء الاصطناعي في هذا المجال على تحليل متعدد المتغيرات(Multivariate Analysis) ، يشمل مجموعة واسعة من العوامل المؤثرة في أداء الخرسانة، مثل نسب الخلط التصميمية، ونوع وخصائص الإسمنت، وتدرج الركام، وظروف المعالجة (Curing Conditions)، ونسبة الماء إلى الإسمنت (Water/Cement Ratio) ، بالإضافة إلى تقنيات الصب والدمك وجودة التنفيذ الميداني. ويسمح هذا النهج بفهم العلاقات المعقدة وغير الخطية بين هذه المتغيرات، وكيفية انعكاسها على الخصائص النهائية للخرسانة في المدين القصير والطويل.

وفي هذا السياق، أثبتت تقنيات التعلم الآلي، ولا سيما الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks – ANN) ونماذج التعلم العميق(Deep Learning) ، كفاءة عالية في التنبؤ بخصائص الخرسانة المختلفة، وعلى رأسها مقاومة الانضغاط (Compressive Strength)، وقابلية التشغيل (Workability) ، ومقاومة الخرسانة للظروف البيئية والأحمال المتغيرة. وقد أظهرت هذه النماذج تفوقاً ملحوظاً في الدقة مقارنة بالأساليب الإحصائية التقليدية، نظراً لقدرتها على معالجة العلاقات غير الخطية والمعقدة بين المتغيرات المدخلة والمخرجات المستهدفة (Aggarwal and Sharma, 2010; Akande et al., 2014; Deng et al., 2018).

كما يتيح الذكاء الاصطناعي إمكانيات متقدمة في تحسين تصميم الخلطات الخرسانية (Concrete Mix Design Optimization) من خلال توليد تركيبات متعددة تحقق توازناً بين الأداء الميكانيكي والاستدامة البيئية وتقليل التكلفة. إضافة إلى ذلك، يمكن استخدام النماذج الذكية في التنبؤ المبكر بظواهر التدهور مثل التشقق، والانكماش، والزحف (Creep and Shrinkage) ، مما يسهم في تحسين إدارة دورة حياة المنشآت الخرسانية.

وبذلك، لم يعد دور الذكاء الاصطناعي مقتصراً على التنبؤ بالخصائص فقط، بل أصبح أداة استراتيجية في تطوير مواد بناء أكثر كفاءة واستدامة، تدعم التحول نحو هندسة إنشائية قائمة على البيانات (Data-Driven Construction Engineering).

2.3 تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التصميم الإنشائي

يسهم الذكاء الاصطناعي في إحداث نقلة نوعية في مجال التصميم الإنشائي من خلال تطوير نماذج تصميمية أكثر كفاءة واستدامة، تعتمد على تحسين توزيع المواد وتقليل الكتلة الإنشائية والتكلفة، مع الحفاظ على متطلبات الأداء الإنشائي ومعايير السلامة والكودات الهندسية. ويتيح هذا التوجه الانتقال من التصميم التقليدي القائم على الحلول المحدودة إلى تصميمات مُحسّنة تعتمد على التحليل الحسابي المتقدم والبحث عن الحلول المثلى ضمن فضاءات تصميم متعددة الأبعاد.

وتعتمد تطبيقات التحسين الإنشائي (Structural Optimization) على مجموعة من تقنيات الذكاء الاصطناعي والخوارزميات التطورية، من أبرزها الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms) ، وتقنيات التحسين الطوبولوجي (Topology Optimization)، وخوارزميات سرب الجسيمات .(Particle Swarm Optimization) وتُستخدم هذه الأساليب في تصميم الجسور والمنشآت المعقدة، وتحسين توزيع العناصر الإنشائية، وتقليل استهلاك المواد، بما ينعكس إيجابًا على الكفاءة الاقتصادية والبيئية للمشاريع، إضافة إلى تعزيز أداء المنشآت في مواجهة الأحمال الديناميكية والظروف القاسية مثل الزلازل (Salehi and Burgueno, 2018).

كما تُوظف نماذج التعلم العميق (Deep Learning Models) في تحليل السلوك الإنشائي المتقدم، بما في ذلك الاستجابات الديناميكية للمنشآت، وتأثير الأحمال الزلزالية، والسلوك غير الخطي للعناصر الإنشائية، إضافة إلى تحليل الإجهادات والانفعالات بدقة عالية اعتمادًا على بيانات محاكاة أو بيانات حسية (Sensor Data). ويساهم ذلك في تحسين القدرة التنبؤية للنماذج الهندسية ودعم قرارات التصميم.

وفي السياق ذاته، تُعد تقنيات التصميم التوليدي (Generative Design) من أبرز التطورات الحديثة في هذا المجال، حيث تعتمد على توليد عدد كبير من البدائل التصميمية تلقائيًا بناءً على مجموعة من القيود الهندسية ومتطلبات الأداء المحددة مسبقًا. ويتيح ذلك للمهندس تقييم خيارات تصميم متعددة واختيار الحل الأمثل من حيث الكفاءة الإنشائية، والتكلفة الاقتصادية، والاستدامة البيئية، بما يعزز من جودة المخرجات التصميمية ومرونتها.

2.4 الذكاء الاصطناعي في إدارة مشاريع البناء

شهدت إدارة مشاريع البناء تحولًا جذريًا مع دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي، حيث تجاوزت هذه التقنيات حدود أدوات التخطيط التقليدية مثل أساليب المسار الحرج (CPM) وتقنية تقييم ومراجعة البرامج (PERT)، لتقدم منظومات ذكية قادرة على دعم عمليات التخطيط والتحكم بصورة أكثر ديناميكية وارتباطًا بالبيانات الفعلية للموقع. ويتيح ذلك الانتقال من نماذج إدارة ثابتة إلى نماذج تنبؤية وتكيفية قادرة على تحليل المخاطر، والتنبؤ بالتأخيرات، وإدارة الموارد بكفاءة أعلى ضمن بيئات تنفيذ معقدة ومتغيرة.

وفي هذا السياق، تعتمد أنظمة الجدولة الذكية على دمج البيانات التاريخية للمشاريع مع بيانات التنفيذ اللحظية، بهدف بناء جداول زمنية مرنة وقابلة للتحديث المستمر. ويسهم هذا النهج في تحسين دقة التنبؤ بانحرافات الجدول الزمني، وتحديد المسار الحرج بشكل أكثر فاعلية، إضافةً إلى دعم اتخاذ القرار فيما يتعلق بإعادة توزيع الموارد البشرية والمادية بما يضمن تقليل التأخيرات وتحسين الإنتاجية (Levitt et al., 1992).

وفي مجال إدارة التكاليف، أصبحت نماذج التعلم الآلي (Machine Learning Models) أداة محورية في التنبؤ بتكاليف المشاريع، وتحليل الانحرافات المالية، واكتشاف تجاوزات الميزانية في مراحل مبكرة من التنفيذ. كما تُستخدم هذه النماذج في تحسين دقة إعداد العطاءات (Bidding) من خلال تحليل العوامل المؤثرة في التكلفة، مثل أسعار المواد، وإنتاجية العمالة، وظروف السوق، مما يعزز من موثوقية التقديرات المالية ويدعم كفاءة التخطيط الاقتصادي للمشروعات (Rafiei and Adeli, 2018).

أما في مجال السلامة المهنية (Construction Safety Management)، فقد أسهمت تقنيات الرؤية الحاسوبية (Computer Vision) وأنظمة المراقبة الذكية في تطوير آليات متقدمة لرصد مواقع العمل. حيث تُستخدم الكاميرات الذكية في اكتشاف السلوكيات الخطرة، ومراقبة الالتزام باستخدام معدات الوقاية الشخصية (PPE)، وتحليل الانتهاكات في الوقت الفعلي. بالإضافة إلى ذلك، يتم توظيف تحليل البيانات التاريخية للحوادث لبناء نماذج تنبؤية قادرة على تحديد مناطق ومراحل العمل ذات الخطورة المرتفعة، مما يساهم في تقليل معدلات الحوادث وتحسين بيئة العمل في مشاريع البناء الحديثة.

2.5 الذكاء الاصطناعي في الهندسة الجيوتقنية

تشهد الهندسة الجيوتقنية توسعاً متزايداً في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين دقة تحليل خصائص التربة والتنبؤ بسلوكها تحت تأثير الأحمال المختلفة، بما يسهم في الحد من مستويات عدم اليقين الناجمة عن الطبيعة غير المتجانسة للتربة وتعزيز موثوقية التقييمات الجيوتقنية. وتشمل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذا المجال التنبؤ بالهبوط، وتحليل استقرار المنحدرات، وتصميم الأساسات، وتقييم مخاطر الانهيارات الأرضية، إضافة إلى تحليل السلوك الزلزالي للتربة ودراسة تفاعل التربة مع المنشآت، الأمر الذي يدعم تطوير حلول هندسية أكثر كفاءة وأماناً واستدامة.

وتعتمد هذه التطبيقات بصورة رئيسية على تقنيات التعلم الآلي، ولا سيما الشبكات العصبية الاصطناعية، لمعالجة وتحليل بيانات متعددة المصادر، تشمل بيانات الحفر الاستكشافي، والاختبارات المخبرية، والبيانات الجيوفيزيائية، بهدف تحسين دقة التصنيف الجيوتقني للتربة والتنبؤ بخصائصها الهندسية، مثل مقاومة القص والانضغاطية ونفاذية التربة، بكفاءة تتجاوز الأساليب التجريبية التقليدية. كما تسهم نماذج الذكاء الاصطناعي في دعم عمليات اتخاذ القرار خلال مرحلتي التصميم والتنفيذ، من خلال تقليل مستويات عدم اليقين المرتبطة بخصائص التربة، ورفع كفاءة الحلول الهندسية، والحد من احتمالات الفشل الإنشائي المرتبط بالأساسات والمنشآت الجيوتقنية.

2.6 الذكاء الاصطناعي في هندسة الموارد المائية

يسهم الذكاء الاصطناعي بصورة متزايدة في تطوير أنظمة إدارة الموارد المائية ورفع كفاءة تشغيل البنية التحتية المرتبطة بالمياه، من خلال توظيف نماذج تحليل البيانات والتعلم الآلي في فهم السلوك الهيدرولوجي المعقد والتعامل مع تقلباته. وتشمل أبرز تطبيقاته التنبؤ بتدفقات الأنهار، والإنذار المبكر من الفيضانات، وإدارة تشغيل الخزانات والسدود، والتنبؤ بموجات الجفاف، إضافة إلى تحسين أداء شبكات المياه والصرف الصحي من حيث الكفاءة التشغيلية والاستدامة.

وفي هذا السياق، تُستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي في بناء نماذج تنبؤية تعتمد على البيانات المناخية والهيدرولوجية التاريخية واللحظية، بما يتيح تحسين دقة التوقعات المرتبطة بالدورات المائية وتغيراتها الزمنية والمكانية. كما تُسهم هذه النماذج في دعم عمليات اتخاذ القرار المتعلقة بتوزيع الموارد المائية وإدارة المخاطر المرتبطة بالفيضانات والجفاف.

وعلى مستوى التشغيل والبنية التحتية، يتم توظيف أنظمة الذكاء الاصطناعي بالتكامل مع تقنيات إنترنت الأشياء (Internet of Things – IoT) والمستشعرات الذكية للكشف المبكر عن تسربات المياه، وتحديد أعطال الأنابيب، ورصد حالات تلوث المياه في الوقت الفعلي. ويتيح هذا التكامل بين الاستشعار والتحليل اللحظي تحسين كفاءة شبكات التوزيع وتقليل الفاقد المائي، بالإضافة إلى رفع كفاءة استهلاك الطاقة في محطات الضخ والمعالجة، بما يعزز من استدامة منظومات المياه بشكل عام.

2.7 الذكاء الاصطناعي في الصيانة التنبؤية والفحص الآلي

تمثل الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance) أحد أهم التحولات الحديثة في إدارة الأصول الهندسية، حيث تقوم على تحليل البيانات التاريخية واللحظية بهدف التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها الفعلي، بما يتيح الانتقال من نموذج الصيانة التفاعلية إلى نموذج صيانة استباقي قائم على البيانات. ويُسهم هذا التحول في رفع كفاءة إدارة البنية التحتية وتقليل التكاليف التشغيلية المرتبطة بالأعطال المفاجئة.

وتشمل تطبيقات الصيانة التنبؤية مختلف عناصر البنية التحتية المدنية، مثل الجسور، والأنفاق، والطرق، والسدود، وشبكات المياه، إضافة إلى المباني الذكية. وفي هذا السياق، يتم توظيف الطائرات بدون طيار (Drones) والروبوتات الذكية في عمليات الفحص الهندسي للمناطق التي يصعب الوصول إليها، بما في ذلك المنشآت المرتفعة والهياكل المعقدة، وذلك للكشف عن التشققات، والتآكل، وإجراء المسح ثلاثي الأبعاد، وتقييم الأضرار بعد الكوارث الطبيعية.

وتعتمد هذه التطبيقات بشكل أساسي على تقنيات الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)، والتعلم العميق (Deep Learning)، ومعالجة الصور (Image Processing)، حيث يتم تحليل الصور والبيانات البصرية لاستخلاص مؤشرات دقيقة عن الحالة الإنشائية. وقد أسهم هذا التطور في تقليل مخاطر الفحص اليدوي، وتسريع عمليات التفتيش، ورفع دقة تقييم الأضرار، بما يعزز من موثوقية قرارات الصيانة والإصلاح.

2.8 الذكاء الاصطناعي في هندسة النقل والمدن الذكية

يمثل الذكاء الاصطناعي عنصرًا محوريًا في تطوير أنظمة النقل الذكية وتحسين كفاءة المدن الحديثة، من خلال دعم عمليات التخطيط الحضري وإدارة الحركة المرورية بشكل أكثر ديناميكية واستجابة للبيانات اللحظية. وتشمل أبرز تطبيقاته إدارة المرور الذكية، وتحسين توقيت الإشارات المرورية، والتنبؤ بالازدحامات، وتحليل التدفقات المرورية، وتخطيط أنظمة النقل الحضري، وإدارة مواقف السيارات.

وقد شهدت العديد من المدن العالمية تطورًا ملحوظًا في اعتماد أنظمة نقل ذكية قائمة على الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء (IoT)، والتحليلات التنبؤية، بهدف تحسين انسيابية الحركة المرورية ورفع كفاءة البنية التحتية الحضرية (Frontiers, 2025). ويسهم هذا التكامل التقني في تقليل زمن التنقل، وخفض استهلاك الوقود، وتحسين مستويات السلامة المرورية.

وعلى مستوى أوسع، تعتمد المدن الذكية على توظيف البيانات الضخمة (Big Data)، والمستشعرات الذكية، وإنترنت الأشياء، والنماذج التنبؤية لتحسين إدارة الطاقة، والمياه، والنفايات، وتقليل الانبعاثات الكربونية، ورفع جودة الخدمات الحضرية بشكل عام. ومن أبرز الأمثلة العالمية في هذا المجال أنظمة إدارة المرور الذكية في مدينة لوس أنجلوس، ومشاريع النقل الذكي في هونغ كونغ، إضافة إلى أنظمة البنية التحتية الرقمية المتقدمة في مدينة دبي.

2.9 نمذجة معلومات البناء والذكاء الاصطناعي (BIM–AI Integration)

تُعد نمذجة معلومات البناء (Building Information Modeling – BIM) إطارًا رقميًا متكاملًا لإدارة دورة حياة المنشآت الهندسية، بدءًا من مرحلة التصميم وحتى التشغيل والصيانة. وقد أدى دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع BIM إلى ظهور مفهوم **"BIM الذكي" (Smart BIM)**، الذي يهدف إلى تعزيز مستوى الذكاء والتحليل التنبؤي داخل بيئة إدارة المشاريع الإنشائية.

ويشمل هذا التكامل تطبيقات متعددة، من أبرزها التصميم التوليدي (Generative Design)، والكشف التلقائي عن التعارضات (Clash Detection)، والتنبؤ باحتياجات الصيانة، وإدارة دورة حياة المشروع، بالإضافة إلى المحاكاة الزمنية والمالية (4D/5D Simulation)، بما يساهم في تحسين دقة التخطيط ورفع كفاءة التنفيذ وتقليل المخاطر التشغيلية.

كما يتيح الدمج بين BIM والذكاء الاصطناعي تطوير مفهوم التوأم الرقمي (Digital Twins)، الذي يمثل نموذجًا افتراضيًا حيًا للمنشأة يعكس حالتها الواقعية في الزمن الحقيقي. ويسهم هذا التكامل في دعم أنظمة التشغيل والصيانة الذكية، وتمكين المراقبة اللحظية للأداء الإنشائي، مما يجعل هذه التقنيات ركيزة أساسية في تطوير المدن الذكية والبنية التحتية المستقبلية القائمة على البيانات.

2.10 الذكاء الاصطناعي في إدارة مخاطر الكوارث والمرونة الحضرية

يُعد توظيف الذكاء الاصطناعي في إدارة مخاطر الكوارث وتعزيز المرونة الحضرية (Urban Resilience) من أسرع المجالات نمواً على مستوى العالم، نظراً لتزايد حدة الظواهر المناخية المتطرفة وتعقيد الأنظمة الحضرية الحديثة. وقد أصبح هذا المجال جزءاً محورياً في استراتيجيات التحول الحضري المستدام، حيث يهدف إلى تعزيز قدرة المدن على التنبؤ بالمخاطر، والاستجابة الفورية، والتعافي السريع من الكوارث الطبيعية والبشرية (UNDRR, 2024; World Bank, 2025).

يعتمد الذكاء الاصطناعي في هذا السياق على دمج مصادر بيانات متعددة مثل صور الأقمار الصناعية، وأجهزة الاستشعار الأرضية، وبيانات الطقس، ونماذج التضاريس الرقمية، إضافة إلى البيانات الزمنية الضخمة، بهدف بناء نماذج تنبؤية عالية الدقة قادرة على دعم اتخاذ القرار في المراحل المختلفة لإدارة الكارثة: قبل وقوعها، أثناء حدوثها، وبعدها (IPCC, 2024).

أولاً: التطبيقات الرئيسية للذكاء الاصطناعي في إدارة الكوارث

تشمل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذا المجال مجموعة واسعة من الوظائف التحليلية والتنبؤية، من أبرزها:

- **التنبؤ بالفيضانات والسيول :**عبر نماذج تعلم آلي تربط بين معدلات الأمطار وخصائص التربة وشبكات التصريف، بهدف تحديد المناطق الأكثر عرضة للغمر المائي وإصدار إنذارات مبكرة (UNESCO, 2024).
- **تقييم مخاطر الزلازل :**من خلال تحليل البيانات الجيولوجية والتاريخ الزلزالي ونمذجة احتمالات النشاط الزلزالي في المناطق الحضرية (USGS, 2024).
- **التنبؤ بالانهيارات الأرضية :**باستخدام تحليل الانحدارات الطبوغرافية ونسبة التشبع المائي وخصائص التربة (NASA Earth Observatory, 2025).
- **تقييم مخاطر الأعاصير والعواصف :**عبر نماذج مناخية تنبؤية تعتمد على البيانات الجوية العالمية والمحلية (NOAA, 2025).
- **نمذجة سيناريوهات الكوارث :**من خلال محاكاة رقمية لتقدير تأثير الكوارث على البنية التحتية والسكان (OECD, 2025).
- **دعم الاستجابة للطوارئ :**عبر تحسين توزيع فرق الإنقاذ وإدارة الموارد وتحديد الأولويات المكانية باستخدام التحليل المكاني الذكي (World Bank, 2025).

ثانياً: دور الذكاء الاصطناعي في المرونة الحضرية

يمتد دور الذكاء الاصطناعي إلى ما هو أبعد من التنبؤ بالكوارث، ليشمل تعزيز **المرونة الحضرية (Urban Resilience)** ، أي قدرة المدينة على امتصاص الصدمات والتكيف معها واستعادة وظائفها الحيوية بأقل خسائر ممكنة (UN-Habitat, 2024).

ويتم ذلك من خلال:

- تحسين التخطيط الحضري القائم على المخاطر (Risk-Informed Planning).
- دعم تصميم بنية تحتية مقاومة للكوارث (Resilient Infrastructure).
- تحليل نقاط الضعف في الشبكات الحضرية الحيوية مثل المياه والطاقة والنقل .
- تطوير أنظمة إنذار مبكر ذكية (AI-based Early Warning Systems) (UNDRR, 2024) .
- تعزيز اتخاذ القرار في الوقت الحقيقي أثناء الأزمات .

كما تسهم تقنيات التوأم الرقمي (Digital Twin) في محاكاة سيناريوهات الكوارث داخل المدن، مما يسمح بتقييم تأثيراتها المحتملة واختبار استراتيجيات الاستجابة قبل حدوثها فعلياً (Siemens, 2025; Batty, 2024).

ثالثاً: البعد المؤسسي والتنموي للمجال

أصبح الذكاء الاصطناعي في إدارة الكوارث محوراً مستقلاً في سياسات التنمية الدولية، حيث يُدرج ضمن برامج الأمم المتحدة والبنك الدولي باعتباره أداة رئيسية لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، خاصة تلك المتعلقة بالمدن المستدامة والعمل المناخي والحد من مخاطر الكوارث (UNDRR, 2024; World Bank, 2025).

ويرتبط هذا المجال بشكل مباشر بقضية **تغير المناخ (Climate Change)** ، حيث تؤدي التغيرات المناخية إلى زيادة تكرار وشدة الكوارث الطبيعية، مما يعزز الحاجة إلى أنظمة ذكية قادرة على التنبؤ والاستجابة الفعالة (IPCC, 2024). وبالتالي، أصبح الذكاء الاصطناعي جزءاً أساسياً من استراتيجيات التكيف المناخي (Climate Adaptation Strategies) وليس مجرد أداة تقنية مساعدة.

رابعاً: التوجهات المستقبلية

تشير الاتجاهات الحديثة إلى أن أنظمة إدارة الكوارث ستتطور نحو نماذج أكثر تكاملاً تعتمد على الذكاء الاصطناعي التنبئي والتوليدي، والتوأم الرقمي الحضري، وإنترنت الأشياء، لتشكيل منظومات حضرية قادرة على (OECD, 2025).

- التنبؤ بالمخاطر قبل وقوعها بدقة عالية .
- اتخاذ قرارات استجابة شبه ذاتية في الزمن الحقيقي .
- تحسين توزيع الموارد أثناء الأزمات .
- تسريع عمليات التعافي وإعادة الإعمار .

وبذلك، يتحول الذكاء الاصطناعي من أداة تحليلية إلى **بنية تشغيلية أساسية في منظومة إدارة المخاطر الحضرية**، تسهم في بناء مدن أكثر أماناً ومرونة واستدامة في مواجهة التحديات البيئية والمناخية المتزايدة.

2.11 الذكاء الاصطناعي في إدارة دورة حياة الأصول والبنية التحتية

يُعد الذكاء الاصطناعي في إدارة دورة حياة الأصول والبنية التحتية (Infrastructure Asset Lifecycle Management) أحد المجالات المتقدمة في التطبيقات الهندسية الحديثة، حيث يتجاوز مفهوم الصيانة التنبؤية التقليدية ليشمل إدارة شاملة ومتكاملة للأصول على امتداد دورة حياتها الكاملة، بدءاً من مرحلة التشغيل المبكر، مروراً بمرحلة الاستخدام، وصولاً إلى الإحلال والتجديد أو الإيقاف النهائي.

ويقوم هذا المجال على توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الضخمة والتوأم الرقمي لدعم اتخاذ القرار الاستراتيجي على مستوى البنية التحتية، بما يضمن تحسين الكفاءة التشغيلية، وإطالة العمر الافتراضي للأصول، وتعظيم العائد الاقتصادي والاجتماعي من الاستثمارات العامة (World Bank, 2025; OECD, 2025).

أولاً: مجالات التطبيق في البنية التحتية

يُستخدم الذكاء الاصطناعي في إدارة الأصول عبر نطاق واسع من عناصر البنية التحتية الحيوية، ومن أبرزها:

- **إدارة الجسور :**من خلال مراقبة الحالة الإنشائية باستخدام بيانات الاستشعار (Structural Health Monitoring) وتحليل التشققات والتشوهات لتقييم السلامة الإنشائية وتحديد الحاجة إلى التدخل .
- **إدارة الطرق :**عبر تحليل كثافة المرور، وحالة الرصف، وتدهور الطبقات الإسفلتية لتحديد أولويات الصيانة وإعادة التأهيل .
- **إدارة السدود :**من خلال مراقبة مستويات الإجهاد المائي، والتغيرات الجيولوجية، وتحليل مخاطر الفشل الإنشائي .
- **إدارة شبكات المياه :**عبر تتبع التسربات، وضغط الشبكة، وكفاءة التوزيع باستخدام التحليل التنبئي والبيانات اللحظية .
- **إدارة أصول البنية التحتية الحضرية :**بما يشمل شبكات الطاقة، والنقل العام، والمرافق الحيوية .
- **تحديد أولويات الاستثمار :**عبر نماذج تحليل القرار متعددة المعايير – (Multi-Criteria Decision Analysis MCDA)المدعومة بالذكاء الاصطناعي .
- **جدولة الإحلال والتجديد :**من خلال نمذجة السيناريوهات المستقبلية لتحديد التوقيت الأمثل لاستبدال الأصول أو تحديثها .

ثانياً: الوظائف التحليلية للذكاء الاصطناعي في إدارة الأصول

يسهم الذكاء الاصطناعي في هذا المجال في تطوير مجموعة من الوظائف التحليلية المتقدمة التي تدعم اتخاذ القرار الاستراتيجي، ومن أبرزها:

- **تقدير العمر المتبقي للأصول (Remaining Useful Life – RUL):**

  حيث يتم استخدام نماذج تعلم الآلة لتحليل بيانات الأداء والتدهور التاريخي للتنبؤ بالعمر التشغيلي المتبقي لكل أصل بنيوي .
- **تحديد أولويات الصيانة والتجديد:**

  من خلال دمج بيانات الحالة الإنشائية مع عوامل المخاطر والأهمية الوظيفية للأصل داخل الشبكة الحضرية .
- **تحسين تخصيص الميزانيات:**

  عبر نماذج تحسين (Optimization Models) تساعد في توزيع الموارد المالية بشكل أكثر كفاءة بين الأصول المختلفة وفقاً لمستوى الخطورة والأثر المتوقع .
- **دعم اتخاذ القرار الاستثماري:**

  من خلال تحليل السيناريوهات طويلة المدى وتقييم التكلفة الكلية لدورة الحياة – (Life Cycle Cost Analysis LCCA).

ثالثاً: التكامل مع التوأم الرقمي والأنظمة الذكية

يُعد التكامل مع التوأم الرقمي (Digital Twin) أحد أهم التطورات في هذا المجال، حيث يتم إنشاء نسخة رقمية حية للبنية التحتية تتيح محاكاة الأداء الفعلي للأصول في الزمن الحقيقي. ويسمح هذا التكامل بـ:

- مراقبة الحالة التشغيلية بشكل مستمر .
- اختبار سيناريوهات الفشل والإصلاح افتراضياً .
- تحسين خطط الصيانة والإحلال بشكل ديناميكي .
- دعم التخطيط طويل المدى للبنية التحتية الحضرية .

كما يتيح دمج الذكاء الاصطناعي مع نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وإنترنت الأشياء (IoT) بناء منظومة متكاملة لإدارة الأصول تعتمد على البيانات اللحظية والتحليل التنبئي.

رابعاً: الأهمية الاستراتيجية للمجال

تكتسب إدارة دورة حياة الأصول المدعومة بالذكاء الاصطناعي أهمية متزايدة في ظل التحديات المرتبطة بتقادم البنية التحتية وارتفاع تكاليف الصيانة والضغط المتزايد على الموارد العامة. وقد أصبحت هذه المقاربة جزءاً أساسياً من استراتيجيات المؤسسات الدولية مثل البنك الدولي ومنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية، حيث تُستخدم كأداة لتعزيز الكفاءة الاقتصادية وتحقيق الاستدامة في إدارة الأصول العامة (World Bank, 2025; OECD, 2025).

كما يسهم هذا التوجه في الانتقال من نموذج الإدارة التفاعلية (Reactive Management) إلى نموذج الإدارة التنبؤية والاستباقية (Predictive and Proactive Management) ، مما يؤدي إلى تقليل الأعطال غير المخططة، وتحسين السلامة العامة، ورفع كفاءة الاستثمار في البنية التحتية.

خامساً: التوجهات المستقبلية

تشير الاتجاهات الحديثة إلى أن مستقبل إدارة الأصول والبنية التحتية سيتجه نحو أنظمة ذكية ذاتية التعلم قادرة على:

- التنبؤ بالتدهور الهيكلي بدقة عالية .
- اتخاذ قرارات صيانة شبه مستقلة .
- تحسين تخصيص الموارد بشكل لحظي .
- دمج الاستدامة البيئية ضمن قرارات الإحلال والتجديد .

وبذلك، يتحول الذكاء الاصطناعي في هذا المجال إلى عنصر بنيوي في إدارة المدن الحديثة، يسهم في تعزيز استدامة البنية التحتية ورفع كفاءتها التشغيلية على المدى الطويل.

2.12 الذكاء الاصطناعي في الاستدامة والتقييم البيئي

يُعد الذكاء الاصطناعي في الاستدامة والتقييم البيئي أحد المحاور الأساسية في التحول نحو العمارة الخضراء والمدن منخفضة الانبعاثات، حيث يوفر أدوات تحليل متقدمة قادرة على قياس وتحسين الأداء البيئي للمباني والبنية التحتية عبر دورة حياتها الكاملة. وعلى الرغم من أن مفهوم الاستدامة يُطرح في العديد من الدراسات ضمن إطار عام، إلا أن التطورات الحديثة (2024–2026)

تشير إلى ضرورة اعتباره محوراً مستقلاً نظراً لتزايد دوره في دعم القرارات التصميمية والتشغيلية المبنية على البيانات (IEA, 2024; UNEP, 2025).

يعتمد هذا المجال على دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي، وتحليل البيانات الضخمة، ونمذجة المحاكاة البيئية، بهدف تحويل الاستدامة من مفهوم وصفي إلى نظام قياس وتحكم كمي دقيق يمكن توظيفه في جميع مراحل التصميم والتشغيل وإدارة المباني.

أولاً: التطبيقات الرئيسية للذكاء الاصطناعي في الاستدامة

يشمل الذكاء الاصطناعي في هذا المجال مجموعة واسعة من التطبيقات التحليلية والتقييمية، من أبرزها:

- **حساب البصمة الكربونية (Carbon Footprint):**
حيث تُستخدم نماذج التعلم الآلي لتحليل الانبعاثات الناتجة عن المواد، وعمليات البناء، والتشغيل، والنقل، بهدف تحديد إجمالي الأثر الكربوني للمبنى أو المشروع (IEA, 2024).
- **تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment – LCA):**
من خلال تحليل التأثير البيئي للمبنى منذ مرحلة استخراج المواد الخام وحتى نهاية العمر الافتراضي، مع دمج البيانات التشغيلية والزمنية في نماذج تنبؤية دقيقة (UNEP, 2025).
- **تحليل استهلاك الطاقة:**
باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحليل أنماط الاستهلاك الفعلي للطاقة في المباني، وتحديد فرص التحسين وتقليل الهدر عبر أنظمة إدارة الطاقة الذكية .
- **تحسين استخدام الموارد:**
من خلال تحسين استهلاك المياه، والمواد الإنشائية، والطاقة، وتقليل الفاقد في العمليات التشغيلية باستخدام نماذج التحسين (Optimization Models).
- **تقييم الأداء البيئي للمباني:**
عبر مؤشرات الأداء البيئي (Environmental Performance Indicators – EPI) المدعومة بالتحليل التنبئي، والتي تتيح مقارنة بدائل التصميم من حيث الكفاءة والاستدامة .
- **دعم أهداف الحياد الكربوني (Net Zero Carbon Goals):**
من خلال دمج الذكاء الاصطناعي في استراتيجيات تقليل الانبعاثات، وتحسين كفاءة الطاقة، وتعويض الكربون عبر الحلول الطبيعية والتكنولوجية .

ثانياً: دور الذكاء الاصطناعي في التحول نحو الاستدامة الذكية

يسهم الذكاء الاصطناعي في تحويل الاستدامة من مفهوم تقليدي قائم على التقييم اللاحق إلى نظام **تنبؤي واستباقي** قادر على دعم اتخاذ القرار في المراحل المبكرة من التصميم. حيث يمكن للنماذج الذكية تحليل آلاف السيناريوهات التصميمية لتحديد البدائل الأقل تأثيراً بيئياً والأعلى كفاءة من حيث الطاقة والموارد.

كما يتيح دمج الذكاء الاصطناعي مع أدوات المحاكاة البيئية (Environmental Simulation Tools) تطوير أنظمة قادرة على:

- التنبؤ بالأداء البيئي قبل التنفيذ .
- تحسين تصميم المباني لتحقيق أهداف الاستدامة .
- دعم اتخاذ القرار في اختيار المواد منخفضة الانبعاثات .
- محاكاة تأثير التغيرات المناخية على أداء المباني .

ثالثاً: التكامل مع استراتيجيات التحول العالمي

يتكامل هذا المجال مع الاستراتيجيات العالمية للتحول نحو الحياد الكربوني، حيث أصبح الذكاء الاصطناعي أداة أساسية في دعم خطط الحكومات والمؤسسات الدولية لتحقيق أهداف اتفاق باريس للمناخ (Paris Agreement). وتشير التقارير الحديثة إلى أن قطاع البناء يمثل أحد أكبر مصادر الانبعاثات العالمية، مما يجعل تحسين أدائه البيئي أولوية استراتيجية في سياسات الاستدامة (IEA, 2024; UNEP, 2025).

وبناءً على ذلك، أصبح الذكاء الاصطناعي جزءاً من منظومة الحوكمة البيئية الحديثة، حيث يتم استخدامه في إعداد تقارير الاستدامة، وقياس الانبعاثات، وتقييم الامتثال للمعايير البيئية الدولية.

رابعاً: التوجهات المستقبلية

تشير الاتجاهات المستقبلية إلى أن الاستدامة المدعومة بالذكاء الاصطناعي ستتطور نحو أنظمة أكثر تكاملاً تعتمد على:

- التوأم الرقمي البيئي (Environmental Digital Twin).
- التحليل التنبئي لانبعاثات الكربون .
- أنظمة اتخاذ القرار البيئي الذكية .
- دمج الاستدامة في التصميم التوليدي (Sustainable Generative Design).

وبذلك يتحول الذكاء الاصطناعي من أداة تقييم إلى **نظام إدارة استدامة ذكي (Intelligent Sustainability Management System)** قادر على تحسين الأداء البيئي بشكل مستمر عبر دورة حياة المبنى.

يمثل الذكاء الاصطناعي في الاستدامة والتقييم البيئي تحولاً جذرياً في كيفية فهم وإدارة الأثر البيئي للمباني، حيث يتيح الانتقال من التقييم التقليدي إلى التحليل التنبئي والتحسين المستمر. ويسهم هذا التحول في تحقيق أهداف الحياد الكربوني، وتعزيز كفاءة الموارد، ودعم التحول العالمي نحو عمارة أكثر استدامة وذكاءً.

2.13 الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة للمباني والبنية التحتية

يُعد الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة للمباني والبنية التحتية أحد أكثر المجالات نمواً وتسارعاً ضمن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاع العمراني، نظراً لارتباطه المباشر بكفاءة التشغيل، وخفض الانبعاثات الكربونية، وتحقيق أهداف الاستدامة. ومع تزايد تعقيد أنظمة الطاقة في المباني الحديثة وارتفاع الطلب على الطاقة، أصبح من الضروري الانتقال من أنظمة الإدارة التقليدية إلى أنظمة ذكية تعتمد على التحليل التنبئي واتخاذ القرار الآلي (IEA, 2024).

يعتمد هذا المجال على دمج تقنيات التعلم الآلي، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات الزمنية (Time-Series Analytics) بهدف تحسين تشغيل الأنظمة الطاقية داخل المباني والبنية التحتية الحضرية بشكل ديناميكي ومستمر.

أولاً: التطبيقات الرئيسية

تشمل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة مجموعة واسعة من الوظائف التشغيلية والتحليلية، من أبرزها:

- **تحسين استهلاك الطاقة:**
عبر تحليل أنماط الاستهلاك الفعلي وتحديد فرص تقليل الهدر وتحسين الكفاءة التشغيلية للمباني .
- **التنبؤ بالأحمال الكهربائية (Load Forecasting):**
باستخدام نماذج تعلم الآلة للتنبؤ بالطلب المستقبلي على الطاقة في المباني والشبكات الحضرية، مما يساعد في تحسين التخطيط التشغيلي .
- **إدارة أنظمة التدفئة والتبريد (HVAC Optimization):**
من خلال التحكم الذكي في درجات الحرارة والتهوية بناءً على الإشغال والظروف المناخية الخارجية .
- **إدارة المباني الذكية (Smart Building Management Systems):**
حيث يتم دمج أنظمة الإضاءة والطاقة والأمن في منصة ذكية موحدة تعتمد على البيانات اللحظية .
- **دمج الطاقة المتجددة:**
عبر تحسين تكامل أنظمة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح داخل المباني وإدارة تدفق الطاقة بين الإنتاج والاستهلاك والتخزين .

ثانياً: الأهمية الاستراتيجية

يسهم الذكاء الاصطناعي في تحويل إدارة الطاقة من نظام تفاعلي يعتمد على الاستجابة إلى نظام **تنبؤي واستباقي** قادر على تحسين الأداء بشكل مستمر. كما يدعم تحقيق أهداف الحياد الكربوني من خلال تقليل الانبعاثات التشغيلية وتحسين كفاءة استخدام الموارد الطاقية، مما يجعله عنصراً أساسياً في استراتيجيات التحول نحو المدن الذكية منخفضة الانبعاثات (IEA, 2024; OECD, 2025).

2.14 الذكاء الاصطناعي والروبوتات والإنشاءات الذاتية

يمثل الذكاء الاصطناعي في مجال الروبوتات والإنشاءات الذاتية أحد التحولات الجذرية في صناعة البناء، حيث أدى إلى ظهور أنظمة بناء مؤتمتة قادرة على تنفيذ العمليات الإنشائية بشكل شبه مستقل. ويُعد هذا المجال اليوم أحد الركائز الأساسية في التحول نحو البناء الرقمي والصناعة الإنشائية الذكية (Autonomous Construction Systems).

يعتمد هذا التوجه على دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي، والروبوتات المتقدمة، والرؤية الحاسوبية، ونظم التحكم الذاتي، بهدف تقليل الاعتماد على التدخل البشري في العمليات الخطرة أو المتكررة، وتحسين الدقة والكفاءة الإنتاجية في مواقع البناء.

أولاً: التطبيقات الرئيسية

تشمل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الإنشاءات الذاتية ما يلي:

- **الروبوتات الإنشائية (Construction Robotics):**
استخدام روبوتات ذكية في أعمال اللحام، والتركيب، والطوب، والتشطيب، مع قدرة على التكيف مع بيئات العمل المختلفة .
- **الطباعة ثلاثية الأبعاد للمباني (3D Printing Construction):**
حيث يتم بناء عناصر أو مبانٍ كاملة باستخدام أنظمة طباعة رقمية تعتمد على نماذج تصميمية توليدية مدعومة بالذكاء الاصطناعي .
- **الحفر الذاتي (Autonomous Excavation):**
استخدام معدات حفر ذكية قادرة على تحليل التربة وتنفيذ عمليات الحفر بشكل مستقل وفقاً لنماذج الموقع الرقمية .
- **المعدات الثقيلة ذاتية التشغيل:**
مثل الجرافات والحفارات والشاحنات ذاتية القيادة التي تعتمد على أنظمة استشعار وتحليل لحظي للبيئة المحيطة .
- **المسح الذاتي للمواقع (Autonomous Site Surveying):**
باستخدام الطائرات بدون طيار (Drones) والروبوتات الأرضية لجمع البيانات الطبوغرافية وتحديث نماذج الموقع بشكل مستمر .

ثانياً: الأثر التحويلي على قطاع البناء

يسهم الذكاء الاصطناعي في إعادة تشكيل قطاع الإنشاءات من خلال الانتقال من العمليات التقليدية إلى أنظمة إنتاج رقمية ذاتية التشغيل، مما يؤدي إلى:

- تقليل الأخطاء البشرية في التنفيذ .
- رفع معدلات السلامة في مواقع العمل .
- تسريع عمليات البناء وتقليل الزمن الكلي للمشاريع .
- تحسين جودة التنفيذ عبر التحكم الدقيق بالعمليات الإنشائية .

كما يعزز هذا التحول التكامل بين التصميم الرقمي (BIM) ، والتصنيع الرقمي(Digital Fabrication) ، والروبوتات الذكية، مما يؤدي إلى ظهور نموذج **الإنشاءات الذكية الذاتية (Autonomous Smart Construction Systems).**

ثالثاً: التوجهات المستقبلية

تشير الاتجاهات الحديثة إلى أن قطاع البناء يتجه نحو مستويات أعلى من الأتمتة تعتمد على:

- روبوتات متعددة المهام تعمل بتنسيق ذكي .
- أنظمة بناء ذاتية التعلم قادرة على تحسين أدائها مع الوقت .

- دمج الذكاء الاصطناعي مع التوأم الرقمي لمراقبة مواقع البناء لحظياً .
- تقليل الاعتماد على العمالة البشرية في البيئات الخطرة .

وبذلك، يتحول قطاع الإنشاءات إلى نظام إنتاج ذكي متكامل يجمع بين السرعة، والدقة، والاستدامة، ويعيد تعريف مفهوم "موقع البناء" بوصفه بيئة تشغيل رقمية ذكية بدلاً من كونه موقعاً تقليدياً.

2.15 الذكاء الاصطناعي في الهندسة المساحية ونظم المعلومات الجغرافية

يُعد توظيف الذكاء الاصطناعي في الهندسة المساحية ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) أحد المجالات المحورية في الهندسة المدنية والمعمارية الحديثة، نظراً لدوره المباشر في دعم عمليات جمع البيانات المكانية، وتحليلها، وتفسيرها، بما يتيح فهماً أكثر دقة وديناميكية للبيئة العمرانية والطبيعية. وقد أسهمت التطورات في تقنيات الاستشعار عن بعد (Remote Sensing) وبيانات الأقمار الصناعية و LiDAR في تعزيز قدرة الذكاء الاصطناعي على معالجة كميات ضخمة ومعقدة من البيانات المكانية واستخلاص الأنماط منها بشكل شبه فوري (NASA Earth Observatory, 2025; USGS, 2024).

ويقوم هذا المجال على دمج خوارزميات التعلم العميق (Deep Learning) ورؤية الحاسوب (Computer Vision) مع أنظمة GIS، بهدف تحويل البيانات الجغرافية الخام إلى معلومات تحليلية قابلة للاستخدام في التخطيط الحضري، وإدارة الموارد، ومراقبة التغيرات البيئية والعمرانية.

أولاً: التطبيقات الرئيسية

تشمل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في المساحة ونظم المعلومات الجغرافية مجموعة واسعة من الاستخدامات التحليلية والمكانية، من أبرزها:

- **تحليل الصور الفضائية (Satellite Imagery Analysis):**
  استخدام نماذج التعلم العميق لاستخراج المعلومات من الصور الفضائية عالية الدقة، مثل الغطاء النباتي، والتوسع العمراني، والخصائص السطحية للأرض .
- **تحليل صور الأقمار الصناعية:**
  من خلال معالجة البيانات متعددة الأطياف (Multispectral Data) لرصد التغيرات البيئية والعمرانية على مدى زمني طويل، ودعم عمليات المراقبة المستمرة للأراضي .
- **معالجة بيانات LiDAR:**
  استخدام الذكاء الاصطناعي لتحليل سُحُب النقاط (Point Clouds) الناتجة عن تقنية LiDAR لإنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد دقيقة للتضاريس والمباني والبنية التحتية .
- **تصنيف استخدامات الأراضي (Land Use Classification):**
  عبر خوارزميات التصنيف الذكي لتحديد وتحليل أنماط استخدام الأراضي (سكني، تجاري، صناعي، زراعي) بدقة عالية، ودعم اتخاذ القرار التخطيطي (OECD, 2025).

- **الكشف عن التغيرات المكانية (Change Detection):**

باستخدام نماذج المقارنة الزمنية للصور الجغرافية لاكتشاف التغيرات في العمران أو البيئة أو البنية التحتية، مثل التوسع الحضري أو إزالة الغطاء النباتي .

- **دعم التخطيط الحضري:**

من خلال توفير تحليلات مكانية دقيقة تساعد في تحسين توزيع الخدمات، وتحديد المواقع المثلى للمشاريع، ودعم اتخاذ القرار في التخطيط الإقليمي والعمراني .

ثانياً: الأهمية التحليلية والتطبيقية

يسهم الذكاء الاصطناعي في هذا المجال في تحويل نظم المعلومات الجغرافية من أدوات وصفية وتحليلية تقليدية إلى أنظمة **تنبؤية وداعمة لاتخاذ القرار (Predictive GIS Systems)** ، قادرة على تحليل الأنماط المكانية المعقدة والتنبؤ بالتغيرات المستقبلية في استخدامات الأراضي والبنية الحضرية.

كما يعزز التكامل بين الذكاء الاصطناعي و GISدقة التخطيط الحضري، ويقلل من الاعتماد على العمل اليدوي في تحليل البيانات الجغرافية، مما يرفع كفاءة إدارة الأراضي والموارد الطبيعية والبنية التحتية.

ثالثاً: التوجهات المستقبلية

تشير الاتجاهات الحديثة إلى أن هذا المجال يتجه نحو تطوير أنظمة GIS ذكية قائمة على:

- نماذج تعلم عميق متعددة المصادر (Multimodal Deep Learning).
- تكامل مباشر مع التوأم الرقمي الحضري (Urban Digital Twin).
- تحليل لحظي للبيانات المكانية (Real-time Geospatial Analytics).
- أنظمة تخطيط حضري تنبؤية تعتمد على الذكاء الاصطناعي .

وبذلك، يتحول الذكاء الاصطناعي في المساحة و GIS إلى أداة استراتيجية محورية في فهم وتشكيل الفضاء العمراني، ودعم قرارات التنمية المستدامة على المستويين المحلي والإقليمي.

3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

تعتمد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية على مجموعة واسعة من التقنيات والخوارزميات المتقدمة التي تختلف باختلاف طبيعة التطبيق والبيانات المتاحة والأهداف الهندسية المراد تحقيقها. وقد أسهم التطور المستمر في تقنيات التعلم الآلي والتعلم العميق والرؤية الحاسوبية والتوائم الرقمية في توسيع نطاق استخدام الذكاء الاصطناعي ليشمل مختلف مراحل دورة حياة المشروع الهندسي، بدءاً من الدراسات الأولية والتصميم، مروراً بالتنفيذ والتشغيل، وانتهاءً بالصيانة وإدارة الأصول.

جدول 1. أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات الهندسة المدنية

مجال التطبيق	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة
تحليل المنشآت ومراقبة الصحة الهيكلية (SHM)	التعلم الآلي، التعلم العميق، الرؤية الحاسوبية، التحليلات التنبؤية
تكنولوجيا الخرسانة	التعلم الآلي، النمذجة التنبؤية، التحسين الذكي
التصميم الإنشائي والتحسين الهيكلي	التصميم التوليدي، الخوارزميات التطورية، التحسين متعدد الأهداف
إدارة مشاريع البناء	التعلم الآلي، التحليلات التنبؤية، الأنظمة الخبيرة
السلامة المهنية في مواقع البناء	الرؤية الحاسوبية، التعلم العميق، تحليل الفيديو الذكي
الهندسة الجيوتقنية	التعلم الآلي، النماذج الهجينة، التحليل التنبئي
هندسة الموارد المائية	التعلم العميق، تحليل السلاسل الزمنية، النمذجة التنبؤية
الصيانة التنبؤية للبنية التحتية	التعلم الآلي، الرؤية الحاسوبية، التحليلات التنبؤية
الفحص الآلي للمنشآت	الرؤية الحاسوبية، معالجة الصور، الطائرات المسيرة الذكية
النقل الذكي وإدارة المرور	التعلم المعزز، البيانات الضخمة، التحليلات التنبؤية
المدن الذكية	البيانات الضخمة، إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي التنبئي
نمذجة معلومات البناء (BIM)	التعلم الآلي، الذكاء الاصطناعي التوليدي، الأنظمة الخبيرة
الكشف الذكي عن التعارضات (Clash Detection)	التعلم الآلي، التحليل التنبئي
التوائم الرقمية للبنية التحتية	التوأم الرقمي، إنترنت الأشياء، التعلم الآلي
إدارة مخاطر الكوارث والمرونة الحضرية	الذكاء الاصطناعي التنبئي، التحليل المكاني الذكي، التوأم الرقمي
إدارة دورة حياة الأصول والبنية التحتية	التعلم الآلي، التحليل التنبئي، دعم القرار الذكي
الاستدامة والتقييم البيئي	التحليل التنبئي، المحاكاة البيئية، التحسين متعدد المعايير
إدارة الطاقة للمباني والبنية التحتية	التعلم الآلي، تحليل السلاسل الزمنية، أنظمة الطاقة الذكية
الروبوتات والإنشاءات الذاتية	الرؤية الحاسوبية، التعلم المعزز، الأنظمة الذاتية
الطباعة ثلاثية الأبعاد في البناء	الذكاء الاصطناعي التوليدي، الروبوتات الذكية
الهندسة المساحية والاستشعار عن بعد	الرؤية الحاسوبية، التعلم العميق، تحليل البيانات المكانية
نظم المعلومات الجغرافية الذكية (AI-GIS)	التحليل المكاني الذكي، التعلم العميق، البيانات الضخمة
تحليل صور الأقمار الصناعية	التعلم العميق، الرؤية الحاسوبية
معالجة بيانات LiDAR	التعلم العميق، النمذجة ثلاثية الأبعاد
التخطيط الحضري الذكي	الذكاء الاصطناعي التنبئي، التحليل المكاني، البيانات الضخمة
هندسة الموجهات (Prompt Engineering) في التطبيقات المدنية	نماذج اللغة الكبيرة، الذكاء الاصطناعي التوليدي
دعم القرار الهندسي الذكي	أنظمة دعم القرار الذكية، التعلم الآلي متعدد المعايير

المصدر: الاعتماد على buildingSMART International (2024); Digital Twin Consortium (2024); ASCE (2024); Shahin et al. (2008); Farrar & Worden (2013); World Bank (2025); OECD (2025); IEA (2024); UNEP (2025); UNDRR (2024)

4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

يشهد قطاع الهندسة المدنية والبنية التحتية تحولاً رقمياً متسارعاً مدفوعاً بالتطورات الجوهرية في تقنيات الذكاء الاصطناعي، وتحليل البيانات، والنمذجة الرقمية، حيث انتقل تدريجياً من الاعتماد على الأساليب التقليدية في التصميم والتنفيذ والإدارة إلى بيئات هندسية ذكية قائمة على البيانات الضخمة، ونمذجة معلومات البناء (BIM) ، والتحليلات التنبؤية، والتوائم الرقمية، وخوارزميات التعلم الآلي والتعلم العميق (Vickers, 2017). ويأتي هذا التحول ضمن الإطار الأوسع لتبني أنظمة البناء الذكية التي تدمج النماذج الهندسية مع قدرات الحوسبة المتقدمة والمحاكاة الرقمية، بما يسهم في رفع كفاءة المشاريع، وتقليل الهدر والتكاليف، وتحسين إدارة الأصول، وتعزيز مستويات السلامة والاستدامة عبر مختلف مراحل دورة حياة المشروع.

يقدّم الجدول 2 تصنيفاً منهجياً لأدوات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في الهندسة المدنية والبنية التحتية، موزعة ضمن **أربعة محاور رئيسية مترابطة** وظيفياً، تشمل: التصميم الهندسي الذكي، والنمذجة الرقمية (BIM) والتوائم الرقمية، وإدارة المشاريع والقرارات الذكية، والمراقبة الذكية وضبط الجودة والسلامة. ويعكس هذا التصنيف الطبيعة التكاملية لهذه الأدوات، بوصفها منظومة رقمية متكاملة تدعم جميع مراحل المشروع بدءاً من التخطيط والتصميم، مروراً بالتنفيذ، وصولاً إلى التشغيل والصيانة.

يركز **المحور الأول، التصميم الهندسي الذكي** على توظيف أدوات التصميم التوليدي والمنصات المدعومة بنظم المعلومات الجغرافية (GIS)ونماذج (BIM) المعززة بالذكاء الاصطناعي، مثل Bentley OpenSite+ و Allsite.aiوTestFit، حيث تتيح هذه الأدوات توليد بدائل تصميمية متعددة بصورة تلقائية، وتحسين تصميم الطرق وشبكات البنية التحتية، ودعم تخطيط المشاريع العمرانية، إلى جانب الكشف المبكر عن التعارضات الهندسية. كما تسهم في تقليل زمن التصميم ورفع جودة المخرجات من خلال تحسين عمليات اتخاذ القرار التصميمي. أما **المحور الثاني، النمذجة الرقمية (BIM) والتوائم الرقمية**، فيتضمن منصات متقدمة مثل Tekla Structures 2026 و Bentley Copilotو Asite Cognitive CDEوAutodesk Construction Cloud، والتي تتيح إنشاء بيئات بيانات مشتركة ذكية وإدارة نماذج معلومات البناء بصورة تكاملية. وتدعم هذه الأدوات أتمتة سير العمل الهندسي، وتحليل الوثائق، والتحقق من النماذج، وتحسين إدارة الوثائق والمعلومات، بما يعزز كفاءة التعاون بين الفرق الهندسية ويرفع مستوى الامتثال والمعايير التشغيلية، إضافة إلى دعم الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول. وفيما يتعلق **المحور الثالث، إدارة المشاريع والقرارات الذكية**، فإنه يعتمد على منصات تحليل متقدمة مثل Daisy.ai وPathw.ai، والتي توظف تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحليل التكاليف، والجداول الزمنية، وإدارة المخاطر، وأتمتة التقارير التشغيلية. كما تسهم هذه الأدوات في دعم اتخاذ القرار من خلال توفير رؤى تحليلية دقيقة، وتحسين كفاءة التخطيط والتنفيذ، وتقليل الانحرافات في أداء المشاريع الهندسية. ويختص **المحور الرابع، المراقبة الذكية وضبط الجودة والسلامة** بتطبيقات الرؤية الحاسوبية وإنترنت الأشياء المدعوم بالذكاء الاصطناعي (AIoT)، والطائرات المسيّرة، وأدوات الفحص الذكي، مثل YOLO11 وTekla PowerFab 2026، إضافة إلى أنظمة التفتيش المعتمدة على الدرونز. وتُستخدم هذه الأدوات في مراقبة مواقع الإنشاءات، واكتشاف المخاطر والانتهاكات المتعلقة بالسلامة، ورصد العيوب الإنشائية مثل التشققات، وتتبع المواد، والتحقق من جودة التصنيع، بما يسهم في رفع مستويات السلامة وتقليل التكاليف التشغيلية وتعزيز الاستدامة.

جدول 2. أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية والبنية التحتية

المحور الرئيسي	الأداة	النوع التقني	أبرز الوظائف	التطبيقات الهندسية	المخرجات والفوائد
أولاً: التصميم الهندسي الذكي	Bentley OpenSite+	تصميم توليدي مدعوم بالذكاء الاصطناعي	تصميم الطرق والمواقع وتحسين البدائل التصميمية	مشاريع الطرق والبنية التحتية	تقليل زمن التصميم وتحسين جودة المخرجات
	Allsite.ai	منصة تصميم مدني ذكية متكاملة مع GIS	أتمتة تصميم شبكات الطرق والصرف وتحليل الفيضانات	التطوير العمراني والبنية التحتية	خفض التكاليف وتحسين التخطيط
	Tekla Structures 2026	منصة BIM مدعومة بالذكاء الاصطناعي	النمذجة بالأوامر اللغوية واكتشاف التعارضات	المنشآت الخرسانية والفولاذية	رفع جودة التصميم وتحسين التنسيق
	Bentley OpenUtilities Substation	منصة تصميم لمحطات الكهرباء	تصميم وإدارة بيانات محطات الكهرباء وتحسين التعاون الهندسي	محطات الطاقة والبنية التحتية الكهربائية	تقليل الأخطاء وتحسين إدارة البيانات
	TestFit	منصة تصميم توليدي	إنشاء بدائل تصميمية تلقائية وفق قيود المشروع	المشاريع السكنية والتجارية	تسريع تطوير الحلول التصميمية
ثانياً: النمذجة الرقمية (BIM)	Bentley Copilot	مساعد هندسي ذكي	دعم سير العمل الهندسي وإدارة الوثائق	تصميم وإدارة الأصول	رفع الإنتاجية وتحسين إدارة المعرفة
	Asite Cognitive CDE	بيئة بيانات مشتركة ذكية (CDE)	تحليل الوثائق والتحقق من نماذج BIM	المشاريع الكبرى والبنية التحتية	دعم الامتثال وتحسين إدارة البيانات
	Autodesk Construction Cloud	منصة إدارة مشاريع وإنشاءات ذكية	تحليل المخاطر وإدارة المستندات والتنسيق	مشاريع البناء والتشييد	تعزيز التكامل وتحسين اتخاذ القرار
ثالثاً: إدارة المشاريع والقرارات الذكية	Daisy.ai	منصة إدارة مشاريع ذكية	تحليل التكاليف والجداول الزمنية والمخاطر	مشاريع الإنشاءات والبنية التحتية	تحسين التخطيط وتقليل المخاطر
	Pathw.ai	منصة إدارة مشاريع مدعومة بالذكاء الاصطناعي	أتمتة الحسابات وإعداد التقارير	إدارة المشاريع المدنية	تحسين كفاءة التنفيذ والمتابعة
رابعاً: المراقبة الذكية وضبط الجودة والسلامة	YOLO11	منصة رؤية حاسوبية	مراقبة الالتزام بمعدات السلامة واكتشاف المخاطر	مواقع الإنشاءات	تحسين السلامة المهنية
	أدوات الفحص الذكي بالطائرات المسيّرة	منصة فحص تعتمد على الرؤية الحاسوبية	الكشف عن التشققات والعيوب الإنشائية	الجسور والطرق والمنشآت	زيادة دقة الفحص وتقليل التكاليف
	Tekla PowerFab 2026	منصة إدارة التصنيع وضبط الجودة	التحقق من الجودة وتتبع المواد	الهياكل المعدنية	رفع جودة التصنيع ودعم الاستدامة

المصدر: Autodesk (n.d.); Bentley Systems (n.d.); ISO 19650:2018; Zhu et al. (2021)

فوائد الذكاء الاصطناعي
في الهندسة المدنية

الفوائد الاقتصادية

خفض تكاليف التشغيل والصيانة:

تساعد الأنظمة الذكية في التنبؤ بالأعطال وحالة المنشآت والبنية التحتية والتنبؤ بالأعطال قبل وقوعها، مما يقلل تكاليف الصيانة الطارئة وبطيل العمر التشغيلي للأصول الهندسية.

تقليل الهدر في الموارد:

تسهم تقنيات التحليل الذكي وإدارة الموارد في تحسين استخدام مواد البناء وتقليل الفاقد أثناء عمليات التنفيذ والتشييد.

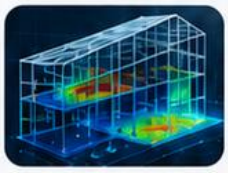
تحسين الإنتاجية:

تؤدي الأتمتة الذكية وتحسين إدارة العمليات إلي رفع كفاءة فرق العمل والمعدات، مما يزيد من إنتاجية المشاريع الهندسية.

تقليل التأخير الزمني:

يساعد الذكاء الاصطناعي في تحسين جدولة المشاريع وتحليل المخاطر والتنبؤ بالمشكلات المحتملة، مما يقلل من التأخيرات الزمنية ويرفع كفاءة إدارة الوقت.

الفوائد التقنية



رفع دقة التحليل والتصميم:

تساعد خوارزميات الذكاء الاصطناعي وتقنيات التعلم العميق في تحليل الأحمال والبيانات الإنشائية بدقة عالية، مما يساهم في تحسين التصاميم الهندسية وتقليل الأخطاء في الفيسل الإنشائي.

تحسين جودة التنفيذ:

تستخدم الطائرات المسيرة والطائرات بدون طيار (Drones) وتقنيات المراقبة الذكية لمتابعة سير الأعمال في مواقع البناء، والكشف المبكر عن العبوب والانحرافات عن المخططات التصميمية.

تقليل الأخطاء البشرية:

يقلل الذكاء الاصطناعي في أتمتة العمليات الحسابية والتحليلات المعقدة، مما يقلل من الأخطاء الناتجة عن التدخل البشري في التصميم والتنفيذ وإدارة المشاريع.

تسريع العمليات الهندسية:

تسهم تقنيات الأتمتة والتحليل الذكي في تسريع عمليات التصميم، وجدولة المشاريع، ومتابعة التنفيذ، مما يزيد النماذج الهندسية، مما يقلل الزمن اللازم لإنجاز الأعمال الهندسية.

الفوائد المتعلقة بالسلامة

اكتشاف المخاطر مبكرا:

تساعد أنظمة التحليل الذكي والرؤية الحاسوبية في اكتشاف المخاطر المحتملة والإنهيارات أو العيوب الإنشائية قبل تفاقمها.

تقليل الحوادث المهنية:

تستخدم تقنيات المراقبة الذكية لتحليل سلوك العمال وضمان بيئة عمل آمنة، مما يساعد على تقليل الحوادث والإصابات المهنية.

مراقبة السلامة بصورة لحظية:

تتيح أجهزة الاستشعار الذكية والإنترنت الأشياء (IoT) مراقبة بيئة العمل بصورة آنية.

الفوائد البيئية

خفض الانبعاثات:

تساعد الأنظمة الذكية في تحسين استهلاك الوقود والطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية الناتجة عن عمليات البناء والتشغيل.

تحسين كفاءة الطاقة:

تستخدم الذكاء الاصطناعي في تصميم المباني الذكية وأنظمة إدارة الطاقة، مما يرفع كفاءة استهلاك الكهرباء والتبريد والتدفئة داخل المنشأت.

تعزيز الاستدامة:

تساهم تقنيات الذكاء الاصطناعي في تطوير مدن ذكية ومبانٍ مستدامة تعتمد على الإدارة الذكية للموارد والطاقة والمياه والنفايات.

الذكاء الاصطناعي ليس مجرد تقنية، بل شريك استراتيجي
ببني مستقبل الهندسة المدنية بكفاءة، أمان، واستدامة.

6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

يشهد قطاع الهندسة المدنية تحولاً جوهرياً نتيجة التوسع في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي، والتعلم الآلي، والتحليلات التنبؤية، والتوائم الرقمية، وإنترنت الأشياء، والروبوتات الهندسية ضمن مختلف مراحل دورة حياة المشاريع المدنية، بدءاً من التخطيط والتصميم وصولاً إلى التنفيذ والتشغيل والصيانة. وقد أدى هذا التحول إلى إعادة تعريف الأدوار المهنية التقليدية وظهور تخصصات جديدة تجمع بين المعرفة الهندسية العميقة والقدرات الرقمية المتقدمة، بما يجعل المهندس المدني المعاصر أكثر ارتباطاً بإدارة البيانات وتحليلها واتخاذ القرارات المدعومة بالخوارزميات الذكية.

ولم يعد دور المهندس المدني مقتصراً على تصميم المنشآت والإشراف على تنفيذها، بل أصبح يمتد إلى تطوير الأنظمة الذكية للبنية التحتية، وتحليل البيانات الضخمة، وبناء النماذج التنبؤية، وإدارة البيئات الرقمية المتكاملة التي تعتمد على التفاعل المستمر بين الأصول المادية والنماذج الافتراضية. كما أصبحت القدرة على توظيف الذكاء الاصطناعي في تحسين الكفاءة التشغيلية وتقليل المخاطر وتعزيز الاستدامة من المتطلبات الأساسية للنجاح المهني في هذا القطاع.

الوظائف الناشئة في الهندسة المدنية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

أفرزت الثورة الرقمية مجموعة من التخصصات الهندسة المدنية الجديدة التي يُتوقع أن تشهد نمواً متزايداً خلال السنوات المقبلة، ومن أبرزها:

1 مهندس البنية التحتية الذكية والتوائم الرقمية
(Smart Infrastructure and Digital Twin Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة البنية التحتية الذكية وربطها بمنصات المراقبة والتحليل الرقمي.
- تطوير وإدارة نماذج التوائم الرقمي (المتطابق والتوأم المعنى).
- دمج بيانات الحساسات والأشباه وأشباه، مع نماذج BIM و GIS.
- مراقبة الأداء التشغيلي وتحليل المحاولي والمحاطر التشغيلية.
- دعم استراتيجيات الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول الهندسية.

المهارات المطلوبة:
- تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) والتوائم الرقمية (Digital Twins)
- نظم معلومات البناء (BIM) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)
- تحليل البيانات الهندسية والتحليلات التنبؤية.
- إدارة البيانات السحابية ومنصات المراقبة الذكية.
- الأمن السيبراني للبنية التحتية الذكية.

2 مهندس الذكاء الاصطناعي والتحليل التنبؤي للمنشآت
(AI and Predictive Structural Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج تعلم آلي للتنبؤ بالأعطال والعيوب الهيكلية.
- تحليل بيانات الاهتزازات والاجهادات والتشوهات الإنشائية.
- تقييم المخاطر الإنشائية ودعم قرارات الصيانة الوقائية.
- استخدام الرؤية الحاسوبية والطائرات المسيرة للكشف عن العيوب الإنشائية.
- تطوير أنظمة الإنذار المبكر للكوارث والأخطر الطبيعية.

المهارات المطلوبة:
- تعلم الآلة والتعلم العميق.
- تحليل الصحة الإنشائية (Structural Health Monitoring).
- النمذجة العددية والمحاكاة الهندسية.
- البرمجة باستخدام Python و MATLAB.
- معالجة الصور والرؤية الحاسوبية وتحليل السلاسل الزمنية.

3 مهندس بيانات البناء والتحليلات الذكية
(Construction Data and AI Analytics Engineer)

المسؤوليات:
- جمع وتنظيم وتحليل البيانات الهندسية من مصادر متعددة.
- تطوير لوحات لحلومات وقوئمية ومؤشرات أداء للمشاريع.
- تحليل التكاليف والإنتاجية والجدول الزمنية باستخدام النماذج التنبؤية.
- دعم القرارات الهندسية والإدارية القائمة على البيانات.
- تطوير نماذج ذكاء اصطناعي لتحسين الأداء والكفاءة التشغيلية.

المهارات المطلوبة:
- تحليل البيانات والاحصاء الهندسي.
- أدوات تحليل البيانات مثل Power BI و Tableau.
- مكتبات ومكتبات المبرمجة Pandas.
- تعلم الآلة والتحليلات التنبؤية.
- مهارات إعداد التقارير والعرض المصري للبيانات.

4 مهندس أتمتة البناء والروبوتات الهندسية
(Construction Automation and Robotics Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير وتشغيل الأنظمة الروبوتية في مواقع البناء.
- إدارة عمليات المسح والتقنيش باستخدام الطائرات المسيرة.
- توظيف الطباعة ثلاثية الأبعاد في تطبيقات البناء الحديثة.
- أتمتة العمليات الميدانية وتحسين كفاءة التنفيذ.
- دمج بيانات الروبوتات والحساسات مع أنظمة المعلومات إدارة المشاريع.

المهارات المطلوبة:
- الروبوتات الصناعية وأنظمة التحكم الآلي.
- البرمجة الصناعية وأنظمة الأتمتة.
- تقنيات المسح الرقمي و LiDAR والطائرات المسيرة.
- تحليل البيانات الميدانية وإدارة الأنظمة الذكية.
- تكامل الأنظمة الرقمية مع بيئات البناء المؤتمت.

5 مدير مشاريع البناء الذكية والتحول الرقمي
(Smart Construction and Digital Transformation Manager)

المسؤوليات:
- إدارة المشاريع باستخدام التحليلات الذكية والبيانات الفورية.
- تطبيق خوارزميات التنبؤ بالمخاطر والتأخير الزمني.
- دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع أنظمة BIM ومنصات إدارة المشاريع.
- إدارة عمليات التحول الرقمي وتدريب فرق العمل.
- تقييم العائد الاستثماري للتقنيات الذكية وإدارة المخاطر الرقمية.

المهارات المطلوبة:
- إدارة المشاريع الرقمية والقيادة التقنية.
- تكامل BIM مع تقنيات الذكاء الاصطناعي.
- إدارة المخاطر والتحليل والتحليل التنبؤي.
- منصات إدارة المشاريع الذكية والتحليلات السحابية.
- إدارة التغيير والتواصل متعدد التخصصات.

6 مهندس الاستدامة والمرونة المناخية للبنية التحتية
(Infrastructure Sustainability and Climate Resilience Engineer)

المسؤوليات:
- تقييم الأداء البيئي واستهلاك الطاقة والموارد.
- إجراء دراسات تقييم دورة الحياة للمنشآت.
- تحليل المخاطر المناخية وتأثيرها على البنية التحتية.
- تطوير نماذج للتنبؤ بتأثار التغير المناخي.
- دعم تطبيق معايير البناء الأخضر والاستدامة.

المهارات المطلوبة:
- تقييم دورة الحياة (LCA) والمحاكاة البيئية.
- تحليل البيانات البيئية والمناخية.
- معايير الاستدامة مثل LEED و Envision.
- النمذجة المناخية والتحليل التنبؤي.
- تصميم البنية التحتية المقاومة للتغيرات المناخية.

7 مهندس تخطيط شبكات النقل الذكية والمستدامة
(Smart & Sustainable Transport Planning Engineer)

المسؤوليات:
- إعداد الخطط الاستراتيجية طويلة المدى لشبكات النقل والطرق.
- استخدام نماذج الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالطلب المستقبلي.
- تطوير نماذج لدراسة لدراسة سيناريوهات الحضري والتوسع.
- تقييم الأداء البيني لشبكات النقل والدمج حلول مستدامة.
- دمج لنقطة النقل الذكية (ITS) ضمن خطط الحضرية.
- دعم مشاريع التنقل الذكي والمركبات المتصلة واداتية القيادة.

المهارات المطلوبة:
- هندسة النقل والتخطيط الحضري.
- أنظمة النقل الذكية (ITS).
- تحليل البيانات والمنذجة التنبؤية.
- برامج محاكاة النقل مثل VISSIM و AIMSUN و MUMAX.
- نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والتحليل المكاني.
- تقييم دورة الحياة (LCA) والاستدامة البيئية.

8 مهندس مواد بناء متقدمة وذكية
(Advanced & Smart Construction Materials Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير واختبار مواد بناء جديدة (خرسانة ذاتية الشفاء، مواد، نانوية، خرسانة خضراء).
- استخدام الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بسلوك المواد تحت ظروف مناخية مختلفة.
- دمج حساسات ذكية في المواد لمراقبة الأداء في الزمن الحقيقي.
- تقييم استدامة المواد باستخدام نماذج تقييم دورة الحياة.
- تطوير مواد إنشائية ذكية ومواداتية الشفاء تدعم مفهوم النمنية التخنية ذات ذاتية الإصلاح.

المهارات المطلوبة:
- علم المواد الهندسية وطرق الاختبار (ASTM، ISO).
- التعلم الآلة لتحليل بيانات المواد (Python، Scikit-learn).
- برامج المحاكاة (ANSYS، COMSOL).
- تقنيات النواد والمواد الذكية.
- تقييم دورة الحياة (LCA) ومعايير LEED.

9 مهندس نظم السكك الحديدية والنقل المتكامل الذكي
(Smart Railway Systems & Integrated Mobility Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم وتطوير أنظمة الإشارات والتحكم الذكية.
- استخدام الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأعطال وتحسين
- برامج الصيانة التنبؤية.
- تطوير أنظمة إدارة وتشغيل متكاملة تربط السكك الحديدية.
- ووسائل النقل الأخرى.
- تحسين جداول التشغيل وحركة القطارات بالتحليلات التنبؤية.
- مراقبة الأداء والسلامة استخدام الحساسات وإنترنت الأشياء.
- دعم التحول نحو أنظمة النقل المتكاملة متعددة الوسائط.

المهارات المطلوبة:
- هندسة السكك الحديدية وأنظمة النقل الجماعي.
- أنظمة الإشارات والتحكم (ERTMS، ETCS).
- تحليل البيانات الآلي.
- برامج محاكاة السكك الحديدية مثل OpenTrack و RailSys.
- إنترنت الأشياء (IoT) وأنظمة المراقبة الذكية.
- معايير السلامة والاعتمادية (RAMS، CENELEC).

10 مهندس الجيوتقنية الذكية وتدعيم المنشآت
(Smart Geotechnical and (Structural Support Engineer)

المسؤوليات:
- إجراء الفحوصات الحقلية والمخبرية المتقدمة للتقدبة والصخور باستخدام الحساسات الذكية.
- تحليل البيانات الجيوتقنية باستخدام تقنيات التعلم الآلي لتوصيف سلوك التربة.
- اقتراح حلول تحسين التربة والتثبيت والحقن والدمك.
المدعومة بالنماذج التنبؤية.

المهارات المطلوبة:
- فحوصات التربة المخبرية والحقلية (SPT، CPT، Triaxial، Consolidation).
- برامج التحليل الجيوتقني المتقدم (PLAXIS، FLAC، GeoStudio، MIDAS GTS).

لماذا هذه الوظائف مهمة؟

- تسهم في بناء مدن ذكية وبنية تحتية مستدامة
- تعزز السلامة والجودة في المشاريع
- تخلق فرص عمل نوعية ذات مستقبل واعد
- تدعم اتخاذ القرار القائم على البيانات
- تحسن الكفاءة التشغيلية وتقلل التكاليف
- تعزز الاستدامة والمرونة المناخية

الوظائف الناشئة في الهندسة المدنية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

أفرزت الثورة الرقمية مجموعة من التخصصات الهندسة المدنية الجديدة التي يُتوقع أن تشهد نمواً متزايداً خلال السنوات المقبلة، ومن أبرزها:

17 مهندس أخلاقيات الذكاء الاصطناعي والحوكمة الرقمية للبنية التحتية
(AI Ethics and Infrastructure Governance Engineer)

المسؤوليات:
- تقييم المخاطر الأخلاقية والقانونية.
- تطوير أطر الحوكمة والامتثال.
- مراجعة قرارات الذكاء الاصطناعي عالية الخطورة.
- ضمان الشفافية وقابلية تفسير النماذج.
- دعم الامتثال التنظيمي.

المهارات المطلوبة:
- حوكمة الذكاء الاصطناعي.
- إدارة المخاطر.
- التشريعات الرقمية.
- الأمن السيبراني.
- أخلاقيات البيانات.

16 مدير جودة البيانات الهندسية
(Engineering Data Quality Manager)

المسؤوليات :
- ضمان جودة البيانات الهندسية للنماذج الذكية
- تطوير سياسات حوكمة البيانات.
- التحقق من سلامة قواعد البيانات.
- إدارة دورة حياة البيانات.
- مراقبة تحيزات البيانات وأخطاء النماذج.

المهارات المطلوبة :
- إدارة البيانات.
- هندسة البيانات.
- حوكمة البيانات.
- Python و SQL.
- التحليلات المتقدمة.

15 مهندس المطارات والموانئ الذكية
(Smart Airports and Ports Infrastructure Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير البنية التحتية الذكية للمطارات والموانئ.
- إدارة الحركة اللوجستية باستخدام الذكاء الاصطناعي.
- تحسين تدفق البضائع والمسافرين.
- الصيانة التنبؤية للمرافق التشغيلية.
- تطوير التوائم الرقمية للموانئ والمطارات.
- إدارة الأصول والبنية التحتية الحرجة بالتخزانات والمعدات والتحليلات التنبؤية.

المهارات المطلوبة :
- هندسة النقل والمرافق اللوجستية.
- التحليلات التنبؤية.
- أنظمة إدارة الأصول.
- التوائم الرقمية.
- إنترنت الأشياء والأمتة.

14 مهندس البيئة والصرف الصحي الذكي
(Smart Environmental and Wastewater Engineer)

المسؤوليات:
- تحسين تشغيل محطات معالجة المياه العادمة.
- التنبؤ بجودة المياه والملوثات.
- إدارة النفايات والاقتصاد الدائري.
- مراقبة الانبعاثات البيئية.
- دعم الامتثال البيئي الرقمي.

المهارات المطلوبة:
- هندسة البيئة والصرف الصحي.
- معالجة البيانات البيئية.
- النمذجة البيئية والتنبؤية.
- Python و R.
- أنظمة الاستشعار البيئي الذكية.

13 مهندس الموارد المائية الذكية وإدارة السدود
(Smart Water Resources and Dam Management Engineer)

المسؤوليات
- تطوير نماذج ذكاء اصطناعي للتنبؤ بالفيضانات والجفاف.
- تحسين تشغيل السدود والخزانات المائية.
- إدارة شبكات توزيع المياه الذكية.
- كشف التسربات وتحسين كفاءة استخدام المياه.
- دمج بيانات الاستشعار عن بعد مع النماذج الهيدرولوجية.
- تطوير أنظمة دعم القرار لإدارة الموارد المائية.

المهارات المطلوبة
- الهندسة الهيدرولوجية وهندسة الموارد المائية.
- التعلم الآلي والتحليل التنبؤي.
- GIS والاستشعار عن بعد.
- نماذج (HEC-HMS, HEC-RAS , SWMM)
- إنترنت الأشياء وأنظمة المراقبة المائية.
- أنظمة إدارة الموارد المائية ومنصات (DSS)

12 مهندس نظم استشعار عن بعد ومساحة جوية ذكية
(Remote Sensing & Smart Aerial Survey Engineer)

المسؤوليات:
- جمع ومعالجة بيانات المسح الجوي بالأقمار الصناعية LiDAR،
- استخدام الرؤية الحاسوبية والتعلم الآلي لاستخراج معلومات هندسية.
- دمج بيانات الاستشعار عن بعد مع GIS ونماذج B.IM.
- مراقبة التغيرات في البنية التحتية عن بعد.
- إنتاج نماذج رقمية للأرض (DTM/DSM) والخرائط الطوبوغرافية.

المهارات المطلوبة :
- تقنيات الاستشعار عن بعد (LiDAR , RADAR). صور الأقمار).
- الطائرات المسيرة بمعدات التصوير. (Pix4D, DroneDeploy).
- معالجة الصور والرؤية الحاسوبية. (OpenCV, Python:)
- نظم المعلومات الجغرافية. (ArcGIS , QGIS)
- التعلم الآلي لتصنيف الصور واكتشاف الكائنات.

11 مهندس إدارة وتشغيل المرور الذكي
(Intelligent Traffic Operations Engineer)

المسؤوليات:
- جمع وتحليل بيانات حركة المرور من الحساسات والكاميرات والكاميرات المسيرة.
- تطوير نماذج تنبؤية للازدحام المروري وأوقات الرحلات والحوادث.
- تصميم وإدارة أنظمة الإشارات المرورية الذكية والتكيفية.
- مراقبة أداء الشبكات المرورية في الزمن الحقيقي.
- تحسين إدارة النقل العام وتقليل زمن الانتظار.
- تطوير لوحات معلومات تفاعلية لمتابعة مؤشرات الأداء.

المهارات المطلوبة:
- هندسة المرور وتشغيل شبكات النقل.
- أنظمة التحكم والإشارات الذكية (SCATS ,SCOOT)
- تحليل البيانات (Python، ,Python ,SQL ,Power BI)
- الرؤية الحاسوبية وتحليل الفيديو.
- محاكاة المرور بطرق (VISSIM , Synchro , HCS)
- الإحصاء الهندسي وتحليل السلاسل الزمنية.

الوظائف المستقبلية في الهندسة المدنية (ما بعد عام 2035)

19 مهندس الحوسبة اللكمومية للتصميم والبنية التحتية
(Quantum Computing Infrastructure Engineer)

يُعنى هذا التخصص بتطبيق تقنيات الحوسبة الكمومية في معالجة المشكلات الهندسية المعقدة التي تتجاوز قدرات الحوسبة التقليدية، مثل تحسين شبكات النقل والطاقة والبنية التحتية واسعة النطاق، وتطوير نماذج محاكاة متقدمة للمدن الذكية والأنظمة الهندسية المستقبلية.

المسؤولياة:
- إستخدام الحوسبة الكمومية في مسائل التحسين المعقدة.
- تحسين تصميم الشبكات والبنية التحتية واسعة النطاق.
- تطوير نماذج محاكاة متقدمة للمدن الذكية.
- معالجة المسائل الهندسية عالية التعقيد.

18 مهندس البنية التحتية ذاتية الإصلاح
(Self-Healing Infrastructure Engineer)

أحد الاتجاهات المستقبلية المتقدمة في الهندسة المدنية حيث يركز على تطوير منشآت قادرة على اكتشاف الأضرار والاستجابة لها ذاتياً باستخدام المواد الذكية والحساسات المتقدمة وتقنيات الذكاء الاصطناعي، ويهدف إلى تقليل تكاليف الصيانة وإطالة العمر التشغيلي للبنية التحتية.

المسؤوليات
- تطوير منشآت تعتمد على مواد ذاتية الشفاء.
- دمج الحساسات الذكية مع المواد الإنشائية.
- بناء أنظمة كشف الأعطال والإصلاح التلقائي.
- تطوير توائم رقمية ذاتية التحديث.

المهارات المطلوبة
- المواد الذكية.
- النانو تكنولوجي.
- الذكاء الاصطناعي.
- إنترنت الأشياء.
- هندسة المنشآت المتقدمة.

لماذا هذه الوظائف مهمة؟

- تسهم في بناء مدن ذكية وبنية تحتية مستدامة
- تعزز السلامة والجودة في المشاريع
- تخلق فرص عمل نوعية ذات مستقبل واعد
- تدعم اتخاذ القرار القائم على البيانات
- تحسن الكفاءة التشغيلية وتقلل التكاليف
- تعزز الاستدامة والمرونة المناخية

6.1 مهارات المستقبل في الهندسة المدنية في عصر الذكاء الاصطناعي

1. المهارات التقنية المستقبلية

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

- إتقان أنظمة نمذجة معلومات البناء (BIM) والتوائم الرقمية .
- البرمجة باستخدام Python وتطبيقات الأتمتة الهندسية .
- تحليل البيانات الضخمة وتطبيقات تعلم الآلة .
- استخدام أدوات التصميم التوليدي والمحاكاة الذكية .
- إدارة البيانات السحابية وخطوط معالجة البيانات الهندسية .
- دمج بيانات الحساسات والطائرات المسيّرة والروبوتات في بيئات العمل الهندسي .
- تطبيق تقنيات التحليل التنبؤي والرؤية الحاسوبية .

2. المهارات المهنية والاستراتيجية المستقبلية

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

- إدارة المشاريع الرقمية واتخاذ القرار المعتمد على البيانات .
- التفكير التحليلي وحل المشكلات المعقدة .
- القيادة والتنسيق بين التخصصات الهندسية والرقمية .
- فهم أخلاقيات الذكاء الاصطناعي وحوكمة البيانات .
- إدارة الاستدامة والممارسات الهندسية الخضراء .
- القدرة على العمل ضمن بيئات تكامل الإنسان والذكاء الاصطناعي (Human-in-the-Loop) .

وبذلك يتجه مستقبل الهندسة المدنية نحو بيئة تعتمد بصورة متزايدة على البنية التحتية الذكية، والتوائم الرقمية، والتحليلات التنبؤية، والأتمتة المتقدمة، حيث يصبح المهندس المدني قائداً للتحول الرقمي ومهندساً للأنظمة الذكية القادرة على تحسين أداء المنشآت وتعزيز استدامتها ومرونتها التشغيلية على المدى الطويل.

7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

رغم التطور الكبير في تطبيقات الذكاء الاصطناعي، لا تزال هناك مجموعة من التحديات، أبرزها:

7.1 التحديات التقنية

- **ضعف جودة البيانات :**تعاني العديد من المشاريع الهندسية من وجود بيانات غير مكتملة أو غير مهيكلة أو منخفضة الدقة، مما يؤثر سلباً في دقة النماذج التنبؤية وموثوقية نتائجها .
- **نقص البيانات التاريخية :**تحتاج خوارزميات التعلم الآلي إلى كميات كبيرة من البيانات التاريخية لتدريب النماذج بصورة فعالة، إلا أن العديد من المؤسسات الهندسية لا تمتلك قواعد بيانات تراكمية كافية، خاصة في المشاريع الفريدة أو البيئات النادرة .
- **تعقيد النماذج الذكية :**تتسم بعض تقنيات الذكاء الاصطناعي، خصوصاً نماذج التعلم العميق، بدرجة عالية من التعقيد الحسابي، مما يزيد صعوبة تطويرها وصيانتها ودمجها داخل الأنظمة الهندسية التقليدية .
- **محدودية تفسير النماذج (Explainability):** تواجه بعض النماذج الذكية مشكلة الصندوق الأسود (Black Box) ، حيث يصعب تفسير كيفية وصول النظام إلى قراراته أو تنبؤاته، وهو ما يمثل تحدياً كبيراً في التطبيقات الهندسية الحساسة التي تتطلب شفافية عالية وقابلية للتحقق .

7.2 التحديات الاقتصادية

- **ارتفاع تكلفة البنية الرقمية :**يتطلب تطبيق الذكاء الاصطناعي توفير بنية تحتية رقمية متقدمة تشمل الحوسبة السحابية، وأجهزة الاستشعار، والشبكات الذكية، ومراكز البيانات .
- **الحاجة إلى استثمارات تقنية كبيرة:** تستلزم أنظمة الذكاء الاصطناعي الاستثمار في البرمجيات المتخصصة، ومنصات التحليل، وأنظمة BIM ، والتوائم الرقمية، إضافة إلى تكاليف التدريب والتطوير المستمر .
- **ارتفاع تكاليف الحوسبة والتخزين :**تعتمد تطبيقات الذكاء الاصطناعي على معالجة كميات ضخمة من البيانات، مما يؤدي إلى ارتفاع متطلبات الحوسبة والتخزين واستهلاك الموارد التقنية .

8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين المدنيين

في ظل التحول الرقمي المتسارع في قطاع الإنشاءات والبنية التحتية، تُوصى المؤسسات الهندسية والمهندسون المدنيون بما يلي:

1. **تطوير الكفاءات الرقمية والهندسية المتقدمة :**من خلال التدريب المستمر على تقنيات الذكاء الاصطناعي والتحليل التنبؤي ونظم BIM والتوائم الرقمية.
2. **دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة مشاريع البنية التحتية :**بهدف تحسين الجدولة الزمنية وتقليل المخاطر ورفع كفاءة التنفيذ والصيانة.
3. **تعزيز استخدام أنظمة المراقبة الذكية :**عبر توظيف الحساسات وإنترنت الأشياء والطائرات المسيّرة لمراقبة السلامة الإنشائية وإدارة الأصول.
4. **تبني حلول الاستدامة والحياد الكربوني :**من خلال تصميم بنية تحتية منخفضة الانبعاثات وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة والموارد.
5. **تعزيز التكامل بين الهندسة المدنية وعلوم البيانات :**بما يتيح تطوير نماذج تنبؤية دقيقة لدعم اتخاذ القرار الهندسي.
6. **تطوير التشريعات والمعايير الرقمية :**لدعم استخدام التقنيات الذكية وضمان أمن البيانات وجودة النماذج الرقمية.
7. **دعم البحث والتطوير في تقنيات البناء الذكي :**بما يشمل الروبوتات والطباعة ثلاثية الأبعاد والمواد الذكية.
8. **تحديث المناهج الجامعية للهندسة المدنية :**لتضمين علوم البيانات والتحليل الرقمي والأتمتة الهندسية والذكاء الاصطناعي.
9. **تعزيز العمل متعدد التخصصات :**عبر دمج خبرات المهندسين المدنيين مع المتخصصين في البرمجيات وتحليل البيانات والاستدامة.
10. **رفع الجاهزية المهنية لسوق العمل المستقبلي :**من خلال التركيز على المهارات التقنية والتحليلية والقيادية المطلوبة في مشاريع البنية التحتية الذكية.

9 الخاتمة

أظهر هذا الفصل أن الذكاء الاصطناعي يمثل تحولاً محورياً في قطاع الهندسة المدنية، حيث انتقل دوره من أداة مساعدة إلى عنصر أساسي في جميع مراحل المشروع الهندسي، بدءاً من التخطيط والتصميم وصولاً إلى التنفيذ والتشغيل والصيانة. وقد أسهمت تقنيات مثل التعلم الآلي، والتحليل التنبؤي، والتوائم الرقمية، ونمذجة معلومات البناء (BIM)، وإنترنت الأشياء، والطائرات المسيّرة في رفع كفاءة إدارة المشاريع، وتحسين دقة القرارات الهندسية، وتقليل الأخطاء والهدر، وتعزيز السلامة والاستدامة.

كما بينت التطبيقات الحديثة قدرة الذكاء الاصطناعي على دعم تطوير بنية تحتية أكثر ذكاءً ومرونة، قادرة على التكيف مع التحديات البيئية والاقتصادية المتسارعة. وفي المقابل، يظل نجاح هذا التحول مرهوناً بتطوير المهارات الهندسية، وتحديث الأطر التنظيمية، وتعزيز التكامل بين الهندسة وعلوم البيانات.

10 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

- Aggarwal, C.C. and Sharma, A., 2010. *Machine Learning for Engineering Applications*. New York: Springer.
- Akande, K.O., Owolabi, T.O. and Oke, O.L., 2014. Predictive modelling of concrete properties using artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 50, pp.123–131.
- ASCE (American Society of Civil Engineers), 2024. *Artificial Intelligence in Civil Engineering: Emerging Applications and Standards*. Reston, VA: ASCE.
- Batty, M., 2024. Digital twins and urban simulation: The future of cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 51(2), pp.1–15.
- buildingSMART International, 2024. *Open BIM Standards and Digital Construction Frameworks*. London: buildingSMART.
- Dai, H., et al., 2011. Non-destructive evaluation techniques for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 18(7), pp.1–20.
- Deng, J., et al., 2018. Deep learning for concrete property prediction. *Automation in Construction*, 85, pp.1–12.
- Digital Twin Consortium, 2024. *Digital Twin Reference Architecture and Applications*. Boston, MA: DTC.
- Doxel, 2024. *AI-based Construction Monitoring: Case Study of Kaiser Permanente Viewridge Project*. San Francisco, CA: Doxel Inc.
- Farrar, C.R. and Worden, K., 2013. *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Chichester: Wiley.
- Flood, I., 2008. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. London: Academic Press.
- Frontiers, 2025. AI applications in civil engineering and smart infrastructure systems. *Frontiers in Built Environment*. Available at: https://www.frontiersin.org
- Gonzalez, I. and Zapico, J.L., 2008. Structural damage identification using machine learning techniques. *Engineering Structures*, 30(6), pp.1–10.
- Hirokane, H., et al., 2008. Application of neural networks in structural reliability assessment. *Journal of Structural Engineering*, 134(4), pp.1–9.
- IEA (International Energy Agency), 2024. *Energy Efficiency and Artificial Intelligence in Buildings*. Paris: IEA.
- IPCC, 2024. *Sixth Assessment Report: Climate Change Impacts and Adaptation*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO, 2018. *ISO 19650: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works*. Geneva: International Organization for Standardization.

- ISO, 2023. *ISO/IEC 42001: Artificial Intelligence Management System*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Kia, A., et al., 2014. Structural health monitoring using sensor data and machine learning. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 46(1), pp.1–15.
- Levitt, R.E., et al., 1992. *Computer-Integrated Construction: Methods and Management*. New York: McGraw-Hill.
- Mohri, M., Rostamizadeh, A. and Talwalkar, A., 2018. *Foundations of Machine Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- NASA Earth Observatory, 2025. *Remote Sensing and Geospatial AI Applications*. Washington, DC: NASA. Available at: https://earthobservatory.nasa.gov
- NOAA, 2025. *AI-based Climate and Hurricane Forecasting Systems*. Washington, DC: National Oceanic and Atmospheric Administration.
- OECD, 2024. *AI Governance and Policy Frameworks*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD, 2025. *Smart Cities and Digital Infrastructure Report*. Paris: OECD Publishing.
- Rafiei, M.H. and Adeli, H., 2018. AI-based cost estimation models in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(5), pp.1–12.
- RIBA (Royal Institute of British Architects), 2025. *AI Adoption in Architecture and Construction Survey Report*. London: RIBA.
- Salehi, H. and Burgueno, R., 2018. Emerging AI-based structural optimization methods. *Engineering Structures*, 171, pp.1–15.
- Shahin, M.A., Maier, H.R. and Jaksa, M.B., 2008. Data-driven models in geotechnical engineering. *Geotechnique*, 58(7), pp.1–18.
- Shalev-Shwartz, S. and Ben-David, S., 2014. *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Siemens, 2025. *Digital Twin Solutions for Smart Cities and Infrastructure*. Munich: Siemens AG.
- UNDRR, 2024. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- UNEP, 2025. *Sustainable Buildings and Life Cycle Assessment Report*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- UNESCO, 2024. *AI for Flood Prediction and Water Resource Management*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- UN-Habitat, 2024. *Urban Resilience and Smart Cities Framework*. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme.
- USGS, 2024. *Earthquake Hazard Assessment and AI-based Monitoring*. Reston, VA: United States Geological Survey.

- Vickers, P., 2017. Digital transformation in civil engineering practice. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(6), pp.1–10.
- World Bank, 2025. *Digital Infrastructure and AI for Development Report*. Washington, DC: World Bank.
- World Economic Forum, 2025. *AI Governance and Future of Infrastructure Report*. Geneva: WEF.
- Zhou, M., et al., 2016. Machine learning approaches for concrete mix design optimization. *Construction and Building Materials*, 120, pp.1–10.

إعداد

مركز الدراسات والبحوث