مركز الدراسات والبحوث
Studies and Research Center

نقابة المهندسين الأردنيين
Jordan Engineers Association

التطبيقات المتقدمة للذكاء الاصطناعي في التخصصات الهندسية

إطار تحليلي شامل للتقنيات
والتوجهات الحديثة والوظائف المستقبلية

2026

إعداد
مركز الدراسات والبحوث

نقابة المهندسين الأردنيين
Jordan Engineers Association

مركز الدراسات والبحوث
Studies and Research Center

إعداد الدراسة
م. هبه الزعبي

إشراف
م. سمر الكيلاني
مساعد الأمين العام لشؤون التدريب
والتأهيل والشؤون العلمية

الجهة الناشرة
نقابة المهندسين الأردنيين
مركز البحوث والدراسات

“

الذكاء الاصطناعي محرك أساسي للكفاءة والإنتاجية، وما زلنا في بداية الطريق

صاحب السمو الملكي الأمير الحسين بن عبد الله الثاني ولي العهد

الفهرس

1 الفصل الأول: مقدمة عن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في المجالات الهندسية... 1
1.1 تعريف الذكاء الاصطناعي ونشأته..... 2
1.2 تعريفات الذكاء الاصطناعي وأبعاده المفاهيمية... 2
1.3 أهمية الذكاء الاصطناعي في التحولات الهندسية. 3
1.4 أهداف الدراسة وفرضيتها الرئيسية..... 5
2 الفصل الثاني: التطور التاريخي للذكاء الاصطناعي..... 7
2.1 المقدمة..... 8
2.2 المراحل التاريخية لتطور الذكاء الاصطناعي..... 8
3 الفصل الثالث: تقنيات الذكاء الاصطناعي في التطبيقات الهندسية..... 12
3.1 المقدمة..... 13
3.2 التقنيات الأساسية للذكاء الاصطناعي في الهندسة..... 13

التطبيقات المتقدمة للذكاء الاصطناعي في التخصصات الهندسية

4 الفصل الرابع: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 18
4.1 المقدمة: التحول الرقمي في الهندسة المدنية..... 19
4.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية... 20
4.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية... 35
4.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 37
4.5 فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 39
4.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية... 40
4.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 43
4.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين المدنيين..... 44
4.9 الخاتمة..... 45
5 الفصل الخامس: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجالات الهندسة المعمارية..... 46
5.1 مقدمة: التحول الرقمي في الهندسة المعمارية..... 47
5.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية... 48
5.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية..... 63
5.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية.. 65
5.5 فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية..... 68
5.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية..... 69
5.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية... 73
5.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين المعماريين... 74
5.9 الخاتمة..... 74
6 الفصل السادس: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية..... 75
6.1 المقدمة: الثورة الصناعية الرابعة والهندسة الميكانيكية... 76
6.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية..... 77
6.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية... 89
6.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية..... 90

6.5 فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية.. 93
6.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية... 94
6.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية... 98
6.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين الميكانيكيين... 99
6.9 الخاتمة..... 99
7 الفصل السابع: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية..... 100
7.1 المقدمة: التحول الرقمي في الهندسة الكهربائية.. 101
7.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية... 102
7.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية.... 112
7.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية..... 114
7.5 فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية... 117
7.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية.... 118
7.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية... 123
7.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين الكهربائيين... 123
7.9 الخاتمة..... 124
8 الفصل الثامن: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول..... 125
8.1 مقدمة: التحول الرقمي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول... 126
8.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول... 127
8.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول ... 136
8.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول... 138
8.5 فوائد الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول... 141
8.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول..... 143
8.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول ... 146
8.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين التعدينين..... 147
8.9 الخاتمة..... 147
9 الفصل التاسع: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 148
9.1 مقدمة: التحول الرقمي في الهندسة الكيميائية..... 149
9.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية... 150
9.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية... 156
9.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 158
9.5 فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية... 160
9.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية... 161
9.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية... 165
9.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين الكيميائيين... 166
9.9 الخاتمة..... 166
10 الفصل العاشر: تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاعات الهندسية الأردنية..... 167
10.1 السياق الوطني والرؤية الاستراتيجية..... 168
10.2 تأثيرات الذكاء الاصطناعي على سوق العمل الأردني... 168
10.3 التطبيقات الحالية عبر القطاعات الهندسية..... 170
10.4 ملخص المشاريع التطبيقية الرائدة في الأردن... 171

11 الحادي عشر: الحوكمة والأطر التنظيمية للذكاء الاصطناعي في الهندسة..... 172
11.1 المقدمة..... 173
11.2 أهداف حوكمة الذكاء الاصطناعي في الهندسة..... 173
11.3 الأطر التنظيمية والمعايير الدولية..... 174
11.4 حوكمة البيانات والمعلومات الهندسية..... 176
11.5 إدارة دورة حياة أنظمة الذكاء الاصطناعي..... 176
11.6 الحوكمة المؤسسية والامتثال..... 177
11.7 الخاتمة..... 179
12 الفصل الثاني عشر: التحديات والاعتبارات الأخلاقية والقانونية لتطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة..... 180
12.1 المقدمة..... 181
12.1 التحديات التقنية..... 181
12.2 التحديات المؤسسية والتنظيمية..... 182
12.3 الاعتبارات الأخلاقية والقانونية..... 183
13 الفصل الثالث عشر: التوصيات..... 185
13.1 التوصيات على المستوى الوطني..... 186
13.2 التوصيات على المستوى المؤسسي والصناعي..... 186
13.3 التوصيات على المستوى الأكاديمي والتعليمي..... 187
13.4 التوصيات للمهندسين على المستوى الفردي..... 187
13.5 النظرة المستقبلية..... 187
14 الفصل الرابع عشر: المراجع الرئيسية..... 188
14.1 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية..... 188
14.2 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية..... 189
14.3 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية..... 191
14.4 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية..... 192
14.5 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول..... 193
14.6 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 194
14.7 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاعات الهندسية الأردنية..... 195
14.8 المراجع الخاصة بالتحديات والاعتبارات الأخلاقية..... 195
14.9 المراجع العامة المشتركة الواردة في كافة الفصول..... 196

رقم الجدول	محتويات الجدول	رقم الصفحة
جدول 3.1	تصنيف تقنيات الذكاء الاصطناعي الرئيسة وخصائصها وتطبيقاتها في الهندسة	14-16
جدول 4.1	التقنيات المستخدمة في مجالات الهندسة المدنية	36
جدول 4.2	أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية والبنية التحتية	38
جدول 5.1	التقنيات المستخدمة في مجالات الهندسة المعمارية	63
جدول 5.2	أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية	67
جدول 6.1	التقنيات المستخدمة في مجالات الهندسة الميكانيكية	89
جدول 6.2	أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية	92
جدول 7.1	التقنيات المستخدمة في مجالات الهندسة الكهربائية	113
جدول 7.2	أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية	117
جدول 8.1	التقنيات المستخدمة في مجالات هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول	137
جدول 8.2	أدوات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول	141
جدول 9.1	التقنيات المستخدمة في مجالات الهندسة الكيميائية	157
جدول 9.2	أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية	160
جدول 10.1	توزيع الوظائف حسب درجة التعرض لمخاطر الذكاء الاصطناعي في الأردن	171
جدول 10.2	المشاريع التطبيقية الرائدة للذكاء الاصطناعي في الأردن	172

رقم الشكل	محتويات الشكل	رقم الصفحة
الشكل 10.1	يوضح توزيع العمالة الأردنية بحسب مجموعات المهن الرئيسية	169
الشكل 10.2	مستوى تعرض العمالة الأردنية الى مخاطر الذكاء الاصطناعي-نسبة العمالة من اجمالي العمالة الكلية	170

قاموس مصطلحات مبسّط		
المختصر	المصطلح بالإنجليزية	الترجمة العربية
AI	Artificial Intelligence	الذكاء الاصطناعي
ML	Machine Learning	التعلم الآلي
DL	Deep Learning	التعلم العميق
ANN	Artificial Neural Networks	الشبكات العصبية الاصطناعية
CNN	Convolutional Neural Networks	الشبكات العصبية الالتفافية
RNN	Recurrent Neural Networks	الشبكات العصبية المتكررة
NLP	Natural Language Processing	معالجة اللغة الطبيعية
CV	Computer Vision	الرؤية الحاسوبية
GA	Genetic Algorithms	الخوارزميات الجينية
SVM	Support Vector Machine	آلة المتجهات الداعمة
IoT	Internet of Things	إنترنت الأشياء
IIoT	Industrial Internet of Things	إنترنت الأشياء الصناعي
BIM	Building Information Modeling	نمذجة معلومات البناء
HBIM	Historic Building Information Modeling	نمذجة معلومات المباني التاريخية
AEC	Architecture, Engineering and Construction	العمارة والهندسة والإنشاءات
GPU	Graphics Processing Unit	وحدة معالجة الرسوميات
GPT	Generative Pre-trained Transformer	نموذج محول توليدي مدرب مسبقًا
XAI	Explainable Artificial Intelligence	الذكاء الاصطناعي القابل للتفسير
AI Agents	Artificial Intelligence Agents	الوكلاء الأذكياء
Generative AI	Generative Artificial Intelligence	الذكاء الاصطناعي التوليدي
Digital Twin	Digital Twin	التوأم الرقمي
CPS	Cyber Physical Systems	الأنظمة السيبرانية الفيزيائية
Industry 4.0	Fourth Industrial Revolution	الثورة الصناعية الرابعة
LiDAR	Light Detection and Ranging	الاستشعار بالليزر
DEM	Digital Elevation Model	نموذج الارتفاع الرقمي
GIS	Geographic Information System	نظم المعلومات الجغرافية
AR	Augmented Reality	الواقع المعزز
VR	Virtual Reality	الواقع الافتراضي
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning	التدفئة والتهوية وتكييف الهواء
RFI	Request For Information	طلب معلومات
ISO	International Organization for Standardization	المنظمة الدولية للتقييس
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات
WEF	World Economic Forum	المنتدى الاقتصادي العالمي
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development	منظمة التعاون والتنمية الاقتصادية
NIST	National Institute of Standards and Technology	المعهد الوطني للمعايير والتقنية
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	وكالة مشاريع الأبحاث الدفاعية المتقدمة

الفصل الأول

مقدمة عن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في المجالات الهندسية

1.1 تعريف الذكاء الاصطناعي ونشأته

يُعد الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence - AI) أحد أبرز فروع علوم الحاسوب الحديثة وأكثرها تطورًا وتأثيرًا في مختلف المجالات العلمية والتطبيقية. ويُعرَّف بأنه مجموعة من النظريات والخوارزميات والتقنيات الحاسوبية المصممة لتمكين الأنظمة والآلات من محاكاة القدرات الذهنية البشرية، بما في ذلك التعلم، والاستدلال المنطقي، واتخاذ القرار، والإدراك الحسي، وفهم اللغات الطبيعية، وحل المشكلات المعقدة، وذلك من خلال نماذج وخوارزميات قادرة على التكيف والتحسين المستمر اعتمادًا على البيانات والخبرات المكتسبة (Russell & Norvig, 2021) .

وتعود الجذور الفكرية للذكاء الاصطناعي إلى تساؤلات فلسفية وعلمية مبكرة تناولت إمكانية بناء آلات تمتلك قدرات تفكير مشابهة للإنسان. إلا أن التأسيس العلمي الرسمي لهذا المجال بدأ خلال مؤتمر دارتموث (Dartmouth Conference) الذي عُقد عام 1956، حيث اجتمع عدد من العلماء والباحثين البارزين، من بينهم جون مكارثي (John McCarthy) ، ومارفن مينسكي (Marvin Minsky)، وكلود شانون (Claude Shannon) ، وتم خلاله تقديم مصطلح "الذكاء الاصطناعي" للمرة الأولى بوصفه مجالًا علميًا مستقلًا يسعى إلى تطوير أنظمة قادرة على إظهار سلوك ذكي يحاكي القدرات البشرية (McCarthy et al., 2006).

ومنذ ذلك الوقت، مرّ الذكاء الاصطناعي بمراحل تطور متعاقبة اتسمت بتفاوت مستويات التقدم والاهتمام البحثي. فقد شهد المجال فترات من التفاؤل الكبير نتيجة التقدم في تطوير الأنظمة الخبيرة والخوارزميات المنطقية، أعقبها فترات من التراجع عُرفت اصطلاحًا بـ"شتاء الذكاء الاصطناعي (AI Winter) "، حيث انخفضت الاستثمارات وتباطأت وتيرة الإنجازات بسبب محدودية القدرات الحاسوبية والقيود المرتبطة بتوافر البيانات. غير أن العقدين الأخيرين شهدا تحولًا جذريًا في هذا المجال، مدفوعًا بالتوسع الهائل في إنتاج البيانات الرقمية، والتطور المتسارع في قدرات الحوسبة عالية الأداء، وظهور تقنيات التعلم الآلي (Machine Learning) والتعلم العميق (Deep Learning) ، التي أحدثت نقلة نوعية في قدرة الأنظمة الذكية على التعلم واستخلاص الأنماط واتخاذ القرارات بصورة أكثر دقة وكفاءة (LeCun, Bengio & Hinton, 2015).

1.2 تعريفات الذكاء الاصطناعي وأبعاده المفاهيمية

يُعد الذكاء الاصطناعي من المفاهيم متعددة الأبعاد التي شهدت تطورًا ملحوظًا في تعريفاتها بتطور التقنيات الرقمية واتساع نطاق تطبيقاتها. وعلى الرغم من عدم وجود تعريف موحد يحظى بإجماع كامل بين الباحثين، فإن معظم التعريفات تتفق على أن الذكاء الاصطناعي يمثل منظومة من الأساليب والخوارزميات الحاسوبية التي تهدف إلى تمكين الأنظمة والآلات من أداء مهام تتطلب عادةً قدرات معرفية بشرية، مثل التعلم، والاستدلال، والتخطيط، واتخاذ القرار، والإدراك، وفهم اللغة الطبيعية، والتفاعل مع البيئة المحيطة بصورة ذكية وهادفة (Russell & Norvig, 2021).

وقد قدمت الأدبيات العلمية مجموعة واسعة من التعريفات التي تعكس تنوع المدارس الفكرية والمنهجية في هذا المجال. فعرفه جون مكارثي (John McCarthy) ، الذي يُعد أحد مؤسسي هذا التخصص، بأنه "علم وهندسة صناعة الآلات الذكية"، مؤكدًا أن الهدف الأساسي للذكاء الاصطناعي يتمثل في تطوير أنظمة قادرة على تنفيذ مهام تتطلب عادةً مستوى معينًا من الذكاء البشري (McCarthy, 2007). ومن منظور وظيفي، يُعرَّف الذكاء الاصطناعي بأنه قدرة الأنظمة الحاسوبية على محاكاة العمليات

الذهنية البشرية من خلال تحليل البيانات واستخلاص المعرفة والتعلم من الخبرة السابقة وتحسين الأداء بمرور الوقت دون الحاجة إلى برمجة صريحة لكل حالة أو موقف (Poole & Mackworth, 2017).

وفي المقابل، تنظر بعض التعريفات الحديثة إلى الذكاء الاصطناعي بوصفه مجموعة من النماذج والخوارزميات القادرة على إدراك البيئة المحيطة، ومعالجة كميات ضخمة من البيانات، واتخاذ إجراءات أو قرارات تحقق أهدافًا محددة بدرجات متفاوتة من الاستقلالية والمرونة (Kaplan & Haenlein, 2019). ويعكس هذا التوجه انتقال مفهوم الذكاء الاصطناعي من مجرد محاكاة التفكير البشري إلى التركيز على تحقيق الأداء الذكي والكفء في البيئات المعقدة والديناميكية.

وتتعدد الأبعاد المفاهيمية للذكاء الاصطناعي تبعًا للمنظور الذي يتم من خلاله دراسة هذا المجال. فمن الناحية المعرفية، يُنظر إليه بوصفه محاولة لفهم آليات التفكير البشري وتمثيلها حاسوبيًا من خلال نماذج تحاكي عمليات الإدراك والتعلم والاستنتاج. أما من الناحية التقنية، فيُعد الذكاء الاصطناعي منظومة من الأدوات والخوارزميات التي تُمكّن الحواسيب من تحليل البيانات والتنبؤ بالأنماط واتخاذ القرارات بصورة آلية. ومن الناحية التطبيقية، يمثل إطارًا متكاملًا لتطوير حلول ذكية قادرة على معالجة المشكلات المعقدة في مختلف القطاعات الاقتصادية والصناعية والخدمية.

كما يمكن تصنيف الأبعاد المفاهيمية للذكاء الاصطناعي **وفق أربع توجهات رئيسية وردت في الأدبيات الكلاسيكية للمجال**، وهي: **الأنظمة التي تفكر بطريقة تحاكي التفكير البشري، والأنظمة التي تتصرف بطريقة تحاكي السلوك البشري، والأنظمة التي تفكر بصورة عقلانية** اعتمادًا على قواعد المنطق والاستدلال، **والأنظمة التي تتصرف بصورة عقلانية** لتحقيق أهداف محددة بأعلى درجات الكفاءة الممكنة (Russell & Norvig, 2021). وقد أسهم هذا التصنيف في بناء الأساس النظري الذي استندت إليه معظم التطورات اللاحقة في الذكاء الاصطناعي.

وفي السياق المعاصر، يرتبط مفهوم الذكاء الاصطناعي ارتباطًا وثيقًا بعدد من المجالات الفرعية المتخصصة، من أبرزها التعلم الآلي (Machine Learning-ML) ، والتعلم العميق (Deep Learning-DL) ، ومعالجة اللغات الطبيعية (Natural Language Processing)، والرؤية الحاسوبية (Computer Vision) ، والأنظمة الخبيرة (Expert Systems)، والروبوتات الذكية (Intelligent Robotics). وتمثل هذه المجالات اللبنات الأساسية التي تقوم عليها التطبيقات الحديثة للذكاء الاصطناعي في مختلف القطاعات، بما في ذلك الهندسة والصناعة والطاقة والرعاية الصحية والنقل والخدمات الحكومية.

وتكمن أهمية فهم الأبعاد المفاهيمية للذكاء الاصطناعي في أنها تساعد على إدراك طبيعته بوصفه مجالًا متعدد التخصصات يجمع بين علوم الحاسوب والرياضيات والإحصاء والهندسة والعلوم المعرفية. كما تسهم في توضيح الفروق بين الذكاء الاصطناعي بوصفه إطارًا علميًا عامًا وبين التقنيات الفرعية المنبثقة عنه، الأمر الذي يُعد ضروريًا لفهم إمكاناته الحقيقية وحدوده التطبيقية، وتقييم دوره المتنامي في دعم التحول الرقمي وتعزيز الابتكار وتحسين الكفاءة في البيئات الهندسية والمؤسسية المعاصرة.

1.3 أهمية الذكاء الاصطناعي في التحولات الهندسية

يمثل الذكاء الاصطناعي أحد أبرز المحركات الرئيسة للتحولات الهندسية المعاصرة، حيث أسهم في إحداث نقلة نوعية في أساليب التصميم والتخطيط والتنفيذ والتشغيل والصيانة عبر مختلف التخصصات الهندسية. ولم يعد دوره مقتصرًا على أتمتة بعض المهام الروتينية أو دعم عمليات التحليل التقليدية، بل أصبح عنصرًا استراتيجيًا يعيد تشكيل النماذج الهندسية وأساليب اتخاذ القرار، من

خلال توظيف البيانات الضخمة والخوارزميات الذكية والنماذج التنبؤية لتحسين الأداء وتعزيز الكفاءة التشغيلية والابتكار الهندسي (Pan & Zhang, 2021).

وتنبع أهمية الذكاء الاصطناعي في القطاع الهندسي من قدرته على التعامل مع المشكلات المعقدة التي تتسم بتعدد المتغيرات وتشابك العلاقات بينها، وهي تحديات غالبًا ما تتجاوز قدرة الأساليب التحليلية التقليدية. فمن خلال تقنيات التعلم الآلي والتعلم العميق، يمكن تحليل كميات هائلة من البيانات الهندسية واستخلاص الأنماط والعلاقات الخفية، مما يتيح اتخاذ قرارات أكثر دقة وموضوعية، ويسهم في تقليل مستويات عدم اليقين المرتبطة بعمليات التصميم والتشغيل والإدارة (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

وقد أدى دمج الذكاء الاصطناعي في العمليات الهندسية إلى تعزيز كفاءة دورة حياة المشروعات الهندسية بأكملها، بدءًا من مرحلة التخطيط والتصميم، مرورًا بالتنفيذ والتشغيل، وانتهاءً بالصيانة وإدارة الأصول. ففي مرحلة التصميم، توفر الخوارزميات الذكية إمكانات متقدمة لتحسين النماذج الهندسية وتوليد بدائل تصميمية متعددة وفق معايير الأداء والكلفة والاستدامة. أما خلال مراحل التنفيذ والتشغيل، فتُستخدم الأنظمة الذكية في مراقبة العمليات بشكل لحظي، واكتشاف الانحرافات التشغيلية، وتحسين تخصيص الموارد، ورفع مستويات الإنتاجية والجودة (Bock & Linner, 2016).

كما أسهم الذكاء الاصطناعي في تطوير مفهوم الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance) ، الذي يُعد من أهم التحولات في الإدارة الهندسية الحديثة. فمن خلال تحليل بيانات المستشعرات وإنترنت الأشياء الصناعية (Industrial IoT) ، تستطيع الأنظمة الذكية التنبؤ بالأعطال المحتملة قبل وقوعها، مما يقلل من فترات التوقف غير المخطط لها، ويخفض تكاليف الصيانة، ويطيل العمر التشغيلي للمعدات والبنية التحتية (Lee et al., 2018). وقد أصبح هذا النهج أحد الركائز الأساسية للمصانع الذكية ومنظومات الصناعة المتقدمة ضمن إطار الثورة الصناعية الرابعة.

وعلى مستوى التخصصات الهندسية المختلفة، برزت تطبيقات الذكاء الاصطناعي بصورة واسعة ومتنوعة، مما جعله أحد المكونات الأساسية في التحول الرقمي للقطاعات الهندسية. ففي **الهندسة المدنية**، يُستخدم في تصميم المنشآت وتحليل المخاطر الإنشائية، وإدارة مشاريع البنية التحتية، ومراقبة حالة الجسور والطرق والمباني، والتنبؤ بالأعطال الهيكلية قبل وقوعها. وفي **الهندسة المعمارية**، أسهم الذكاء الاصطناعي في تطوير عمليات التصميم المعماري التوليدي (Generative Design) ، وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة في المباني، وتحليل الأداء البيئي، ودعم نمذجة معلومات البناء (BIM) ، بما يساهم في تصميم مبانٍ أكثر استدامة ومرونة وكفاءة تشغيلية. أما في **الهندسة الميكانيكية**، فيسهم في تطوير الروبوتات الصناعية، وأنظمة التحكم الذكية، وتحسين كفاءة التصنيع، والتشخيص الآلي للأعطال، وتعزيز موثوقية المعدات والأنظمة الميكانيكية.

وفي **الهندسة الكهربائية** وهندسة الطاقة، أصبح الذكاء الاصطناعي أداة رئيسة لإدارة الشبكات الكهربائية الذكية، وتحسين استهلاك الطاقة، ودمج مصادر الطاقة المتجددة، والتنبؤ بالأحمال الكهربائية، وتعزيز موثوقية أنظمة التوزيع والنقل الكهربائي. كما تلعب تقنيات الذكاء الاصطناعي دورًا محوريًا في هندسة الاتصالات من خلال تحسين أداء الشبكات، وإدارة تدفقات البيانات، واكتشاف الأعطال والتهديدات السيبرانية، وتعزيز كفاءة شبكات الجيل الخامس والسادس.

وفي **هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول**، تُستخدم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الاستكشاف الجيولوجي وتحليل البيانات الجيوفيزيائية والجيوكيميائية، وتحديد المواقع الواعدة للمعادن والثروات الطبيعية، وتحسين عمليات الحفر والاستخراج، وإدارة أساطيل المعدات الثقيلة، ومراقبة السلامة المهنية داخل المناجم، بالإضافة إلى التنبؤ بالمخاطر الجيولوجية

والانهيارات الأرضية، مما يسهم في رفع الإنتاجية وتقليل التكاليف التشغيلية وتحسين مستويات السلامة. أما في **الهندسة الكيميائية**، فقد أصبح الذكاء الاصطناعي أداة متقدمة لتحسين تصميم وتشغيل العمليات الصناعية، وتطوير النماذج التنبؤية للتفاعلات الكيميائية، وتحسين كفاءة المفاعلات ووحدات الإنتاج، واكتشاف المواد والمحفزات الجديدة، والتحكم الذكي بالعمليات الصناعية، وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الخام، بما يعزز الكفاءة الاقتصادية والاستدامة البيئية للمنشآت الكيميائية.

وتعكس هذه التطبيقات المتنامية التحول الجذري الذي أحدثه الذكاء الاصطناعي في مختلف التخصصات الهندسية، حيث لم يعد دوره مقتصرًا على دعم العمليات التقليدية، بل أصبح شريكًا أساسيًا في تطوير الحلول الهندسية الذكية، وتعزيز الابتكار، ورفع الكفاءة التشغيلية، وتحقيق أهداف الاستدامة والتنمية الصناعية في بيئة تتسم بتزايد التعقيد والتنافسية (Ahmad et al., 2021; Pan & Zhang, 2021).

وتتجاوز أهمية الذكاء الاصطناعي الجوانب التقنية البحتة لتشمل أبعادًا اقتصادية واستراتيجية وتنظيمية. فقد أسهم في رفع مستويات الإنتاجية، وتقليل التكاليف التشغيلية، وتحسين جودة المنتجات والخدمات الهندسية، وزيادة القدرة التنافسية للمؤسسات. كما أتاح تطوير نماذج أعمال جديدة تعتمد على البيانات والتحليلات الذكية، الأمر الذي عزز قدرة المؤسسات الهندسية على التكيف مع المتغيرات المتسارعة في الأسواق العالمية ومتطلبات التنمية المستدامة (World Economic Forum, 2024).

وفي سياق التحول الرقمي الشامل، أصبح الذكاء الاصطناعي أحد المكونات الأساسية للمنظومات الهندسية الذكية، حيث يتكامل مع تقنيات أخرى مثل إنترنت الأشياء (IoT) ، والتوائم الرقمية (Digital Twins) ، والحوسبة السحابية (Cloud Computing) ، والبيانات الضخمة (Big Data) ، والروبوتات المتقدمة. وقد أدى هذا التكامل إلى ظهور بيئات هندسية أكثر قدرة على التنبؤ والتكيف والاستجابة للمتغيرات التشغيلية في الزمن الحقيقي، مما ساهم في تعزيز الكفاءة والمرونة والاستدامة عبر مختلف القطاعات الهندسية.

وعليه، يمكن النظر إلى الذكاء الاصطناعي بوصفه قوة تحويلية تعيد تعريف الممارسة الهندسية في القرن الحادي والعشرين، ليس فقط من خلال تحسين الأدوات والأساليب القائمة، وإنما أيضًا عبر إحداث تغييرات جوهرية في طبيعة العمل الهندسي ذاته. فمع استمرار التطور في الخوارزميات والقدرات الحاسوبية وتوافر البيانات، يتوقع أن يتعاظم دور الذكاء الاصطناعي في صياغة مستقبل الهندسة، وأن يصبح عنصرًا محوريًا في بناء أنظمة ومشروعات أكثر ذكاءً وكفاءةً واستدامةً وقدرةً على مواجهة التحديات التقنية والاقتصادية والبيئية المستقبلية.

1.4 أهداف الدراسة وفرضيتها الرئيسية

تأتي هذه الدراسة في إطار الاهتمام المتزايد بالدور التحويلي الذي تؤديه تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تشكيل الممارسات الهندسية الحديثة، في ظل التحول الرقمي المتسارع والثورة الصناعية الرابعة التي تشهدها مختلف القطاعات الاقتصادية والإنتاجية والخدمية. وتهدف الدراسة إلى تقديم رؤية علمية متكاملة حول مفاهيم الذكاء الاصطناعي وتقنياته وتطبيقاته الهندسية، وتحليل أثره في تطوير عمليات التصميم والتحليل والتشغيل والصيانة واتخاذ القرار، واستشراف انعكاساته المستقبلية على المهن الهندسية ومتطلبات التنمية المستدامة والتحول الرقمي.

وتسعى الدراسة إلى تحقيق مجموعة من الأهداف العلمية والتطبيقية المتكاملة، تتمثل فيما يلي:

1. استعراض المفاهيم الأساسية للذكاء الاصطناعي وتطوره التاريخي، وبيان الأسس النظرية والعلمية والتقنية التي يقوم عليها .

2. تحليل التقنيات الرئيسة للذكاء الاصطناعي المستخدمة في التطبيقات الهندسية، بما في ذلك التعلم الآلي، والتعلم العميق، والشبكات العصبية الاصطناعية، والرؤية الحاسوبية، والأنظمة الخبيرة، والتوائم الرقمية، وإنترنت الأشياء، والتحليلات التنبؤية، والبيانات الضخمة .
3. دراسة تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مختلف التخصصات الهندسية، بما يشمل الهندسة المدنية، والهندسة المعمارية، والهندسة الميكانيكية، والهندسة الكهربائية وهندسة الطاقة، وهندسة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات، والهندسة الكيميائية، وهندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول، وتحليل أثر هذه التطبيقات في تحسين الأداء الهندسي وتعزيز الكفاءة التشغيلية والابتكار .
4. استكشاف دور الذكاء الاصطناعي في دعم التحول الرقمي والاستدامة الهندسية من خلال تحسين كفاءة استخدام الموارد والطاقة، وتقليل الهدر والتكاليف، وتعزيز الجودة والسلامة التشغيلية، والحد من المخاطر البيئية والتشغيلية .
5. تحليل العلاقة التكاملية بين الذكاء الاصطناعي والتقنيات الرقمية الحديثة، مثل البيانات الضخمة، والحوسبة السحابية، وإنترنت الأشياء، والتوائم الرقمية، ونمذجة معلومات البناء، والأنظمة السيبرانية الفيزيائية، ودراسة أثر هذا التكامل في تطوير الأنظمة الهندسية الذكية .
6. دراسة واقع ومستقبل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاعات الهندسية الأردنية، وتحليل فرص التحول الرقمي والتحديات المرتبطة بتبني التقنيات الذكية في مجالات البنية التحتية والطاقة والصناعة والإنشاءات والخدمات الهندسية، بما ينسجم مع رؤية التحديث الاقتصادي والتحول الرقمي في المملكة الأردنية الهاشمية .
7. استشراف تأثير الذكاء الاصطناعي في سوق العمل الهندسي، من خلال تحليل الوظائف الناشئة والمهن المستقبلية المرتبطة بالهندسة الذكية، وتحديد المهارات التقنية والرقمية والتحليلية والهجينة المطلوبة للمهندسين في بيئات العمل المستقبلية .
8. تحديد المتطلبات المؤسسية والتعليمية والتدريبية اللازمة لتأهيل الكوادر الهندسية وتمكينها من التعامل مع تقنيات الذكاء الاصطناعي وتوظيفها بكفاءة وفاعلية في مختلف المجالات الهندسية .
9. تحليل التحديات والمعوقات المرتبطة بتطبيق الذكاء الاصطناعي في البيئات الهندسية، بما يشمل التحديات التقنية والتنظيمية والقانونية والأخلاقية، وقضايا جودة البيانات، والأمن السيبراني، والخصوصية، وموثوقية النماذج الذكية، وحوكمة أنظمة الذكاء الاصطناعي .

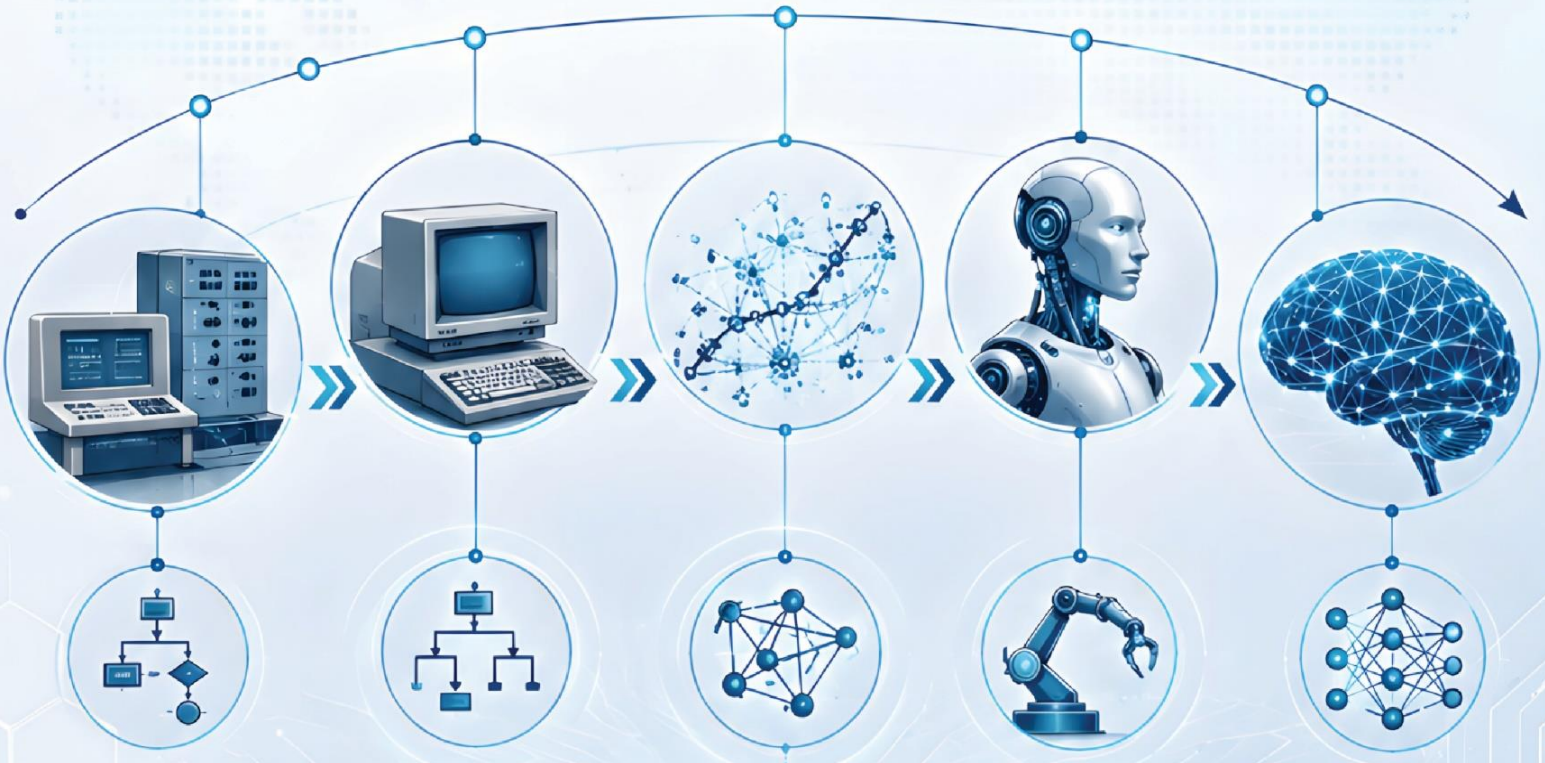
الفرضية الرئيسية للدراسة

تنطلق الدراسة من فرضية رئيسية مفادها أن الدمج المنهجي والمسؤول لتقنيات الذكاء الاصطناعي ضمن المنظومات الهندسية الحديثة يُسهم بصورة جوهرية في إحداث تحول نوعي في مختلف مراحل العمل الهندسي، من خلال تحسين دقة التصميم والتحليل والمحاكاة والتنبؤ واتخاذ القرار، ورفع الكفاءة التشغيلية والإنتاجية والاستدامة والسلامة، وتقليل التكاليف والمخاطر، وتعزيز الابتكار والقدرة التنافسية للمؤسسات الهندسية، فضلاً عن إعادة تشكيل طبيعة الوظائف والمهارات الهندسية المطلوبة في المستقبل.

كما تفترض الدراسة أن نجاح هذا التحول يعتمد على توافر منظومة متكاملة تشمل بنية تحتية رقمية متقدمة، وبيانات موثوقة وعالية الجودة، وكفاءات هندسية مؤهلة، وبرامج تعليمية وتدريبية حديثة، وأطر تشريعية وتنظيمية وأخلاقية فاعلة، بما يضمن الاستخدام الآمن والمسؤول والمستدام لتقنيات الذكاء الاصطناعي في مختلف القطاعات الهندسية. وفي السياق الأردني، تفترض الدراسة أن توسيع تبني تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاعات الهندسية يمكن أن يسهم في تعزيز الإنتاجية والابتكار والتنافسية، وخلق فرص

الفصل الثاني

التطور التاريخي للذكاء الاصطناعي



2.1 المقدمة

يمثل هذا الفصل إطارًا تحليليًا يهدف إلى استعراض المسار التاريخي لتطور الذكاء الاصطناعي منذ نشأته وحتى وصوله إلى صورته المعاصرة، مع التركيز على التحولات المفصلية التي أسهمت في تشكيل بنيته النظرية والتطبيقية. كما يتناول أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي في المجال الهندسي، موضحًا دوره المتنامي في إعادة تشكيل الممارسات الهندسية التقليدية، وتعزيز كفاءة العمليات التصميمية والتحليلية والإدارية في مختلف التخصصات الهندسية.

شهد الذكاء الاصطناعي تطورًا متسارعًا منذ منتصف القرن العشرين، حيث انتقل تدريجيًا من كونه مفهومًا نظريًا محدود التطبيق إلى تقنية محورية تُعد اليوم أحد المحركات الرئيسة لعمليات التحول الرقمي في مختلف القطاعات العلمية والصناعية والهندسية. وقد ارتبط هذا التطور ارتباطًا وثيقًا بالتقدم المتسارع في علوم الحاسوب والرياضيات والإحصاء، فضلًا عن التطور الكبير في قدرات المعالجة الحاسوبية، وتزايد توافر البيانات الضخمة، وظهور خوارزميات التعلم الآلي والتعلم العميق، وهو ما أسهم في إحداث نقلة نوعية في قدرات الأنظمة الذكية على التعلم والتنبؤ واتخاذ القرار (Russell and Norvig, 2021).

2.2 المراحل التاريخية لتطور الذكاء الاصطناعي

شهد الذكاء الاصطناعي مسيرة تطورية طويلة امتدت لأكثر من سبعة عقود، انتقل خلالها من مرحلة التصورات النظرية والتجارب البحثية المحدودة إلى كونه إحدى أكثر التقنيات تأثيرًا في الاقتصاد والصناعة والهندسة الحديثة. وقد تأثر هذا التطور بالتقدم المستمر في علوم الحاسوب والرياضيات والإحصاء، إلى جانب التطورات المتلاحقة في قدرات الحوسبة وتوافر البيانات الرقمية. ويمكن تقسيم التطور التاريخي للذكاء الاصطناعي إلى عدد من المراحل الرئيسة التي أسهمت في تشكيل واقعه الحالي.

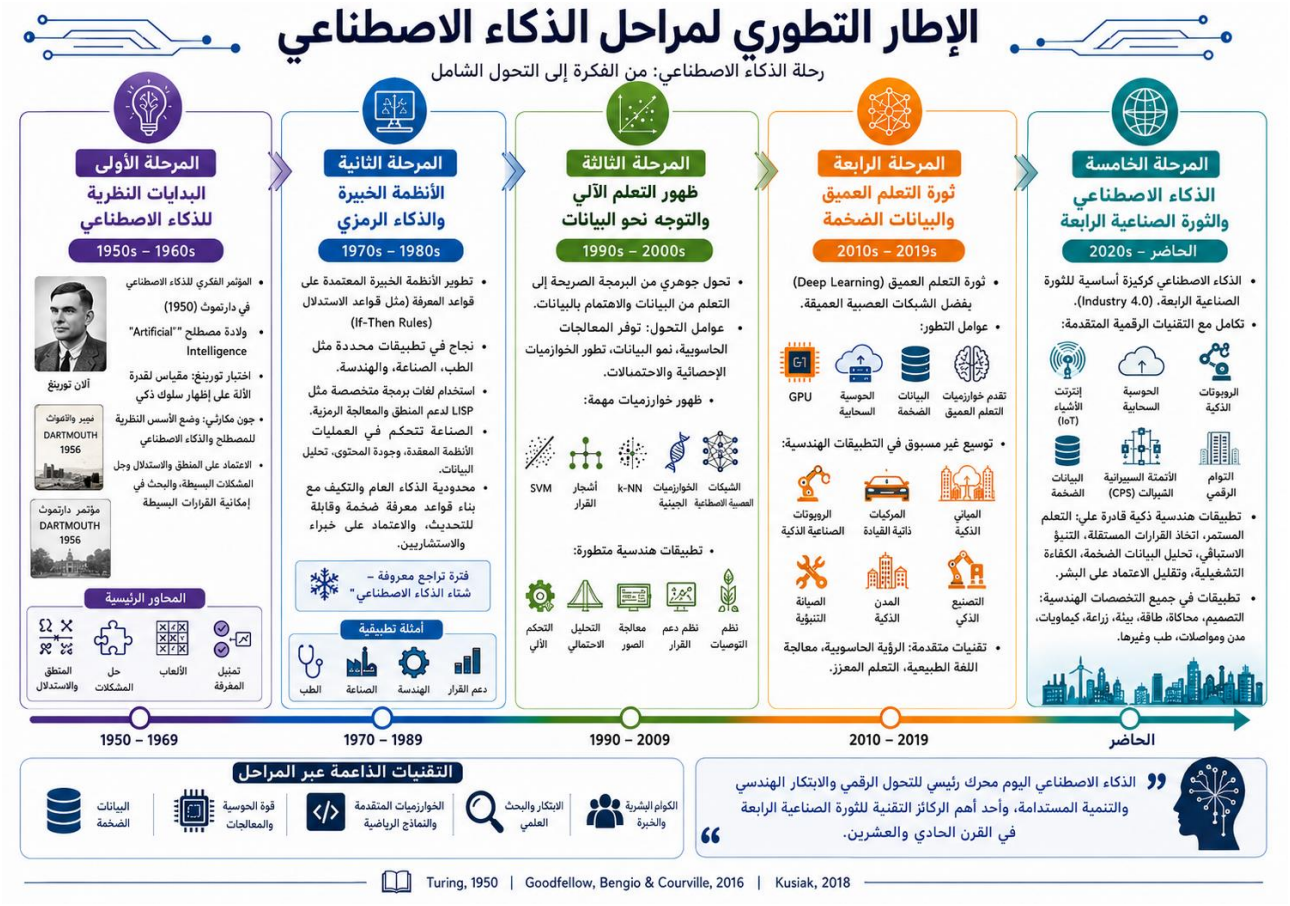
الفترة الزمنية	أبرز التطورات والإنجازات
1950–1956	وضع آلان تورينغ الأسس النظرية للذكاء الاصطناعي من خلال اختبار تورينغ، الذي شكل أول إطار علمي لتقييم قدرة الآلات على محاكاة السلوك الذكي للبشر (Turing, 1950).
1956–1974	تأسيس مجال الذكاء الاصطناعي رسميًا خلال مؤتمر دارتموث، وظهور الأنظمة الرمزية وبرامج حل المشكلات والمنطق الرياضي، مع دعم مؤسسات بحثية كبرى مثل وكالة مشاريع الأبحاث الدفاعية المتقدمة (DARPA).
1974–1980	بداية فترة "شتاء الذكاء الاصطناعي" نتيجة محدودية القدرات الحاسوبية وصعوبة تحقيق الوعود المبكرة للذكاء الاصطناعي.
1980–1990	ازدهار الأنظمة الخبيرة والشبكات العصبية الاصطناعية، وتطوير نماذج التعلم العصبي التي مهدت لظهور تقنيات التعلم العميق لاحقًا (Hopfield, 1982; Rumelhart et al., 1986).
1990–2005	تطور التعلم الإحصائي والتعلم المعزز، وظهور تطبيقات ذكية متقدمة في الصناعة والهندسة، وتحقيق إنجازات بارزة في مجالات الألعاب واتخاذ القرار.
2005–2015	التوسع في استخدام البيانات الضخمة والحوسبة السحابية ووحدات المعالجة الرسومية، وظهور الجيل الحديث من تقنيات التعلم العميق.
2015–الحاضر	الانتشار الواسع للذكاء الاصطناعي في مختلف القطاعات، وظهور النماذج التوليدية، والتوائم الرقمية، والمركبات ذاتية القيادة، والروبوتات الذكية، وتطبيقات الصناعة الذكية والمدن الذكية.

2.2.1 الإطار التطوري لمراحل الذكاء الاصطناعي

تعكس المراحل التاريخية السابقة مسارًا تطوريًا متدرجًا للذكاء الاصطناعي، انتقل خلاله من كونه فكرة نظرية تهدف إلى محاكاة التفكير البشري إلى منظومة تقنية متكاملة أصبحت تمثل أحد المحركات الرئيسة للابتكار والتحول الرقمي في مختلف القطاعات الاقتصادية والهندسية. ولم يكن هذا التطور خطيًا أو متواصلًا بالوتيرة نفسها، بل مرّ بفترات من التقدم السريع وأخرى من التراجع النسبي نتيجة التحديات التقنية والقيود الحاسوبية التي واجهت الباحثين في المراحل المبكرة.

ويمكن تصنيف هذا التطور إلى **خمس مراحل رئيسية** مترابطة، **بدأت بمرحلة التأسيس النظري** التي وضعت الأسس الفلسفية والعلمية للذكاء الاصطناعي، تلتها **مرحلة الذكاء الرمزي والأنظمة الخبيرة** التي ركزت على تمثيل المعرفة البشرية باستخدام القواعد المنطقية. ثم شهد المجال تحولًا جوهريًا نحو **النماذج القائمة على البيانات مع ظهور تقنيات التعلم الآلي**، قبل أن يدخل مرحلة النمو المتسارع بفضل **ثورة التعلم العميق والبيانات الضخمة**. أما المرحلة الحالية فتتمثل في اندماج **الذكاء الاصطناعي مع تقنيات الثورة الصناعية الرابعة**، مما أدى إلى ظهور أنظمة ذكية قادرة على التعلم الذاتي واتخاذ القرار والتفاعل مع البيئات المعقدة في الزمن الحقيقي.

وفيما يلي عرض تفصيلي لأبرز خصائص كل مرحلة من هذه المراحل، والعوامل التي أسهمت في تطورها، وانعكاساتها على التطبيقات الهندسية والصناعية الحديثة.



المرحلة الأولى: البدايات النظرية للذكاء الاصطناعي

تعود الجذور الفكرية للذكاء الاصطناعي إلى منتصف القرن العشرين، عندما بدأ العلماء في استكشاف إمكانية محاكاة العمليات الذهنية البشرية باستخدام الأنظمة الحاسوبية. ويُعد آلان تورينغ من أبرز الرواد الذين وضعوا الأساس النظري لهذا المجال من خلال ورقته البحثية الشهيرة *Computing Machinery and Intelligence* المنشورة عام 1950، والتي طرح فيها اختبار تورينغ باعتباره معيارًا لتقييم قدرة الآلات على إظهار سلوك ذكي لا يمكن تمييزه عن السلوك البشري (Turing, 1950).
وشكّل مؤتمر دارتموث عام 1956 نقطة الانطلاق الرسمية للذكاء الاصطناعي بوصفه تخصصًا علميًا مستقلًا، حيث اقترح جون مكارثي مصطلح "الذكاء الاصطناعي" لأول مرة، وتركزت الأبحاث خلال هذه المرحلة على تطوير الأنظمة الرمزية القائمة على المنطق والاستدلال وحل المشكلات الرياضية والألعاب واتخاذ القرارات البسيطة.

المرحلة الثانية: الأنظمة الخبيرة والذكاء الرمزي

خلال سبعينيات وثمانينيات القرن العشرين، اتجهت الجهود البحثية نحو تطوير الأنظمة الخبيرة، وهي أنظمة تعتمد على قواعد معرفية وقواعد استدلالية تحاكي خبرات المختصين في مجالات محددة. وقد حققت هذه الأنظمة نجاحًا ملحوظًا في تطبيقات الطب والصناعة والهندسة، حيث استخدمت في تشخيص الأعطال الصناعية، والتحكم في العمليات الإنتاجية، وجدولة التصنيع، وتحليل الأنظمة المعقدة، ودعم اتخاذ القرار.
ورغم الإنجازات التي تحققت خلال هذه المرحلة، فإن محدودية القدرات الحاسوبية وصعوبة بناء قواعد معرفية شاملة وقابلة للتحديث أدت إلى تراجع الاهتمام والاستثمارات في هذا المجال، وهي الفترة التي عُرفت اصطلاحًا بـ" شتاء الذكاء الاصطناعي"

المرحلة الثالثة: ظهور التعلم الآلي والتحول نحو البيانات

شهدت تسعينيات القرن العشرين تحولًا جوهريًا في فلسفة تطوير الأنظمة الذكية مع ظهور تقنيات التعلم الآلي (Machine Learning)، التي انتقلت بالذكاء الاصطناعي من الاعتماد على القواعد المبرمجة مسبقًا إلى الاعتماد على البيانات والتعلم من الخبرة. وقد ساهمت عدة عوامل في تسريع هذا التحول، من أبرزها التطور المتسارع في المعالجات الحاسوبية، والتوسع في تخزين البيانات الرقمية، وتقدم الأساليب الإحصائية والخوارزميات الحسابية.
وخلال هذه المرحلة ظهرت تطبيقات هندسية أكثر تطورًا شملت التنبؤ بالأعطال الصناعية، والتحليل الإنشائي الذكي، وتحسين أنظمة التحكم، والمحاكاة الهندسية، وتحسين كفاءة الطاقة والعمليات الصناعية. كما شهدت هذه الفترة تطور خوارزميات مهمة مثل آلات المتجهات الداعمة (SVM) ، والأشجار القرارّية، والخوارزميات الجينية، والشبكات العصبية متعددة الطبقات.

المرحلة الرابعة: ثورة التعلم العميق والبيانات الضخمة

مع بداية العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين، دخل الذكاء الاصطناعي مرحلة جديدة تمثلت في ثورة التعلم العميق (Deep Learning)، التي تعتمد على الشبكات العصبية العميقة القادرة على معالجة البيانات الضخمة واستخلاص الأنماط المعقدة بدرجات عالية من الدقة والكفاءة. وقد ارتبط هذا التطور بتوافر وحدات المعالجة الرسومية (GPU) ، والتوسع في الحوسبة السحابية، والنمو الهائل في البيانات الرقمية، والتقدم في خوارزميات التعلم العميق.

وأدى ذلك إلى توسع غير مسبوق في التطبيقات الهندسية، حيث أصبحت تقنيات الذكاء الاصطناعي تستخدم في الروبوتات الصناعية الذكية، والمركبات ذاتية القيادة، والتوائم الرقمية، والصيانة التنبؤية، والمدن الذكية، وأنظمة التصنيع الذكي، وتحسين تصميم المواد والهياكل الهندسية، إضافة إلى تطبيقات الرؤية الحاسوبية ومعالجة اللغة الطبيعية والتعلم المعزز (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

المرحلة الخامسة: الذكاء الاصطناعي والثورة الصناعية الرابعة

يمثل الذكاء الاصطناعي اليوم إحدى الركائز الأساسية للثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0) ، حيث يتكامل مع مجموعة واسعة من التقنيات الرقمية المتقدمة، تشمل إنترنت الأشياء، والحوسبة السحابية، والروبوتات الذكية، والبيانات الضخمة، والأنظمة السيبرانية الفيزيائية، والتوائم الرقمية. وقد أدى هذا التكامل إلى ظهور منظومات هندسية ذكية قادرة على التعلم الذاتي، واتخاذ القرار بصورة مستقلة، والتنبؤ بالمشكلات قبل حدوثها، وتحسين الكفاءة التشغيلية، وتقليل الاعتماد على التدخل البشري المباشر.

وفي الوقت الراهن، تمتد تطبيقات الذكاء الاصطناعي إلى معظم التخصصات الهندسية، بما في ذلك الهندسة المدنية، والهندسة المعمارية، والهندسة الميكانيكية، والهندسة الكهربائية، والهندسة الكيميائية، وهندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول، وهندسة الطاقة، الأمر الذي يجعله أحد أهم المحركات التقنية للتحول الرقمي والابتكار الهندسي والتنمية المستدامة في القرن الحادي والعشرين (Kusiak, 2018).

الفصل الثالث

تقنيات الذكاء الاصطناعي في التطبيقات الهندسية

3.1 المقدمة

شهدت العقود الأخيرة تطوراً متسارعاً في تقنيات الذكاء الاصطناعي، الأمر الذي أسهم في إحداث تحول جوهري في مختلف القطاعات الهندسية، وجعل هذه التقنيات أحد المحركات الرئيسية للتحول الرقمي والثورة الصناعية الحديثة. وقد أصبحت تطبيقات الذكاء الاصطناعي أداةً أساسية في معالجة المشكلات الهندسية المعقدة، وتحليل البيانات الضخمة، وتحسين عمليات التصميم والتشغيل والصيانة، بما ينعكس بصورة مباشرة على رفع الكفاءة والإنتاجية وتعزيز جودة المخرجات الهندسية.

ويُعنى هذا الفصل بدراسة وتحليل أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في التطبيقات الهندسية المعاصرة، مع التركيز على الأسس النظرية التي تقوم عليها هذه التقنيات، وآليات عملها، وخصائصها الوظيفية، ودورها في تعزيز الأداء الهندسي عبر مختلف التخصصات. كما يستعرض الفصل كيفية توظيف هذه التقنيات في دعم عمليات التصميم والتحليل والمحاكاة والتحكم، ومعالجة المشكلات الهندسية المعقدة، إضافة إلى المساهمة في اتخاذ القرارات في البيئات التشغيلية الديناميكية والمتغيرة.

وتشمل تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في الهندسة مجموعة واسعة من النماذج والخوارزميات والأساليب الحسابية المتقدمة، من أبرزها التعلم الآلي (Machine Learning-ML)، والتعلم العميق (Deep Learning-DL)، والشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks-ANN)، والرؤية الحاسوبية (Computer Vision-CV)، ومعالجة اللغة الطبيعية (Natural Language Processing) ، وخوارزميات التحسين مثل الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms-GA)، إضافة إلى المنطق الضبابي (Fuzzy Logic)، والأنظمة الخبيرة، والتعلم المعزز، والتوائم الرقمية، والذكاء الاصطناعي التوليدي. وتمتاز هذه التقنيات بقدرتها على معالجة كميات هائلة من البيانات، واكتشاف الأنماط والعلاقات المعقدة وغير الخطية، والتنبؤ بالسلوك المستقبلي للأنظمة الهندسية بدرجات عالية من الدقة والموثوقية.

وقد أسهم دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في مختلف التطبيقات الهندسية في تطوير أساليب أكثر كفاءة في تصميم الأنظمة والمنشآت وإدارتها وتشغيلها، وتحسين عمليات المراقبة والتحكم والصيانة التنبؤية، وتقليل الأخطاء البشرية، ورفع مستويات الجودة والاعتمادية، وتعزيز القدرة على الابتكار وتطوير الحلول الهندسية المتقدمة. ومن هذا المنطلق، أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الركائز الأساسية للممارسة الهندسية الحديثة، وأحد العوامل الرئيسية الداعمة لتطوير أنظمة هندسية أكثر ذكاءً وكفاءةً واستدامةً وقدرةً على التكيف مع متطلبات المستقبل.

3.2 التقنيات الأساسية للذكاء الاصطناعي في الهندسة

تشكل التقنيات الأساسية للذكاء الاصطناعي البنية التكنولوجية التي تعتمد عليها التطبيقات الهندسية الذكية. وتتنوع هذه التقنيات من حيث آليات عملها ومجالات استخدامها، إلا أنها تتكامل فيما بينها لتحقيق مستويات متقدمة من التحليل والتنبؤ والأتمتة واتخاذ القرار.

جدول 3.1. تصنيف تقنيات الذكاء الاصطناعي الرئيسة وخصائصها وتطبيقاتها في الهندسة

التقنية	التعريف والوصف	الأنواع أو النماذج الرئيسية	أبرز التطبيقات الهندسية
التعلم الآلي (Machine Learning)	يُعد التعلم الآلي أحد أكثر فروع الذكاء الاصطناعي انتشاراً واستخداماً في التطبيقات الهندسية، ويعتمد على تطوير نماذج رياضية وإحصائية قادرة على التعلم من البيانات واستخلاص الأنماط والعلاقات الكامنة فيها بهدف إجراء التنبؤات أو اتخاذ القرارات دون الحاجة إلى برمجة تفصيلية لكل حالة.	**التعلم تحت الإشراف (Supervised Learning):** يعتمد على بيانات مصنفة مسبقاً لتدريب النماذج على التنبؤ بالنتائج المستقبلية. **التعلم غير الخاضع للإشراف (Unsupervised Learning):** يهدف إلى اكتشاف الأنماط والتجمعات والعلاقات غير الظاهرة في البيانات. **التعلم المعزز (Reinforcement Learning):** يعتمد على تفاعل النظام مع البيئة المحيطة وتعلمه من خلال المكافآت والعقوبات الناتجة عن القرارات المتخذة.	التنبؤ بأعطال المعدات والآلات، تحسين استهلاك الطاقة، مراقبة الجودة في العمليات الصناعية، التنبؤ بالأحمال التشغيلية، تحليل المخاطر، دعم اتخاذ القرار في المشاريع الهندسية.
التعلم العميق (Deep Learning)	يمثل فرعاً متقدماً من التعلم الآلي يعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية متعددة الطبقات التي تحاكي بصورة مبسطة آلية عمل الدماغ البشري في معالجة المعلومات، ويتميز بقدرته على تحليل البيانات المعقدة وغير المهيكلة مثل الصور والفيديوهات والإشارات والنصوص واستخلاص الخصائص والأنماط منها بصورة تلقائية.	**الشبكات العصبية التلافيفية (CNNs):** لتحليل الصور والرؤية الحاسوبية. **الشبكات العصبية المتكررة (RNNs):** لمعالجة البيانات الزمنية والتسلسلية. **نماذج المحولات (Transformers):** لمعالجة اللغة الطبيعية وتحليل الوثائق والنصوص الفنية.	كشف العيوب والتشققات في المنشآت، تحليل الصور الجوية وصور الأقمار الصناعية، مراقبة البنية التحتية، القيادة الذاتية، النمذجة والمحاكاة المتقدمة للأنظمة الهندسية.

الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks)	من أهم النماذج الحسابية المستخدمة في الذكاء الاصطناعي، وتستند إلى بنية مستوحاة من الخلايا العصبية في الدماغ البشري، وتتميز بقدرتها على التعامل مع العلاقات غير الخطية والأنظمة المعقدة التي يصعب نمذجتها باستخدام الأساليب التقليدية.	شبكات عصبية متعددة الطبقات مستوحاة من آلية عمل الدماغ البشري.	التنبؤ بالأداء الهيكلي للمنشآت، تقدير خصائص المواد، النمذجة الرياضية للأنظمة المعقدة، التنبؤ بالأحمال والإجهادات، أنظمة التحكم الذكية.
معالجة اللغة الطبيعية (Natural Language Processing)	أحد الفروع المتقدمة للذكاء الاصطناعي التي تهدف إلى تمكين الحواسيب من فهم اللغة البشرية وتحليلها وتفسيرها وتوليدها بصورة تحاكي التواصل البشري، وتكتسب أهمية متزايدة في البيئات الهندسية التي تعتمد على كميات كبيرة من الوثائق والتقارير والمواصفات الفنية.	تقنيات فهم وتحليل وتوليد اللغة البشرية.	تحليل العقود والمواصفات الفنية، إدارة المعرفة الهندسية، تطوير المساعدات الذكية للمهندسين، أتمتة إعداد التقارير الفنية، البحث الذكي في الوثائق وقواعد البيانات الهندسية، تطوير روبوتات المحادثة الداعمة للمشاريع الهندسية.
الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)	تعنى بتمكين الأنظمة الذكية من فهم وتحليل الصور ومقاطع الفيديو واستخلاص المعلومات منها بصورة آلية، وقد أصبحت من الأدوات الأساسية في العديد من التطبيقات الهندسية خاصة مع انتشار الطائرات دون طيار وأنظمة الاستشعار المتقدمة.	تقنيات تحليل الصور والفيديو واستخلاص المعلومات البصرية.	فحص المنشآت والبنية التحتية، الكشف التلقائي عن التشققات والعيوب الإنشائية، مراقبة مواقع الإنشاءات ومتابعة تقدم الأعمال، التفتيش الآلي لخطوط الإنتاج، تحليل الصور الجوية وصور الأقمار الصناعية، تحويل المخططات الهندسية إلى نماذج رقمية قابلة للمعالجة.
الأنظمة الخبيرة (Expert Systems)	من أوائل تطبيقات الذكاء الاصطناعي، وتعتمد على قواعد معرفية وآليات استدلالية تحاكي خبرات المتخصصين في مجال معين، وتمكّن المؤسسات الهندسية من الاستفادة من المعرفة التراكمية للخبراء في دعم عمليات اتخاذ القرار وحل المشكلات المعقدة.	قواعد معرفية وآليات استدلال تحاكي الخبراء.	تشخيص الأعطال الفنية، إدارة المخاطر الهندسية، تقييم البدائل التصميمية، دعم عمليات التشغيل والصيانة، تدريب المهندسين الجدد على معالجة المشكلات المتكررة.
الذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI)	من أحدث التطورات في مجال الذكاء الاصطناعي، ويعتمد على نماذج قادرة على إنتاج محتوى جديد يشمل النصوص والصور والنماذج والتصاميم والبرمجيات استناداً إلى البيانات التي تم تدريبها عليها، وقد فتح آفاقاً جديدة في المجالات الهندسية لدعم الابتكار وتسريع عمليات التصميم والتطوير.	نماذج توليد النصوص والصور والتصاميم والنماذج والبرمجيات.	التصميم التوليدي للمنشآت والمنتجات، إنشاء النماذج الأولية للتصاميم، إعداد التقارير الفنية والمستندات الهندسية، تطوير الحلول الابتكارية، دعم أنشطة البحث والتطوير.

التعلم المعزز (Reinforcement Learning)	يعتمد على مبدأ التعلم من خلال التفاعل المباشر مع البيئة المحيطة، حيث يتعلم النظام اختيار أفضل القرارات بناءً على المكافآت أو العقوبات الناتجة عن أفعاله، وتبرز أهميته في التطبيقات التي تتطلب اتخاذ قرارات متسلسلة ضمن بيئات ديناميكية ومتغيرة.	التعلم القائم على التفاعل مع البيئة والمكافآت والعقوبات.	التحكم الذكي في الأنظمة الصناعية، إدارة الشبكات الكهربائية الذكية، تحسين حركة الروبوتات المستقلة، أنظمة النقل وإدارة المرور الذكية، تحسين العمليات التشغيلية والإنتاجية.
الروبوتات الذكية (Intelligent Robotics)	تمثل أحد أبرز مجالات التكامل بين الذكاء الاصطناعي وتقنيات الاستشعار والتحكم والأتمتة، وتتميز بقدرتها على إدراك البيئة المحيطة واتخاذ القرارات وتنفيذ المهام بصورة شبه مستقلة أو مستقلة بالكامل.	روبوتات مزودة بقدرات الاستشعار والتحليل واتخاذ القرار.	التصنيع الذكي، أعمال التفتيش والفحص والصيانة، الإنشاءات والبناء، العمليات الخطرة والبيئات عالية المخاطر، الخدمات اللوجستية وسلاسل التوريد.
التوائم الرقمية (Digital Twins)	يمثل التوأم الرقمي نموذجاً افتراضياً ديناميكياً لأصل أو نظام فيزيائي حقيقي يتم تحديثه باستمرار اعتماداً على البيانات الواردة من أجهزة الاستشعار وأنظمة المراقبة، ويتيح مراقبة أداء الأصول الهندسية وتحليلها ومحاكاتها في الزمن الحقيقي لتحسين التشغيل والصيانة واتخاذ القرار.	نماذج رقمية ديناميكية مرتبطة بالأصول والأنظمة الحقيقية.	مراقبة أداء المنشآت والبنية التحتية، إدارة دورة حياة الأصول الهندسية، التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها، تحسين استراتيجيات التشغيل والصيانة، دعم التخطيط الاستراتيجي وإدارة المخاطر.
خوارزميات التحسين (Optimization Algorithms)	تُستخدم لإيجاد الحلول المثلى للمشكلات الهندسية المعقدة التي تتضمن عدداً كبيراً من المتغيرات والقيود.	الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms).	تحسين التصميم الإنشائي، تقليل الكلفة، تقليل الوزن، تحسين الأداء التشغيلي.
المنطق الضبابي (Fuzzy Logic)	يوفر إطاراً فعالاً لمعالجة حالات عدم اليقين والغموض في الأنظمة الهندسية واتخاذ القرارات في البيئات غير المؤكدة.	قواعد ومنهجيات الاستدلال الضبابي.	أنظمة التحكم الصناعي، إدارة العمليات المعقدة، تقييم المخاطر، اتخاذ القرارات في البيئات غير المؤكدة.

المصدر: الاعتماد على RUSSELL AND NORVIG (2021)، GOODFELLOW ET AL. (2016)، SUTTON AND BARTO (2018)، NILSSON (1998)، SCHMIDHUBER (2015)، KAPLAN AND HAENLEIN (2019)، FULLER (1995)، TAO ET AL. (2019)، إضافةً إلى تقارير ومراجع علمية وهندسية متخصصة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي والتوائم الرقمية والروبوتات الذكية

التطبيقات المتقدمة للذكاء الاصطناعي
في التخصصات الهندسية

- ابتكاز حلول ذكية لمستقبل الهندسة
- الاستدامة وحماية البيئة
- تعزيز السلامة واتخاذ القرار
- رفع الكفاءة وتقليل التكاليف

الفصل السادس

تطبيقات الذكاء الاصطناعي
في الهندسة الميكانيكية

الفصل الخامس

تطبيقات الذكاء الاصطناعي
في الهندسة المعمارية

الفصل الرابع

تطبيقات الذكاء الاصطناعي
في الهندسة المدنية

الفصل التاسع

تطبيقات الذكاء الاصطناعي
في الهندسة الكيميائية

الفصل الثامن

تطبيقات الذكاء الاصطناعي
في هندسة التعدين والمناجم

الفصل السابع

تطبيقات الذكاء الاصطناعي
في الهندسة الكهربائية

الذكاء الاصطناعي في الهندسة نحو مستقبل ذكي ومستدام

- حلول هندسية ذكية لمستقبل أفضل
- مهندسون مبتكرون لمجتمعات ذكية
- تكامل العلوم الهندسية مع الذكاء الاصطناعي
- البيانات هي الوقود والخوارزميات هي المحرك

الفصل الرابع

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

4.1 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.

4.2 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:

4.2.1 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).

4.2.2 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).

4.2.3 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.

4.2.4 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.

4.2.5 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.

4.2.6 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.

4.2.7 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.

4.2.8 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.

4.2.9 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.

4.2.10 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.

4.2.11 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.

4.2.12 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.

4.2.13 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).

4.2.14 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.

4.2.15 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.

4.3 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 (4.1). 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 ; Digital Twin Consortium (2024); ASCE (2024); Shahin et al. (2008); Farrar & Worden (2013): International (2024); World Bank (2025); OECD (2025); IEA (2024); UNEP (2025); UNDRR (2024)

4.4 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 (4.2) 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 (4.2). 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 ويطيل 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.

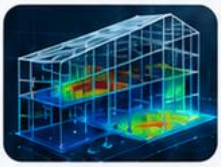
تحسين الإنتاجية:

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 الهيكل الإنشائي.

تحسين جودة التنفيذ:

تستخدم الطائرات المسيرة والطائرات بدون طيار (Drones) وتقنيات المراقبة الذكية لمتابعة سير الأعمال في مواقع البناء، والكشف المبكر عن العيوب 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 مبكرًا:

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 المنشآت.

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
بيني مستقبل الهندسة المدنية بكفاءة، أمان، واستدامة.

4.6 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

4.6.1 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.

4.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

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

4.7.1 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 .

4.7.2 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 .

4.8 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.

4.9 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.

الفصل الخامس

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

5.1 مقدمة: التحول الرقمي في الهندسة المعمارية

تشير 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) .

5.2 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:

5.2.1 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.

5.2.2 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.

5.2.3 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.

5.2.4 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.

5.2.5 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.

5.2.6 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)** (OECD, 2025؛Batty, 2024).

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.

5.2.7 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.

5.2.8 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.

5.3 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.

جدول (5.1). 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).

5.3.1 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.

5.4 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 (5.2) 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 3D و 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 (5.2). 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 (Rendering & Visualization)	**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)

فوائـد الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

الذكاء الاصطناعي يُغيّر 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

CO_2

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.

الذكاء الاصطناعي
شريكك المعماري في كل مرحلة

مستقبل أفضل | استدامة أعلي | تكلفة أقل | إدارة أفضل | تصميم أذكي

5.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة المعمارية

يشهد قطاع الهندسة المعمارية تحولاً جوهرياً نتيجة التوسع في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي، ونمذجة معلومات المباني (BIM)، والتوائم الرقمية، وإنترنت الأشياء، والتحليلات المتقدمة، والأنظمة الذكية الداعمة لاتخاذ القرار. ولم يعد الذكاء الاصطناعي يقتصر على كونه أداة مساندة لعمليات الرسم أو النمذجة، بل أصبح جزءاً أساسياً من منظومة التصميم والتخطيط والتشغيل وإدارة دورة حياة المبنى.

وقد أسهم هذا التحول في إعادة تعريف دور المهندس المعماري، حيث أصبح مسؤولاً عن إدارة البيانات الرقمية، وتطوير النماذج التنبؤية، وتحليل أداء المباني، والاستفادة من الخوارزميات التوليدية لإنتاج بدائل تصميمية أكثر كفاءة واستدامة. كما أدى ذلك إلى ظهور وظائف جديدة تجمع بين المعرفة المعمارية التقليدية والمهارات الرقمية المتقدمة في مجالات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات والمحاكاة الحاسوبية وإدارة الأنظمة الذكية.

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

5.6.1 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.

5.7 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:

5.7.1 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 .

5.7.2 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 .

5.8 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.

5.9 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.

الفصل السادس

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

6.1 المقدمة: الثورة الصناعية الرابعة والهندسة الميكانيكية

يشهد العالم في ظل الثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0) تحولًا جوهريًا في الأنظمة الصناعية والهندسية نتيجة التكامل المتنامي بين الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء والحوسبة السحابية والروبوتات المتقدمة (WEF, 2025). وفي هذا السياق، أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الركائز الأساسية لتطوير الهندسة الميكانيكية الحديثة، إذ يسهم في تحسين عمليات التصميم والتصنيع والتحكم والصيانة وإدارة دورة حياة المنتجات من خلال أنظمة ذكية قادرة على تحليل البيانات والتعلم المستمر واتخاذ القرارات بصورة شبه ذاتية (Deloitte, 2025).

ويشهد سوق الذكاء الاصطناعي الصناعي نموًا متسارعًا مدفوعًا بالتوسع في المصانع الذكية وتقنيات التصنيع الرقمي (PwC, 2025). وقد أثبتت تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجالات التصميم التوليدي والصيانة التنبؤية وتحسين العمليات التشغيلية قدرتها على خفض التكاليف التشغيلية ورفع مستويات الإنتاجية والجودة (McKinsey & Company, 2025). كما تشير الدراسات إلى أن أنظمة الصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي قادرة على تقليل فترات التوقف غير المخطط لها بنسبة تتراوح بين 30% و50%، وخفض تكاليف الصيانة بنسبة 20% إلى 40%، مع إطالة العمر التشغيلي للمعدات الصناعية (IBM Institute for Business Value, 2025).

وعلى الرغم من الاهتمام المتزايد بهذه التقنيات، فإن معدلات التبني الفعلية ما تزال أقل من التصورات الشائعة المرتبطة بالتحول الرقمي. فقد أظهر تقرير McKinsey العالمي للذكاء الاصطناعي لعام 2025 أن نحو 78% من المؤسسات تستخدم الذكاء الاصطناعي في وظيفة أعمال واحدة على الأقل، مقارنة بـ72% في عام 2024، إلا أن مستويات النضج والتكامل ما تزال متفاوتة بين القطاعات المختلفة (McKinsey & Company, 2025). وتتمتع المؤسسات الصناعية الكبرى بقدرة أكبر على الاستفادة من هذه التقنيات بفضل توافر البنية التحتية الرقمية والموارد الاستثمارية، في حين تواجه المؤسسات الصغيرة والمتوسطة تحديات تتعلق بالتكلفة وتوافر البيانات والخبرات الفنية (Deloitte, 2025).

وفي قطاع التصنيع والهندسة الميكانيكية، حققت المصانع التي تبنت تقنيات الذكاء الاصطناعي والتحليلات المتقدمة زيادات في الإنتاجية تراوحت بين 20% و40%، إلى جانب خفض الهدر وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة (WEF, 2025). كما أظهرت دراسات العائد على الاستثمار أن دمج الذكاء الاصطناعي في الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول الصناعية يمكن أن يسرّع استرداد تكاليف الاستثمار من خلال تقليل الأعطال وتحسين استغلال المعدات ورفع موثوقية العمليات التشغيلية(PwC, 2025 ؛ IBM Institute for Business Value, 2025).

ورغم الإمكانات الكبيرة للذكاء الاصطناعي، لا تزال العديد من المؤسسات الصناعية تواجه تحديات تعيق التبني الكامل لهذه التقنيات، من أبرزها محدودية جودة البيانات، ونقص الكفاءات المتخصصة، وصعوبة دمج الأنظمة الذكية مع المعدات التقليدية، وارتفاع تكاليف التحول الرقمي، إضافة إلى التحديات المرتبطة بأمن البيانات والاعتمادية التشغيلية(McKinsey & Company, 2025 ؛ Deloitte, 2025). ولذلك أصبح نجاح تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية مرتبطًا بتبني استراتيجيات تحول رقمي متكاملة تجمع بين الاستثمار في التكنولوجيا وتنمية رأس المال البشري وتطوير البنية التحتية الرقمية (PwC, 2025).

ويتناول هذا الفصل بصورة منهجية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية، من خلال استعراض مجالات التطبيق الرئيسة، والأدوات والتقنيات المستخدمة، والفوائد الاستراتيجية المتحققة، والوظائف المستقبلية والمهارات المطلوبة، إضافة إلى أبرز التحديات والمعوقات والتوصيات العملية التي تدعم الاستفادة المثلى من تقنيات الذكاء الاصطناعي في بيئات الصناعة الذكية.

6.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

شهدت الهندسة الميكانيكية خلال العقد الأخير تحولًا جذريًا نتيجة التوظيف المتزايد لتقنيات الذكاء الاصطناعي، بما يشمل التعلم الآلي، والتحليلات التنبؤية، والرؤية الحاسوبية، والخوارزميات الذكية. وقد أسهم هذا التحول في إعادة تشكيل مختلف مراحل دورة الحياة الهندسية، بدءًا من التصميم والتصنيع، مرورًا بالتشغيل، وصولًا إلى الصيانة وإدارة الأصول. كما عززت هذه التقنيات كفاءة الأداء الصناعي، ورفعت مستويات الاعتمادية، وخفضت التكاليف التشغيلية، ووسّعت من قدرات اتخاذ القرار في البيئات الصناعية المعقدة (Goodfellow, Bengio and Courville, 2016؛Russell and Norvig, 2021).

وتغطي تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذا المجال طيفًا واسعًا من الأنظمة والعمليات الصناعية والهندسية، بما يعكس التكامل المتزايد بين النمذجة الفيزيائية والأساليب المعتمدة على البيانات. وفي هذا السياق، يمكن تصنيف هذه التطبيقات ضمن المحاور التالية.

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

6.2.1 التصميم الهندسي والتصنيع الذكي

يمثل التصميم الهندسي والتصنيع الذكي أحد أبرز المجالات التي شهدت تطورًا نوعيًا نتيجة دمج الذكاء الاصطناعي، حيث أصبحت عمليات التصميم والإنتاج تعتمد على النماذج الحسابية والتحسين القائم على البيانات بدلًا من الأساليب التقليدية. وقد أدى ذلك إلى تحسين الأداء الوظيفي للمنتجات، وتقليل استهلاك المواد والطاقة، ورفع كفاءة عمليات التصنيع (Rao, 2018).

يرتكز التصميم التوليدي (Generative Design) على إنتاج عدد كبير من الحلول التصميمية الممكنة انطلاقًا من قيود محددة تتعلق بالأداء والمواد والتكلفة والتصنيع، باستخدام خوارزميات التحسين والتعلم الذكي. ويسهم هذا النهج في استكشاف فضاءات تصميمية واسعة وتوليد هياكل خفيفة الوزن وعالية الكفاءة، خصوصًا في قطاعات الطيران والسيارات والروبوتات.

كما يُستخدم التحسين الطوبولوجي (Topology Optimization) لإعادة توزيع المواد داخل المكونات الهندسية بهدف تحقيق أعلى كفاءة إنشائية وحرارية مع تقليل الكتلة. وقد أدى هذا النهج إلى تطوير مكونات متقدمة تتميز بنسبة أداء إلى وزن مرتفعة، خاصة في التطبيقات عالية المتطلبات. وتُنفذ هذه التقنيات عبر منصات تصميم متقدمة مثل Autodesk Fusion 360 و Siemens NX (Gradišar et al., 2024).

وفي السياق ذاته، برزت التوائم الرقمية (Digital Twins) كنموذج محوري في الصناعة الحديثة، حيث توفر تمثيلًا افتراضيًا ديناميكيًا للأصول الفيزيائية. وتتيح هذه التقنية محاكاة الأداء، والتنبؤ بالأعطال، وتحليل السلوك التشغيلي بالاعتماد على دمج الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء وتحليل البيانات الضخمة (Tao and Qi, 2019؛ Chen et al., 2023).

كما ساهم الذكاء الاصطناعي في دعم منظومة الصناعة 4.0 عبر تحسين التحكم الذاتي، وجدولة الإنتاج، ومراقبة الجودة اللحظية، وتقليل الهدر الصناعي. وقد عززت الروبوتات الذكية والرؤية الحاسوبية عمليات اللحام والتجميع والفحص البصري والمناولة، مما رفع الإنتاجية وسلامة التشغيل (Kusiak, 2018 ؛Lu, 2017). ويدعم ذلك تطور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والتحليل الفوري للبيانات نحو بيئات إنتاج أكثر كفاءة واستدامة (Bolton, 2009).

6.2.2 الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول الصناعية

تُعد الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance) من أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية، حيث تعتمد على تحليل بيانات الحساسات مثل الاهتزاز، ودرجة الحرارة، والضغط، والضوضاء، واستهلاك الطاقة للتنبؤ بالأعطال قبل حدوثها.

تستخدم هذه الأنظمة تقنيات التعلم الآلي والشبكات العصبية لاكتشاف الأنماط غير الطبيعية المرتبطة بتدهور الأداء، مما يتيح التدخل المبكر وتقليل الأعطال المفاجئة (He, Xu and Xu, 2019).

وقد أسهمت هذه المقاربة في:

- تقليل التوقفات غير المخططة
- إطالة العمر التشغيلي للمعدات
- خفض تكاليف الصيانة
- تحسين موثوقية الأنظمة الصناعية

وتشمل التطبيقات الصناعية التوربينات، والمضخات، والضواغط، والمحركات، وأنظمة التبريد وخطوط الإنتاج (Zhang et al., 2017). كما تدعم هذه النماذج التحول من الصيانة التفاعلية إلى الصيانة الاستباقية (Ayub et al., 2023).

6.2.3 الروبوتات والأتمتة والأنظمة المستقلة

أدى تطور الذكاء الاصطناعي إلى تحول الروبوتات من أنظمة تقليدية مبرمجة مسبقًا إلى أنظمة ذكية قادرة على الإدراك والتعلم واتخاذ القرار بصورة مستقلة، الأمر الذي انعكس بشكل مباشر على رفع الكفاءة الإنتاجية وتحسين مستويات السلامة في البيئات الصناعية (Bogue, 2018).

تتطور الروبوتات التعاونية (Cobots) بوصفها جيلًا متقدمًا من الأنظمة المصممة للعمل جنبًا إلى جنب مع الإنسان ضمن بيئات مشتركة وآمنة ومرنة. وتتميز هذه الروبوتات بقدرتها على التعلم من المهام المتكررة، والتكيف مع التغيرات في بيئة العمل، وتحسين مستوى التفاعل بين الإنسان والآلة. كما تتيح تقنيات التعلم من العرض (Learning from Demonstration) إمكانية اكتساب المهام من خلال الملاحظة دون الحاجة إلى برمجة معقدة، مما يرفع مرونة التشغيل ويقلل زمن التطوير.

أما الأنظمة المستقلة، فتشمل المركبات ذاتية القيادة، والطائرات بدون طيار (Drones)، والروبوتات المتنقلة الذكية، والتي تعتمد على الرؤية الحاسوبية، والتعلم العميق، وخوارزميات التحكم الذكي لتحليل البيئة المحيطة واتخاذ قرارات لحظية في الزمن الحقيقي (Huang et al., 2023). وتُوظف هذه الأنظمة في مجالات متعددة تشمل التفتيش الصناعي، والمسح الهندسي، والخدمات اللوجستية، والمراقبة الذكية، والعمليات الصناعية عالية الخطورة.

6.2.4 تطبيقات الذكاء الاصطناعي في قطاع الطاقة

أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الركائز الأساسية لتحديث قطاع الطاقة وتحسين كفاءته التشغيلية وتعزيز استدامته البيئية. وتمتد تطبيقاته عبر مختلف مراحل الإنتاج، والنقل، والتوزيع، والاستهلاك.

وتشمل أبرز التطبيقات:

- الاستخراج المعزز للنفط (EOR) عبر تحليل بيانات المكامن ومحاكاة الأداء الجيولوجي .
- الصيانة الاستباقية للمعدات النفطية ومحطات الطاقة .
- تحسين عمليات الحفر والتحكم التكيفي بالمعدات .
- مراقبة الانبعاثات ودعم معايير الاستدامة البيئية (ESG) .
- تطوير الشبكات الذكية (Smart Grids).
- إدارة الأحمال الكهربائية ودمج مصادر الطاقة المتجددة .

كما تعتمد شركات الطاقة الكبرى على تقنيات التوأم الرقمي لتحسين أداء الأصول الصناعية وتقليل المخاطر التشغيلية، ومن أبرز الشركات التي تبنت هذه التطبيقات (BP, 2024؛ Chevron IEA, 2019).

6.2.5 تحليل الإجهاد والمحاكاة الذكية

أصبحت تقنيات الذكاء الاصطناعي تُستخدم بشكل متزايد في تسريع عمليات التحليل العددي والمحاكاة الهندسية، وخاصة في:

- تحليل العناصر المحددة (FEA) .
- ديناميكا الموائع الحسابية (CFD) .
- التحليل الحراري .
- تحليل الاهتزازات .

وتساعد نماذج التعلم الآلي في تقليل الزمن الحسابي المطلوب للمحاكاة، والتنبؤ بسلوك الأنظمة الميكانيكية تحت ظروف تشغيل مختلفة، وتحسين دقة النماذج الرياضية المعقدة (Shalev-Shwartz and Ben-David, 2014).

كما تُستخدم هذه التقنيات في:

- تصميم المبادلات الحرارية .
- تحسين أداء المحركات .
- تحليل تدفق الموائع .
- تحسين أنظمة الاحتراق والطاقة .

6.2.6 تشخيص الأعطال وتحسين أداء الأنظمة الميكانيكية

أصبح التشخيص الذكي للأعطال عنصرًا محوريًا في تحسين موثوقية وكفاءة الأنظمة الميكانيكية. وتعتمد أنظمة التشخيص الحديثة على استراتيجيات متقدمة تشمل:

- الاستدلال القائم على القواعد (RBR).
- الاستدلال القائم على الحالات (CBR).
- الشبكات العصبية الاصطناعية .
- أنظمة الخبراء .

أولاً: آلية عمل أنظمة التشخيص الذكي

تبدأ عملية التشخيص عبر جمع بيانات التشغيل الحية من أجهزة الاستشعار وربطها بمحرك استدلال ذكي يقوم بتحليل البيانات وتطبيق قواعد المعرفة المخزنة مسبقًا. كما يتم استرجاع الحالات المشابهة السابقة لتحسين دقة التشخيص واتخاذ القرار بصورة ديناميكية.

وقد أدى هذا التكامل إلى:

- تقليل أوقات التوقف .
- تحسين الصيانة الوقائية .
- رفع كفاءة التشغيل الصناعي .

ثانياً: تشخيص الآلات الدوارة والترددية

تُستخدم الشبكات العصبية وخوارزميات الذكاء الاصطناعي في تشخيص أعطال:

- المضخات .

- المراوح .
- المحركات .
- محركات الديزل .
- الضواغط .

ويتم ذلك عبر تحليل:

- الاهتزازات .
- الضوضاء .
- درجات الحرارة .
- تحليل الزيت .
- بيانات الأداء التشغيلي .

مما يسهم في تقليل الأعطال وتحسين موثوقية الأنظمة الصناعية بصورة كبيرة (Shyr et al., 2019).

6.2.7 التطبيقات الصناعية المتخصصة والناشئة

أولاً: التطبيقات الصناعية القطاعية

تشمل التطبيقات القطاعية المتخصصة للذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية ما يلي:

- **صناعة السيارات :**تحسين الديناميكا الهوائية، وتصميم أنظمة الدفع الكهربائية، وسلاسل التجميع الذكية .
- **صناعة الطيران والفضاء :**تطوير هياكل خفيفة الوزن باستخدام التحسين الطوبولوجي، والصيانة التنبؤية للمحركات .
- **الصناعات الثقيلة والتعدين :**استخدام المعدات المستقلة وتحليل البيانات التشغيلية لتحسين الكفاءة .
- **الطاقة المتجددة :**تطوير توربينات رياح ذكية وأنظمة تتبع ذكية للألواح الشمسية .
- **الأجهزة الطبية :**تصميم الأطراف الاصطناعية الذكية والروبوتات الجراحية الدقيقة .

ثانياً: التطبيقات المتقدمة والناشئة

تشمل التطبيقات الناشئة ما يلي:

- الأنظمة الميكاترونية الذكية .
- الأطراف الاصطناعية العصبية والهياكل الخارجية الذكية .
- الأنظمة الدقيقة والنانوميكانيكا .
- المركبات البحرية المستقلة (AUVs).
- الروبوتات الفضائية وأنظمة الهبوط الذاتي .
- التصميم الهندسي المعتمد على المحاكاة المتسارعة والذكاء الاصطناعي .

وتشير الدراسات الحديثة إلى أن هذه التطبيقات تمثل أحد أهم محركات التحول المستقبلي في القطاع الصناعي والهندسي عالميًا.

6.2.8 الذكاء الاصطناعي في هندسة المواد الميكانيكية

يُعد تطبيق الذكاء الاصطناعي في هندسة المواد الميكانيكية أحد أسرع المجالات البحثية نموًا خلال السنوات الأخيرة، حيث أسهم بشكل مباشر في إحداث تحول جذري في أساليب اكتشاف المواد وتصميمها وتحليل خصائصها والتنبؤ بسلوكها. وبدلًا من الاعتماد التقليدي على التجارب المخبرية المطولة ونهج المحاولة والخطأ، أصبح بالإمكان توظيف خوارزميات التعلم الآلي وتحليل البيانات الضخمة لمعالجة كمّ هائل من المعلومات المتعلقة بتركيب المواد وسلوكها الفيزيائي والكيميائي، مما أدى إلى تسريع عمليات التطوير وخفض التكاليف البحثية بشكل ملحوظ (Nature Materials, 2025؛ Materials Genome Initiative).

أولاً: اكتشاف مواد جديدة باستخدام التعلم الآلي

يُعد اكتشاف المواد الجديدة من أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذا المجال، حيث تُستخدم النماذج التنبؤية لتحليل قواعد بيانات ضخمة تحتوي على ملايين التركيبات الكيميائية والبنى البلورية المحتملة، بهدف تحديد المواد الأكثر ملاءمة قبل تصنيعها فعليًا. وقد ساهم ذلك في تسريع تطوير سبائك ومواد متقدمة موجهة لتطبيقات الطاقة والطيران والسيارات، مع تقليص زمن الاكتشاف من سنوات طويلة إلى أسابيع أو أشهر فقط (Materials Genome Initiative, 2024).

ثانياً: التنبؤ بالخصائص الميكانيكية للمواد

أصبح الذكاء الاصطناعي أداة فعّالة للتنبؤ بالخصائص الميكانيكية للمواد دون الحاجة إلى إجراء عدد كبير من الاختبارات التجريبية، حيث يمكن نمذجة العلاقة بين التركيب الكيميائي والبنية المجهرية والخواص النهائية باستخدام تقنيات التعلم العميق والشبكات العصبية. وتشمل هذه الخصائص مقاومة الشد، ومقاومة الخضوع، والصلادة، والمتانة، ومعامل المرونة، ومقاومة التعب، مما يساهم في تسريع عملية اختيار المواد المناسبة للتطبيقات الهندسية المختلفة (Elsevier Materials Today, 2025).

ثانياً: تصميم السبائك المتقدمة والمواد المركبة

أصبح الذكاء الاصطناعي عنصرًا أساسيًا في تصميم السبائك المتقدمة والمواد المركبة، من خلال استكشاف فضاءات تصميمية واسعة وتحديد التركيبات التي تحقق أفضل توازن بين الوزن والقوة والمتانة. وتكتسب هذه التطبيقات أهمية خاصة في قطاعات الطيران والسيارات والطاقة، نظرًا لحاجة هذه الصناعات إلى مواد خفيفة وعالية الأداء وقادرة على العمل في ظروف تشغيل قاسية. كما أسهم هذا التوجه في تطوير سبائك عالية الإنتروبيا ومواد ذكية قادرة على التكيف مع التغيرات البيئية والتشغيلية (Nature Reviews Materials, 2025).

ثالثاً: تحسين مقاومة التآكل والإجهاد والحرارة

تُعد ظواهر التآكل والإجهاد الميكانيكي والتدهور الحراري من أهم أسباب فشل المواد الهندسية. وفي هذا السياق، تُستخدم نماذج الذكاء الاصطناعي لتحليل هذه الظواهر والتنبؤ بسلوك التدهور خلال العمر التشغيلي للمادة. كما تُسهم خوارزميات التعلم الآلي في تطوير مواد أكثر مقاومة للبيئات القاسية، وتحسين الطلاءات الواقية، واختيار التركيبات المثلى التي تعزز المتانة والاعتمادية، مما ينعكس على إطالة عمر المعدات وتقليل تكاليف الصيانة.

رابعاً: الاختبارات الافتراضية للمواد

يمثل التحول نحو الاختبارات الافتراضية المدعومة بالذكاء الاصطناعي أحد أهم التطورات الحديثة، حيث يتم دمج النماذج التنبؤية مع المحاكاة الرقمية والتوائم الرقمية للمواد لتقييم الأداء قبل التصنيع الفعلي. وتتيح هذه المنهجية تنفيذ عدد كبير من السيناريوهات في وقت قصير، مما يقلل الحاجة إلى النماذج الأولية المكلفة ويسرّع عمليات البحث والتطوير ونقل الابتكارات إلى التطبيقات الصناعية (McKinsey & Company, 2025).

خامساً: مبادرة الجينوم المادي والمواد القائمة على البيانات

ساهمت مبادرة الجينوم المادي في تعزيز التحول نحو هندسة المواد القائمة على البيانات، حيث يتم توظيف الذكاء الاصطناعي والمحاكاة الحاسوبية وقواعد البيانات الضخمة لتسريع اكتشاف المواد وتحسين خصائصها. ويعتمد هذا التوجه على استبدال المنهجيات التجريبية التقليدية بأساليب تحليل بيانات متقدمة تتيح تصميم مواد أكثر كفاءة وابتكارًا.

سادساً: التوجهات المستقبلية

تشير الاتجاهات الحديثة إلى أن مستقبل هندسة المواد سيتجه نحو تطوير مواد مصممة بالكامل بالذكاء الاصطناعي، وتوائم رقمية للمواد، ومختبرات ذاتية التشغيل، ومواد ذاتية الإصلاح، ومنصات اكتشاف تعتمد على الذكاء الاصطناعي التوليدي. وبذلك يمثل الذكاء الاصطناعي نقلة نوعية في هذا المجال، من خلال تسريع دورة تطوير المواد، وتحسين دقة التنبؤ بخصائصها، ودعم تطوير مواد أكثر استدامة وكفاءة بما يتماشى مع متطلبات الصناعة الحديثة.

6.2.9 الذكاء الاصطناعي في التحكم الذكي والأنظمة الديناميكية

يمثل الذكاء الاصطناعي أحد أهم الركائز التقنية في تطوير أنظمة التحكم الحديثة، إذ أسهم في الانتقال من أنظمة التحكم التقليدية المعتمدة على النماذج الرياضية الثابتة إلى أنظمة ذكية قادرة على التعلم والتكيف واتخاذ القرار بشكل ذاتي في البيئات التشغيلية المعقدة والمتغيرة. وقد ازدادت أهمية هذا التحول مع التوسع في تطبيقات الصناعة الذكية (Industry 4.0) ، والأنظمة السيبرانية الفيزيائية (Cyber-Physical Systems) ، والروبوتات الصناعية، وأنظمة الطاقة المتقدمة، التي تتطلب مستويات عالية من الاستقلالية والمرونة التشغيلية (IEEE Control Systems Society, 2025; IFAC, 2024).

ويعتمد هذا المجال على مجموعة من تقنيات الذكاء الاصطناعي، أبرزها التعلم الآلي، والتعلم العميق، والتعلم المعزز، والشبكات العصبية الاصطناعية، إضافة إلى تقنيات التحسين الرياضي والتحكم التنبؤي، بهدف بناء أنظمة قادرة على التعامل مع عدم اليقين والتغيرات الديناميكية في الزمن الحقيقي.

أولاً: التحكم التنبؤي القائم على النماذج

يُعد التحكم التنبؤي (Model Predictive Control) من أكثر استراتيجيات التحكم تطورًا في التطبيقات الصناعية، حيث يعتمد على بناء نموذج رياضي للنظام واستخدامه للتنبؤ بالسلوك المستقبلي ضمن أفق زمني محدد، ثم اختيار الإجراء الأمثل الذي يحقق الأهداف التشغيلية ضمن القيود المفروضة.

وقد عزز دمج الذكاء الاصطناعي مع هذا النوع من التحكم قدرة الأنظمة على التعامل مع العمليات غير الخطية والبيئات الديناميكية المعقدة، من خلال تطوير نماذج تنبؤية تعتمد على التعلم الآلي بدلًا من النماذج الفيزيائية التقليدية فقط. وتُستخدم هذه التقنيات على نطاق واسع في الصناعات الكيميائية، ومحطات الطاقة، وأنظمة التكييف والتبريد، وشبكات الطاقة الذكية (Qin & Badgwell, 2024).

ثانياً: التحكم التكيفي الذكي

يواجه التحكم في الأنظمة الصناعية الحديثة تحديات ناتجة عن تغير ظروف التشغيل وخصائص المعدات، مما يحد من كفاءة أنظمة التحكم التقليدية الثابتة. ومن هنا ظهر مفهوم التحكم التكيفي الذكي، الذي يسمح بتحديث معلمات التحكم بصورة ديناميكية اعتمادًا على البيانات التشغيلية المستمرة.

وتُستخدم تقنيات التعلم الآلي والشبكات العصبية في تحديث نماذج التحكم بشكل مستمر، بما يضمن الحفاظ على الأداء الأمثل رغم تغير الأحمال أو الظروف البيئية أو خصائص النظام، خصوصًا في الأنظمة التي يصعب نمذجتها رياضيًا بدقة عالية.

ثالثاً: التعلم المعزز والتحكم الذاتي

يُعد التعلم المعزز (Reinforcement Learning – RL) أحد أكثر فروع الذكاء الاصطناعي تقدمًا في مجال التحكم الذكي، حيث يتعلم النظام من خلال التفاعل المباشر مع البيئة، ويطوّر استراتيجياته اعتمادًا على المكافآت والعقوبات الناتجة عن قراراته السابقة. ويمكّن هذا النهج من تطوير أنظمة قادرة على اتخاذ قرارات تحكم ذاتية في بيئات معقدة وغير مؤكدة دون الحاجة إلى نموذج رياضي دقيق. وقد أثبت فعاليته في الروبوتات المتقدمة، والمركبات ذاتية القيادة، والطائرات بدون طيار، وأنظمة التصنيع المرنة، وإدارة الشبكات الذكية (DeepMind, 2025).

رابعاً: التحكم في المحركات والتوربينات

يُعد التحكم الذكي في المحركات الكهربائية والتوربينات من أكثر التطبيقات الصناعية شيوعًا، حيث تُستخدم النماذج الذكية لتحسين كفاءة التشغيل، وخفض استهلاك الطاقة، وتحسين الاستجابة الديناميكية.

كما تُستخدم خوارزميات التعلم الآلي في التنبؤ بالأعطال، وتحسين التحكم في السرعة والعزم، وتقليل الاهتزازات وعدم الاستقرار التشغيلي. وتشمل التطبيقات توربينات الرياح والغاز والبخار، بما يساهم في رفع كفاءة إنتاج الطاقة وإطالة العمر التشغيلي للمعدات (Siemens Energy, 2025).

خامساً: التحكم في العمليات الصناعية المعقدة

تعتمد الصناعات الحديثة على عمليات متعددة المتغيرات تتسم بالتداخل وعدم الخطية، كما هو الحال في الصناعات الكيميائية والبتروكيماوية والنفط والغاز والمعادن. وفي هذه البيئات، يصبح اتخاذ القرار التحكمي الأمثل في الزمن الحقيقي تحديًا معقدًا.

- ولهذا تُستخدم أنظمة الذكاء الاصطناعي لتحقيق ما يلي:
- مراقبة العمليات الصناعية بشكل مستمر.
- التنبؤ بالانحرافات التشغيلية قبل حدوثها.
- تحسين جودة المنتجات.
- تقليل استهلاك الطاقة والمواد الخام.
- دعم اتخاذ القرار في الزمن الحقيقي.

وقد أسهم ذلك في تحسين استقرار العمليات ورفع الكفاءة التشغيلية والسلامة الصناعية (ABB, 2025; Honeywell, 2025).

سادساً: التكامل مع التوائم الرقمية والأنظمة السيبرانية الفيزيائية

شهدت أنظمة التحكم الذكي تطورًا كبيرًا عبر دمجها مع التوائم الرقمية (Digital Twin) والأنظمة السيبرانية الفيزيائية، حيث يتم إنشاء نماذج رقمية تحاكي السلوك الحقيقي للأنظمة الفيزيائية بصورة مستمرة.

ويتيح هذا التكامل محاكاة السيناريوهات التشغيلية، واختبار استراتيجيات التحكم قبل تطبيقها فعليًا، مما يسهم في تقليل المخاطر وتحسين الأداء. كما يمثل خطوة أساسية نحو بناء أنظمة ذاتية التشغيل قادرة على التعلم المستمر واتخاذ القرار بشكل مستقل.

سابعاً: الاتجاهات المستقبلية

- تشير الأدبيات الحديثة إلى أن مستقبل التحكم الذكي يتجه نحو:
- أنظمة تحكم ذاتية التعلم.
- التحكم المعتمد على الذكاء الاصطناعي التوليدي.

- الوكلاء الذكيون المستقلون.
- التحكم الموزع في الأنظمة واسعة النطاق.
- المصانع ذاتية التشغيل.
- الأنظمة الصناعية المعرفية.

وبذلك أصبح الذكاء الاصطناعي يشكل الأساس التقني للجيل القادم من أنظمة التحكم، من خلال تمكين الأنظمة من التعلم والتكيف والتنبؤ واتخاذ القرار بشكل ذاتي، بما يعزز الكفاءة والاعتمادية والاستدامة في البيئات الصناعية المعقدة.

6.2.10 الذكاء الاصطناعي في الفحص غير الإتلافي

يُعد الفحص غير الإتلافي (Non-Destructive Testing) أحد الركائز الأساسية في الهندسة الميكانيكية، إذ يُستخدم لتقييم سلامة المكونات والمنشآت الهندسية وكشف العيوب دون التسبب بأي ضرر مادي أو التأثير على صلاحية التشغيل. ومع التطور المتسارع في تقنيات الذكاء الاصطناعي، انتقل هذا المجال من الاعتماد على الخبرة البشرية والتقييم اليدوي إلى أنظمة ذكية قادرة على تحليل البيانات والصور بشكل آلي ودقيق، مما أسهم في رفع موثوقية النتائج وتقليل الأخطاء وتحسين كفاءة عمليات الفحص (ASNT, 2025; ISO, 2024).

ويعتمد الذكاء الاصطناعي في هذا المجال على مجموعة من التقنيات المتقدمة، تشمل التعلم الآلي، والتعلم العميق، ورؤية الحاسوب، والشبكات العصبية الالتفافية (CNNs) ، وتحليل الصور الرقمية، بهدف الكشف المبكر عن العيوب والتنبؤ بحالة المكونات الصناعية قبل حدوث الفشل.

أولاً: تحليل صور الأشعة السينية

يُعد الفحص بالأشعة السينية (Radiographic Testing – RT) من أكثر تقنيات الفحص غير الإتلافي استخدامًا في التطبيقات الصناعية. وقد أسهم الذكاء الاصطناعي في تطوير نماذج قادرة على تحليل الصور الشعاعية تلقائيًا للكشف عن العيوب الداخلية مثل الفراغات، والشقوق، والمسامية، وعدم التجانس البنيوي في المواد.

وتتميز نماذج التعلم العميق بقدرتها على اكتشاف أنماط دقيقة يصعب ملاحظتها بالطرق التقليدية، مما يؤدي إلى رفع دقة التشخيص، وتقليل زمن الفحص، وزيادة موثوقية تقييم الجودة (Materials Evaluation Journal, 2025).

ثانياً: الفحص الآلي للحامات

تُعد مناطق اللحام من أكثر المناطق عرضة لظهور العيوب في المنشآت الصناعية، لذلك يتم استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل صور وفيديوهات اللحام بهدف الكشف عن عيوب مثل:

- عدم الانصهار (Lack of Fusion).
- الشقوق (Cracks).
- المسامية (Porosity).
- الاختراق غير الكامل (Incomplete Penetration).
- التضمينات الخبثية (Slag Inclusions).

وتسهم تقنيات رؤية الحاسوب في أتمتة عمليات الفحص أثناء أو بعد التصنيع، مما يقلل الاعتماد على الفحص اليدوي، ويرفع مستوى الجودة والاعتمادية، خصوصًا في الصناعات الحرجة مثل النفط والغاز والطاقة والطيران (AWS, 2025).

ثالثاً: اكتشاف الشقوق والتآكل

يُستخدم الذكاء الاصطناعي على نطاق واسع في كشف الشقوق (Crack Detection) ومراقبة التآكل (Corrosion Monitoring) في المكونات الميكانيكية والبنى التحتية الصناعية. وتعتمد هذه التطبيقات على تحليل الصور الرقمية أو بيانات الحساسات أو الموجات فوق الصوتية للكشف المبكر عن العيوب قبل تطورها إلى حالات فشل حرجة.

وقد أثبتت خوارزميات التعلم العميق قدرة عالية على اكتشاف العيوب الدقيقة التي يصعب رصدها بالطرق التقليدية، مما يساهم في تعزيز الصيانة التنبؤية وإطالة العمر التشغيلي للأصول الهندسية (Elsevier Engineering Failure Analysis, 2025).

رابعاً: تحليل الصور الحرارية

يشكل الفحص الحراري (Infrared Thermography) أحد أهم تطبيقات الفحص غير الإتلافي الحديثة، حيث يتم استخدام الكاميرات الحرارية لرصد التوزيع الحراري للمكونات والأنظمة. ويقوم الذكاء الاصطناعي بتحليل هذه الصور لاكتشاف الأنماط غير الطبيعية المرتبطة بوجود أعطال داخلية أو خلل تشغيلي.

وتشمل التطبيقات:

- كشف الأعطال في المعدات الكهربائية.
- تشخيص أعطال المحركات.
- تقييم العزل الحراري.
- فحص المواد المركبة.
- مراقبة المعدات الدوارة.

كما تسهم النماذج الذكية في تحسين تفسير الصور الحرارية وتقليل الاعتماد على الخبرة البشرية المتخصصة (IEEE Access, 2025).

خامساً: فحص المواد المركبة باستخدام الرؤية الحاسوبية

مع التوسع في استخدام المواد المركبة (Composite Materials) في صناعات الطيران والسيارات والطاقة، أصبحت الحاجة ملحة إلى تقنيات فحص دقيقة قادرة على اكتشاف العيوب الداخلية والخارجية.

وفي هذا السياق، تُستخدم تقنيات رؤية الحاسوب والتعلم العميق لتحليل الصور الناتجة عن الأشعة السينية أو الموجات فوق الصوتية أو التصوير البصري بهدف اكتشاف:

- الانفصال الطبقي (Delamination).
- الفراغات الداخلية (Voids).
- التشققات الدقيقة.
- عيوب التصنيع.
- مناطق الضعف البنيوي.

ويؤدي ذلك إلى رفع موثوقية المكونات المركبة المستخدمة في التطبيقات الهندسية عالية الأداء (Composites Science and Technology, 2025).

سادساً: التكامل مع الصيانة التنبؤية والتوأم الرقمي

تشهد تطبيقات الفحص غير الإتلافي تطورًا متسارعًا من خلال دمجها مع الصيانة التنبؤية والتوائم الرقمية(Digital Twin) ، حيث تُستخدم نتائج الفحص لتحديث النماذج الرقمية للأصول وتحسين التنبؤ بسلوكها المستقبلي.

ويسمح هذا التكامل بالانتقال من الفحص الدوري التقليدي إلى المراقبة الذكية المستمرة، مما يعزز كفاءة إدارة الأصول ويقلل من مخاطر الأعطال المفاجئة والتوقفات غير المخططة (Siemens Digital Industries, 2025).

سابعاً: الاتجاهات المستقبلية

تشير الأدبيات الحديثة إلى أن مستقبل الفحص غير الإتلافي يتجه نحو:

- أنظمة فحص ذاتية التشغيل.
- الطائرات بدون طيار للفحص الذكي.
- روبوتات الفحص الصناعية.
- التوائم الرقمية للفحص والصيانة.
- الفحص المعتمد على الذكاء الاصطناعي التوليدي.
- أنظمة التحليل الفوري في الزمن الحقيقي (Real-Time NDT Analytics).

وبذلك أصبح الذكاء الاصطناعي يمثل تحولًا جذريًا في مجال الفحص غير الإتلافي، من خلال الانتقال من الاعتماد على التقييم البشري إلى أنظمة ذكية قادرة على التعلم والتحليل والتنبؤ، مما يسهم في رفع مستويات السلامة والجودة والاعتمادية في الأنظمة الصناعية الحديثة.

6.2.11 الذكاء الاصطناعي في الهندسة الحرارية وأنظمة التبريد والتكييف

يُعد الذكاء الاصطناعي من التقنيات المحورية في تطوير أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء(HVAC) ، حيث أسهم في تحسين كفاءة الطاقة ورفع الأداء التشغيلي وتقليل الانبعاثات. وتبرز أهمية هذا المجال نظراً لأن أنظمة HVAC تمثل جزءاً كبيراً من استهلاك الطاقة في المباني (IEA, 2025; ASHRAE, 2025).

أولاً: تحسين أداء أنظمة التكييف

يُستخدم الذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات التشغيل وتحديد الظروف المثلى للعمل، مع القدرة على التكيف الديناميكي مع الظروف البيئية وأنماط الإشغال، مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الراحة الحرارية.

ثانياً: إدارة الأحمال الحرارية

تُستخدم نماذج التعلم الآلي للتنبؤ بالأحمال الحرارية اعتماداً على بيانات الطقس والاستخدام، مما يساعد في تحسين التخطيط التشغيلي وتحقيق توازن بين الكفاءة الطاقية وجودة الأداء الحراري (Energy and Buildings Journal, 2025).

ثالثاً: التحكم الذكي بالطاقة

يسهم الذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة داخل المباني الذكية من خلال تحسين تشغيل أنظمة التبريد والتدفئة بشكل لحظي، وتقليل استهلاك الطاقة عبر تحليل البيانات التاريخية والفورية (IEA, 2025).

رابعاً: الصيانة التنبؤية

يُستخدم الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأعطال في أنظمة HVAC مثل أعطال الضواغط وتسربات المبردات وتدهور كفاءة المبادلات الحرارية، مما يقلل التوقفات غير المخطط لها ويخفض تكاليف الصيانة (McKinsey & Company, 2025).

خامساً: تحسين المبادلات الحرارية

تساعد النماذج الذكية في تحليل انتقال الحرارة واكتشاف ظواهر الترسّب (Fouling) وتحسين جداول التشغيل والصيانة، مما يرفع الكفاءة الحرارية ويقلل استهلاك الطاقة (Applied Thermal Engineering, 2025).

سادساً: التوائم الرقمية والاستدامة

يسهم دمج التوائم الرقمية في تحسين إدارة الأنظمة الحرارية من خلال المحاكاة والتنبؤ بالأداء، مما يدعم تحقيق أهداف المباني صفرية الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية (UNEP, 2025).

سابعاً: الاتجاهات المستقبلية

يتجه هذا المجال نحو أنظمة HVAC ذاتية التعلم، ومبانٍ ذكية مستقلة حرارياً، وشبكات طاقة حرارية حضرية ذكية، وأنظمة تبريد منخفضة الكربون مدعومة بالذكاء الاصطناعي.

6.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

تعتمد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية على مجموعة واسعة من التقنيات والخوارزميات المتقدمة التي تُستخدم في التصميم والتصنيع والتشغيل والصيانة وإدارة الأصول الصناعية. وتختلف التقنية المستخدمة باختلاف طبيعة التطبيق الهندسي، والبيانات المتاحة ،ومتطلبات الأداء والدقة. ويوضح الجدول التالي أبرز التقنيات المستخدمة في المجالات الميكانيكية المختلفة:

جدول (6.1) . أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات الهندسة الميكانيكية

مجال التطبيق	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة
التصميم الهندسي والتصنيع الذكي	الذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI)، الخوارزميات الجينية (GA)، التحسين الطوبولوجي (Topology Optimization)، التعلم الآلي (ML)
الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول	التعلم الآلي، الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، تحليل السلاسل الزمنية، كشف الشذوذ (Detection Anomaly)
الروبوتات والأتمتة والأنظمة المستقلة	التعلم المعزز (RL)، التعلم العميق (DL)، الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)، دمج المستشعرات (Sensor Fusion)
التوائم الرقمية والأنظمة السيبرانية الفيزيائية	التوائم الرقمية (Twins Digital)، إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)، التحليلات التنبؤية
تحليل الإجهاد والمحاكاة الهندسية	التعلم الآلي، الشبكات العصبية العميقة، النماذج البديلة (Surrogate Models)
قطاع الطاقة والأنظمة الحرارية	التعلم العميق (DL)، التعلم المعزز، التوائم الرقمية، التحليلات التنبؤية
تشخيص الأعطال والأنظمة الميكانيكية	الشبكات العصبية، أنظمة الخبراء (Expert Systems)، الاستدلال القائم على الحالات (CBR)
المركبات والأنظمة المستقلة	الرؤية الحاسوبية، التعلم العميق، التعلم المعزز، دمج المستشعرات
الأنظمة الميكاترونية الذكية	التعلم الآلي، التحكم التكيفي الذكي، الأنظمة المدمجة الذكية
الفحص غير الإتلافي (NDT)	الرؤية الحاسوبية، التعلم العميق (CNNs)، تحليل الصور، كشف العيوب (Defect Detection)
الهندسة الحرارية وأنظمة HVAC	التعلم الآلي، التحليلات التنبؤية، التوائم الرقمية، التعلم المعزز

المصدر: الأدبيات العلمية المنشورة في مجلات Journal of Manufacturing Systems و Mechanical Systems and Signal Processing و Engineering Applications of Artificial Intelligence و Robotics and Computer-Integrated Manufacturing).

6.3.1 التقنيات الأكثر استخداماً في الهندسة الميكانيكية

يمكن تصنيف التقنيات الأساسية المستخدمة في معظم تطبيقات الهندسة الميكانيكية وفق الترتيب الآتي:

1. **التعلم الآلي (Machine Learning)**: يُستخدم في التنبؤ بالأعطال وتحليل البيانات التشغيلية وتحسين الأداء الصناعي.
2. **التعلم العميق (Deep Learning)** : يُستخدم في تحليل الصور الصناعية، والرؤية الحاسوبية، وتشخيص الأعطال المعقدة.
3. **الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)** : تُستخدم في فحص الجودة الآلي، ومراقبة خطوط الإنتاج، والروبوتات الصناعية.
4. **التعلم المعزز (Reinforcement Learning)** : يُستخدم في التحكم الذاتي للروبوتات وتحسين العمليات الصناعية المعقدة.
5. **الخوارزميات الجينية والتحسين التطوري (Evolutionary Algorithms)** : تُستخدم في التصميم التوليدي والتحسين الطوبولوجي للمكونات والأنظمة الميكانيكية.
6. **التوائم الرقمية (Digital Twins)** : تُستخدم لمحاكاة الأنظمة الميكانيكية ومراقبة أدائها والتنبؤ بالأعطال في الزمن الحقيقي.
7. **الأنظمة الخبيرة (Expert Systems)** : تُستخدم في تشخيص الأعطال ودعم اتخاذ القرار الهندسي وإدارة الصيانة.
8. **إنترنت الأشياء الصناعي (Industrial IoT)** : يُستخدم في جمع البيانات من المعدات والآلات وربطها بمنصات الذكاء الاصطناعي للتحليل اللحظي.

6.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

تشهد الهندسة الميكانيكية تحولًا رقميًا متسارعًا نتيجة التوسع في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي عبر مختلف مراحل دورة حياة المنتج(Product Lifecycle Management – PLM) ، بدءًا من التصميم والنمذجة الهندسية، مرورًا بالمحاكاة والتحليل العددي، وانتهاءً بعمليات التصنيع الذكي، واختيار المواد، وإدارة المعرفة الهندسية، والروبوتات الصناعية. وقد أسهم هذا التحول في انتقال الممارسات الهندسية من النماذج التقليدية المعتمدة على الحسابات الحتمية إلى بيئات رقمية ذكية تستفيد من التعلم الآلي، والتعلم العميق، والتحليلات التنبؤية، بما يتيح تطوير منتجات أكثر كفاءة، وتحسين الأداء الهندسي، وتقليل زمن التصميم والتطوير (Jiang et al., 2021; Wuest et al., 2016).

ويبين الجدول (6.2) أن أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية يمكن تصنيفها ضمن **خمسة محاور رئيسية مترابطة،** تشمل: التصميم والنمذجة الهندسية، والمحاكاة والتحليل الهندسي، والتصنيع الذكي، واختيار المواد وإدارة المعرفة الهندسية، والروبوتات والأتمتة الصناعية. ويعكس هذا التصنيف التكامل الوظيفي بين هذه الأدوات في دعم دورة حياة المنتج، وتحسين جودة التصميم، ورفع كفاءة العمليات الهندسية والإنتاجية .يركز **المحور الأول، التصميم والنمذجة الهندسية (CAD / Generative Design)**، على الأدوات التي توظف التصميم التوليدي، والنمذجة البارامترية، والمساعدات الذكية في تطوير النماذج الهندسية، مثل Zoo Design Studio و Adam CADو nTopologyو MecAgent. وتتيح هذه الأدوات تحويل المتطلبات التصميمية إلى نماذج هندسية قابلة للتطوير والتصنيع، مع أتمتة العديد من المهام الروتينية، وتحسين الطوبولوجيا، وإنتاج هياكل خفيفة وعالية

الأداء، بما يسهم في تقليص دورة التصميم، ورفع الإنتاجية، وتعزيز جودة الحلول الهندسية .أما **المحور الثاني، المحاكاة والتحليل الهندسي (CAE / CFD / FEA)** ، فيضم منصات متقدمة مثل Neural Concept و SimScaleو Ansysو Altair، والتي تستفيد من تقنيات التعلم العميق والمحاكاة متعددة الفيزياء لتحليل السلوك الإنشائي والحراري وديناميكا الموائع. وتسهم هذه الأدوات في تسريع عمليات المحاكاة الرقمية، وتحسين دقة التنبؤ بالأداء الهندسي، وتقليل الزمن اللازم لإجراء التحليلات التقليدية، مما يدعم اتخاذ قرارات تصميمية أكثر كفاءة خلال مراحل تطوير المنتجات .ويمثل **المحور الثالث، التصنيع الذكي (CAM / DFM)** ، أحد أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في البيئات الصناعية، حيث يشمل منصات مثل CloudNC CAM Assist و Xometry وFictiv، التي تعتمد على الأتمتة وتحليل البيانات لتوليد مسارات التشغيل لماكينات التحكم الرقمي (CNC) ، وتحليل قابلية التصنيع، وربط التصميم بسلاسل التوريد الرقمية. وتسهم هذه الأدوات في تحسين كفاءة الإنتاج، وتقليل زمن البرمجة، وتسريع عمليات تطوير المنتجات، وتعزيز المرونة الصناعية والاستجابة لمتطلبات السوق.ويختص **المحور الرابع، اختيار المواد وإدارة المعرفة الهندسية،** بالأدوات التي تدعم اتخاذ القرارات الفنية من خلال تحليل خصائص المواد وإدارة المعرفة المؤسسية، مثل Materials Project و Leo AIو HOOPS Visualize وتوفر هذه المنصات قواعد بيانات متقدمة للمواد الهندسية، وأدوات للبحث الذكي في المعرفة الفنية، وإمكانات لعرض وتحليل النماذج ثلاثية الأبعاد، بما يساعد المهندسين على اختيار المواد المناسبة، وتحسين إعادة استخدام النماذج التصميمية، وتسريع الوصول إلى الخبرات والمعارف المتخصصة داخل المؤسسات الصناعية .أما **المحور الخامس، الروبوتات والأتمتة الصناعية،** فيشمل أنظمة الروبوتات الذكية التي تقدمها شركات مثل ABB Robotics و FANUCوKUKA، والتي تُستخدم في تنفيذ عمليات التجميع، واللحام، والمناولة، والفحص، وأتمتة خطوط الإنتاج. وتمتاز هذه الأنظمة بقدرتها على رفع الإنتاجية، وتحسين جودة العمليات الصناعية، وتعزيز السلامة المهنية، وزيادة مرونة خطوط الإنتاج، بما يدعم توجهات المصانع الذكية ويعزز القدرة التنافسية للقطاع الصناعي .وتؤكد هذه المنظومة أن القيمة الحقيقية للذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية لا تتمثل في استخدام أدوات مستقلة، وإنما في تحقيق التكامل بين التصميم التوليدي، والمحاكاة الرقمية، والتصنيع الذكي، وإدارة المعرفة الهندسية، والروبوتات الصناعية ضمن بيئة هندسية رقمية موحدة.

جدول (6.2). أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

المحور الرئيسي	الأداة / المنصة	الفئة التقنية	الوظائف والخصائص الرئيسية	التطبيقات الهندسية	الأثر التشغيلي
أولاً: التصميم والنمذجة الهندسية (CAD / Generative Design)	Zoo Design Studio	تصميم توليدي مدعوم بالذكاء الاصطناعي	تصميم ميكانيكي عبر واجهة محادثة + توليد نماذج	تصميم الأجزاء والأنظمة الميكانيكية	تسريع دورة التصميم وتحسين الإنتاجية
	Adam CAD	تصميم توليدي لغوي	تحويل المتطلبات النصية إلى نماذج بارامترية	التصميم المفاهيمي والتفصيلي	تقليل الفجوة بين المتطلبات والتصميم
	nTopology	نمذجة ضمنية وتحسين هندسي	تصميم هياكل خفيفة وتحسين الطوبولوجيا	الطيران والأجهزة الطبية والمكونات المتقدمة	تحسين الأداء وتقليل الوزن
	MecAgent	مساعد CAD ذكي	أتمتة الرسومات والتكامل مع CAD	أعمال التصميم الروتينية	رفع الإنتاجية وتقليل الأعمال المتكررة
ثانياً: المحاكاة والتحليل الهندسي (CAE / CFD / FEA)	Neural Concept	تعلم عميق هندسي	التنبؤ بنتائج CFD/FEA وتسريع التحليل	الطيران والمركبات والهياكل	تقليل زمن المحاكاة وتحسين الدقة
	SimScale	محاكاة سحابية	عبر السحابة FEAو CFD	ديناميكا الموائع والهياكل	تسهيل الوصول وتقليل التعقيد
	Ansys	منصة تحليل هندسي	تحليل حراري وإنشائي متقدم + أدوات مساعدة ذكية	الهندسة الميكانيكية والإنشائية	تحسين دقة التحليل وتسريع القرار
	Altair	منصة محاكاة هندسية	تحسين التصميم ومحاكاة متعددة الفيزياء	الأنظمة الميكانيكية المتقدمة	رفع جودة التصميم وتقليل الزمن
ثالثاً: التصنيع الذكي (CAM / DFM)	CloudNC CAM Assist	تصنيع ذكي	توليد مسارات CNC تلقائياً	التشغيل الصناعي والتصنيع الدقيق	تقليل زمن البرمجة وزيادة الكفاءة
	Xometry	منصة تصنيع رقمية	تحليل قابلية التصنيع والتسعير الفوري	التصنيع حسب الطلب	تحسين قرارات الإنتاج
	Fictiv	تصنيع رقمي	ربط التصميم بسلاسل التوريد + DFM	التصنيع السريع	تسريع تطوير المنتج
رابعاً: اختيار المواد وإدارة المعرفة الهندسية	Materials Project	قاعدة بيانات مواد ذكية	تحليل خصائص المواد وتوصيات تصميمية	اختيار المواد الهندسية	تحسين الأداء وخفض التكلفة
	Leo AI	مساعد هندسي مؤسسي	البحث في المعرفة الداخلية والإجابة التقنية	إدارة المعرفة الهندسية	تسريع الوصول للخبرات
	HOOPS Visualize	عرض وتحليل CAD	عرض النماذج ثلاثية الأبعاد والبحث فيها	إدارة بيانات التصميم	تحسين إعادة استخدام النماذج
خامساً: الروبوتات والأتمتة الصناعية	ABB Robotics	روبوتات صناعية	التجميع واللحام والفحص الآلي	المصانع الذكية	رفع الإنتاجية والسلامة
	FANUC	روبوتات صناعية	أتمتة خطوط الإنتاج	التصنيع الصناعي	تحسين الكفاءة التشغيلية
	KUKA	روبوتات صناعية	أتمتة التجميع والتصنيع	الصناعة الثقيلة	تعزيز المرونة الصناعية

المصدر: الاعتماد على البيانات الرسمية والمواصفات التقنية الصادرة عن الشركات المطوّرة للبرمجيات والمنصات التالية: Ansys، SimScale، Altair، nTopology، Neural Concept، CloudNC CAM Assist، Xometry، Fictiv، Materials Project، HOOPS Visualize، Leo AI، إضافة إلى الشركات الصناعية ABB، FANUC، KUKA،

فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

الذكاء الاصطناعي يطور التصميم، يحسن الأداء، يقلل التكاليف، ويدعم الاستدامة الصناعية

الفوائد التقنية

تقليل الأخطاء البشرية

تساهم أنظمة الأتمتة والتحليل الذكي في تقليل الأخطاء الناتجة عن العمليات اليدوية والحسابات المعقدة، مما يرفع موثوقية الأنظمة الميكانيكية وجودة الأداء الصناعي.

رفع كفاءة الأنظمة

تُستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين أداء الأنظمة الميكانيكية مثل أنظمة التبريد، الضخ، التهوية، والضاغط، مما يرفع كفاءتها ويقلل استهلاك الطاقة.

تحسين دقة التصميم

تساعد خوارزميات الذكاء الاصطناعي وتقنيات التصميم التوليدي والمحاكاة الذكية في تطوير تصاميم ميكانيكية أكثر دقة وكفاءة، مع القدرة على تحليل عدد كبير من البدائل التصميمية خلال وقت قصير.

الفوائد الاقتصادية

تقليل الأعطال

تعتمد تطبيقات الصيانة التنبؤية على تحليل بيانات المستشعرات للكشف المبكر عن الأعطال المحتملة، مما يقلل تكاليف الصيانة الطارئة والخسائر الناتجة عن توقف المعدات.

تحسين كفاءة التشغيل

تتيح التحليلات التنبؤية والأنظمة الذكية تحسين إدارة العمليات التشغيلية وتقليل الفاقد ورفع كفاءة المعدات والموارد.

تقليل تكاليف الإنتاج

تساعد أنظمة التصنيع الذكي والتحكم الآلي في تقليل استهلاك المواد والطاقة وتحسين كفاءة خطوط الإنتاج، مما يخفض تكاليف التصنيع.

الفوائد التشغيلية

رفع الإنتاجية

تسهم الأتمتة الصناعية والروبوتات الذكية في زيادة سرعة العمليات وتحسين كفاءة خطوط الإنتاج، مما يؤدي إلى رفع الإنتاجية الصناعية بصورة ملحوظة.

تقليل التوقفات غير المخططة

تُمكن تطبيقات الصيانة الذكية من التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها، مما يقلل من التوقفات المفاجئة ويحسن استمرارية الإنتاج.

تحسين موثوقية المعدات

تساعد أنظمة المراقبة الذكية في متابعة حالة المعدات وتحليل أدائها بصورة مستمرة، مما يرفع موثوقية الأنظمة الميكانيكية ويطيل عمرها التشغيلي.

الفوائد البيئية

دعم الاستدامة الصناعية

يسهم الذكاء الاصطناعي في تقليل الانبعاثات الصناعية والهدر وتحسين كفاءة استخدام الموارد، مما يدعم التحول نحو الصناعة المستدامة والتصنيع منخفض الكربون.

تحسين كفاءة الوقود

تُستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين أداء المحركات وأنظمة الاحتراق وتقليل الفاقد في استهلاك الوقود، خصوصاً في القطاعات الصناعية ووسائل النقل.

تقليل استهلاك الطاقة

تساعد الأنظمة الذكية في تحسين تشغيل المعدات وتقليل استهلاك الكهرباء والطاقة الحرارية داخل المنشآت الصناعية.

مستقبل مستدام
صناعة نظيفة وكفاءة واستهلاك موارد أمثل

تكلفة أقل
تخفيض التكاليف وزيادة العائد الاقتصادي

أداء أعلى
أنظمة أكثر كفاءة وموثوقية

تصميم أذكى
حلول أكثر دقة وابتكارا

6.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

يشهد قطاع الهندسة الميكانيكية تحولاً جذرياً بفعل التوسع المتسارع في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي وإنترنت الأشياء الصناعي والتوائم الرقمية والروبوتات المتقدمة ضمن مختلف مراحل دورة الحياة الهندسية، بدءاً من التصميم والمحاكاة، مروراً بالتصنيع والتشغيل، وصولاً إلى الصيانة وإدارة الأصول الصناعية. وقد أدى هذا التحول إلى إعادة تعريف دور المهندس الميكانيكي، بحيث لم يعد مقتصراً على الجوانب التقليدية المرتبطة بالتصميم والتحليل والتشغيل، بل أصبح يمتد ليشمل تحليل البيانات الصناعية، وتطوير النماذج التنبؤية، وإدارة الأنظمة السيبرانية الفيزيائية، وتكامل الأنظمة الذكية ضمن بيئات الصناعة الرقمية.

وفي ظل الانتقال نحو مصانع أكثر ذكاءً واعتماداً على البيانات، ظهرت مجموعة من الوظائف الهندسية الجديدة التي تجمع بين المعرفة الميكانيكية العميقة والمهارات الرقمية والتحليلية المتقدمة. وتعكس هذه الوظائف طبيعة التحول نحو بيئات إنتاجية تعتمد على الأتمتة الذكية، والتحليلات التنبؤية، والمحاكاة الرقمية، واتخاذ القرار المدعوم بالذكاء الاصطناعي.

الوظائف الناشئة في الهندسة الميكانيكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

AI-Powered Emerging Careers in Mechanical Engineering

مستقبل الهندسة الميكانيكية.. أكثر ذكاءً... أكثر كفاءة واستدامة

ابتكار مستدام | استدامة وكفاءة طاقة | رقمنة متقدم | رقمنة وتوأم رقمي | تحليلات تنبؤية | أتمتة متقدمة | تصميم ذكي

1 مهندس الذكاء الاصطناعي والأنظمة الميكانيكية الذكية
AI Mechanical Engineer

المسؤوليات
- تطوير نماذج تعلم آلي
- دمج الذكاء الاصطناعي في التصميم والمحاكاة
- تحسين الأداء باستخدام التحليل التنبؤي
- دعم الأنمتة الذكية في الأنظمة الصناعية
- تطوير حلول تعتمد على البيانات

المهارات المطلوبة
- Python, MATLAB, C++
- TensorFlow, PyTorch
- النمذجة والمحاكاة الهندسية
- تحليل البيانات الصناعية
- أنظمة التحكم الذكية والخوارزميات التنبؤية

2 مهندس التصميم التوليدي والتصنيع المتقدم
Generative Design & Advanced Manufacturing Engineer

المسؤوليات
- تطوير نماذج تصميم توليدي متعددة البدائل
- تطبيق التحسين الطوبولوجي على المكونات
- دعم اتخاذ القرار في مراحل التصميم
- تحسين كفاءة المنتجات وتقليل المواد
- تحسين التصميم للطباعة ثلاثية الأبعاد

المهارات المطلوبة
- Fusion 360, Altair
- Topology Optimization
- التصميم والمحاكاة الرقمية
- أدوات CAE و CAD المتقدمة
- تصنيع إضافي (الطباعة ثلاثية الأبعاد)

3 مهندس التوأم الرقمي وتحليل الأداء
Digital Twin & Performance Engineer

المسؤوليات
- تطوير نماذج التوأم الرقمي للأنظمة
- ربط الأنظمة بالبيانات عبر IIoT
- تحليل الأداء والتنبؤ بالأعطال
- تحسين التشغيل والصيانة الذكية
- تطوير مؤشرات أداء ولوحات متابعة

المهارات المطلوبة
- Digital Twins
- IIoT
- Cloud Computing
- نمذجة الأنظمة والمحاكاة
- تحليل البيانات التشغيلية

4 مهندس التصنيع الذكي والمصانع الذاتية
Smart Manufacturing & Autonomous Factory Engineer

المسؤوليات
- تصميم خطوط إنتاج ذكية ومؤتمتة
- تطوير أنظمة التشغيل الذاتي للمصانع
- دمج الروبوتات والأنظمة المستقلة
- تطبيق مفاهيم الصناعة 4.0 و 5.0
- تطوير التوائم الرقمية وتحسين العمليات

المهارات المطلوبة
- Industry 4.0, 5.0
- الروبوتات والأتمتة
- IIoT, Digital Twins
- أنظمة التحكم الصناعية MES, ERP,
- التحليلات التنبؤية و Lean, Six Sigma

5 مهندس الصيانة التنبؤية والموثوقية
Predictive Maintenance & Reliability Engineer

المسؤوليات
- مراقبة أداء المعدات وتحليل البيانات
- تطوير نماذج تنبؤية للصيانة الوقائية
- اكتشاف أنماط الفشل والأعطال
- تحسين الموثوقية وتقليل التكاليف
- تحليل البيانات لتقييم المخاطر

المهارات المطلوبة
- تعلم الآلة التحليل التنبؤي
- معالجة الإشارات (Signal Processing)
- IIoT والحساسات الذكية
- تحليل البيانات الزمنية
- أنظمة المراقبة الذكية للمعدات

6 عالم البيانات الهندسية ومحلل البيانات الصناعية
Engineering Data Scientist

المسؤوليات
- تحليل البيانات الصناعية والهندسية
- بناء نماذج تعلم آلي للتنبؤ بالأداء
- تطوير لوحات مطومات وتقارير
- دعم تحسين العمليات والقرارات
- استخراج الأنماط وتحديد فرص التحسين

المهارات المطلوبة
- Python, R, SQL
- Hadoop, Spark
- تعلم الآلة والتحليل الإحصائي
- هندسة البيانات والنمذجة
- Power BI, Tableau

7 مهندس الروبوتات والأنظمة المؤتمتة
Robotics & Intelligent Automation Engineer

المسؤوليات
- تطوير أنظمة الروبوتات الصناعية
- تحسين الأتمتة والتحكم الذاتي
- دمج الحساسات والرؤية الحاسوبية
- دعم التصنيع الذكي وتقليل التدخل
- تطوير أنظمة تحكم واختبار الأداء

المهارات المطلوبة
- الروبوتات الصناعية والتحكم
- البرمجة الصناعية والرؤية الحاسوبية
- الأنظمة المدمجة والحساسات
- الذكاء الاصطناعي التطبيقي
- ROS وأدوات التحكم الحديثة

8 مهندس أنظمة تخزين الطاقة المتقدمة والإدارة الحرارية
Advanced Energy Storage & Thermal Systems Engineer

المسؤوليات
- تصميم وتحليل أنظمة البطاريات
- تخزين الطاقة بالهيدروجين وخلايا الوقود
- تصميم أنظمة الإدارة الحرارية والتبريد
- تحسين الكفاءة والموثوقية والسلامة
- حلول تخزين هجينة ودعم المركبات الكهربائية

المهارات المطلوبة
- تقنيات البطاريات وتخزين الطاقة
- الهيدروجين وخلايا الوقود
- الديناميكا الحرارية وانتقال الحرارة
- ANSYS, COMSOL
- معايير السلامة والاستدامة

9 خبير المحتوى الهندسي لتدريب نماذج الذكاء الاصطناعي
Mechanical Engineering AI Content Specialist

المسؤوليات
- تصميم مسائل هندسية لاختبار النماذج
- إعداد الحلول المرجعية الدقيقة
- مراجعة وتدقيق المخرجات الهندسية
- اكتشاف الأخطاء وتقديم التغذية الراجعة
- التحقق من المعايير (ASME, ISO)

المهارات المطلوبة
- معرفة عميقة في مجالات الهندسة الميكانيكية
- مهارات تحليلية واكتشاف الأخطاء
- كتابة بيان نواصل قوي
- SolidWorks, ANSYS, MATLAB
- تقييم للتغيير والتحقق من جودة النماذج الذكية

10 مهندس الحوسبة السحابية الصناعية والأنظمة المتصلة
Industrial Cloud & Connected Systems Engineer

المسؤوليات
- تصميم البنية السحابية للأنظمة الصناعية
- ربط المعدات بمنصات IIoT
- إدارة تدفق البيانات والتكامل الرقمي
- حلول المراقبة والتحكم عن بعد
- دعم تطبيقات الذكاء الاصطناعي

المهارات المطلوبة
- AWS IoT, Azure IoT, Google Cloud
- IIoT
- قواعد البيانات الصناعية وتحليل البيانات
- الأمن السيبراني الصناعي
- OPC UA, MQTT

11 مهندس الروبوتات التعاونية
Collaborative Robotics Engineer (Cobot Engineer)

المسؤوليات
- تصميم وتطوير الروبوتات التعاونية
- دمج الروبوتات مع خطوط الإنتاج
- أنظمة تحكم آمنة بجوار العاملين
- تحسين التفاعل بين الإنسان والروبوت
- اختبار واعتماد أنظمة السلامة

المهارات المطلوبة
- الروبوتات الصناعية والتحكم
- ROS, Python, C++
- الحساسات والرؤية الحاسوبية
- معايير السلامة الصناعية
- تكامل IIoT والأنظمة

12 مهندس الطاقة المتجددة والأنظمة الحرارية
Renewable Energy & Thermal Systems Engineer

المسؤوليات
- تصميم الأنظمة الحرارية للطاقة المتجددة
- تحسين أنظمة التبخيد والتبريد والتخزين
- تقييم أداء الطاقة الشمسية والرياح
- إدارة الطاقة الحرارية في المنشآت
- دعم مشاريع التحول نحو الطاقة النظيفة

المهارات المطلوبة
- الديناميكا الحرارية وانتقال الحرارة
- أنظمة الطاقة المتجددة والتخزين
- ANSYS, COMSOL
- تحليل كفاءة الطاقة
- النمذجة والمحاكاة الهندسية

المهارات المشتركة للنجاح في وظائف المستقبل

- الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة
- البرمجة وتحليل البيانات
- إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)
- الحوسبة السحابية (Cloud)
- الأمن السيبراني الصناعي
- التوأم الرقمي (Digital Twins)
- الروبوتات والأتمتة الذكية
- الطاقة والاستدامة
- التفكير التحليلي وحل المشكلات
- التعاون والتواصل الفعال

لماذا هذه الوظائف مهمة؟

- خلق فرص عمل مستقبلية واعدة
- تسريع التحول الرقمي في الصناعة
- تعزيز الاستدامة وكفاءة الطاقة
- تقليل التكاليف والهدر
- تحسين الدقة وجودة المنتجات
- رفع الكفاءة والإنتاجية

12 وظيفة ناشئة تقود مستقبل الهندسة الميكانيكية بالذكاء الاصطناعي

الوظائف الناشئة في الهندسة الميكانيكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

AI-Powered Emerging Mechanical Engineering Careers

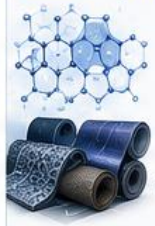
مستقبل الميكندسة الدكنكية والمستدامة والمنزإمة الذكيـة

13 مهندس التصنيع الإضافي والطباعة ثلاثية الأبعاد
(Additive Manufacturing Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم مكونات مهيأة للتصنيع الإضافي.
- اختيار المواد المناسبة وتحسين خصائصها.
- تطوير معامات الطباعة وتحسين الجودة.
- دمج التصميم التوليدي مع التصنيع الإضافي.
- تقييم أداء ومتانة الأجزاء المطبوعة.

المهارات المطلوبة:
- الطباعة ثلاثية البعاد وتقنيات التصنيع الإضافي
- برامج CAE وÇAE مثل SolidWorks و Fusion 360.
- علم المواد والهندسة الميكانيكية التطبيقية
- معايير GD&T وتصميم المنتجات
- تحسين العمليات والتصنيع الرقمي

14 مهندس المواد المتقدمة
(Advanced Materials Engineer)



المسؤوليات:
- تطوير مواد هندسية جديدة.
- دراسة الخصائص الميكانيكية والحرارية.
- إجراء الاختبارات والتحاليل المخبرية.
- دعم اختيار المواد في التصميم والتصنيع.
- تطوير مواد مستدامة وخفيفة وعالية الأداء.

المهارات المطلوبة:
- علم الهندسية
- الاختبارات الميكانيكية والحرارية للمواد
- برامج محاكاة المواد و FEM
- تصميم المواد المركبة والمواد الذكية
- أدوات CAE و CAE وتحليل الأداء

15 مهندس سلامة الأنظمة الميكانيكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي
(AI Safety Mechanical Engineer)

المسؤوليات:
- تقييم مخاطر الأنظمة المعتمدة على الذكاء الاصطناعي.
- تطوير استراتيجيات السلامة والموثوقية.
- اختبار النماذج الذكية وتحليل الفشل.
- ضمان الامتثال للمعايير التنظيمية.
- مراجعة أداء الأنظمة وتحسين موثوقيتها.

المهارات المطلوبة:
- هندسة السلامة وتحليل المخاطر
- الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة
- (Engineenlhg) (Reliability Engineering).
- معايير الحوكمة والسلامة للذكاء الاصطناعي
- أدوات تقييم المخاطر والتحقق من الأنظمة

16 مهندس تحسين أنظمة التدفئة والتهوية والتكييف بالذكاء الاصطناعي
(AI HVAC Optimization Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج تعلم آلي لتحسين تشغيل HVAC.
- تحليل بيانات التشغيل واستهلاك الطاقة.
- تحسين استراتيجيات التحكم التكيفي.
- دمج الحساسات الذكية وإنترنت الأشياء.
- دعم الصيانة التنبؤية وتقليل الأعطال.

المهارات المطلوبة:
- أنظمة HVAC والتحكم الحراري
- تعلم الآلة والتحليل التنبؤي
- إنترنت الأشياء والحساسات الذكية
- تحليل الإشارات والبيانات التشغيلية
- برامج المحاكاة الحرارية مثل Modelicag Dymolta

17 مهندس الهندسة الحيوية الميكانيكية
(Mechanical Biomechanical Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم وتطوير الأجهزة الطبية والأطراف.
- تطوير الروبوتات الطبية والجراحية الذكية.
- محاكاة وتحليل التفاعل البيوميكانيكي.
- اختبار واعتماد المنتجات الطبية.
- تحسين الأداء والراحة للمستخدمين.

المهارات المطلوبة:
- رالميكانيكا الحيوية (Biomechanics)
- تصميم الأجهزة الطبية
- النمذجة والمحاكاة الحيوية
- الروبوتات الطبية وأنظمة التحكم
- المعايير والأنظمة التنظيمية للأجهزة الطبية

18 مهندس الأنظمة السيبرانية الفيزيائية
(Cyber-Physical Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم الأنظمة السيبرانية الفيزيائية.
- دمج الحساسات والمشغلات والتحكم الذكية.
- تطوير أنظمة اتخاذ القرار الذاتي.
- مراقبة التفاعل بين العالمن الفيزيائي والرقمي.
- ضمان موثوقية وأمن الأنظمة المتصلة.

المهارات المطلوبة:
- الأنظمة (Embedded Systems)
- أنظمة التحكم الذكية
- الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي
- هندسة الأنظمة متعددة التخصصات
- الأمن السيبراني الصناعي

19 مهندس الاستدامة والطاقة الصناعية الذكية
(Smart Industrial Sustainability and Energy Engineer)

المسؤوليات:
- تحليل استهلاك الطاقة في الأنظمة.
- تطوير استراتيجيات خفض الانبعاثات.
- تحسين كفاءة المعدات والعمليات.
- دمج مصادر الطاقة المتجددة.
- إعداد موشرات الاستدامة وتقارير الأداء.

المهارات المطلوبة:
- إدارة الطاقة الصناعية
- أنظمة الطاقة المتجددة
- التحليل التنبؤي والذكاء الاصطناعي
- معايير الاستدامة والحباد الكربوني
- برامج محاكاة الطاقة وتحليل الكفاءة

20 مهندس الأمن السيبراني للأنظمة الصناعية
(Industrial Cybersecurity Engineer)

المسؤوليات:
- تقييم المخاطر الأمنية للأنظمة الصناعية.
- حماية شبكات التحكم الصناعية وSCADA.
- تطوير سياسات الأمن السيبراني.
- مراقبة التهديدات والاستجابة للحوادث.
- ضمان الامتثال للمعايير الأمنية الصناعية.

المهارات المطلوبة:
- الأمن السيبراني الصناعي
- أنظمة SCADA و PLC
- إدارة المخاطر الأمنية
- إختبار الاختراق وتحليل الثغرات
- معايير IEC 62443 و NIST

21 مهندس الذكاء الاصطناعي للمحاكاة متعددة الفيزياء
(AI-Driven Multiphysics Simulation Engineer)

المسؤوليات:
- تسريع عمليات المحاكاة بالذكاء الاصطناعي.
- بناء نماذج بديلة (Surrogate Models).
- دمج الذكاء الاصطناعي مع CFD وFEA.
- تقليل زمن التحليل الهندسي.

المهارات المطلوبة:
- ANSYS
- Abaqus
- OpenFOAM
- Physics-Informed Neural Networks (PINNs)
- Deep Learning

22 مهندس الأنظمة المستقلة للمركبات والآلات
(Autonomous Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير أنظمة الملاحة والتحكم الذاتي.
- دمج الحساسات والرؤية الحاسوبية.
- تطوير خوارزميات SLAM والملاحة الذاتية.
- بناء نماذج اتخاذ القرار والتخطيط الحركي.
- تحسين الأداء في البيئات المعقدة.

المهارات المطلوبة:
- الذكاء الاصطناعي والتعلم المحزز (RL)
- الرؤية الحاسوبية ومعالجة الصور
- دمج بيانات الحساسات (Sensor Fusion)
- SLAM وتقنيات الملاحة ورسم الخرائط
- برمجة وPython وPython و Rوط
- أنظمة التحكم الذكية والمركبات الذاتية
- إترنت الأشياء والأنظمة المدمجة
- معايير السلامة والاعتمادية للأنظمة

نحو مستقبل ذكي ومستدام للهندسة الميكانيكية

الهندسة التخصصات | المواد المتقدمة | التصنيع المتقدمة | الروبوتات والأنظمة المستقلة | الأمن السيبراني | المحاكاة المتقدمة | تحليل البيانات | الاستدامة والطاقة | التوأم الرقمي | الأتمتة الذكية | الذكاء الاصطناعي

6.6.1 مهارات المستقبل في الهندسة الميكانيكية في عصر الذكاء الاصطناعي

1. المهارات التقنية المستقبلية

يتطلب النجاح في الوظائف الهندسية الحديثة امتلاك مجموعة متقدمة من المهارات التقنية التي تجمع بين العلوم الهندسية التقليدية والتقنيات الرقمية الناشئة. ومن أبرز هذه المهارات:

- البرمجة باستخدام لغات Python و MATLABو++C.
- تطوير وتطبيق نماذج التعلم الآلي والذكاء الاصطناعي باستخدام أطر عمل مثل TensorFlow وPyTorch.
- تحليل البيانات الصناعية والبيانات الضخمة والنمذجة التنبؤية.
- تصميم الأنظمة الروبوتية وأنظمة التحكم الذكية.
- استخدام برامج التصميم والمحاكاة الهندسية المتقدمة مثل ANSYS و Abaqusو.SolidWorks.
- تطبيق تقنيات التوأم الرقمي والمحاكاة الديناميكية للأنظمة.
- دمج تقنيات إنترنت الأشياء الصناعي والحوسبة السحابية في البيئات الصناعية.
- استخدام أدوات التصميم التوليدي والتحسين الطوبولوجي.
- إدارة أنظمة التصنيع الذكي والأتمتة الصناعية.
- تطوير حلول الصيانة التنبؤية وتحليل موثوقية المعدات.

2. المهارات الرقمية والتحليلية والمهنية

إلى جانب المهارات التقنية، تزداد أهمية مجموعة من المهارات المهنية والتحليلية التي تمكّن المهندس من العمل بكفاءة ضمن البيئات الصناعية الذكية ومتعددة التخصصات، ومن أهمها:

- التفكير النظمي وفهم العلاقات المتبادلة بين مكونات الأنظمة المعقدة.
- القدرة على تحليل البيانات واتخاذ القرارات المبنية على الأدلة الرقمية.
- مهارات حل المشكلات المعقدة والابتكار الهندسي.
- إدارة المشاريع التقنية والتحول الرقمي.
- العمل ضمن فرق متعددة التخصصات تضم مهندسين ومبرمجين وعلماء بيانات.
- مهارات التواصل الفعال وعرض النتائج الفنية والتحليلية.
- القدرة على التكيف مع التقنيات المتغيرة والتعلم المستمر.
- فهم أخلاقيات الذكاء الاصطناعي والحوكمة الرقمية.
- الإشراف على الأنظمة الذكية والتحقق من موثوقية مخرجاتها.
- إدارة التفاعل بين الإنسان والآلة ضمن البيئات الصناعية الذكية.

6.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

رغم الإمكانات التحويلية الكبيرة التي يوفرها الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية، إلا أن عملية لا تزال تواجه مجموعة من التحديات المتداخلة على المستويات التقنية والاقتصادية والبشرية والأخلاقية والقانونية.

6.7.1 التحديات التقنية

- الحاجة إلى بيانات ضخمة عالية الجودة ومُعالجة بشكل دقيق لتدريب النماذج الذكية.
- تعقيد النماذج الحسابية، خاصة في التطبيقات المرتبطة بالأنظمة الديناميكية والحرارية.
- محدودية قابلية تفسير نماذج الذكاء الاصطناعي(Black Box Problem) ، خصوصًا في التطبيقات الحرجة.
- صعوبات التكامل بين أنظمة الذكاء الاصطناعي والبنى الهندسية التقليدية والبرمجيات الصناعية القائمة
- ارتفاع المتطلبات الحاسوبية (High Computational Cost) في التعلم العميق والمحاكاة المتقدمة.

6.7.2 التحديات الاقتصادية

- ارتفاع تكاليف التحول الرقمي وتحديث البنية التحتية الصناعية.
- الحاجة إلى استثمارات كبيرة في الحوسبة السحابية وأجهزة الاستشعار والأنظمة الذكية.
- عدم وضوح العائد الاستثماري في المدى القصير لبعض التطبيقات المتقدمة.
- تفاوت القدرة المالية بين المؤسسات الصناعية الكبرى والصغيرة والمتوسطة.
- ارتفاع تكلفة الصيانة والتحديث المستمر لأنظمة الذكاء الاصطناعي.

6.7.3 التحديات البشرية

- نقص الكفاءات الهندسية المتخصصة التي تجمع بين الهندسة الميكانيكية والذكاء الاصطناعي.
- الحاجة إلى إعادة تأهيل القوى العاملة التقليدية لمواكبة التحول الرقمي.
- مقاومة التغيير التنظيمي داخل المؤسسات الصناعية والهندسية.
- الفجوة بين مخرجات التعليم الهندسي ومتطلبات سوق العمل الحديث.
- محدودية الخبرة في التعامل مع أدوات الذكاء الاصطناعي المتقدمة والتحليل البياني.

6.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين الميكانيكيين

في ظل التحول الرقمي المتسارع في الهندسة الميكانيكية، تُوصى المؤسسات والمهندسون الميكانيكية بالتوجهات التالية:

1. **التعلم المستمر وتطوير المهارات التقنية:** التدريب على أدوات الذكاء الاصطناعي والتحليل البياني والتصميم التوليدي وتقنيات المحاكاة المتقدمة.
2. **تبني الابتكار وحل المشكلات:** دمج التصميم التوليدي والتحسين الطوبولوجي والنمذجة متعددة التخصصات، وتطبيق التعلم الآلي والشبكات العصبية لتحليل البيانات التشغيلية.
3. **تحسين الكفاءة التشغيلية:** دعم اتخاذ القرار بالذكاء الاصطناعي، وتبني الصيانة التنبؤية، وتطبيق التخطيط والجدولة الذكية للإنتاج.
4. **تعزيز القدرة على التكيف مع التحولات الرقمية:** المشاركة في برامج التحول الرقمي وتطوير مهارات التعامل مع أنظمة IoTوالروبوتات التعاونية.
5. **التركيز على الاستدامة والطاقة الذكية:** تحسين كفاءة الأنظمة الحرارية والشبكات الذكية، وتبني معايير التصميم المستدام.
6. **تعزيز التعليم والبحث التطبيقي:** المشاركة في برامج تعليمية متقدمة، وتطوير قدرات البحث في الذكاء الاصطناعي والميكاترونيكس.
7. **التعاون والشراكة مع الصناعة:** العمل مع الشركات لتطبيق حلول الذكاء الاصطناعي، والمشاركة في المؤتمرات العلمية والمشاريع المشتركة بين الجامعات والصناعة.

6.9 الخاتمة

يمثل الذكاء الاصطناعي تحولًا جذريًا في الهندسة الميكانيكية، حيث أعاد تشكيل مفاهيم التصميم والتصنيع والتشغيل والصيانة، من خلال الانتقال من النماذج التقليدية القائمة على القواعد الثابتة إلى أنظمة ذكية تعتمد على البيانات والتعلم المستمر والتحسين التلقائي للأداء.

ومع استمرار تطور التقنيات الذكية وتوسع تطبيقاتها الصناعية، يتجه قطاع الهندسة الميكانيكية نحو منظومات أكثر استقلالية وكفاءة واستدامة، قادرة على التكيف مع البيئات التشغيلية المعقدة ودعم اتخاذ القرار في الزمن الحقيقي.

ورغم التحديات المرتبطة بجودة البيانات، والتكلفة الاستثمارية، والحاجة إلى مهارات متقدمة، فإن التكامل بين الذكاء الاصطناعي والهندسة الميكانيكية يمثل ركيزة أساسية لمستقبل الصناعة الحديثة، ضمن إطار التحول المستمر نحو الثورة الصناعية الرابعة، وما يتبعها من تطورات نحو أنظمة صناعية أكثر ذكاءً ومرونة.

الفصل السابع

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية

7.1 المقدمة: التحول الرقمي في الهندسة الكهربائية

يشهد قطاع الهندسة الكهربائية تحولًا رقميًا متسارعًا في ظل الثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0) ، مدفوعًا بالتكامل بين أنظمة الطاقة الرقمية والذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء الصناعي والحوسبة السحابية وتحليلات البيانات المتقدمة. وقد أسهم هذا التحول في الانتقال من أساليب التحليل والتشغيل التقليدية إلى أنظمة كهربائية ذكية قادرة على التعلم من البيانات والتنبؤ بالسلوك التشغيلي واتخاذ القرارات بصورة آنية، مما عزز كفاءة أنظمة الطاقة وموثوقيتها واستدامتها (WEF, 2025).

ويمتد تأثير الذكاء الاصطناعي ليشمل الشبكات الكهربائية الذكية، وأنظمة توليد ونقل وتوزيع الطاقة، والطاقة المتجددة، والإلكترونيات الصناعية، وأنظمة التحكم والأتمتة، حيث أصبح أداة محورية لتحسين الكفاءة التشغيلية، وإدارة الأحمال الكهربائية، والتنبؤ بالأعطال، وتعزيز استقرار الشبكات وخفض التكاليف التشغيلية (IEA, 2025). كما تشهد الاستثمارات العالمية في رقمنة قطاع الطاقة والأنظمة الذكية نموًا متزايدًا لدعم الاستدامة ورفع كفاءة استغلال الموارد والتحول نحو اقتصاد منخفض الكربون.

وتؤكد الدراسات الحديثة (2024–2026) أن تقنيات التعلم الآلي (Machine Learning) ، والتعلم العميق (Deep Learning) ، والتعلم المعزز (Reinforcement Learning) ، والذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI) ، والشبكات العصبية المقيدة بالفيزياء (PINNs) ، تمثل الركائز التقنية للجيل الجديد من الأنظمة الكهربائية الذكية، خاصة في تطبيقات التنبؤ بالأحمال الكهربائية، وإدارة الطاقة، والتحكم الذاتي بالشبكات، والصيانة التنبؤية للمعدات الكهربائية، وتحسين تكامل مصادر الطاقة المتجددة ضمن الشبكات الوطنية (Safari et al., 2025؛ Nguyen et al., 2025).

ورغم الزخم المتزايد المحيط بهذه التقنيات، ما تزال مستويات التبني الفعلي أقل من التصورات الشائعة؛ إذ أظهر تقرير McKinsey العالمي للذكاء الاصطناعي لعام 2025 أن 78% من المؤسسات تستخدم الذكاء الاصطناعي في وظيفة أعمال واحدة على الأقل، في حين لا يزال التكامل الكامل ضمن الأنظمة التشغيلية الحرجة محدودًا نسبيًا ويتركز في المؤسسات الكبرى ذات البنية الرقمية المتقدمة (McKinsey & Company, 2025) .

وفي قطاع الطاقة الكهربائية، حققت المؤسسات التي دمجت الذكاء الاصطناعي في إدارة الشبكات والصيانة التنبؤية تحسينات تشغيلية ملموسة، تمثلت في خفض فترات الانقطاع غير المخطط لها بنسبة تراوحت بين 20% و40%، وتحسين دقة التنبؤ بالأحمال الكهربائية بأكثر من 30% في بعض التطبيقات، إضافة إلى تقليل تكاليف التشغيل والصيانة ورفع كفاءة استغلال الأصول الكهربائية (WEF, 2025؛IEA, 2025) كما أظهرت دراسات العائد على الاستثمار (ROI) أن تطبيقات الشبكات الذكية وإدارة الأصول المدعومة بالذكاء الاصطناعي تحقق وفورات اقتصادية كبيرة من خلال تحسين موثوقية الإمداد الكهربائي وتقليل الأعطال، مع إمكانية استرداد تكاليف الاستثمار خلال فترات زمنية قصيرة نسبيًا (Deloitte, 2025؛ PwC, 2025).

ومع ذلك، لا تزال هناك فجوة بين الإمكانات النظرية للذكاء الاصطناعي ومستويات التطبيق العملي في العديد من مؤسسات الطاقة، نتيجة تحديات تتعلق بتوافر البيانات عالية الجودة، وصعوبة دمج الأنظمة الذكية مع البنية التحتية التقليدية، ونقص الكفاءات المتخصصة، وارتفاع تكاليف التحول الرقمي، إضافة إلى متطلبات الأمن السيبراني وحماية الأنظمة الحيوية (McKinsey & Company, 2025؛ Deloitte, 2025). لذلك أصبح نجاح تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية مرتبطًا ببناء بنية تحتية رقمية متكاملة، وتطوير المهارات البشرية، وتعزيز حوكمة البيانات واستراتيجيات التحول الرقمي.

ويتناول هذا الفصل بصورة منهجية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية، من خلال استعراض مجالات التطبيق الرئيسة، والأدوات والتقنيات المستخدمة، والفوائد الاستراتيجية المتحققة، والوظائف المستقبلية والمهارات المطلوبة، إضافة إلى أبرز التحديات والمعوقات والتوصيات العملية التي تدعم توظيف الذكاء الاصطناعي في بناء أنظمة طاقة وشبكات كهربائية أكثر ذكاءً وكفاءة واستدامة.

7.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية

يشهد قطاع الهندسة الكهربائية تحولًا جذريًا ومتسارعًا نتيجة التقدم الكبير في تقنيات الذكاء الاصطناعي وتكاملها المتزايد مع أنظمة الطاقة والتحكم والأتمتة والبنية التحتية الكهربائية الحديثة. وقد أسهم هذا التحول في إعادة تشكيل أساليب تصميم وتشغيل وإدارة الأنظمة الكهربائية من خلال رفع كفاءة الأداء، وتعزيز الاعتمادية التشغيلية، وتقليل الفواقد، وتحسين سرعة الاستجابة للمتغيرات التشغيلية، إلى جانب دعم اتخاذ القرار الذكي في البيئات الصناعية وأنظمة الطاقة المعقدة(Russell and Norvig, 2021 ؛ Alpaydin, 2021).

ومع تزايد تعقيد الشبكات الكهربائية الحديثة وارتفاع مستويات الاعتماد على البيانات الضخمة وتقنيات الاستشعار والاتصال، أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الممكنات الأساسية للتحول نحو أنظمة كهربائية أكثر مرونة واستدامة وقدرة على التكيف. وقد أدى ذلك إلى انتقال القطاع من الأنظمة التقليدية القائمة على التشغيل المركزي والتفاعل مع الأحداث إلى أنظمة ذكية تعتمد على التحليل التنبؤي، والتشغيل الذاتي، والتحسين المستمر للأداء.

وتتوزع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية على نطاق واسع يشمل أنظمة القدرة الكهربائية، والشبكات الذكية، والطاقة المتجددة، وأنظمة التحكم، والإلكترونيات الصناعية، وإلكترونيات القدرة، والصيانة التنبؤية، والروبوتات الصناعية، والأنظمة الذاتية، إضافة إلى الأسواق الكهربائية والتوائم الرقمية وأنظمة الطاقة اللامركزية. ويعكس هذا التنوع الطبيعة متعددة الأبعاد للهندسة الكهربائية، التي أصبحت تعتمد بصورة متزايدة على النظم الذكية القائمة على البيانات.

وفي هذا الإطار، يمكن تصنيف مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية ضمن مجموعة من المحاور الرئيسة التي تغطي دورة حياة الأنظمة الكهربائية بدءاً من النمذجة والمحاكاة، مروراً بالتشغيل والتحكم والصيانة، وصولاً إلى إدارة الطاقة والأسواق الكهربائية والتوائم الرقمية، وذلك على النحو الآتي:

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

7.2.1 دمج الشبكات العصبية مع المحاكاة الرقمية الزمنية (RTDS)

يمثل التكامل بين الشبكات العصبية الاصطناعية (Neural Networks – NNs) والمحاكاة الرقمية الزمنية الفورية (Real-Time Digital Simulator – RTDS) أحد الاتجاهات المتقدمة في تطوير الأنظمة الكهربائية الذكية، حيث يتيح بناء نماذج عالية الدقة قادرة على تمثيل السلوك الديناميكي للأنظمة الكهربائية المعقدة في الزمن الحقيقي.

وتعتمد هذه المقاربة على تدريب الشبكات العصبية باستخدام بيانات مستخرجة من بيئات المحاكاة الزمنية الفعلية بهدف تمثيل استجابة أنظمة التحكم والمكونات الكهربائية المختلفة، بالاعتماد على تقنيات التعلم الموجّه (Supervised Learning) والتعلم المعزز (Reinforcement Learning). ويؤدي هذا التكامل إلى إنشاء نماذج قادرة على التعلم المستمر وتحسين الأداء التشغيلي مع تغير الظروف التشغيلية.

وقد أسهمت هذه المنهجية في تحقيق مجموعة من التحسينات التشغيلية المهمة، من أبرزها:

- تحسين أداء أنظمة نقل القدرة المستمرة عالية الجهد متعددة الأطراف (Multi-Terminal HVDC Systems).
- تعزيز الاستقرار الديناميكي للشبكات الكهربائية تحت ظروف التشغيل المتغيرة.
- رفع سرعة الاستجابة اللحظية لأنظمة التحكم عند تغير الأحمال أو حدوث الاضطرابات.
- تحسين اختبار استراتيجيات التحكم وتقليل الحاجة إلى التجارب الميدانية المكلفة.

ويمثل هذا التكامل خطوة متقدمة نحو تطوير بيئات تشغيل ومحاكاة ذكية تسمح بتقييم أداء الأنظمة الكهربائية قبل التنفيذ الفعلي، الأمر الذي يسهم في خفض المخاطر التشغيلية، ورفع موثوقية الأنظمة، وتقليل تكاليف التطوير والتشغيل (Henao et al., 2025).

7.2.2 الذكاء الاصطناعي في أنظمة الطاقة الكهربائية

يُعد قطاع الطاقة الكهربائية من أكثر المجالات استفادة من تقنيات الذكاء الاصطناعي، نتيجة التوسع المتسارع في الشبكات الذكية وزيادة الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة والأنظمة الموزعة. وقد أدى هذا التحول إلى ظهور نماذج تشغيل جديدة تعتمد على التنبؤ والتحسين والتحكم الذاتي في الزمن الحقيقي.
وينقسم توظيف الذكاء الاصطناعي في أنظمة الطاقة الكهربائية إلى محورين رئيسيين: الشبكات الكهربائية الذكية، وأنظمة التنبؤ بالطلب وإدارة الأحمال.

أولاً: الشبكات الكهربائية الذكية (Smart Grids)

تعتمد الشبكات الذكية على تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل تدفقات الطاقة وإدارة الأحمال والتنبؤ الفوري بالطلب الكهربائي، بما يضمن تحقيق التوازن بين الإنتاج والاستهلاك وتحسين استقرار الشبكة.
كما يسهم الذكاء الاصطناعي في تعزيز تكامل مصادر الطاقة المتجددة من خلال تحسين القدرة على التعامل مع تقلبات الإنتاج، وتوظيف الحوسبة الطرفية (Edge Computing) لاتخاذ قرارات تشغيلية فورية وتقليل زمن الاستجابة.

وتتجه هذه الشبكات نحو تطوير خصائص أكثر استقلالية تشمل التنبؤ الذاتي، والكشف التلقائي عن الأعطال، وإعادة تكوين الشبكة ذاتياً (Self-Healing) ، وتحسين توزيع الأحمال بصورة مستمرة.

ثانياً: التنبؤ بالطلب وإدارة الأحمال

تُستخدم نماذج التعلم الآلي لتحليل البيانات التاريخية واللحظية بهدف بناء توقعات دقيقة للطلب الكهربائي، مما ينعكس إيجاباً على التخطيط التشغيلي وتقليل الفاقد وتحسين كفاءة استغلال الموارد.

كما تدعم تقنيات إدارة الاستجابة للطلب (Demand Response) تحقيق التوازن الديناميكي بين العرض والطلب في الزمن الحقيقي، والحد من الأحمال القصوى وتقليل الضغوط التشغيلية على الشبكة الكهربائية.

ويمثل هذا التحول أساساً لتطوير أنظمة كهربائية أكثر كفاءة ومرونة وقدرة على الاستجابة للتغيرات المستقبلية في أنماط إنتاج واستهلاك الطاقة.

7.2.3 الذكاء الاصطناعي في أنظمة التحكم الكهربائية

تُعد أنظمة التحكم من أكثر المجالات التي شهدت تحولاً نوعياً نتيجة توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي، نظراً لدورها المحوري في إدارة الأنظمة الكهربائية المعقدة التي تتطلب استجابة سريعة وقدرة عالية على التكيف مع المتغيرات التشغيلية. وقد أسهم الذكاء الاصطناعي في الانتقال من أنظمة التحكم التقليدية ذات المعاملات الثابتة إلى أنظمة ذكية قادرة على التعلم المستمر واتخاذ القرار بصورة ذاتية.

أولاً: التحكم التكيفي (Adaptive Control)

يعتمد التحكم التكيفي على خوارزميات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي لتعديل معاملات النظام بصورة ديناميكية وفقاً للتغيرات التشغيلية وظروف الحمل والبيئة المحيطة. ويتيح هذا النهج المحافظة على الأداء الأمثل للنظام الكهربائي وتقليل تأثير الاضطرابات وعدم اليقين، دون الحاجة إلى إعادة الضبط اليدوي المستمر.

وتُستخدم هذه المقاربة في أنظمة القدرة والمحركات الكهربائية والأنظمة الصناعية التي تتطلب استقراراً تشغيلياً مرتفعاً في ظل ظروف تشغيل متغيرة.

ثانياً: التحكم بالتعلم المعزز(Reinforcement Learning Control)

يمثل التعلم المعزز أحد أكثر تقنيات الذكاء الاصطناعي تقدماً في مجال التحكم، حيث تتعلم الأنظمة آلياً من خلال التفاعل المستمر مع البيئة التشغيلية وتحسين قراراتها تدريجياً لتحقيق أفضل أداء ممكن.

وقد أثبتت هذه النماذج كفاءتها في تحسين أداء الأنظمة الديناميكية المعقدة مثل المحركات الكهربائية والروبوتات الصناعية وأنظمة الطاقة الذكية، خاصة في البيئات غير الخطية التي يصعب تمثيلها بالنماذج الرياضية التقليدية.

7.2.4 الذكاء الاصطناعي في الإلكترونيات الصناعية وإلكترونيات القدرة

أدى دمج الذكاء الاصطناعي في الإلكترونيات الصناعية وإلكترونيات القدرة إلى تطوير قدرات الأنظمة الإلكترونية ورفع كفاءتها التشغيلية، من خلال تحسين التصميم والتحكم والتشغيل والصيانة اعتماداً على التحليل الذكي للبيانات.

وتشمل أبرز التطبيقات:

- تحسين تصميم الدوائر الإلكترونية والكشف المبكر عن الأعطال المحتملة.
- رفع كفاءة محولات القدرة وتقليل الفواقد الحرارية.
- تطوير أنظمة طاقة صناعية تعتمد على التحليل التنبؤي للبيانات التشغيلية.
- تحسين تصميم الدوائر المتكاملة عالية الكثافة (VLSI).
- تقليل استهلاك الطاقة وتحسين جودة العمليات التصنيعية.

وتعتمد هذه التطبيقات بصورة رئيسية على تقنيات التعلم العميق والنمذجة الرقمية المتقدمة التي تتيح اختبار الأداء قبل التنفيذ الفعلي وتقليل زمن التطوير والتكاليف التشغيلية.

7.2.5 الذكاء الاصطناعي في منظومة الطاقة المتجددة

يمثل الذكاء الاصطناعي عنصراً محورياً في تعظيم كفاءة منظومة الطاقة المتجددة وتحسين موثوقيتها عبر المحاور الثلاثة الآتية:

أولاً: الطاقة الشمسية

تُوظَّف نماذج التعلم العميق للتنبؤ بمستويات الإشعاع الشمسي وأنماطه اليومية والموسمية، مما يُتيح تحسين زاوية الألواح الشمسية وجدولة الإنتاج بدقة عالية. ويُسهم ذلك في رفع معدلات الاستفادة من الطاقة المنتجة وتخفيض الفاقد (Nguyen et al., 2025).

ثانياً: طاقة الرياح

تعتمد توربينات الرياح الحديثة على خوارزميات التعلم الآلي لتحليل سرعة الرياح واتجاهها والتنبؤ بها في أفق زمني متعدد، مما يُحسّن إدارة التشغيل ويُقلّل الإجهاد الميكانيكي على أجزاء التوربين ويُطيل عمره التشغيلي.

ثالثاً: تخزين الطاقة وإدارة البطاريات

تُستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين دورات الشحن والتفريغ، وإطالة عمر البطاريات، ورفع موثوقية الشبكة في مواجهة التذبذبات الناجمة عن المصادر المتجددة. كما تُتيح هذه التقنيات تحقيق التوازن الأمثل بين مصادر الإنتاج المتعددة.

7.2.6 الصيانة التنبؤية في الأنظمة الكهربائية

تعتمد الصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance) على تحليل البيانات التشغيلية المستمرة للكشف عن مؤشرات التدهور والإخفاق قبل وقوع الأعطال الفعلية. وتشمل تطبيقاتها الرئيسية:

- مراقبة المحولات الكهربائية وتحليل جودة الزيت وأنماط الحرارة.
- تقييم أداء القواطع والمفاتيح ورصد انحرافات التشغيل.
- التنبؤ بأعطال خطوط النقل والكابلات الأرضية.
- إطالة العمر التشغيلي للمعدات وتقليل التوقفات غير المخططة.

تستند هذه الأنظمة إلى تقنيات تحليل السلاسل الزمنية والشبكات العصبية الاصطناعية والتعلم العميق، مع دمج بيانات المستشعرات بصورة تتيح مراقبة الحالة في الوقت الفعلي وتوليد تنبيهات استباقية.

7.2.7 الذكاء الاصطناعي في أنظمة الحماية الكهربائية

طوّرت أنظمة الحماية الحديثة المدعومة بالذكاء الاصطناعي قدرتها على اكتشاف الأعطال وعزلها بسرعة ودقة غير مسبوقتين، عبر المحاور الآتية:

- الكشف الفوري عن الأعطال وتصنيفها وتحديد موقعها بدقة.
- العزل التلقائي للمناطق المتضررة بأدنى تأثير على باقي الشبكة.
- تقليل انقطاعات الطاقة وتحسين استجابة أنظمة الحماية التفاضلية.
- التنسيق التلقائي بين مستويات الحماية المختلفة في الشبكة.

وقد أسهم ذلك في رفع موثوقية الشبكات الكهربائية بصورة ملموسة وتقليل الخسائر التشغيلية الناجمة عن أوقات انقطاع الخدمة.

7.2.8 الذكاء الاصطناعي في منظومة المركبات الكهربائية

تُشكّل المركبات الكهربائية بيئةً خصبةً لتطبيقات الذكاء الاصطناعي، إذ تمتد من إدارة دورة الشحن إلى التكامل مع الشبكة الكهربائية الأشمل:

- إدارة الشحن الذكي وفق أسعار الطاقة، وتوفّرها، وحالة البطارية.
- تحسين أداء البطاريات ورصد حالتها الصحية في الزمن الفعلي.
- تقنية Vehicle-to-Grid (V2G) التي تتيح للمركبة تزويد الشبكة بالطاقة في أوقات الذروة.
- تحسين خوارزميات إدارة الطاقة داخل المركبة لتعظيم المدى.

ويُسهم هذا التكامل في تحويل المركبة الكهربائية من مستهلك سلبي للطاقة إلى عنصر فاعل في منظومة الشبكة الذكية.

7.2.9 الذكاء الاصطناعي في الأمن السيبراني للبنية التحتية الكهربائية

مع تصاعد تهديدات الأمن السيبراني الموجهة نحو البنية التحتية الحيوية، يؤدي الذكاء الاصطناعي دوراً دفاعياً محورياً عبر:

- كشف الهجمات السيبرانية وأنماطها غير المعتادة بصورة فورية.
- تعزيز أمن بروتوكولات الاتصال بين مكونات الشبكة الذكية.
- التنبؤ بنقاط الضعف قبل استغلالها من قِبل الجهات المعادية.
- تأمين منظومة البيانات التشغيلية وضمان نزاهتها وسريتها (IEEE-USA, 2025).

وتؤكد IEEE أن التطور المتسارع في مجال الذكاء الاصطناعي يستلزم بالتوازي تعزيز منظومة الحوكمة الأمنية والإطار التنظيمي لحماية هذه البنى التحتية.

7.2.10 التطبيقات الصناعية والناشئة

تشمل التطبيقات الناشئة للذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية:

- المدن الذكية .
- الشبكات الكهربائية ذاتية الإصلاح .
- الحوسبة الطرفية للطاقة (Edge AI).
- الأنظمة الذاتية المستقلة .
- إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT).
- الروبوتات الكهربائية الذكية .
- أنظمة إدارة الطاقة الذكية .

وتشير الاتجاهات المستقبلية إلى أن الذكاء الاصطناعي سيصبح مكونًا جوهريًا في بناء أنظمة كهربائية أكثر كفاءة واستدامة واعتمادية خلال العقود القادمة.

7.2.11 الذكاء الاصطناعي في الميكروشبكات وأنظمة الطاقة اللامركزية

يمثل الذكاء الاصطناعي أحد المحركات الرئيسة للتحول نحو أنظمة الطاقة اللامركزية (Distributed Energy Systems) ، والتي تعتمد على دمج مصادر الطاقة الموزعة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وأنظمة التخزين الكهربائي والمركبات الكهربائية ضمن شبكات محلية مستقلة أو شبه مستقلة تُعرف بالميكروشبكات (Microgrids). وقد اكتسب هذا النموذج أهمية متزايدة نتيجة التوجه العالمي نحو تعزيز أمن الطاقة، ورفع مرونة الشبكات الكهربائية، ودعم الانتقال إلى أنظمة منخفضة الكربون وأكثر استدامة (IEA, 2025).

وتُعرَّف الميكروشبكة بأنها منظومة كهربائية محلية تتكون من وحدات توليد وأحمال وأنظمة تخزين تعمل بصورة متكاملة، ويمكنها العمل متصلة بالشبكة الرئيسة أو بصورة مستقلة عند الحاجة. ونظراً لتعقيد تشغيل هذه الأنظمة وتعدد مصادرها، أصبح الذكاء الاصطناعي أداة مركزية لدعم عمليات الإدارة والتحكم واتخاذ القرار.

أولاً: إدارة الميكروشبكات الذكية

يُستخدم الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات الواردة من العدادات الذكية وأجهزة الاستشعار وأنظمة التنبؤ المناخي بهدف تحقيق التوازن اللحظي بين العرض والطلب الكهربائي. كما تساعد خوارزميات التعلم الآلي والتعلم العميق على تطوير استراتيجيات تشغيل ذاتية تُحسن كفاءة الطاقة وتدعم استقرار الشبكة وتخفض تكاليف التشغيل.

وقد أتاح ذلك ظهور مفهوم الميكروشبكات ذاتية التكيف (Self-Adaptive Microgrids) ، القادرة على تعديل أنماط التشغيل بصورة تلقائية استجابةً لتغير الأحمال أو تقلبات إنتاج الطاقة المتجددة.

ثانياً: جدولة مصادر الطاقة الموزعة

تمثل جدولة الموارد الموزعة أحد أكثر التطبيقات أهمية في هذا المجال، حيث تُستخدم النماذج التنبؤية لتحديد الاستراتيجية التشغيلية المثلى اعتماداً على الأحمال المتوقعة، وأسعار الطاقة، والظروف المناخية.

وتسهم هذه النماذج في:

- رفع كفاءة استغلال مصادر الطاقة المتجددة.

- تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.
- خفض تكاليف التشغيل.
- تقليل فاقد الطاقة.
- تحسين أداء أنظمة التخزين.

وقد أثبتت خوارزميات التعلم المعزز والتعلم العميق كفاءة عالية في التعامل مع مسائل الجدولة الديناميكية المعقدة.

ثالثاً: تشغيل الشبكات المعزولة (Islanded Operation)

تُعد القدرة على التشغيل المعزول إحدى الخصائص الاستراتيجية للميكروشبكات الحديثة، حيث تسمح باستمرار تزويد الأحمال الحرجة بالطاقة عند انقطاع الاتصال بالشبكة الرئيسة.

وفي هذا السياق يسهم الذكاء الاصطناعي في:

- اكتشاف حالات الانفصال عن الشبكة.
- إدارة الأحمال الحرجة أثناء الطوارئ.
- المحافظة على استقرار الجهد والتردد.
- تحسين استخدام الطاقة المخزنة.
- دعم استعادة الخدمة بعد انتهاء الأعطال.

وتبرز أهمية هذه التطبيقات بصورة خاصة في المنشآت الحيوية والمناطق النائية.

رابعاً: إدارة أنظمة الطاقة المجتمعية والتكامل الرقمي

شهدت السنوات الأخيرة توسعاً في أنظمة الطاقة المجتمعية التي تعتمد على مشاركة الموارد الطاقية بين المستخدمين ضمن بيئات إنتاج واستهلاك محلية.

ويُستخدم الذكاء الاصطناعي لإدارة تدفقات الطاقة بين المنتجين والمستهلكين، وتحسين عمليات تبادل الطاقة المحلية، ودعم نماذج الطاقة من النظير إلى النظير (Peer-to-Peer Energy Trading).

كما أصبحت الميكروشبكات ترتبط بصورة متزايدة بالشبكات الذكية والتوائم الرقمية، بما يسمح بمحاكاة الأداء التشغيلي واختبار سيناريوهات التشغيل المختلفة والتنبؤ بالمشكلات قبل حدوثها.

وتشير الاتجاهات المستقبلية إلى تطور هذا المجال نحو الميكروشبكات ذاتية التشغيل، والشبكات المعرفية، وأسواق الطاقة اللامركزية، والتكامل الكامل مع الذكاء الاصطناعي التوليدي ووكلاء الطاقة الأذكياء.

7.2.12 الذكاء الاصطناعي في الأسواق الكهربائية وتجارة الطاقة

أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الممكنات الأساسية للتحول الرقمي في الأسواق الكهربائية الحديثة، لا سيما مع توسع تحرير أسواق الكهرباء وزيادة الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة وظهور أدوار جديدة للمنتجين المستقلين والمستهلكين المنتجين للطاقة (Prosumers).

وقد أدى هذا التحول إلى زيادة تعقيد الأسواق الكهربائية نتيجة تغيرات العرض والطلب وتقلب الأسعار والقيود التشغيلية، مما عزز الحاجة إلى أدوات تحليل ذكية قادرة على دعم التنبؤ واتخاذ القرار.

أولاً: التنبؤ بأسعار الكهرباء

يُعد التنبؤ بأسعار الكهرباء من أكثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي انتشاراً في الأسواق الكهربائية، حيث تعتمد النماذج الذكية على تحليل بيانات الأحمال، وأسعار الوقود، وإنتاج الطاقة المتجددة، والظروف المناخية، والبيانات التاريخية للأسعار.

وتوفر هذه النماذج توقعات قصيرة ومتوسطة وطويلة الأجل بدقة مرتفعة، مما يسهم في تحسين التخطيط وتقليل المخاطر الاقتصادية.

ثانياً: دعم قرارات التداول وإدارة المحافظ الطاقية

تُستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات السوقية بصورة لحظية من أجل:

- تحديد فرص التداول المثلى.
- التنبؤ بالاتجاهات السعرية.
- تقييم المخاطر.
- تحسين توقيت عمليات البيع والشراء.
- إدارة المحافظ الطاقية.

كما بدأت الأسواق الحديثة بالاعتماد على أنظمة تداول شبه مستقلة قائمة على التعلم المعزز والذكاء الاصطناعي التوليدي.

ثالثاً: إدارة العقود طويلة الأجل والتشغيل الاقتصادي

أصبح الذكاء الاصطناعي أداة مهمة لإدارة اتفاقيات شراء الطاقة (PPAs) من خلال تقييم المخاطر المستقبلية والتنبؤ بالعوائد وتحسين هياكل العقود.

كما يُستخدم في تحسين التشغيل الاقتصادي لمحطات التوليد عبر:

- جدولة وحدات الإنتاج.
- تحسين استهلاك الوقود.
- تقليل تكاليف التشغيل والصيانة.
- إدارة أنظمة التخزين.
- دعم دمج الطاقة المتجددة.

رابعاً: مستقبل الأسواق الكهربائية الذكية

تشير الاتجاهات الحديثة إلى تطور الأسواق الكهربائية نحو:

- التداول الآلي للطاقة.
- الأسواق اللامركزية.
- شبكات الطاقة من النظير إلى النظير.
- العقود الذكية.
- دمج تقنيات البلوك تشين والذكاء الاصطناعي.
- وكلاء الطاقة الأذكياء.

ومن المتوقع أن يؤدي هذا التحول إلى رفع كفاءة الأسواق وتحسين استخدام الموارد وتعزيز مشاركة المستهلكين في إنتاج وتداول الطاقة.

7.2.13 الذكاء الاصطناعي في التوائم الرقمية للأنظمة الكهربائية

يمثل الذكاء الاصطناعي في التوائم الرقمية (AI-Driven Digital Twins) أحد أكثر الاتجاهات تقدماً في الهندسة الكهربائية، حيث يجمع بين النمذجة الرقمية، وإنترنت الأشياء، وتحليلات البيانات، وخوارزميات الذكاء الاصطناعي لإنشاء نسخة رقمية ديناميكية مطابقة للأصول الكهربائية الحقيقية.

وقد تطور هذا المفهوم من كونه أداة محاكاة هندسية إلى منصة متكاملة لمراقبة الأداء والتنبؤ بالحالة التشغيلية ودعم اتخاذ القرار.

أولاً: إنشاء نموذج رقمي متكامل

تعتمد التوائم الرقمية على بناء نموذج افتراضي يتم تحديثه باستمرار اعتماداً على بيانات أجهزة الاستشعار وأنظمة التحكم والمراقبة.

ويتيح ذلك:

- مراقبة الأداء لحظياً.
- تقييم الحالة الفنية للأصول.
- تحليل مؤشرات الكفاءة والاعتمادية.
- اكتشاف الانحرافات التشغيلية مبكراً.
- دعم الإدارة الذكية للأصول.

ثانياً: التنبؤ بالأعطال وتحسين الصيانة

تستخدم النماذج الذكية لتحليل البيانات التشغيلية بهدف:

- التنبؤ بأعطال المحولات والقواطع.
- تحليل احتمالات فقدان الاستقرار.
- تقدير العمر التشغيلي المتبقي.
- تحسين جداول الصيانة.
- تقليل التوقفات غير المخطط لها.

وقد أدى ذلك إلى تعزيز الانتقال نحو الصيانة المعتمدة على الحالة التشغيلية بدلاً من الصيانة الدورية التقليدية.

ثالثاً: دعم اتخاذ القرار والمحاكاة التشغيلية

توفر التوائم الرقمية منصة متقدمة لدعم اتخاذ القرار من خلال دمج البيانات اللحظية مع النماذج التنبؤية.

وتُستخدم في:

- إدارة الأحمال.
- تشغيل الشبكات الذكية.
- تحسين استجابة الأنظمة للاضطرابات.
- إدارة الطاقة المتجددة والتخزين.
- اختبار السيناريوهات المختلفة قبل التنفيذ الفعلي.

كما تسمح بإجراء تجارب افتراضية تشمل إضافة أحمال جديدة أو دمج مصادر متجددة أو إعادة هيكلة الشبكات دون التأثير على النظام الحقيقي.

رابعاً: الاتجاهات المستقبلية

تشير الأدبيات الحديثة إلى أن التوائم الرقمية ستصبح مكوناً أساسياً في الجيل القادم من أنظمة الطاقة الذكية، مع توسع تطبيقات:

- التوائم الرقمية ذاتية التعلم.
- الشبكات الكهربائية ذاتية الإصلاح.
- الإدارة المستقلة للطاقة.
- وكلاء الذكاء الاصطناعي.
- البنية التحتية الكهربائية المعرفية.

ويمثل هذا التوجه خطوة استراتيجية نحو بناء أنظمة كهربائية أكثر ذكاءً ومرونة واستدامة، قادرة على الربط المستمر بين العالم الفيزيائي والعالم الرقمي وتحويل البيانات إلى قرارات تشغيلية دقيقة وفعالة.

7.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية

تعتمد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية على منظومة متكاملة من التقنيات الحسابية والخوارزميات الذكية التي تُمكّن الأنظمة الكهربائية من التحليل والتنبؤ واتخاذ القرار والتحكم الذاتي بصورة أكثر كفاءة ومرونة مقارنة بالأساليب التقليدية. ويشمل ذلك تطبيقات أنظمة القدرة الكهربائية، والشبكات الذكية، والطاقة المتجددة، والإلكترونيات الصناعية، وأنظمة الحماية، والميكروشبكات، والأسواق الكهربائية، والتوائم الرقمية.

وتختلف التقنيات المستخدمة وفقاً لطبيعة المشكلة الهندسية ومستوى تعقيد النظام وتوفر البيانات التشغيلية ومتطلبات الزمن الحقيقي (Real-Time Operation).وقد أدى التطور المتسارع في التعلم الآلي والتعلم العميق والحوسبة الطرفية والتحليلات التنبؤية إلى ظهور جيل جديد من الأنظمة الكهربائية القادرة على التعلم المستمر والتكيف الذاتي. ويمكن تصنيف أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات الهندسة الكهربائية كما يوضحه الجدول الآتي:

جدول (7.1) .أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات الهندسة الكهربائية

مجال التطبيق	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة
دمج الشبكات العصبية مع المحاكاة الرقمية الزمنية (RTDS)	الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، الشبكات العصبية العميقة (DNN)، التعلم الموجّه (Learning Supervised)، التعلم المعزز (RL)، النماذج البديلة (Surrogate Models)
الشبكات الكهربائية الذكية (Smart Grids)	التعلم الآلي (ML)، التعلم العميق (DL)، التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics)، الحوسبة الطرفية (Edge AI)، كشف الشذوذ (Anomaly Detection)
التنبؤ بالطلب وإدارة الأحمال	نماذج السلاسل الزمنية (LSTM)، الشبكات العصبية المتكررة (RNN)، التعلم الآلي، التحليلات التنبؤية
أنظمة التحكم الكهربائية	التعلم المعزز (RL)، التحكم التكيفي (Adaptive Control)، المنطق الضبابي (Fuzzy Logic)، الشبكات العصبية
الإلكترونيات الصناعية وإلكترونيات القدرة	التعلم العميق، النمذجة الذكية، التحليل التنبؤي، الشبكات العصبية، التحسين التطوري
الطاقة الشمسية	التعلم العميق، الشبكات العصبية، تحليل السلاسل الزمنية، الرؤية الحاسوبية
طاقة الرياح	التعلم الآلي، النماذج التنبؤية، التعلم العميق، تحليل البيانات المناخية

تخزين الطاقة وإدارة البطاريات	التعلم الآلي، التعلم المعزز، تحليل البيانات الضخمة، تقدير الحالة الصحية (SOH Estimation)
الصيانة التنبؤية	تحليل السلاسل الزمنية، كشف الشذوذ، الشبكات العصبية، التحليلات التنبؤية
أنظمة الحماية الكهربائية	الأنظمة الخبيرة (Systems Expert)، الشبكات العصبية، التعلم الآلي، تصنيف الأعطال
المركبات الكهربائية (EVs)	التعلم المعزز، التحليلات التنبؤية، إدارة البطاريات الذكية، خوارزميات التحسين
الأمن السيبراني للبنية التحتية الكهربائية	كشف التسلل (IDS)، كشف الشذوذ، التعلم العميق، الذكاء الاصطناعي السيبراني (Cyber AI)
التطبيقات الصناعية والناشئة	الذكاء الاصطناعي الطرفي (Edge AI)، إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)، الأنظمة الذاتية، الروبوتات الذكية
الميكروشبكات وأنظمة الطاقة اللامركزية	التعلم المعزز، التعلم العميق، التحسين متعدد الأهداف، الوكلاء الأذكياء (AI Agents)، أنظمة اتخاذ القرار
الأسواق الكهربائية وتجارة الطاقة	التنبؤ بالسلاسل الزمنية، التعلم المعزز، الذكاء الاصطناعي التوليدي، التحليلات الاقتصادية، الخوارزميات متعددة الوكلاء
التوائم الرقمية للأنظمة الكهربائية	التوائم الرقمية (Twins Digital)، إنترنت الأشياء (IoT)، التحليلات التنبؤية، التعلم العميق، النمذجة الفيزيائية المعززة بالذكاء الاصطناعي

المصدر: الأدبيات العلمية المنشورة في IEEE Transactions on Smart Grid، IEEE Transactions on Power Systems، IEEE Transactions on Power Electronics، Applied Energy، Renewable Energy، Electric Power Systems Research، Journal of Energy Storage، بالإضافة إلى تقارير EPRI وIEA وNIST وIndustrial Internet Consortium وIEEE Power & Energy Society (2022–2025).

7.3.1 التقنيات الأكثر استخداماً في الهندسة الكهربائية

يمكن تصنيف التقنيات الأساسية المستخدمة في معظم تطبيقات الهندسة الكهربائية وفق الترتيب الآتي:

1. **التعلم الآلي (Machine Learning)**: يُستخدم في التنبؤ بالأحمال الكهربائية، وتحليل بيانات التشغيل، وتحسين أداء الشبكات والأنظمة الكهربائية.
2. **التعلم العميق (Deep Learning)**: يُستخدم في تحليل الأنظمة المعقدة، وكشف الأعطال، والتنبؤ بإنتاج الطاقة المتجددة، والأمن السيبراني.
3. **الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks)**: تُستخدم في نمذجة الأنظمة الكهربائية، وتحليل الاستقرار، والتنبؤ بالأعطال والأحمال.
4. **التعلم المعزز (Reinforcement Learning)**: يُستخدم في أنظمة التحكم الذاتي، وإدارة الطاقة، والشبكات الذكية، والمركبات الكهربائية.
5. **تحليل السلاسل الزمنية (Time-Series Analysis)**: يُستخدم في التنبؤ بالطلب الكهربائي، وتحليل الأحمال، وإدارة الطاقة المتجددة.
6. **الأنظمة الخبيرة (Expert Systems)**: تُستخدم في أنظمة الحماية الكهربائية، وتشخيص الأعطال، ودعم اتخاذ القرار التشغيلي.

7. **التوائم الرقمية (Digital Twins)**: تُستخدم لمحاكاة الأصول الكهربائية ومراقبة أدائها والتنبؤ بالأعطال في الزمن الحقيقي.
8. **الذكاء الاصطناعي الطرفي (Edge AI)**: يُستخدم في معالجة البيانات واتخاذ القرار محليًا داخل الشبكات الذكية وإنترنت الأشياء الصناعي.
9. **كشف الانحرافات (Anomaly Detection)**: يُستخدم في اكتشاف الأعطال والهجمات السيبرانية والانحرافات التشغيلية قبل تطورها إلى مشكلات حرجة.

7.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية

يشهد قطاع الهندسة الكهربائية تحولًا رقميًا متسارعًا نتيجة التوسع في دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في أنظمة القدرة الكهربائية، والشبكات الذكية، والتحكم الصناعي، وإدارة الطاقة، والصيانة التنبؤية. وقد أسهم هذا التحول في الانتقال من الأنظمة التقليدية التي تعتمد على المراقبة الدورية والاستجابة اليدوية إلى منظومات ذكية قادرة على تحليل البيانات التشغيلية، والتعلم المستمر، واتخاذ القرارات بصورة شبه ذاتية أو ذاتية، بما يعزز كفاءة تشغيل الأنظمة الكهربائية، ويرفع مستويات الاعتمادية والاستدامة، ويحسن استغلال الموارد والطاقة (Lee et al., 2015; Lu et al., 2018).

ويبين الجدول (7.2) أن أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية يمكن تصنيفها ضمن ثمانية محاور رئيسية مترابطة، تشمل: تصميم الدوائر والأنظمة الكهربائية، وتحليل جودة الطاقة، والصيانة التنبؤية وإدارة الأصول، والشبكات الذكية وإدارة الطاقة، والتنبؤ بالأحمال والطاقة المتجددة، والتشخيص الذاتي للأعطال، والتحكم والأتمتة الذكية، والتعليم والتدريب الهندسي. ويعكس هذا التصنيف التكامل الوظيفي بين هذه الأدوات في دعم مختلف جوانب تصميم وتشغيل وإدارة الأنظمة الكهربائية الحديثة.

يركز المحور الأول، **تصميم الدوائر والأنظمة الكهربائية (ECAD)** ، على الأدوات التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي في تطوير المخططات الكهربائية والإلكترونية، مثل Flux و WSCAD ELECTRIX AI و TINA Design Suite. وتوفر هذه المنصات إمكانات متقدمة لتحويل المتطلبات التصميمية إلى مخططات كهربائية، وتحسين تصميم لوحات الدوائر المطبوعة (PCB) ، وإجراء عمليات المحاكاة والتحليل الكهربائي، إضافة إلى أتمتة إعداد الوثائق الفنية وقوائم المكونات، بما يسهم في تقليل الأخطاء وتسريع عمليات التصميم والتحقق. أما **المحور الثاني، تحليل جودة الطاقة (Power Quality)** ، فيعتمد على أدوات تحليل متقدمة مثل Merlin Power Analytics، التي تستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل التوافقيات، واضطرابات الجهد، وجودة الإشارات الكهربائية، بما يساعد على اكتشاف المشكلات التشغيلية مبكرًا، وتحسين جودة التغذية الكهربائية، وتقليل الأعطال في شبكات القدرة والمنشآت الصناعية. ويمثل **المحور الثالث، الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول**، أحد أكثر مجالات الذكاء الاصطناعي تأثيرًا في قطاع الطاقة الكهربائية، حيث يضم أنظمة مثل Predictive Maintenance Systems و Asset Performance Management Platforms وAI Maintenance Scheduling، والتي تعتمد على تحليل بيانات التشغيل والمستشعرات لتقييم الحالة الفنية للمعدات، والتنبؤ بالأعطال قبل وقوعها، وتحسين جدولة الصيانة وتخصيص الموارد. ويسهم ذلك في تقليل فترات التوقف غير المخطط لها، وإطالة العمر التشغيلي للمحولات والمولدات والقواطع الكهربائية، ورفع الاعتمادية التشغيلية للأصول. ويركز **المحور الرابع، الشبكات الذكية وإدارة الطاقة**، على الأنظمة التي تدعم التشغيل الذكي لشبكات الكهرباء، مثل Smart Grid Technologies و Smart Meters و Building Energy Management Systems. وتتيح هذه الأدوات اكتشاف الأعطال، وإعادة توجيه تدفقات الطاقة بصورة تلقائية، وتحليل أنماط استهلاك الكهرباء، وإدارة الأحمال، وتحسين كفاءة استخدام الطاقة في المباني والمنشآت الصناعية، بما يسهم في تعزيز استقرار الشبكات الكهربائية وتقليل الفاقد وخفض التكاليف التشغيلية.

أما **المحور الخامس، التنبؤ بالأحمال والطاقة المتجددة،** فيشمل أدوات تعتمد على الشبكات العصبية العميقة والنماذج التنبؤية، مثل Deep Neural Networksو Renewable Energy Forecasting Systemsو Demand Response Systems، والتي تُستخدم لتحليل البيانات التاريخية والظروف المناخية والتشغيلية بهدف التنبؤ بالأحمال الكهربائية وإنتاج الطاقة من المصادر المتجددة، إضافة إلى إدارة الاستجابة للطلب وتحقيق التوازن بين العرض والطلب، بما يعزز كفاءة تشغيل الشبكات الكهربائية ويدعم دمج الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. ويختص **المحور السادس، التشخيص الذاتي للأعطال،** بأنظمة الذكاء الاصطناعي التي تعتمد على التعلم الآلي لتحليل البيانات التشغيلية والكشف عن الحالات الشاذة، مثل AI Fault Diagnosis Systems و Machine Learning Fault Detection.وتتيح هذه الأنظمة تحديد مواقع الأعطال وأسبابها بدقة عالية، وتقليل زمن الاستجابة، وتحسين موثوقية تشغيل شبكات النقل والتوزيع ومحطات الطاقة. ويضم **المحور السابع، التحكم والأتمتة الذكية،** أنظمة مثل Intelligent Control Systemsو Smart Automation Platforms، والتي تعتمد على الذكاء الاصطناعي في اتخاذ القرارات التشغيلية بصورة آنية، وإدارة عمليات التحكم في أنظمة القدرة الكهربائية، وأنظمة التخزين، وشبكات الطاقة الذكية، بما يعزز استقرار التشغيل، ويرفع كفاءة استخدام الطاقة، ويدعم التشغيل الآلي للمنظومات الكهربائية الحديثة. أما **المحور الثامن، التعليم والتدريب الهندسي،** فيشمل أنظمة التعلم الذكية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي، مثلAI-Based Learning Systems ، والتي توفر بيئات تدريب ومحاكاة تفاعلية للأنظمة الكهربائية، وتمكن الطلبة والمهندسين من إجراء التجارب العملية واكتساب المهارات الفنية في بيئات افتراضية آمنة، بما يسهم في تطوير الكفاءات الهندسية، وتحسين جودة التعليم والتدريب، وتقليل الاعتماد على المختبرات التقليدية. وتؤكد هذه المنظومة أن القيمة الحقيقية للذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية لا تتمثل في توظيف أدوات منفردة، وإنما في تحقيق التكامل بين تصميم الأنظمة الكهربائية، وتحليل جودة الطاقة، والصيانة التنبؤية، وإدارة الأصول، والشبكات الذكية، والتنبؤ بالأحمال، والتشخيص الذاتي للأعطال، وأنظمة التحكم والأتمتة ضمن بيئة رقمية موحدة.

جدول (7.2). أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية

المحور الرئيسي	الأداة / النظام	الفئة التقنية	الوظائف والخصائص الرئيسية	التطبيقات الكهربائية	الفوائد التشغيلية
أولاً: تصميم الدوائر والأنظمة الكهربائية (ECAD)	**Flux**	تصميم إلكتروني مدعوم بالذكاء الاصطناعي	تحويل الأوامر إلى مخططات إلكترونية + تحسين PCB	تصميم الدوائر ولوحات PCB	تسريع التصميم وتحسين الجودة
	WSCAD ELECTRIX AI	كهربائي ذكي CAD	إنشاء مخططات كهربائية تلقائياً + توليد BOM	الأنظمة الكهربائية الصناعية	أتمتة التصميم وتقليل الأخطاء
	TINA Design Suite	محاكاة دوائر إلكترونية	تحليل ومحاكاة الدوائر الكهربائية والقدرة	التعليم والنمذجة والتحقق	تحسين الاختبار والتحليل
ثانياً: تحليل جودة الطاقة (Power Quality)	**Merlin Power Analytics**	تحليل جودة الطاقة بالذكاء الاصطناعي	تحليل التوافقيات واضطرابات الجهد	شبكات القدرة والمنشآت الصناعية	تحسين جودة الطاقة وتقليل الأعطال
ثالثاً: الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول	**Predictive Maintenance Systems**	صيانة تنبؤية مدعومة بالذكاء الاصطناعي	تحليل بيانات الاهتزاز والحرارة والتيار	المحولات والمولدات والقواطع	تقليل الأعطال وخفض التكاليف
	Asset Performance Management Platforms	مراقبة ذكية للأصول	مراقبة الحالة وتقييم العمر التشغيلي	الأصول الكهربائية وشبكات الطاقة	رفع الاعتمادية التشغيلية
	AI Maintenance Scheduling	جدولة صيانة ذكية	تحسين جداول الصيانة وتخصيص الموارد	شركات الكهرباء والمرافق	تحسين الكفاءة وإطالة العمر
رابعاً: الشبكات الذكية وإدارة الطاقة	**Smart Grid Technologies**	شبكات ذكية	اكتشاف الأعطال وإعادة التوجيه التلقائي للطاقة	شبكات النقل والتوزيع	تقليل الانقطاعات
	Smart Meters	عدادات ذكية	تحليل الاستهلاك وإدارة الأحمال	شبكات التوزيع والمستهلكون	تحسين كفاءة الطاقة
	Building Energy Management Systems	إدارة طاقة المباني	تحسين استهلاك الطاقة والتحكم بالأحمال	المباني الذكية	خفض التكاليف التشغيلية
خامساً: التنبؤ بالأحمال والطاقة المتجددة	**Deep Neural Networks**	شبكات عصبية عميقة	التنبؤ بالأحمال وتحليل الأنماط	شركات الكهرباء	تحسين التخطيط التشغيلي
	Renewable Energy Forecasting Systems	أنظمة تنبؤ	دمج بيانات الطقس والتنبؤ بالإنتاج	الطاقة الشمسية والرياح	تحسين دمج الطاقة المتجددة
	Demand Response Systems	إدارة أحمال ذكية	موازنة العرض والطلب تلقائياً	الشبكات الذكية	تحسين كفاءة الطاقة
سادساً: التشخيص الذاتي للأعطال	**AI Fault Diagnosis Systems**	تشخيص ذكي للأعطال	اكتشاف الأعطال وتحليل أسبابها	أنظمة القدرة والمعدات	تقليل زمن الاستجابة
	Machine Learning Fault Detection	كشف أعطال بالتعلم الآلي	اكتشاف الحالات الشاذة	المحطات والشبكات	تحسين الموثوقية
سابعاً: التحكم والأتمتة الذكية	**Intelligent Control Systems**	أنظمة تحكم ذكية	اتخاذ قرارات تشغيلية ذاتية	أنظمة القدرة والتحكم	رفع الكفاءة التشغيلية
	Smart Automation Platforms	أتمتة ذكية	إدارة أنظمة التخزين والطاقة	الشبكات وأنظمة التخزين	تحسين الاستقرار
ثامناً: التعليم والتدريب الهندسي	**AI-Based Learning Systems**	تعليم هندسي ذكي	محاكاة وتدريب على الأنظمة الكهربائية	التعليم والتدريب	رفع الكفاءة العملية

المصدر: بالاعتماد على الأدبيات العلمية المتخصصة في الذكاء الاصطناعي وتطبيقاته في هندسة القدرة الكهربائية، والشبكات الذكية، والصيانة التنبؤية، والطاقة المتجددة، إضافة إلى وثائق الشركات التقنية المتخصصة مثل Siemens Energy وWSCAD وFlux وCESC وتقارير IEEE وIEC (2024–2026).

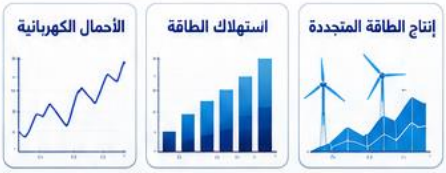
فوائد الذكاء الاصطناعي
في الهندسة الكهربائية

يُولّد دمج الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية منظومة متكاملة من الفوائد، يمكن تصنيفها في ثلاثة مستويات متكاملة:

الفوائد التقنية

تحسين دقة التنبؤ

تساعد خوارزميات التعلم الآلي والتحليلات التنبؤية في تحسين دقة التنبؤ بالأحمال الكهربائية واستهلاك الطاقة والإنتاج المتوقع من مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، مما يعزز كفاءة التخطيط والتشغيل الكهربائي.



تعزيز استقرار الشبكات

تُستخدم أنظمة الذكاء الاصطناعي في مراقبة الشبكات الكهربائية وتحليل البيانات التشغيلية بصورة لحظية للكشف المبكر عن الأعطال والانحرافات التشغيلية، مما يساهم في تحسين استقرار الشبكات وتقليل احتمالية الانقطاعات الكهربائية.

تطوير أنظمة ذاتية التنظيم

ساهم الذكاء الاصطناعي في تطوير الشبكات الذكية (Smart Grids) القادرة على:

- التكيف الذاتي مع تغيرات الأحمال
- إعادة توزيع الطاقة بصورة تلقائية
- عزل الأعطال وإعادة التهيئة الذاتية للشبكة
- تحسين كفاءة إدارة مصادر الطاقة الموزعة

الفوائد الاقتصادية

خفض خسائر الطاقة بنسبة 20–30%

تساعد الأنظمة الذكية في تحسين إدارة تدفق الطاقة وتقليل الفاقد الكهربائي داخل شبكات النقل والتوزيع، مما ينعكس بصورة مباشرة على تقليل الخسائر التشغيلية وتحسين كفاءة الطاقة.

تقليل تكاليف الصيانة

تعتمد أنظمة الصيانة التنبؤية على تحليل بيانات المعدات الكهربائية مثل:

- المحولات
- المولدات
- القواطع الكهربائية
- خطوط النقل

وذلك بهدف التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها، مما يقلل من تكاليف الصيانة الطارئة والتوقفات غير المخططة.

رفع الكفاءة التشغيلية

يساهم الذكاء الاصطناعي في تحسين تشغيل محطات التوليد وأنظمة التحكم الكهربائي، مما يؤدي إلى:

- رفع كفاءة الإنتاج الكهربائي
- تحسين استغلال الموارد
- تقليل نكاليف التشغيل
- تحسين إدارة الأحمال الكهربائية

الفوائد البيئية

دعم الطاقة النظيفة

تساعد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين دمج مصادر الطاقة المتجددة ضمن الشبكات الكهربائية، خصوصاً الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، من خلال تحسين التنبؤ بالإنتاج وإدارة الأحمال والتخزين الكهربائي.

تقليل الانبعاثات الكربونية

يسهم التشغيل الذكي للشبكات ومحطات التوليد في تحسين كفاءة استهلاك الوقود وتقليل الانبعاثات الناتجة عن إنتاج الطاقة الكهربائية التقليدية.

تعزيز مبادئ الاستدامة

تدعم تقنيات الذكاء الاصطناعي تطوير:

- المدن الذكية
- الشبكات الكهربائية الذكية
- أنظمة إدارة الطاقة
- حلول التنقل الكهربائي.

مما يعزز مفاهيم الاستدامة البيئية وكفاءة الستخدام الموارد والطاقة على المدى الطويل.

مستقبل كهربائي ذكي ومستدام | طاقة أنظف وكوكب أفضل | تكاليف أقل وأداء أعلى | شبكات أكثر استقراراً وأماناً | تنبؤ أدق وتخطيط أفضل

7.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية

يشهد قطاع الهندسة الكهربائية تحولاً نوعياً متسارعاً نتيجة التقدم الكبير في تقنيات الذكاء الاصطناعي، وتحليلات البيانات الضخمة، وإنترنت الأشياء الصناعي، والحوسبة الطرفية، وأنظمة التحكم الذكية، والطاقة الرقمية. وقد أسهم هذا التحول في إعادة تشكيل بيئات العمل الهندسية التقليدية، حيث انتقلت الأنظمة الكهربائية من نماذج التشغيل التقليدية إلى أنظمة ذكية قادرة على التنبؤ واتخاذ القرار والتكيف الذاتي مع المتغيرات التشغيلية.

ومع توسع تطبيقات الشبكات الذكية، والطاقة المتجددة، والمركبات الكهربائية، والأنظمة الصناعية المؤتمتة، برزت الحاجة إلى أدوار وظيفية جديدة تجمع بين المعرفة العميقة بالهندسة الكهربائية والمهارات الرقمية المتقدمة في مجالات البرمجة، وتحليل البيانات، وتعلم الآلة، والأمن السيبراني، والنمذجة، والمحاكاة. وأصبح المهندس الكهربائي المعاصر مطالباً بالقدرة على تصميم وإدارة الأنظمة الذكية بقدر قدرته على تصميم وتشغيل الأنظمة الكهربائية التقليدية.

الوظائف الناشئة في الهندسة الكهربائية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

مستقبل الطاقة الذكية والشبكات المستدامة

أمن سيبراني | تحليلات البيانات | أتمتة صناعية | طاقة متجددة | شبكات ذكية | ذكاء اصطناعي

1 مهندس الذكاء الاصطناعي لأنظمة الطاقة والشبكات الذكية
(AI Engineer for Smart Energy and Grid Systems)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج الذكاء الاصطناعي لتحسين تشغيل الشبكات الكهربائية.
- بناء أنظمة تنبؤية للكشف المبكر عن الأعطال.
- تحليل البيانات التشغيلية واسعة النطاق القادمة من أنظمة الطاقة.
- دعم تكامل مصادر الطاقة المتجددة مع الشبكات الذكية.
- تطوير أنظمة إدارة الأحمال والاستجابة الذكية للطلب.

المهارات المطلوبة:
- تعلم الآلة وتحليل البيانات
- Python و MATLAB
- الشبكات الذكية والقمة الطاقة
- أنظمة SCADA وإدارة الطاقة
- التحليل التنبؤي والنمذجة الرياضية

2 مهندس الأنظمة المدمجة والذكاء الاصطناعي
(Embedded AI Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم الأنظمة المدمجة الذكية.
- تطوير تطبيقات الذكاء الاصطناعي الطرفي (Edge AI).
- دمج الحساسات الذكية وإنترنت الأشياء الصناعي.
- تحسين استهلاك الطاقة والأداء التشغيلي للأجهزة.
- تطوير حلول ذكية للأجهزة الصناعية والإلكترونية.

المهارات المطلوبة:
- البرمجة باستخدام C++ و Python
- الأنظمة المدمجة والمعالجات الدقيقة
- الحوسبة الطرفية (Edge Computing)
- إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)
- TensorFlow و PyTorch

3 مهندس أنظمة التحكم الذكية والأتمتة الصناعية
(Intelligent Control and Industrial Automation Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة التحكم الذكية والتكيفية.
- تطوير نماذج تنبؤية للتحكم والاستقرار.
- دمج الذكاء الاصطناعي مع أنظمة التشغيل الصناعية.
- تحسين أداء المعدات وخطوط الإنتاج.
- تطوير استراتيجيات الصيانة التنبؤية.

المهارات المطلوبة:
- أنظمة التحكم المتقدمة
- PLC و SCADA
- تحليل البيانات الصناعية
- MATLAB/Simulink
- تعلم الآلة والخوارزميات الذكية

4 مهندس إلكترونيات القدرة والطاقة الذكية
(Power Electronics and Intelligent Energy Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة إلكترونيات القدرة عالية الكفاءة.
- تطوير المحولات وأنظمة الشحن الذكية.
- تحسين كفاءة استهلاك الطاقة وتقليل الفاقد.
- دعم تكامل البطاريات وأنظمة التخزين الكهربائي.
- تطوير تطبيقات الطاقة المتجددة.

المهارات المطلوبة:
- إلكترونيات القدرة
- تصميم المحولات الكهربائية
- أنظمة تخزين الطاقة والبطاريات
- النمذجة والمحاكاة والمهربائية
- أنظمة التحكم الذكية

5 مهندس أنظمة المركبات الكهربائية
(Electric Vehicle Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير أنظمة إدارة البطاريات،
- تصميم جلول الشحن الذكي.
- تحسين كفاءة استهلاك الطاقة.
- دمج الذكاء الاصطناعي في أنظمة المركبات.
- تطوير استراتيجيات إدارة الطاقة والتنقل الذكي.

المهارات المطلوبة:
- إلكترونيات القدرة
- أنظمة البطاريات
- أنظمة التحكم الكهربائية
- تحليل البيانات والتشغيلية
- النمذجة الديناميكية للمركبات

6 مهندس التوائم الرقمية وتحليلات الطاقة
(Digital Twin and Energy Analytics Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج التوأم الرقمي للمعدات الكهربائية.
- محاكاة سيناريوهات التشغيل المختلفة.
- مراقبة الأداء التشغيلي في الزمن الحقيقي،
- دعم الصيانة التنبؤية وتحليل المخاطر.
- تحسين موتوقية الأنظمة الكهربائية.

المهارات المطلوبة:
- Digital Twins
- المحاكاة الصناعية
- تحليل البيانات الضخمة
- الحوسبة السحابية
- الذكاء الاصطناعي التطبيقي

7 أخصائي أمن الأنظمة الكهربائية الذكية
(Smart Electrical Systems Security Specialist)

المسؤوليات:
- تقييم المخاطر السيبرانية للأنظمة الكهربائية.
- تطوير سياسات الحماية والأمن الصناعي.
- مراقبة أمن الشبكات الذكية.
- إدارة الاستجابة للحوادث الأمنية.
- ضمان الامتثال للمعايير التنظيمية.

المهارات المطلوبة:
- الأمن السيبراني الصناعي
- حماية أنظمة SCADA
- إدارة المخاطر الرقمية
- تحليل التهديدات السيبرانية
- معايير الأمن الصناعي

8 مهندس الأنظمة الذكية للطائرات بدون طيار والروبوتات الكهربائية
(Intelligent Robotics and Drone Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم الأنظمة الكهربائية للروبوتات والطائرات الذكية.
- دمج أنظمة الرؤية الحاسوبية والذكاء الاصطناعي.
- تطوير أنظمة الملاحة الذاتية.
- اختبار وتحسين الأداء التشغيلي.
- دعم تطبيقات التفتيش والمراقبة الصناعية.

المهارات المطلوبة:
- الأنظمة المدمجة
- الرؤية الحاسوبية
- الروبوتات والتحكم الذكي
- بروتوكولات الاتصال الصناعية
- إلكترونيات الطاقة والبطاريات

9 مهندس الشبكات الكهربائية ذاتية التعافي
(Self-Healing Smart Grid Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير خوارزميات اكتشاف الأعطال والاستجابة الذاتية.
- تصميم أنظمة إعادة التهيئة التلقائية للشبكات.
- تحسين موتوقية واستقرار الشبكات الكهربائية.
- دمج أنظمة التنبؤ بالأعطال مع مراكز التحكم.
- دعم تطبيقات الشبكات الذكية الموزعة.

المهارات المطلوبة:
- هندسة نظم القدرة الكهربائية
- الذكاء الاصطناعي والتعلم المعزز (Reinforcement Learning)
- أنظمة SCADA و DMS و EMS
- تحليل الموتوقية الكهربائية
- MATLAB و Python و DigSILENT PowerFactory

10 مهندس إدارة الطاقة والمرونة الشبكية
(Energy Management and Grid Flexibility Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير استراتيجيات إدارة الطاقة الذكية.
- تحسين تشغيل البطاريات وأنظمة التخزين.
- إدارة الأحمال والاستجابة للطلب.
- دعم دمج المركبات الكهربائية مع الشبكة.
- تطوير أنظمة اتخاذ القرار الفوري للطاقة.

المهارات المطلوبة:
- أنظمة إدارة الطاقة (EMS)
- التحسين الرياضي (Optimization)
- تعلم الآلة والتحليل التنبؤي
- أنظمة التخزين الكهربائي
- Python و MATLAB

11 مهندس البنية التحتية لشحن المركبات الكهربائية
(EV Charging Infrastructure Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم شبكات الشحن السريع والذكي.
- تطوير أنظمة إدارة الأحمال لمحطات الشحن.
- دمج مصادر الطاقة المتجددة مع محطات الشحن.
- تحسين استهلاك الطاقة وتوزيع الأحمال.
- تحليل البيانات التشغيلية لمحطات الشحن.

المهارات المطلوبة:
- أنظمة المركبات الكهربائية
- إلكترونيات القدرة
- أنظمة الشحن الذكية
- إدارة الطاقة والشبكات الذكية
- OCPP و IEC 61850

المجالات الداعمة لهذه الوظائف

تخزين الطاقة | مركبات كهربائية | روبوتات وطائرات دون طيار | أمن سيبراني | حوسبة سحابية | أنظمة ذكية | أتمتة صناعية | تحليلات متقدمة | شبكات ذكية | طاقة متجددة

نحو مستقبل كهربائي ذكي ومستدام
مهارات اليوم ... ريادة الغد

الوظائف الناشئة في الهندسة الكهربائية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

مستقبل الطاقة الذكية والشبكات المستدامة

ذكاء اصطناعي | شبكات ذكية | طاقة متجددة | أتمتة صناعية | تحليلات البيانات | أمن سيبراني

12 مهندس الطاقة المتجددة الذكية (Smart Renewable Energy Systems Engineer)

المسؤوليات:
- التنبؤ بإنتاج الطاقة المتجددة.
- تحسين تشغيل المحطات المتجددة.
- تحليل بيانات الطقس والطاقة.
- تطوير استراتيجيات الصيانة التنبؤية.
- إدارة تكامل الطاقة المتجددة مع الشبكة.

المهارات المطلوبة:
- الطاقة الشمسية وطاقة الرياح.
- التعلم الآلي والتحليلات التنبؤية.
- أنظمة تخزين الطاقة.
- SCADA للطاقة المتجددة.
- Python و MATLAB.

13 مهندس الحوسبة الطرفية الصناعية وإنترنت الاشياء الكهربائي (Industrial Edge Computing and Electrical IoT Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير أنظمة Edge AI للأجهزة الكهربائية.
- تصميم شبكات الاستشعار الذكية.
- تحسين زمن الاستجابة في الأنظمة الحرجة.
- إدارة البيانات الصناعية الميدانية.
- دمج الحساسات والعدادات الذكية.

المهارات المطلوبة:
- Edge Computing.
- كدعي وإنترنت الأشياء IIoT.
- الأنظمة المدمجة.
- بروتوكولات الاتصالات الصناعية.
- Python و C++.

14 مهندس البيانات الكهربائية والتحليلات المتقدمة (Electrical Data Analytics Engineer)

المسؤوليات:
- تحليل البيانات الكهربائية واسعة النطاق.
- تطوير نماذج تنبؤية للأعطال والأحمال.
- إنشاء لوحات معلومات تشغيلية.
- تحسين أداء الأصول الكهربائية.
- دعم القرارات التشغيلية والاستثمارية.

المهارات المطلوبة:
- علوم البيانات.
- Python و SQL و R.
- Power BI و Tableau.
- تعلم الآلة.
- تحليل السلاسل الزمنية.

15 مهندس سلامة وأخلاقيات الذكاء الاصطناعي في أنظمة الطاقة (AI Safety and Ethics Engineer for Energy Systems)

المسؤوليات:
- تقييم مخاطر الذكاء الاصطناعي في أنظمة الطاقة.
- تطوير سياسات الحوكمة والامتثال.
- مراجعة قرارات الأنظمة الذكية عالية الخطورة.
- ضمان الشفافية وقابلية تفسير النماذج.
- دعم الامتثال التنظيمي.

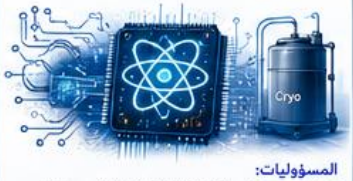
المهارات المطلوبة:
- حوكمة الذكاء الاصطناعي.
- إدارة المخاطر.
- الأمن السيبراني.
- التشريعات والمعايير الرقمية.
- أخلاقيات البيانات والأنظمة الذكية.

16 عالم البيانات الكهربائية (Electrical Data Scientist)

المسؤوليات:
- بناء نماذج تعلم ألي للأحمال والأعطال.
- تحليل بيانات العدادات الذكية والشبكات.
- تطوير مؤشرات أداء ذكية.
- التنبؤ بالطلب على الطاقة.
- دعم إتخاذ القرار المعتمد على البيانات.

المهارات المطلوبة:
- Python و R و SQL.
- تعلم الآلة والتعلم العميق.
- Hadoop و Spark.
- Power BI و Tableau.
- هندسة نظم القدرة والشبكات الذكية

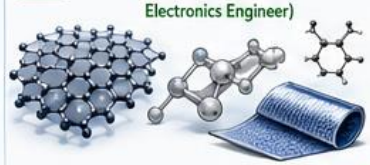
17 مهندس الهندسة الكمومية الكهربائية (Quantum Electrical Engineer)



المسؤوليات:
- تصميم وتطوير إلكترونيات التحكم الكريوجينية للحواسيب الكمومية.
- تطوير أنظمة الربط والاتصال عالية السرعة.
- تصميم دوائر الميكروويف للتحكم بالكيوبينات.
- تحسين موثوقية وكفاءة أنظمة التحكم الكمومية.
- دعم تطوير البنية التحتية الكهربائية الكمومية.

المهارات المطلوبة:
- هندسة الميكروويف والدوائر عالية التردد.
- الحوسبة الكمومية وأنظمة التحكم بالكيوبيتات.
- الأنظمة الكريوجينية (Cryogenic Systems).
- ألبيجام الصينيتنغ MATLAB و Python.
- تصميم الدوائر الإلكترونية المتقدمة.

18 مهندس المواد المتقدمة للإلكترونيات (Advanced Materials for Electronics Engineer)



المسؤوليات:
- تطوير مواد إلكترونية متقدمة عالية الكفاءة.
- تصميم واختبار المواد النانوية في الدوائر الإلكترونية.
- تحسين إدارة الحرارة في الأنظمة الإلكترونية.
- تطوير مواد ذاتية الإصلاح لزيادة عمر الأجهزة.
- دعم تطوير الإلكترونيات المرنة والقابلة للارتداء.

المهارات المطلوبة:
- علم المواد والهندسة النانوية.
- مواد الجرافين والمواد المركبة المتقدمة.
- البوليمرات ذاتية الإصلاح.
- إدارة الحرارة والإجهاد الحراري.
- أدوات محاكاة وتحليل المواد الالكترونية.

19 مهندس الروبوتات التعاونية الكهربائية (Electrical Cobot Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم الأنظمة الكهربائية للروبوتات التعاونية.
- تطوير أنظمة التحكم الأمنة للروبوتات.
- دمج الحساسات وتقنيات دمج البيانات.
- اختبار أنظمة السلامة والاعتمادية.
- تحسين أداء الروبوتات في البيئات الصناعية.

المهارات المطلوبة:
- أنظمة التحكم الكهربائية.
- الروبوتات التعاونية والأنظمة الذكية.
- منصة ROS لتطوير الروبوتات.
- Python و C++.
- معايير السلامة الصناعية وأنظمة الاستشعار.

20 مهندس الاتصالات الكهربائية والجيل السادس (Electrical Communications and 6G Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة الاتصالات اللاسلكية المتقدمة.
- تطوير بروتوكولات الجيل السادس للاتصالات.
- تحسين كفاءة الطاقة في شبكات الاتصالات.
- دعم تكامل إنترنت الأشياء مع الأنظمة الكهربائية.
- تطوير حلول الاتصال للمركبات والأنظمة الذكية.

المهارات المطلوبة:
- هندسة الترددات الراديوية (RF Engineering).
- شبكات الاتصالات 5G و 6G.
- تصميم الهوائيات والدوائر الميكروويفية.
- MATLAB وأدوات المحاكاة.
- بروتوكولات الاتصالات المتقدمة.

21 مهندس الاستدامة الكهربائية والهندسة الخضراء (Electrical Sustainablity and Green Engineering Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير أنظمة كهربائية منخفضة الانبعاثات.
- تحسين كفاءة الطاقة في المعدات والمنشآت.
- تقييم الأثر البيئي للأنظمة الكهربائية.
- تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري في التصميم الكهربائي.
- دعم الامتثال لمعايير الإستدامة الدولية.

المهارات المطلوبة:
- تقييم دورة الحياة (LCA).
- تصميم الأنظمة الكهربائية المستدامة.
- كفاءة الطاقة وادارة الموارد.
- معايير IEE و IEEE البيئية.
- الاقتصاد الدائري والاستدامة الهندسية.

22 مهندس أنظمة التخزين الهجين للطاقة (Hybrid Energy Storage Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة تخزين طاقة هجينة.
- دمج البطاريات وتقنيات الهيدروجين والتخزين الحراري.
- تحسين أداء أنظمة التخزين وكفاءتها.
- دعم تكامل التخزين مع الشبكات الذكية.
- تطوير استراتيجيات إدارة الطاقة والتشغيل.

المهارات المطلوبة:
- أنظمة البطاريات المتقدمة.
- تخزين الهيدروجين والطاقة الحرارية.
- إلكترونيات القدرة.
- إدارة الطاقة والشبكات الذكية.
- أدوات المحاكاة والتحليل الكهربائي.

نحو مستقبل كهربائي ذكي ومستدام
مهارات اليوم ... ريادة الغد

بيئة عمل ذكية وتعاونية | ابتكار وتحول رقمي مستدام | تأثير مباشر على مستقبل الطاقة | رواتب تنافسية | فرص وظيفية متزايدة

الوظائف الناشئة في الهندسة الكهربائية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

مستقبل الطاقة الذكية والشبكات المستدامة

أمن سيبراني | تحليلات البيانات | أتمتة صناعية | طاقة متجددة | شبكات ذكية | ذكاء اصطناعي

23 مهندس أنظمة الطاقة الفضائية
(Space Power Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة توليد وإدارة الطاقة الفضائية.
- تطوير مصفوفات الطاقة الشمسية الفضائية.
- تصميم أنظمة توزيع القدرة للمركبات الفضائية.
- تحسين كفاءة تخزين وإدارة الطاقة في الفضاء.
- ضمان مقاومة الأنظمة للظروف الإشعاعية والبيئية.

المهارات المطلوبة:
- أنظمة الطاقة الفضائية.
- إلكترونيات القدرة الفضائية.
- إدارة الطاقة للأقمار الصناعية.
- تقنيات الحماية من الإشعاع.
- المعايير الهندسية الفضائية.

24 مهندس أنظمة الطاقة الطبية الحيوية
(Medical Biomedical Power Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير أنظمة الطاقة للأجهزة الطبية الحيوية.
- تصميم وإدارة بطاريات الأجهزة الطبية.
- تحسين كفاءة استهلاك الطاقة في المعدات الطبية.
- ضمان الامتثال لمعايير السلامة الطبية.
- دعم تطوير الأطراف الصناعية والأجهزة الذكية القابلة للارتداء.

المهارات المطلوبة:
- إلكترونيات القدرة الطبية.
- أنظمة البطاريات الطبية.
- معايير السلامة مثل IEC 60601.
- الأجهزة الطبية الحيوية.
- تصميم الأنظمة الكهربائية منخفضة القدرة وعالية الاعتمادية.

25 مهندس الذكاء الاصطناعي للصيانة في أنظمة الطاقة
(AI for Power Maintenance Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج تعلم آلي للتنبؤ بأعطال المعدات الكهربائية.
- تحليل بيانات التشغيل والصيانة.
- بناء أنظمة مراقبة ذكية لحالة المعدات.
- تحسين استراتيجيات الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول.
- دعم اتخاذ القرار في أعمال الصيانة والتشغيل.
- تطوير مؤشرات أداء لقياس موثوقية الأنظمة.

المهارات المطلوبة:
- تعلم الآلة والتحليل التنبؤي.
- تحليل البيانات الصناعية وأنظمة الطاقة.
- Python و MATLAB
- معالجة الإشارات وتحليل السلاسل الزمنية.
- أنظمة SCADA ومراقبة الأصول.
- إدارة الصيانة والموثوقية (Reliability Engineering).

26 مهندس إدارة البطاريات المتقدمة
(Advanced Battery Management Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم وتطوير أنظمة إدارة البطاريات الذكية.
- مراقبة حالة البطاريات وتقدير العمر المتبقي.
- تطوير خوارزميات موازنة الخلايا وإدارة الشحن.
- تحسين كفاءة وأمان أنظمة تخزين الطاقة.
- دعم تكامل البطاريات مع المركبات والشبكات.
- تحليل بيانات البطاريات وتطوير نماذج تنبؤية.

المهارات المطلوبة:
- أنظمة إدارة البطاريات (BMS).
- إلكترونيات القدرة وأنظمة تخزين الطاقة.
- كيمياء البطاريات وتقنيات الليثيوم أيون.
- Python و MATLAB/Simulink.
- أنظمة المركبات الكهربائية.
- التحليل الحراري وإدارة السلامة التشغيلية.

27 مهندس التحقق والاعتماد للأنظمة الكهربائية الذكية
(AI Verification and Validation Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير خطط التحقق والاعتماد للأنظمة الذكية.
- اختبار النماذج الذكية ووحدات التحكم.
- تقييم موثوقية ودقة القرارات للنظام.
- تحليل سيناريوهات الفشل والمخاطر.
- تنفيذ اختبارات HIL / SIL.
- ضمان الامتثال لمعايير السلامة.
- إعداد تقارير الاعتماد والتوثيق الفني.

المهارات المطلوبة:
- التحقق والاعتماد الهندسي (V&V)
- اختبار الأنظمة والتحكم الذكي.
- تحليل المخاطر (FMEA, FTA)
- Hardware-in-the-Loop (HIL) / Software-in-the-Loop (SIL)
- معايير السلامة (مثل ISO 26262, 61508).
- التحليل التساقطي و MATLAB/Simulink
- تحليل الاعتمادية (Reliability Engineering)
- توثيق الاختبارات وضمان الجودة

28 مهندس البنية التحتية للهيدروجين الأخضر
(Green Hydrogen Infrastructure Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة إنتاج الهيدروجين الأخضر.
- تخطيط وتنفيذ البنية التحتية للتخزين والنقل.
- دمج الهيدروجين مع الشبكات ومصادر الطاقة.
- تحسين كفاءة سلاسل القيمة للهيدروجين.
- تقييم الجوانب الفنية والاقتصادية للمشاريع.
- تطوير إجراءات السلامة وإدارة المخاطر.
- دعم مشاريع إزالة الكربون والتحول للطاقة النظيفة.

المهارات المطلوبة:
- تقنيات إنتاج التحليل الكهربائي (Electrolysis)
- أنظمة خلايا الوقود (Fuel Cells)
- تحليل المخاطر أيون.
- إلكترونيات القدرة وأنظمة الطاقة.
- تصميم وتشغيل الطاقة المتجددة.
- إدارة الطاقة وتكامل الشبكات الذكية.
- MATLAB/Simulink, Aspen (مثل برامج المحاكاة)
- معايير السلامة للهيدروجين.
- تقييم الجدوى الاقتصادية وتحليل دورة الحياة (LCA)

الوظائف المستقبلية في الهندسة الكهربائية (ما بعد عام 2035)

29 مهندس أشباه الموصلات والرقائق الذكية
(AI Semiconductor and Chip Design Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم وتطوير الرقائق لتطبيقات الذكاء الاصطناعي.
- تطوير معالجات ومسرعات عالية الكفاءة.
- تصميم الدوائر الرقمية والتناظرية المدمجة.
- التحقق الوظيفي واختبارات الأداء للرقائق.
- تحسين استهلاك الطاقة والأداء الحراري.
- دعم تطوير تقنيات أشباه الموصلات المستقبلية.

المهارات المطلوبة:
- تصميم الدوائر المتكاملة (IC Design).
- FPGA و FPGA.
- Verilog/VHDL/SystemVerilog.
- Cadence و Synopsys (EDA).
- AI Accelerators ومعالجات خاصة.
- هندسة الأنظمة الرقمية والمعالجات.
- تصميم منخفض استهلاك للطاقة.
- اختبار الرقائق Chip Verificating.
- تقنيات التصنيع الثانوي.
- Python و C/C++.

30 مهندس الشبكات الكهربائية المستقلة بالكامل
(Autonomous Grid Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير أنظمة تشغيل ذاتية لشبكات الكهربائية.
- تصميم خوارزميات واتخاذ القرار الفوري.
- بناء شبكات ذاتية التعافي واكتشاف الأعطال.
- دمج مصادر الطاقة الموزعة وأنظمة التخزين.
- تحسين استقرار ومرونة الشبكة بالذكاء الاصطناعي.
- تطوير التوائم الرقمية للشبكات الكهربائية.
- ضمان أمن وموثوقية الأنظمة الذاتية التشغيل.

المهارات المطلوبة:
- هندسة نظم القدرة والشبكات الذكية.
- الذكاء الاصطناعي والتعلم المحزز.
- أنظمة إدارة الطاقة المتقدمة (EMS).
- التوائم الرقمية (Digital Twins).
- إنترنت الأشياء الصناعية (IIoT).
- تحليل الموثوقية والمرونة التشغيلية.
- الأمن السيبراني للبنية التحتية الحرجة.
- MATLAB, Python, DigSILENT PowerFactory.
- هندسة الأنظمة السيبرانية الفيزيائية.

31 مهندس البنية التحتية الكهربائية للمدن ذاتية التشغيل
(Self-Operating City Infrastructure Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم البنية التحتية الكهربائية للمدن الذكية.
- دمج شبكات الطاقة والنقل والاتصالات.
- تطوير أنظمة إدارة حضرية ذاتية بالذكاء الاصطناعي.
- تحسين كفاءة استهلاك الطاقة والموارد.
- دعم تكامل المركبات الذاتية والبنية الذكية.
- تطوير التوائم الرقمية للمدن ومراقبة الأداء.
- تعزيز الاستدامة والحياد الكربوني للمدن.

المهارات المطلوبة:
- (Smart Cities) (مثل Digitmerting)
- الشبكات الذكية وأنظمة الطاقة الحضرية.
- الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT).
- التوائم الرقمية (Urban Digital Twins)
- تحليل البيانات الضخمة والحوسبة السحابية.
- الأمن السيبراني للبنية التحتية الحضرية.
- نظم النقل الذكية والمركبات الذاتية.
- إدارة الاستدامة والطاقة الحضرية.

32 مهندس الإلكترونيات العصبية المستوحاة من الدماغ
(Neuromorphic Electronics Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم دوائر إلكترونية عصبية تحاكي الدماغ.
- تطوير شرائح حوسبة عصبية منخفضة الطاقة.
- بناء أنظمة تعلم وتكيف ذاتي على العتاد.
- تطوير معالجات للذكاء الاصطناعي المتقدم.
- تحسين أداء الأنظمة العصبية في الزمن الحقيقي.
- دعم تطوير الجيل القادم من الروبوتات الذكية.
- اختبار واعتماد الأنظمة العصبية الإلكترونية.

المهارات المطلوبة:
- هندسة الإلكترونيات العصبية.
- تصميم الدوائر المتكاملة والرقائق.
- الشبكات العصبية الاصطناعية والعميقة
- FPGA و FPGA.
- هندسة أشباه الموصلات المتقدمة.
- لغات العتاد (مثل VHDL و Verilog).
- الذكاء الاصطناعي (الذكاء Embedmdl)
- تصميم واعتماد منخفض استهلاك الطاقة.
- أدوات الأتمتة للتقرير الني (TSA يلي Cadence).

نحو مستقبل كهربائي ذكي ومستدام
مهارات اليوم ... ريادة الغد

مهارات مستقبلية لجيل الغد | استدامة ومرونة للطاقة والمجتمع | وظائف نوعية ذات تأثير عالمي | ابتكار تقني وتطور دائم | فرص واعدة ونمو مستمر

7.6.1 مهارات المستقبل في الهندسة الكهربائية في عصر الذكاء الاصطناعي

1. المهارات التقنية المستقبلية في الهندسة الكهربائية

في ظل التحول نحو الأنظمة الذكية والطاقة الرقمية، تبرز مجموعة من المهارات التقنية باعتبارها الأكثر أهمية للمهندس الكهربائي خلال السنوات القادمة، وتشمل:

- تطبيقات الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة في أنظمة الطاقة.
- تحليل البيانات الضخمة والتحليلات التنبؤية.
- تصميم الشبكات الذكية وإدارة الطاقة الرقمية.
- إلكترونيات القدرة وأنظمة التخزين الكهربائي.
- تطوير الأنظمة المدمجة والذكاء الاصطناعي الطرفي.
- النمذجة والمحاكاة باستخدام MATLAB وSimulink.
- تقنيات التوأم الرقمي والمحاكاة الصناعية.
- الأمن السيبراني للبنية التحتية الكهربائية.
- الحوسبة السحابية وإنترنت الأشياء الصناعي.
- البرمجة باستخدام Python , C++ , SQL.

2. المهارات المهنية والتحليلية

إلى جانب المهارات التقنية، تتزايد أهمية مجموعة من المهارات المهنية التي تمكّن المهندس الكهربائي من العمل بكفاءة ضمن البيئات الذكية والمتعددة التخصصات، ومن أبرزها:

- التفكير التحليلي وحل المشكلات المعقدة.
- اتخاذ القرار المبني على البيانات.
- إدارة المشاريع التقنية والتحول الرقمي.
- القدرة على العمل ضمن فرق متعددة التخصصات.
- الابتكار وتطوير الحلول الهندسية الذكية.
- التواصل الفني وإدارة المعرفة.
- إدارة المخاطر واستمرارية الأعمال.
- الالتزام بمعايير السلامة والجودة.
- فهم الجوانب الأخلاقية والتنظيمية للذكاء الاصطناعي.

7.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية

على الرغم من التقدم الملحوظ، تواجه تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية جملةً من التحديات الجوهرية التي تستوجب معالجةً منهجية:

7.7.1 التحديات التقنية

- ضعف جودة البيانات وندرة مجموعات البيانات المنقّحة للتدريب الفعّال.
- محدودية قابلية التفسير (Explainability) في النماذج المعقدة، ما يُعيق ثقة المهندسين بها.
- صعوبة الدمج مع الأنظمة الموروثة (Legacy Systems) ذات البنى التحتية القديمة.

7.7.2 التحديات الاقتصادية والبشرية

- ارتفاع تكاليف التحول الرقمي وتطوير البنية التحتية الرقمية الداعمة.
- نقص الكفاءات الهندسية المتخصصة في تقاطع الهندسة الكهربائية والذكاء الاصطناعي.

7.7.3 التحديات الأمنية والتنظيمية

- تصاعد التهديدات السيبرانية الموجهة نحو البنية التحتية الكهربائية الرقمية.
- غياب أطر تنظيمية موحّدة وشاملة لضمان السلامة والاعتمادية.

وفي هذا السياق، تؤكد IEEE أن المسؤولية التشغيلية النهائية تبقى على عاتق المهندس المتخصص، حتى مع الاعتماد على أنظمة الذكاء الاصطناعي المتقدمة؛ إذ لا يُعوّض الذكاء الاصطناعي الحكم الهندسي، بل يُعزّزه ويسانده (IEEE-USA, 2025).

7.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين الكهربائيين

في ظل التحول الرقمي المتسارع في الهندسة الكهربائية، تُوصى المؤسسات والمهندسون الكهربائيين بالتوجهات التالية:

1. **التعلم المستمر في الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات :**ينبغي على المهندسين الكهربائيين تطوير معارفهم في مجالات الذكاء الاصطناعي، والتعلم الآلي، وتحليل البيانات، لما لهذه المهارات من دور محوري في تشغيل الشبكات الذكية، وتحليل الأحمال، والصيانة التنبؤية، وتحسين أداء الأنظمة الكهربائية.
2. **تبني الابتكار في التصميم والتحكم :**يتطلب مستقبل الهندسة الكهربائية توظيف تقنيات التحكم الذكي والخوارزميات التنبؤية في تصميم الأنظمة الكهربائية، بما يسهم في رفع الكفاءة وتحسين الاعتمادية وتقليل الفاقد التشغيلي.

3. **تحسين الكفاءة التشغيلية بالاعتماد على البيانات :**أصبحت البيانات التشغيلية أحد أهم الأصول الاستراتيجية في الأنظمة الكهربائية الحديثة، لذلك يجب تعزيز استخدام التحليلات الذكية وأنظمة المراقبة اللحظية لتحسين الأداء واكتشاف الأعطال وتقليل استهلاك الطاقة.
4. **تعزيز التحول الرقمي والتكيف مع التقنيات الحديثة :**يُعد التحول الرقمي جزءاً أساسياً من مستقبل قطاع الطاقة، مما يفرض على المهندسين الكهربائيين التكيف مع التقنيات الحديثة مثل إنترنت الأشياء (IoT) ، والتوائم الرقمية، والحوسبة السحابية، وأنظمة الأتمتة الصناعية.
5. **دعم الاستدامة والطاقة المتجددة :**ينبغي التركيز على تطوير حلول كهربائية تدعم الاستدامة البيئية، من خلال دمج مصادر الطاقة المتجددة، وتحسين كفاءة استخدام الطاقة، وتقليل الانبعاثات الكربونية ضمن الأنظمة الكهربائية الذكية.
6. **تعزيز التعاون مع الصناعة والمؤسسات البحثية :**يسهم التعاون بين الجامعات، والمراكز البحثية، والشركات الصناعية، في نقل المعرفة وتسريع تطوير التقنيات الحديثة، إضافة إلى مواءمة مخرجات التعليم الهندسي مع متطلبات سوق العمل المستقبلية.

7.9 الخاتمة

يمثل الذكاء الاصطناعي تحولاً استراتيجياً عميقاً في الهندسة الكهربائية، إذ يُعيد تشكيل أساليب التصميم والتشغيل والإدارة عبر مختلف القطاعات والتطبيقات. ومع استمرار التطور التقني وتراكم البيانات، تتجه الأنظمة الكهربائية نحو مزيد من الذكاء والمرونة والاستدامة.

غير أن نجاح هذا التحول لا يتحقق إلا من خلال التكامل العضوي بين قدرات الذكاء الاصطناعي والخبرة الهندسية البشرية، ضمن إطار مؤسسي يضمن السلامة والكفاءة والأمن السيبراني. وتبقى الاستدامة التقنية والبيئية والاقتصادية المحرّكَ الجوهري لهذه المسيرة التحويلية، في ظل تحديات متصاعدة تستوجب استثماراً موصولاً في البحث والتطوير وبناء الكفاءات المتخصصة.

الفصل الثامن

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

8.1 مقدمة: التحول الرقمي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

يشهد قطاع المناجم والتعدين تحولًا رقميًا متسارعًا في ظل الثورة الصناعية الرابعة، مدفوعًا بالتقدم في تقنيات الذكاء الاصطناعي، والتعلم الآلي (Machine Learning) ، والتعلم العميق (Deep Learning) ، والتحليلات التنبؤية، والأنظمة الذاتية التشغيل. ويُعد هذا القطاع من أكثر القطاعات الصناعية الثقيلة قابلية للاستفادة من هذه التقنيات نظرًا لتعقيد بيئاته التشغيلية، وارتفاع مستويات المخاطر، وتباين البيانات الجيولوجية، إضافة إلى الضغوط المتزايدة لتحسين الكفاءة التشغيلية وتحقيق الاستدامة البيئية وخفض التكاليف (Yang et al., 2025).

وقد أدى تطور مفهوم التعدين الذكي (Smart Mining) إلى إعادة تشكيل نماذج التشغيل التقليدية من خلال دمج البيانات الضخمة (Big Data)، وإنترنت الأشياء (IoT) ، والحوسبة السحابية، والتوائم الرقمية (Digital Twins) ، والأنظمة الذاتية التشغيل ضمن بيئة رقمية متكاملة. وقد أسهم هذا التحول في رفع الإنتاجية التشغيلية، وتحسين إدارة الموارد، وتقليل الحوادث المهنية، وتعزيز دقة اتخاذ القرار عبر مختلف مراحل دورة حياة المنجم (Dillon & Mackenzie, 2025).

وتشير التقارير الصناعية الحديثة إلى أن تبني الذكاء الاصطناعي في قطاع التعدين يشهد نموًا تدريجيًا، إلا أنه غير متكافئ بين الشركات. فوفقًا لتقارير (McKinsey& Deloitte, 2025) ، بدأت الشركات الكبرى في تطبيق حلول الذكاء الاصطناعي في مجالات مثل الصيانة التنبؤية، وتحسين سلاسل الإمداد، وتشغيل المعدات الثقيلة بشكل شبه ذاتي، بينما لا تزال الشركات المتوسطة والصغيرة في مراحل التجربة أو التقييم. كما تعتمد العديد من الشركات الرائدة على حلول رقمية جزئية دون تكامل شامل على مستوى المنجم، ما يعكس فجوة واضحة بين الإمكانات التقنية ومستوى التطبيق الفعلي.

وفي السياق ذاته، أظهرت تقارير المنتدى الاقتصادي العالمي (WEF, 2025) أن تطبيق الذكاء الاصطناعي في التعدين يحقق تحسينات تشغيلية ملموسة، تشمل خفض تكاليف التشغيل بنسبة تتراوح بين 15% و25% في بعض المشاريع المتقدمة، وتقليل التوقفات غير المخططة للمعدات بنسبة تصل إلى 30%–40% في تطبيقات الصيانة التنبؤية، إضافة إلى تحسين كفاءة استهلاك الطاقة وتقليل الفاقد في عمليات الاستخراج والمعالجة. كما تسهم أنظمة التشغيل الذاتي في رفع مستويات السلامة المهنية من خلال تقليل التدخل البشري في البيئات عالية الخطورة.

ومن منظور العائد على الاستثمار (ROI) ، تشير الدراسات الحديثة إلى أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في قطاع التعدين تحقق عوائد اقتصادية ملحوظة على المدى المتوسط، خاصة في مجالات إدارة الأصول والصيانة التنبؤية وتحسين عمليات الحفر والنقل. وغالبًا ما يتم استرداد تكاليف الاستثمار خلال فترة تتراوح بين 18 إلى 36 شهرًا في المشاريع الناضجة رقميًا، نتيجة خفض الأعطال، وتقليل استهلاك الوقود، وتحسين كفاءة تشغيل المعدات الثقيلة (IBM Institute for Business Value, 2025؛ PwC, 2025)

ورغم هذه المكاسب، لا تزال هناك فجوة واضحة بين الطموح التقني لمفهوم "التعدين الذكي" ومستوى التبني الفعلي على أرض الواقع. إذ تتركز تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الشركات الكبرى ذات البنية التحتية الرقمية المتقدمة، في حين تواجه العديد من الشركات تحديات تتعلق بتكامل البيانات، وارتفاع التكاليف، ونقص الكفاءات المتخصصة، وضعف جاهزية الأنظمة التقليدية للتحول الرقمي (Deloitte, 2025).

كما تؤكد الأدبيات الحديثة (2024–2026) أن الذكاء الاصطناعي لم يعد مجرد أداة مساندة، بل أصبح عنصرًا استراتيجيًا ضمن إطار التعدين 4.0، حيث يُوظف عبر مختلف مراحل دورة حياة المنجم، بدءًا من الاستكشاف الجيولوجي، مرورًا بالتخطيط والتشغيل الذاتي، وصولًا إلى الإغلاق البيئي وإعادة تأهيل المواقع التعدينية (MDPI, 2026). ويعزز هذا التحول الانتقال نحو نموذج تشغيلي قائم على البيانات في اتخاذ القرار بدلًا من الاعتماد على الخبرة البشرية فقط.

وفي ضوء ذلك، يتناول هذا الفصل بصورة منهجية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول، من خلال استعراض مجالات الاستخدام المختلفة، والأدوات والتقنيات الحديثة، والفوائد الاستراتيجية المتحققة، إضافة إلى الوظائف المستقبلية والمهارات المطلوبة، والتحديات والمعوقات الرئيسة، وصولًا إلى مجموعة من التوصيات العملية التي تدعم التحول نحو مناجم ذكية أكثر كفاءة واستدامة وأمانًا.

8.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية

يشهد قطاع هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول تحولًا جذريًا ومتسارعًا نتيجة التوسع في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي ضمن مختلف مراحل سلسلة القيمة التعدينية، بدءًا من الاستكشاف الجيولوجي وتقييم الموارد المعدنية، مرورًا بنمذجة المكامن والتخطيط المنجمي، ووصولًا إلى التشغيل الذاتي للمعدات، ومعالجة المعادن، والصيانة الذكية، وإدارة الطاقة والاستدامة البيئية. وقد أسهم هذا التحول في تعزيز كفاءة العمليات التعدينية، وتقليل التكاليف التشغيلية، ورفع مستويات السلامة، وتحسين استغلال الموارد الطبيعية، إلى جانب دعم اتخاذ القرار في البيئات التشغيلية المعقدة وغير اليقينية.

ولم يعد دور الذكاء الاصطناعي مقتصرًا على أتمتة الأنشطة التعدينية التقليدية، بل امتد ليشمل تطوير نماذج تنبؤية وتحليلية متقدمة قادرة على معالجة البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية والجيوكيميائية الضخمة، واكتشاف الأنماط الخفية، والتنبؤ بسلوك المكامن، وتحسين إدارة الأصول والبنية التحتية التعدينية. كما أسهم التكامل بين تقنيات التعلم الآلي، والتعلم العميق، والرؤية الحاسوبية، وإنترنت الأشياء الصناعي، والتوائم الرقمية في تطوير بيئات تشغيل أكثر ذكاءً ومرونة وقدرة على التكيف مع المتغيرات التشغيلية والاقتصادية.

وقد انعكس هذا التطور بصورة مباشرة على مختلف مجالات التعدين الحديثة، حيث ظهرت تطبيقات متقدمة تشمل الاستكشاف الذكي، والتخطيط المنجمي الديناميكي، والمناجم ذاتية التشغيل، والصيانة التنبؤية، وإدارة المخاطر والسلامة المهنية، إلى جانب تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الأثر البيئي للأنشطة التعدينية. كما أصبحت تقنيات المحاكاة الذكية والتوائم الرقمية أدوات محورية لدعم اتخاذ القرار وتحليل السيناريوهات التشغيلية في الزمن الحقيقي.

ومع استمرار تطور القدرات الحاسوبية وتكامل الذكاء الاصطناعي مع تقنيات الثورة الصناعية الرابعة، يُتوقع أن يشهد قطاع التعدين انتقالًا متزايدًا نحو المناجم الرقمية المتكاملة والأنظمة ذاتية الإدارة، بما يدعم تحقيق أهداف الاستدامة، وتعظيم القيمة الاقتصادية للموارد المعدنية، وتعزيز القدرة التنافسية للقطاع التعديني عالميًا.

تشمل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في قطاع المناجم والتعدين طيفًا واسعًا من المجالات، كما هو موضح كالتالي:

8.2.1 الاستكشاف الجيولوجي وتحديد الموارد المعدنية

يمثل الاستكشاف الجيولوجي وتحديد الموارد المعدنية المرحلة التأسيسية في دورة حياة المشروع التعديني، إذ تُبنى عليه جميع القرارات الاستراتيجية المتعلقة بتقييم الجدوى الاقتصادية، ونمذجة المكامن، والتخطيط المنجمي. وقد شهد هذا المجال خلال السنوات الأخيرة تحولاً نوعياً بفضل دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي، والتعلم الآلي، وتحليلات البيانات الضخمة، مما أدى إلى تحسين دقة اكتشاف الرواسب المعدنية وتقليل المخاطر المرتبطة بعمليات الاستكشاف التقليدية ذات التكلفة المرتفعة وعدم اليقين (Harris et al., 2020).

ويعتمد الاستكشاف الحديث على تكامل مصادر بيانات متعددة تشمل المسوحات الجيولوجية، والصور الفضائية، وبيانات الأقمار الصناعية، والمسح الجيوفيزيائي، والتحاليل الجيوكيميائية، إضافة إلى بيانات LiDAR والنماذج الرقمية للارتفاعات (DEM). ويُستخدم الذكاء الاصطناعي لدمج هذه البيانات غير المتجانسة وتحليلها بهدف استخراج الأنماط الجيولوجية الدالة على وجود المعادن (Xiong et al., 2021).

أولاً: تحليل البيانات الجيولوجية متعددة المصادر

تُعد عملية دمج البيانات متعددة المصادر (Multi-source Data Integration) من أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الاستكشاف، حيث يتم توحيد البيانات المكانية والزمانية والفيزيائية ضمن نماذج تحليلية متكاملة. ويشمل ذلك دمج بيانات الأقمار الصناعية والصور الجوية، وتحليل الخرائط الجيولوجية الرقمية، ومعالجة بيانات الجيوفيزياء، وتحليل العينات الجيوكيميائية، إضافة إلى بيانات الحفر الاستكشافي، بما يتيح بناء قاعدة بيانات جيولوجية شاملة تدعم النمذجة التنبؤية.

ثانياً: الكشف الذكي عن الرواسب المعدنية

أصبح الذكاء الاصطناعي أداة فعالة في تحديد مناطق الاحتمالية المعدنية (Mineral Prospectivity Mapping) ، باستخدام خوارزميات التعلم الآلي مثل الشبكات العصبية، وآلات الدعم المتجه، والغابات العشوائية، والتعلم العميق، ونماذج التعلم التجميعي. وتتميز هذه النماذج بقدرتها على تحليل العلاقات غير الخطية بين المتغيرات الجيولوجية، مما يرفع دقة التنبؤ ويقلل نطاقات الاستكشاف غير المجدية اقتصادياً (Rodriguez-Galiano et al., 2015).

ثالثاً: تحليل الصور الفضائية والاستشعار عن بعد

يشكل الاستشعار عن بعد أحد أهم مصادر البيانات في الاستكشاف الحديث، حيث تُستخدم الصور متعددة الأطياف والفائقة الطيفية لتحليل التراكيب الجيولوجية. ويسهم الذكاء الاصطناعي في تفسير هذه الصور، والكشف عن الصدوع والتراكيب الجيولوجية، وتحديد مناطق التمعدن المحتملة، ورصد التغيرات السطحية الدقيقة، مع تحقيق أداء متقدم عبر تقنيات الرؤية الحاسوبية مقارنة بالأساليب التقليدية.

رابعاً: التنبؤ بدرجة الخام وتوزيع المعادن

يسهم الذكاء الاصطناعي في تحسين تقدير درجة الخام وتوزيع المعادن داخل المكامن، من خلال نماذج تنبؤية قادرة على تحليل التباين الجيولوجي وتقدير التوزيع المكاني للعناصر، مما يعزز دقة نماذج الاحتياطيات ويقلل من عدم اليقين في التقديرات الاقتصادية.

خامساً: تقليل المخاطر في الاستكشاف

تعمل النماذج التنبؤية على تقليل المخاطر المرتبطة بعمليات الاستكشاف عبر تحسين تحديد مواقع الحفر، وتقليل الآبار غير المجدية، وخفض التكاليف الميدانية، وتحسين تخصيص الموارد، بما يدعم قرارات الاستثمار (McKinsey & Company, 2025).

سادساً: التوائم الرقمية في الاستكشاف

أصبح التوأم الرقمي أداة متقدمة في تمثيل النظم الجيولوجية بصورة ديناميكية، حيث يتم تحديث النماذج بشكل مستمر اعتماداً على البيانات الجديدة، مما يتيح محاكاة التكوينات الجيولوجية، واختبار سيناريوهات الحفر، وتحسين استراتيجيات الاستكشاف في الزمن الحقيقي (World Economic Forum, 2025).

8.2.2 نمذجة المكامن المعدنية والتخطيط المنجمي

تُعد نمذجة المكامن المعدنية والتخطيط المنجمي من أكثر مجالات هندسة التعدين استفادةً من تقنيات الذكاء الاصطناعي، نظراً لاعتمادها على كميات كبيرة من البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية والجيوكيميائية ذات الطبيعة المعقدة وغير اليقينية. وقد أسهم الذكاء الاصطناعي في إحداث تحول جوهري في أساليب توصيف المكامن وتقدير الاحتياطيات وتخطيط عمليات الاستخراج، من خلال تطوير نماذج تحليلية وتنبؤية قادرة على اكتشاف الأنماط الخفية والعلاقات غير الخطية في البيانات الجيولوجية (Dutta et al., 2020).

ويأتي هذا التطور في ظل التحديات المتزايدة التي تواجه قطاع التعدين، مثل انخفاض جودة الخامات السطحية وارتفاع تكاليف التطوير والحاجة إلى تحسين كفاءة استغلال الموارد. وفي هذا الإطار، أصبح الذكاء الاصطناعي أداة محورية لدعم اتخاذ القرار عبر جميع مراحل دورة حياة المنجم.

أولاً: النمذجة الذكية للمكامن المعدنية

تعتمد نمذجة المكامن على دمج بيانات الحفر الاستكشافي والمسوح الجيولوجية والجيوفيزيائية والجيوكيميائية لبناء نموذج ثلاثي الأبعاد يصف توزيع الخام وخصائصه. وتُستخدم خوارزميات التعلم الآلي والشبكات العصبية في تصنيف الوحدات الجيولوجية، وتحديد حدود الأجسام الخامية، والتنبؤ بالتوزيع المكاني للمعادن، بما يعزز دقة النماذج ويقلل عدم اليقين.

ثانياً: تقدير الموارد والاحتياطيات المعدنية

يمثل تقدير الموارد والاحتياطيات أحد التطبيقات الأساسية للذكاء الاصطناعي، حيث يتم توظيف النماذج التنبؤية بدلاً من الأساليب التقليدية مثل الكريغينغ. وتساهم هذه النماذج في تحسين دقة تقدير درجات الخام، والتوزيع المكاني للعناصر، وتقليل مخاطر الاستثمار، ودعم دراسات الجدوى الاقتصادية (Zuo et al., 2019).

ثالثاً: تنبؤ بجودة الخام وتقليل التباين

يسهم الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بجودة الخام قبل الاستخراج، وتحليل التباين الجيولوجي، وتحسين استراتيجيات المزج، مما يؤدي إلى استقرار العمليات التشغيلية ورفع كفاءة المعالجة وتقليل التقلبات في جودة التغذية.

رابعاً: التخطيط الاستراتيجي للمناجم

يدعم الذكاء الاصطناعي عمليات التخطيط الاستراتيجي من خلال تحليل المتغيرات الفنية والاقتصادية والبيئية لتحديد حدود الحفر المثلى، وتسلسل الاستخراج، وتقدير العمر الاقتصادي للمنجم، بما يحقق أعلى قيمة اقتصادية حالية صافية (NPV) (Whittle, 2024).

خامساً: التخطيط التشغيلي وجدولة الإنتاج

تُستخدم النماذج الذكية في إعداد جداول تشغيل ديناميكية تشمل الحفر والنقل وإدارة الأساطيل، بما يسهم في تحسين كفاءة الموارد وتقليل الاختناقات التشغيلية ورفع الإنتاجية.

سادساً: التصميم التوليدي للمناجم

يعتمد التصميم التوليدي على خوارزميات الذكاء الاصطناعي لإنتاج بدائل تصميمية متعددة للمناجم وتحليلها، بهدف تحسين تصميم الحفر المفتوحة والأنفاق وتقليل التكاليف وتعظيم الاستفادة من الموارد.

سابعاً: التوائم الرقمية في التخطيط المنجمي

تتيح التوائم الرقمية إنشاء نموذج افتراضي متكامل للمنجم لمحاكاة سيناريوهات التشغيل المختلفة وتحليل المخاطر والتنبؤ بالأداء المستقبلي، بما يدعم اتخاذ القرار في الزمن الحقيقي (World Economic Forum, 2025) .

ثامناً: الاستدامة وتحسين استغلال الموارد

يسهم الذكاء الاصطناعي في رفع كفاءة استغلال الموارد المعدنية، وتقليل الفاقد، وتحسين استخدام الطاقة، وخفض الأثر البيئي، بما يتماشى مع أهداف التعدين المستدام.

تاسعاً: الاتجاهات المستقبلية

يتجه المستقبل نحو المناجم الرقمية الكاملة، والتخطيط الذاتي المدعوم بالذكاء الاصطناعي، والتوائم الرقمية المتكاملة، إضافة إلى استخدام وكلاء الذكاء الاصطناعي والنماذج اللغوية الكبيرة في دعم القرار وتحليل البيانات الجيولوجية.

8.2.3 التشغيل الذاتي للمعدات والمناجم الذكية

يمثل التشغيل الذاتي (Autonomous Mining) أحد أبرز التحولات في قطاع التعدين الحديث، حيث تعتمد المناجم الذكية على منظومات متكاملة تشمل الشاحنات ذاتية القيادة، والحفارات الذكية، والروبوتات التعدينية، وأنظمة التحكم المركزي، إضافة إلى إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT).

وتعمل هذه الأنظمة بالاعتماد على تقنيات تحديد المواقع (GPS) ، والرؤية الحاسوبية، وتقنية الليدار(LiDAR) ، والتعلم العميق، والتحليلات اللحظية للبيانات، بما يتيح تحقيق مستويات عالية من التشغيل المستمر والدقيق.

وقد انعكس هذا التحول في تحسين الأداء التشغيلي، ورفع الإنتاجية، وتقليل الحوادث البشرية، وخفض استهلاك الوقود، إلى جانب إمكانية تشغيل المناجم على مدار الساعة وتحسين كفاءة العمليات اللوجستية داخل الموقع. وتشير الدراسات إلى أن أنظمة التعدين الذاتي يمكن أن ترفع الإنتاجية بنسبة تتراوح بين 15% و30% مع تقليل استهلاك الوقود بنسبة تصل إلى 5% (Industry Mining Review, 2025).

كما تعتمد هذه الأنظمة على خوارزميات تحسين المسارات واتخاذ القرار اللحظي بهدف تقليل زمن النقل وتحسين تدفق المواد الخام داخل المنجم (Rahman et al., 2026).

الاتجاهات المستقبلية

تشمل الاتجاهات المستقبلية المناجم المعرفية، والروبوتات التعاونية، والأنظمة السيبرانية الفيزيائية، والتكامل الكامل بين الذكاء الاصطناعي والتوائم الرقمية والحوسبة الطرفية.

8.2.4 الذكاء الاصطناعي في معالجة المعادن

تُعد عمليات معالجة المعادن من أكثر العمليات الصناعية تعقيدًا واستمرارية، مما يجعلها من أبرز المجالات المستفيدة من تطبيقات الذكاء الاصطناعي. وتُستخدم هذه التقنيات في تحسين عمليات السحق والطحن، والتحكم في عمليات التعويم (Flotation)، ورفع كفاءة استرجاع المعادن، وتقليل استهلاك الطاقة، إضافة إلى تحسين التحكم اللحظي في عمليات الفصل المعدني.

وتعتمد هذه الأنظمة على تحليل البيانات التشغيلية في الزمن الحقيقي لضبط معلمات التشغيل بشكل تكيفي وفق خصائص الخام الداخل إلى العملية (Yang et al., 2025). كما برزت تقنيات التوأم الرقمي (Digital Twins) بوصفها أداة متقدمة لمحاكاة أداء المصانع التعدينية عبر نماذج افتراضية ديناميكية مرتبطة ببيانات الاستشعار الفعلية، بما يتيح اختبار السيناريوهات التشغيلية وتحسين الأداء قبل التنفيذ الميداني (Journal of Technologies, 2026).

الاتجاهات المستقبلية

تشمل المصانع الذاتية التشغيل، والتحكم بالتعلم المعزز، والتوائم الرقمية الذكية، وأنظمة التحسين المستمر في الزمن الحقيقي.

8.2.5 الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول التعدينية

تعتمد الصيانة التنبؤية على تحليل بيانات التشغيل الحيوية مثل الاهتزاز، ودرجة الحرارة، والضغط، ومؤشرات الأداء التشغيلي، بهدف التنبؤ بالأعطال قبل وقوعها وتقليل التوقفات غير المخططة.

وتوظف هذه الأنظمة تقنيات الشبكات العصبية المتكررة (RNNs)، والتعلم العميق، وتحليل السلاسل الزمنية لمراقبة أداء المعدات الثقيلة مثل الحفارات، والشاحنات، والسيور الناقلة، والطواحين.

وقد أثبتت الدراسات أن اعتماد الصيانة التنبؤية يسهم في خفض تكاليف الصيانة، ورفع الجاهزية التشغيلية، وإطالة العمر الافتراضي للمعدات، وتقليل خسائر التوقف المفاجئ (Metso, 2023).

8.2.6 السلامة المهنية وإدارة المخاطر التعدينية

يُعد تعزيز السلامة المهنية أحد أهم دوافع تطبيق الذكاء الاصطناعي في قطاع التعدين، نظرًا لطبيعة البيئات التشغيلية عالية الخطورة. وتستخدم تقنيات الرؤية الحاسوبية والكاميرات الذكية لرصد مجموعة من المخاطر التشغيلية، مثل دخول العمال إلى المناطق الخطرة، وعدم الالتزام بمعدات السلامة، والتشققات والانهيارات المحتملة، وتسرب الغازات السامة، وعدم استقرار الأنفاق.
كما تُستخدم النماذج التنبؤية لتحليل استقرار جدران المناجم والتنبؤ بالانهيارات قبل وقوعها، مما يسهم في تقليل الحوادث، وتحسين بيئة العمل، وتعزيز إجراءات السلامة التشغيلية (MDPI Algorithms, 2026).

8.2.7 إدارة الطاقة والاستدامة البيئية

يسهم الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة وتقليل الأثر البيئي للعمليات التعدينية من خلال تحسين إدارة الطاقة داخل المناجم، وخفض استهلاك الوقود والكهرباء، ورفع كفاءة المعدات الثقيلة، وتقليل الانبعاثات الكربونية، إلى جانب تحسين إدارة المياه والمخلفات التعدينية.

كما تدعم هذه الأنظمة تحقيق متطلبات الاستدامة البيئية والامتثال للتشريعات البيئية الدولية، بما يعزز التحول نحو نماذج تعدين منخفضة الانبعاثات وأكثر كفاءة من الناحية البيئية.

الاتجاهات المستقبلية

التعدين منخفض الكربون، المناجم المستدامة، التوائم الرقمية البيئية، والاقتصاد الدائري.

8.2.8 التوأم الرقمي والمحاكاة الذكية في التعدين

يُعد التوأم الرقمي (Digital Twin) من أكثر التقنيات التحويلية تأثيراً في قطاع التعدين الحديث، حيث يتيح إنشاء نموذج رقمي ديناميكي مطابق للأصول والعمليات التعدينية الحقيقية، بما يشمل المناجم السطحية وتحت السطحية، ومعدات الاستخراج والنقل، ومصانع المعالجة، والبنية التحتية الداعمة. ويعتمد هذا النموذج على التكامل بين أجهزة الاستشعار، وإنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)، وأنظمة تحديد المواقع، والبيانات الجيولوجية، وتقنيات الذكاء الاصطناعي والتحليلات التنبؤية، بما يسمح بمراقبة العمليات وتحليلها وتحسينها بصورة مستمرة وفي الزمن الحقيقي (World Economic Forum, 2025).

وقد أدى التطور المتسارع في تقنيات الذكاء الاصطناعي والحوسبة السحابية إلى انتقال قطاع التعدين من أساليب التشغيل التقليدية القائمة على المراقبة اللاحقة للأحداث إلى نماذج تشغيلية تنبؤية واستباقية تعتمد على المحاكاة الذكية واتخاذ القرار المدعوم بالبيانات. وأصبحت التوائم الرقمية تمثل الركيزة الأساسية لما يُعرف بالمناجم الذكية (Smart Mines) ، والتي تسعى إلى تحقيق مستويات أعلى من الكفاءة التشغيلية والسلامة والاستدامة.

أولاً: إنشاء نموذج رقمي متكامل للمنجم

يقوم التوأم الرقمي على بناء نسخة افتراضية دقيقة للمنجم تشمل:

- النماذج الجيولوجية ثلاثية الأبعاد .
- طبقات الخام والاحتياطيات المعدنية .
- معدات الحفر والاستخراج والنقل .
- شبكات التهوية والطاقة والمياه .
- خطوط المعالجة والإنتاج .
- الظروف البيئية والتشغيلية المحيطة .

ويتم تحديث هذه النماذج بصورة مستمرة اعتماداً على البيانات الواردة من أجهزة الاستشعار والطائرات المسيّرة وأنظمة المسح الليزري (LiDAR) والأقمار الصناعية، مما يوفر صورة رقمية متكاملة للحالة الفعلية للمنجم (McKinsey & Company, 2025).

ثانياً: المحاكاة الذكية للعمليات التعدينية

تتيح المحاكاة الذكية إمكانية دراسة وتحليل العمليات التعدينية المختلفة قبل تنفيذها ميدانياً، مما يساعد على تقليل المخاطر وتحسين كفاءة اتخاذ القرار. وتشمل هذه المحاكاة:

- تخطيط عمليات الحفر والتفجير .
- تصميم مسارات النقل والشاحنات .
- تحسين تسلسل الاستخراج .
- محاكاة تدفقات المواد الخام .
- تحسين عمليات المعالجة المعدنية .

وتستخدم خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحليل نتائج المحاكاة واقتراح البدائل التشغيلية الأكثر كفاءة من الناحية الاقتصادية والفنية (Elsevier Resources Policy, 2025).

ثالثاً: التنبؤ بالأعطال وتحسين الصيانة

تمثل الصيانة التنبؤية أحد أهم تطبيقات التوائم الرقمية في قطاع التعدين، حيث يتم ربط النماذج الرقمية بمعدات التشغيل الفعلية مثل الحفارات والشاحنات والسيور الناقلة والطواحين الصناعية.

وتساعد النماذج الذكية في:

- التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها .
- تقدير العمر التشغيلي المتبقي للمعدات (Remaining Useful Life – RUL).
- تحسين جداول الصيانة .
- تقليل التوقفات غير المخطط لها .
- خفض تكاليف التشغيل والصيانة .

ويؤدي ذلك إلى زيادة الجاهزية التشغيلية للمعدات وتحسين الإنتاجية العامة للمنجم (Deloitte Mining Report, 2025).

رابعاً: دعم اتخاذ القرار التشغيلي في الزمن الحقيقي

توفر التوائم الرقمية منصة متقدمة لدعم اتخاذ القرار التشغيلي من خلال دمج البيانات الميدانية والنماذج التنبؤية في بيئة رقمية موحدة. ويمكن لمهندسي التعدين ومديري العمليات استخدام هذه المنصة من أجل:

- مراقبة الإنتاج لحظياً .
- تحسين توزيع المعدات والموارد .
- إدارة الاختناقات التشغيلية .
- تحسين استهلاك الطاقة والوقود .
- الاستجابة السريعة للمتغيرات التشغيلية .

كما تسمح هذه الأنظمة بتحليل سيناريوهات متعددة واقتراح أفضل الإجراءات التشغيلية بناءً على الظروف الفعلية للمنجم.

خامساً: إدارة المخاطر والسلامة التعدينية

تسهم التوائم الرقمية بصورة مباشرة في تعزيز السلامة المهنية وإدارة المخاطر من خلال محاكاة الظروف التشغيلية الخطرة والتنبؤ بالمخاطر المحتملة قبل وقوعها.

وتشمل التطبيقات:

- التنبؤ بانهيارات المنحدرات الصخرية .

- مراقبة استقرار الأنفاق والمناجم تحت السطحية .
- تقييم مخاطر الفيضانات والتسربات المائية .
- تحليل جودة الهواء والغازات الخطرة .
- دعم خطط الإخلاء والاستجابة للطوارئ .

وتساعد هذه القدرات على تقليل الحوادث وتحسين مستوى السلامة للعاملين داخل المناجم (International Council on Mining and Metals) (ICMM, 2025)

سادساً: التوأم الرقمي والاستدامة البيئية

أصبح التوأم الرقمي أداة مهمة لدعم الاستدامة في قطاع التعدين، حيث يُستخدم لمراقبة الأداء البيئي وتحليل تأثير العمليات التعدينية على الموارد الطبيعية والبيئة المحيطة.

وتشمل تطبيقاته:

- مراقبة استهلاك المياه والطاقة .
- تقليل الانبعاثات الكربونية .
- إدارة المخلفات التعدينية .
- تحسين كفاءة استخدام الموارد .
- دعم خطط إعادة تأهيل المواقع التعدينية .

وتنسجم هذه التطبيقات مع التوجهات العالمية نحو التعدين المستدام والمسؤول بيئياً (United Nations Environment Programme) (UNEP, 2025)

سابعاً: الاتجاهات المستقبلية

تشير الأدبيات الحديثة إلى أن التوائم الرقمية ستصبح خلال السنوات القادمة مكوناً أساسياً في جميع مراحل دورة حياة المنجم، مع تزايد التكامل بين:

- الذكاء الاصطناعي والتوائم الرقمية .
- المركبات والمعدات ذاتية التشغيل .
- الروبوتات التعدينية .
- إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT).
- الحوسبة السحابية والحوسبة الطرفية (Edge Computing).
- أنظمة اتخاذ القرار الذاتية .

كما يتوقع أن تظهر مفاهيم جديدة مثل **"المنجم المعرفي (Cognitive Mine) "**، الذي يعتمد على التعلم المستمر والتحسين الذاتي للعمليات التشغيلية باستخدام الذكاء الاصطناعي والتوائم الرقمية بصورة متكاملة.

يمثل التوأم الرقمي والمحاكاة الذكية أحد أهم محاور التحول الرقمي في هندسة التعدين، حيث يوفران بيئة رقمية متكاملة تسمح بفهم العمليات التعدينية وتحليلها وتحسينها بصورة مستمرة. ومن خلال دمج الذكاء الاصطناعي مع النماذج الرقمية المتقدمة، أصبح بالإمكان رفع الإنتاجية، وتحسين السلامة، وتقليل التكاليف، وتعزيز الاستدامة البيئية، مما يجعل التوأم الرقمي أحد الركائز الأساسية للمناجم الذكية المستقبلية.

8.2.9 التطبيقات الناشئة والمستقبلية

تشهد صناعة التعدين ظهور مجموعة من التطبيقات الناشئة المدفوعة بالذكاء الاصطناعي، تشمل المناجم ذاتية التشغيل بالكامل، والروبوتات التعدينية المستقلة، والطائرات المسيّرة (Drones) لأغراض المسح والمراقبة، والتحليلات الجيومكانية الذكية، وأنظمة التعدين منخفض الانبعاثات، إضافة إلى أنظمة اتخاذ القرار المعتمدة على البيانات الضخمة وإدارة سلاسل الإمداد التعدينية الذكية. وتشير الاتجاهات المستقبلية إلى أن الذكاء الاصطناعي سيتحول إلى عنصر محوري في إعادة تشكيل قطاع التعدين، بما يعزز كفاءته التشغيلية، ويرفع مستويات السلامة، ويدعم الاستدامة البيئية على المدى الطويل.

8.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

تعتمد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول على مجموعة متنوعة من التقنيات والخوارزميات المتقدمة التي تُستخدم في الاستكشاف الجيولوجي، ونمذجة المكامن المعدنية، وتشغيل المناجم الذكية، والصيانة التنبؤية، وإدارة السلامة، وتحسين عمليات معالجة المعادن، والاستدامة البيئية. وتختلف التقنيات المستخدمة تبعًا لطبيعة المرحلة التعدينية ومستوى الأتمتة وحجم البيانات الجيولوجية والتشغيلية المتاحة. ويوضح الجدول التالي أبرز التقنيات المستخدمة في المجالات التعدينية المختلفة:

جدول (8.1). أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

مجال التطبيق	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة
الاستكشاف الجيولوجي وتحديد الموارد المعدنية	التعلم الآلي (ML)، الغابات العشوائية (Random Forest)، آلات المتجهات الداعمة (SVM)، الشبكات العصبية (ANN)
نمذجة المكامن المعدنية والتخطيط المنجمي	Ensemble Learning، Boosting Gradient، Decision Trees، Neural Networks
التشغيل الذاتي للمعدات والمناجم الذكية	التعلم العميق (DL)، الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)، التعلم المعزز (RL)، Analytics LiDAR
الصيانة التنبؤية وإدارة الأصول التعدينية	تحليل السلاسل الزمنية (Time-Series Analysis)، الشبكات العصبية المتكررة (RNN)، كشف الشذوذ (Anomaly Detection)
السلامة المهنية وإدارة المخاطر التعدينية	الرؤية الحاسوبية، التعلم العميق، التحليلات التنبؤية
إدارة الطاقة والاستدامة البيئية	التعلم الآلي، التحليلات التنبؤية، التحسين الذكي (Optimization Algorithms)
التوأم الرقمي والمحاكاة الذكية	التوأم الرقمي (Digital Twins)، إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)، التحليلات التنبؤية
الطائرات المسيّرة والمسح الذكي	الرؤية الحاسوبية، تحليل الصور، التعلم العميق
المناجم الذكية وإنترنت الأشياء الصناعي	Edge AI، IIoT، التعلم الآلي

8.3.1 التقنيات الأكثر استخداماً في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

يمكن تصنيف التقنيات الأساسية المستخدمة في معظم تطبيقات هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول وفق الترتيب الآتي:

1. **التعلم الآلي (Machine Learning)** : يُستخدم في الاستكشاف الجيولوجي، وتقدير الموارد المعدنية، وتحليل البيانات التشغيلية، وتحسين عمليات الإنتاج والتخطيط المنجمي.
2. **التعلم العميق (Deep Learning)** : يُستخدم في تحليل الصور الجيولوجية، وتشغيل الأنظمة الذاتية، والرؤية الحاسوبية، واكتشاف الأنماط المعقدة في البيانات التعدينية.
3. **الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks)** : تُستخدم في نمذجة المكامن المعدنية، والتنبؤ بالأداء التشغيلي، وتحسين عمليات معالجة المعادن.
4. **الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)** : تُستخدم في مراقبة السلامة المهنية، وتحليل صور الأقمار الصناعية، وتشغيل المعدات الذاتية، وكشف المخاطر التشغيلية.
5. **التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics)** : تُستخدم في الصيانة التنبؤية، والتنبؤ بالأعطال، وتحسين كفاءة المعدات وإدارة الأصول التعدينية.
6. **التعلم المعزز (Reinforcement Learning)** : يُستخدم في التحكم بالمعدات ذاتية القيادة، وتحسين المسارات التشغيلية، واتخاذ القرار في البيئات التعدينية الديناميكية.
7. **تحليل السلاسل الزمنية (Time-Series Analysis)** : يُستخدم في مراقبة أداء المعدات، وتحليل بيانات الحساسات، والتنبؤ بالأعطال قبل حدوثها.
8. **كشف الانحرافات (Anomaly Detection)** : يُستخدم في اكتشاف الانحرافات التشغيلية، ورصد الأعطال المبكرة، وتحسين موثوقية الأنظمة التعدينية.
9. **التوأم الرقمي (Digital Twins)** : يُستخدم لمحاكاة المناجم والمعدات الثقيلة ومراقبة الأداء التشغيلي والتنبؤ بالأعطال في الزمن الحقيقي.
10. **إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)** : يُستخدم في ربط المعدات والحساسات وجمع البيانات التشغيلية اللحظية لدعم المناجم الذكية.
11. **تحليل البيانات الضخمة (Big Data Analytics)** : يُستخدم في تحليل البيانات الجيولوجية والتشغيلية واسعة النطاق ودعم اتخاذ القرار الاستراتيجي.

8.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

يشهد قطاع هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول تحولًا رقميًا متسارعًا نتيجة التوسع في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي عبر مختلف مراحل سلسلة القيمة التعدينية، بدءًا من الاستكشاف الجيولوجي وتقدير الموارد المعدنية، مرورًا بالتخطيط والإنتاج والتشغيل، ووصولًا إلى معالجة المعادن، وإدارة الأصول، والسلامة التشغيلية، وتحليل البيانات التعدينية. وقد أسهم هذا التحول في تطوير منظومات تعدين ذكية تعتمد على البيانات الضخمة، والتعلم الآلي، والتحليلات المتقدمة، مما أدى إلى تحسين الإنتاجية، وتقليل المخاطر التشغيلية، وتعزيز دقة القرارات الفنية والاقتصادية، ورفع كفاءة استغلال الموارد المعدنية (McKinsey & Company, 2023; Deloitte, 2024).

ويبين الجدول (8.2) أن أدوات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول يمكن تصنيفها **ضمن ثمانية محاور رئيسية مترابطة**، تشمل: الاستكشاف الجيولوجي وتقدير الموارد، والحفر والتفجير والتحليل الجيوتقني، والنقل واللوجستيات وإدارة الأساطيل، ومعالجة المعادن وتحسين العمليات، والتخطيط التعديني وتحسين الإنتاج، والصيانة وإدارة الأصول، والسلامة وإدارة المخاطر، وتحليل البيانات والذكاء الاصطناعي التطبيقي. ويعكس هذا التصنيف التكامل الوظيفي بين هذه الأدوات في دعم مختلف مراحل العمليات التعدينية، بدءًا من الاستكشاف وحتى إدارة وتشغيل المناجم. يركز **المحور الأول، الاستكشاف الجيولوجي وتقدير الموارد**، على الأدوات التي تعتمد على النمذجة الجيولوجية وتحليل البيانات المكانية وصور الأقمار الصناعية، مثل Micromine Origin و FlyPix AI و Leapfrog Geo وتوفر هذه المنصات إمكانات متقدمة لبناء النماذج الجيولوجية ثلاثية الأبعاد، وتحليل خصائص الرواسب المعدنية، وتقدير الاحتياطيات، وتحديد المناطق الواعدة للاستكشاف، بما يسهم في تقليل درجة عدم اليقين، وتحسين دقة التفسير الجيولوجي، وخفض تكاليف الاستكشاف .أما **المحور الثاني، الحفر والتفجير والتحليل الجيوتقني**، فيضم أدوات مثل Xplosmart وTrimble Mine Insights، التي توظف الذكاء الاصطناعي في تصميم أنماط التفجير، وتحليل سلوك الصخور، ومراقبة الأداء الجيوتقني، وتحليل بيانات العمليات الميدانية. وتسهم هذه الأدوات في تحسين كفاءة عمليات الاستخراج، وتقليل الهدر، ورفع مستويات السلامة، وتعزيز استقرار العمليات التعدينية .ويمثل **المحور الثالث، النقل واللوجستيات وإدارة الأساطيل**، أحد العناصر الأساسية في المناجم الحديثة، حيث يشمل أدوات مثل Haul Road AI و Fleet Management Systems، التي تستخدم التحليلات الذكية لتحسين جودة طرق النقل، وإدارة حركة المعدات، وتتبع أداء الأساطيل، وتحسين المسارات التشغيلية داخل المناجم، بما يؤدي إلى تقليل استهلاك الوقود، ورفع كفاءة تشغيل المعدات، وتحسين الأداء اللوجستي .ويركز **المحور الرابع، معالجة المعادن وتحسين العمليات**، على أدوات مثل Metso Outotec HSC Chemistry وJKSimMet، التي تعتمد على المحاكاة الرقمية وتحليل العمليات المعدنية لتحسين عمليات التكسير والطحن والفصل المعدني. وتساعد هذه الأنظمة في رفع كفاءة استرجاع المعادن، وتحسين جودة المنتجات النهائية، وتقليل استهلاك الطاقة، وتعزيز كفاءة تشغيل مصانع المعالجة .أما **المحور الخامس، التخطيط التعديني وتحسين الإنتاج**، فيشمل منصات مثل Datamine MineScape وDeswik Suite، التي توفر بيئات رقمية متقدمة لتخطيط المناجم، وجدولة الإنتاج، وتحسين تصميم المناجم، وإدارة تسلسل الاستخراج في المناجم السطحية وتحت الأرض. وتسهم هذه الأدوات في تحسين استغلال الموارد المعدنية، وتعظيم العائد الاقتصادي، ورفع كفاءة التخطيط طويل المدى .ويختص **المحور السادس، الصيانة وإدارة الأصول**، بأنظمة مثل IBM Maximo و SAP Predictive Maintenance، التي تعتمد على تحليل بيانات المعدات ومراقبة حالتها التشغيلية للتنبؤ بالأعطال، وجدولة أعمال الصيانة، وتحسين إدارة الأصول التعدينية. ويؤدي ذلك إلى تقليل فترات التوقف غير المخطط لها، ورفع جاهزية المعدات الثقيلة، وتحسين الاعتمادية التشغيلية للمناجم.

ويضم **المحور السابع، السلامة وإدارة المخاطر،** أنظمة متقدمة مثل Hexagon Safety & Infrastructure و Caterpillar MineStar، التي توفر إمكانات ذكية لمراقبة المخاطر التشغيلية، وإدارة السلامة، وتتبع أداء المعدات، وتحسين الرقابة على مواقع التعدين. وتسهم هذه التطبيقات في الحد من الحوادث، وتعزيز السلامة المهنية، ورفع مستويات الإنتاجية والامتثال للمتطلبات التشغيلية.

أما **المحور الثامن، تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي التطبيقي،** فيشمل منصات تعلم الآلة والأطر البرمجية مثل Microsoft Azure Machine Learning وTensorFlow وPyTorch، والتي تُستخدم في تطوير النماذج التنبؤية، وتحليل البيانات التعدينية، وبناء تطبيقات الذكاء الاصطناعي المتقدمة لدعم البحث والتطوير واتخاذ القرار. وتوفر هذه الأدوات بيئة مرنة لتطوير حلول ذكية تسهم في تحسين دقة النماذج التحليلية، وتعزيز الابتكار، ودعم التحول الرقمي في قطاع التعدين.

جدول (8.2). أدوات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

المحور الرئيسي	الأداة / النظام	الفئة التقنية	الوظائف والخصائص الرئيسية	التطبيقات التعدينية	الفوائد التشغيلية
أولاً: الاستكشاف الجيولوجي وتقدير الموارد	**Micromine Origin**	نمذجة جيولوجية وتحليل بيانات	نمذجة الرواسب المعدنية وتقدير درجات الخام	الاستكشاف وتقدير الاحتياطيات	تقليل عدم اليقين وتسريع النمذجة
	FlyPix AI	تحليل صور أقمار صناعية	تحليل صور جوية وتحديد المناطق الواعدة	الاستكشاف الجيولوجي	خفض تكاليف الاستكشاف
	Leapfrog Geo	نمذجة جيولوجية ثلاثية الأبعاد	بناء نماذج جيولوجية ثلاثية الأبعاد متقدمة	الاستكشاف والتخطيط المعدني	تحسين دقة التفسير الجيولوجي
ثانيًا: الحفر والتفجير والتحليل الجيوتقني	**Xplosmart**	تصميم التفجير الذكي	تصميم أنماط التفجير وتحليل التكسير الصخري	عمليات الحفر والتفجير	تحسين كفاءة الاستخراج
	Trimble Mine Insights	تحليل بيانات التعدين	مراقبة الأداء الجيوتقني وتحليل العمليات	العمليات الميدانية	تحسين السلامة وتقليل الهدر
ثالثًا: النقل واللوجستيات وإدارة الأساطيل	**Haul Road AI**	تحليل طرق التعدين	تحسين جودة الطرق ومسارات النقل	النقل داخل المناجم	تقليل استهلاك الوقود
	Fleet Management Systems	إدارة أساطيل رقمية	تتبع المعدات وتحسين تشغيل المركبات	النقل والإمداد التعديني	رفع الكفاءة التشغيلية
رابعًا: معالجة المعادن وتحسين العمليات	**Metso Outotec HSC Chemistry**	تحليل ومعالجة المعادن	محاكاة العمليات المعدنية وتحليل الفصل	مصانع المعالجة	رفع كفاءة الاسترجاع
	JKSimMet	محاكاة عمليات التعدين	نمذجة عمليات التكسير والطحن	مصانع التركيز والمعالجة	تحسين الأداء وتقليل الطاقة
خامسًا: التخطيط التعديني وتحسين الإنتاج	**Datamine MineScape**	تخطيط مناجم رقمي	جدولة الإنتاج وتحسين تصميم المناجم	التخطيط طويل المدى	زيادة العائد الاقتصادي
	Deswik Suite	تخطيط وتحسين المناجم	تحسين تسلسل الاستخراج والتصميم المعدني	المناجم السطحية وتحت الأرض	رفع كفاءة التخطيط
سادسًا: الصيانة وإدارة الأصول	**IBM Maximo**	إدارة الأصول الذكية	مراقبة المعدات وجدولة الصيانة	المعدات الثقيلة	تقليل الأعطال
	SAP Predictive Maintenance	صيانة تنبؤية	تحليل بيانات المعدات والتنبؤ بالأعطال	الأصول التعدينية	رفع الجاهزية التشغيلية
سابعًا: السلامة وإدارة المخاطر	**Hexagon Safety & Infrastructure**	إدارة سلامة ذكية	مراقبة المخاطر التشغيلية وإدارة السلامة	مواقع التعدين	تقليل الحوادث
	Caterpillar MineStar	نظام إدارة تعدين ذكي	مراقبة المعدات والسلامة التشغيلية	المناجم السطحية	تحسين الأمان والإنتاجية
ثامنًا: تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي التطبيقي	**Microsoft Azure Machine Learning**	منصة تعلم آلي	تطوير نماذج تنبؤية وتحليل بيانات التعدين	التحليل المتقدم	دعم اتخاذ القرار
	TensorFlow	إطار تعلم عميق	بناء نماذج تحليل وتنبؤ	البحث والتطوير	تعزيز الابتكار
	PyTorch	إطار تعلم عميق	تطوير نماذج ذكاء اصطناعي متقدمة	التحليلات البحثية	تحسين دقة النماذج

المصدر: الاعتماد على الأدبيات العلمية المتخصصة في الذكاء الاصطناعي وتطبيقاته في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول، وتقارير شركات Micromine و Trimble وItasca وFlyPix AI، إضافة إلى الدراسات الحديثة في التعدين الذكي، والاستكشاف المعدني، والصيانة التنبؤية، والمناجم ذاتية التشغيل (2024–2026).

فوائد الذكاء الاصطناعي
في هندسة المناجم والتعدين
والهندسة الجيولوجية والبترول
يُحدث الذكاء الاصطناعي ثورة في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول من خلال تحليل البيانات الضخمة، والتنبؤ الذكي، والأتمتة المتقدمة، مما يعزز الكفاءة التشغيلية ويخفض التكاليف، ويرفع معايير السلامة والاستدامة، ويدعم اتخاذ القرار الاستراتيجي في جميع مراحل الاستكشاف والإنتاج والتشغيل والإغلاق.
(Yang et al., 2025)
الفوائد التقنية
تحسين السلامة المهنية
من خلال أنظمة الرؤية الحاسوبية التي تراقب العمال والمعدات وتكشف المخاطر والانهرافات المحتملة في الزمن الحقيقي.
دعم التوائم الرقمية (Digital Twins)
التي تسمح بمحاكاة العمليات التعدينية وتحليل السيناريوهات التشغيلية قبل تنفيذها فعلياً، مما يعزز كفاءة اتخاذ القرار.
(Technologies Journal, 2026)
تعزيز الصيانة التنبؤية للمعدات
عبر تحليل بيانات الاهتزاز والحرارة والضغط للتنبؤ بالأعطال قبل وقوعها وتقليل التوقفات غير المخططة.
(Rahman et al., 2026)
تحسين عمليات معالجة المعادن
عبر أنظمة التحكم التكيفي والتنبؤي التي تعمل في الزمن الحقيقي، مما يرفع معدلات الاسترداد ويقلل استهلاك الطاقة
(Metso, 2023)
تطوير أنظمة التشغيل الذكية للمعدات الثقيلة
مثل الشاحنات والحفارات والقطارات التعدينية. مما يرفع الإنتاجية ويقلّل الأعطال البشرية.
(Rio Tinto, 2025)
تحسين دقة الاستكشاف الجيولوجي وتحديد مواقع المعادن
باستخدام خوارزميات التعلم الآلي وتحليل الصور الفضائية والبيانات الجيوفيزيائية.
(Teng et al., 2024)
الفوائد الاقتصادية
زيادة العائد الاقتصادي للمشروعات التعدينية
عبر تحسين جودة الخام المستخرج ورفع نسب الاسترداد المعدني.
تحسين إدارة سلسلة التوريد والعمليات اللوجستية
داخل المناجم باستخدام التحليل الذكي للبيانات.
تقليل التوقفات المفاجئة الناتجة عن الأعطال
عبر تطبيقات الصيانة التنبؤية.
تقليل استهلاك الوقود والطاقة وتحسين كفاءة المعدات التقيلة
مما يخفض التكاليف التشغيلية الإجمالية.
رفع الإنتاجية التشغيلية للمناجم
من خلال التشغيل الذاتي وتحسين إدارة الأسطول والمعدات.
تقليل تكاليف الاستكشاف والحفر غير المجدي
عبر تحسين دقة النماذج الجيولوجية التنبؤية
(Yang et al., 2025)
ويقلل استهلاك الوقود بنسبة تصل إلى
15%
(Industry Mining Review, 2025)
تشير بعض الدراسات إلى أن الأنظمة الذاتية التشغيل يمكن أن ترفع الإنتاجية بنسبة تتراوح بين
15% – 30%
الفوائد البيئية
مراقبة جودة الهواء والمياه عن بُعد
باستخدام أجهزة الاستشعار الذكية وتحليلات البيانات الحطي للبيانات.
دعم مفهوم التعدين الأخضر (Green Mining)
الذي يركز على الاستدامة وتقليل الأثر البيئي للعمليات التعدينية.
(Ma'aden & OffWorld, 2024)
تقليل الهدر في المواد الخام
من خلال تحسين عمليات الاستخراج والمعالجة.
تحسين إدارة المخلفات التعدينية والتنبؤ بالمخاطر البيئية
مثل التصريف الحمضي للمناجم.
(Acid Mine Drainage)
تقليل الانبعاثات الكربونية
الناتجة عن المعدات التقيلة عبر تحسين المسارات التشغيلية واستخدام الأنظمة الذاتية.
تحسين كفاءة استهلاك الطاقة
في عمليات الطحن والسحق والمعالجة المعدنية.
الذكاء الاصطناعي يقود مستقبل التعدين والهندسة الجيولوجية والبترول
أكثر كفاءة • أكثر أمانًا • أكثر استدامة • أكثر ربحية

8.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

يشهد قطاع المناجم والتعدين تحولاً جوهرياً مدفوعاً بالتطورات المتسارعة في تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليلات البيانات الضخمة وإنترنت الأشياء الصناعي والأنظمة الذاتية والتوائم الرقمية والروبوتات الصناعية. وقد أسهمت هذه التقنيات في إحداث نقلة نوعية في أساليب الاستكشاف والاستخراج والتشغيل، مما أدى إلى ظهور مفهوم التعدين الذكي (Smart Mining) ، الذي يعتمد على البيانات والتحليلات التنبؤية والأتمتة المتقدمة لتحسين الكفاءة التشغيلية وتعزيز السلامة ورفع الإنتاجية وتحقيق الاستدامة البيئية.

وفي ظل هذا التحول الرقمي، لم يعد دور مهندس التعدين مقتصراً على إدارة عمليات الاستخراج والتخطيط التقليدي للمناجم، بل أصبح يتطلب القدرة على التعامل مع الأنظمة الرقمية الذكية، وتحليل البيانات الجيولوجية والتشغيلية، وإدارة المعدات الذاتية، وتطوير الحلول التقنية التي تدعم اتخاذ القرار. ونتيجة لذلك، برزت مجموعة من الوظائف الجديدة التي تجمع بين الخبرة التعدينية والمهارات المتقدمة في الذكاء الاصطناعي وعلوم البيانات والروبوتات والأنظمة الذكية.

أبرز الوظائف الناشئة في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

أدت الثورة الرقمية إلى ظهور وظائف متخصصة تُتوقع أن تشهد نمواً متزايداً خلال السنوات المقبلة، ومن أبرزها:

(Industry Standard – Market Active) مستخدمة فعلية اليوم | (Emerging / Scaling) مستخدمة جزئياً / في طور التوسع | (Research / Future Only) غير مستخدمة فعلياً

1 مهندس التعدين الذكي (Smart Mining Engineer)

المسؤوليات:

- إدارة وتشغيل الأنظمة التعدينية الذكية.
- تحليل البيانات التشغيلية وتحسين الأداء.
- تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في التعدين.
- مراقبة كفاءة المعدات وتقليل الأعطال.
- دعم مبادرات التحول الرقمي.

المهارات المطلوبة:

- Python و SQL
- أنظمة التعدين الرقمية وإنترنت الأشياء الصناعي
- نظم المعلومات الجغرافية (GIS)
- التحليل التنبؤي والصيانة الذكية
- إدارة الأنظمة المؤتمتة

2 أخصائي التوائم الرقمية والمحاكاة التعدينية (Digital Twin Specialist)

المسؤوليات:

- تطوير نماذج التوأم الرقمي للمناجم والمعدات.
- محاكاة العمليات التشغيلية وتحليل الأداء.
- دمج البيانات الحية من الحساسات والأنظمة.
- دعم الصيانة التنبؤية وإدارة المخاطر.
- تقييم وتحسين الكفاءة التشغيلية.

المهارات المطلوبة:

- النمذجة ثلاثية الأبعاد والمحاكاة الصناعية
- تقنيات التوأم الرقمي
- الحوسبة السحابية وتحليل البيانات
- الذكاء الاصطناعي الصناعي
- تكامل إنترنت الأشياء مع الأنظمة التعدينية

3 محلل وعالم البيانات الجيولوجية والتعدينية (Geological and Mining Data Scientist)

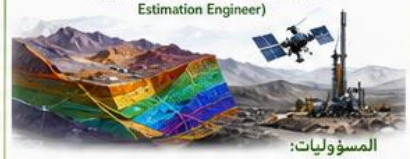
المسؤوليات:

- تحليل البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية والتشغيلية.
- تطوير نماذج تنبؤية للمكامن والإنتاج.
- تطبيق تقنيات تعلم الآلة في الاستكشاف والتعدين.
- إعداد خرائط وتحليلات مكانية باستخدام GIS.
- تطوير لوحات معلومات ومؤشرات أداء تنبؤية.
- دعم قرارات التخطيط وإدارة الموارد.

المهارات المطلوبة:

- Python و R و SQL
- تعلم الآلة والذكاء الاصطناعي
- تحليل البيانات الضخمة (Big Data Analytics)
- الإحصاء الجيولوجي (Geostatistics)
- GIS والاستشعار عن بعد
- Power BI و Tableau
- إدارة قواعد البيانات الجيولوجية والتعدينية

4 مهندس الاستكشاف وتقييم الموارد المعدنية بالذكاء الاصطناعي (AI Mineral Exploration and Resource Estimation Engineer)



المسؤوليات:

- تحليل البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية.
- تطوير نماذج تنبؤية لتحديد المناطق الواعدة.
- دمج بيانات الأقمار والاستشعار ونتائج الحفر.
- تقدير الموارد والاحتياطيات بالنماذج الذكية.
- تحسين دقة نماذج المكامن وتقليل المخاطر.
- دعم قرارات الحفر والتطوير والاستثمار.

المهارات المطلوبة:

- تعلم الآلة والخوارزميات التنبؤية
- (Geostatistics) وتحليل عدم اليقين
- GIS والاستشعار عن بعد
- MATLAB و Python و R
- معالجة البيانات المكانية وتحليل الصور
- الجيولوجيا الاقتصادية وتقييم الموارد

5 مهندس أنظمة التعدين الذاتية (Autonomous Mining Systems Engineer)

المسؤوليات:

- تطوير وتشغيل أنظمة التعدين الذاتية.
- تصميم أنظمة القيادة والملاحة الذكية للمعدات.
- دمج LiDAR والرادار والكاميرات والحساسات.
- تحسين إدارة الأساطيل ومسارات الحركة.
- مراقبة أداء الأنظمة المؤتمتة وتحليل بياناتها.
- تعزيز السلامة ودعم المناجم الذاتية بالكامل.

المهارات المطلوبة:

- الروبوتات وأنظمة التشغيل الذاتي
- المركبات الذاتية وأنظمة الملاحة الذكية
- Sensor Fusion و SLAM
- الرؤية الحاسوبية والذكاء الاصطناعي
- ROS وأنظمة التحكم المتقدمة
- Python و C++
- تكامل الأنظمة الصناعية المؤتمتة

6 أخصائي الروبوتات التعدينية (Mining Robotics Specialist)

المسؤوليات:

- تطوير الأنظمة الروبوتية للتعدين.
- تشغيل الطائرات المسيّرة للمسح والتفتيش.
- تطوير أنظمة التحكم الذاتي.
- تحسين كفاءة العمليات وتقليل المخاطر.
- دعم الأتمتة الصناعية في المناجم.

المهارات المطلوبة:

- الروبوتات الصناعية
- ROS
- الرؤية الحاسوبية
- معالجة الصور الرقمية
- أنظمة الأتمتة الصناعية

7 مهندس الذكاء الاصطناعي لسلامة المناجم (Mining Safety AI Engineer)

المسؤوليات:

- تطوير نماذج للتنبؤ بالمخاطر والانهيارات والانبعاثات.
- مراقبة العمال والمعدات والبيئة في الزمن الحقيقي.
- تحليل بيانات الحساسات والكاميرات لاكتشاف المخاطر.
- تصميم أنظمة إنذار مبكر واستجابة ذكية للطوارئ.
- تقييم ظروف العمل وتحليل المخاطر باستمرار.
- دعم خطط السلامة والاستجابة للحوادث.
- تحسين معايير السلامة والاستدامة في المناجم.

المهارات المطلوبة:

- تعلم الآلة والتحليلات التنبؤية
- الرؤية الحاسوبية وتحليل الصور والفيديو
- إنترنت الأشياء الصناعي (Industrial IoT)
- تحليل البيانات التنغيلية والضخمة
- Python وأدوات تحليل
- إدارة المخاطر والسلامة المهنية
- التطبيل في المراقبة الذكية والإنذار المبكر

8 مهندس الاستدامة البيئية للتعدين (Mining Environmental Sustainability Engineer)

المسؤوليات:

- تقييم الأثر البيئي للعمليات التعدينية.
- إدارة النفايات والانبعاثات.
- تطوير خطط إعادة التأهيل البيئي.
- مراقبة المؤشرات البيئية والاستدامة.
- دعم الامتثال للمعايير البيئية الدولية.

المهارات المطلوبة:

- الاستدامة البيئية والتعدين الأخضر
- تحليل البيانات البيئية
- نظم المعلومات الجغرافية (GIS)
- الاستشعار عن بعد
- معايير ESG والإستدامة

9 مهندس الاستخبارات التشغيلية التعدينية (Operational Intelligence Engineer)

المسؤوليات:

- تطوير أنظمة المراقبة والتحليل الفوري.
- إنشاء نماذج الاستشعار الناعم (Soft Sensors).
- بناء لوحات مؤشرات الأداء الرئيسية (KPIs).
- تحسين استقرار العمليات المعدنية.
- تطوير استراتيجيات التحسين المستمر.

المهارات المطلوبة:

- علوم البيانات وتحليلات العمليات
- Python و Power BI
- أنظمة التحكم الصناعية
- تحليل البيانات الزمني

10 مهندس معالجة المعادن الذكية (Smart Mineral Processing Engineer)

المسؤوليات:

- تطوير نماذج تنبؤية لعمليات المعالجة المعدنية.
- تحسين أداء الطحن والتعويم والاستخلاص.
- مراقبة العمليات في الزمن الحقيقي.
- تقليل استهلاك الطاقة والمياه.
- تطوير أنظمة تحكم ذكية للمصانع.

المهارات المطلوبة:

- (Mineral Processing)
- التحكم المتقدم و APCs
- الذكاء الاصطناعي الصناعي
- تحليل البيانات الزمنية
- Python و MATLAB

لماذا هذه الوظائف مهمة ؟

- تمكّن اتخاذ القرار المبني على البيانات والذكاء الاصطناعي
- تساهم في الاستدامة البيئية وحماية الموارد الطبيعية
- تدعم التحول نحو المناجم الذكية والذاتية
- ترفع الكفاءة التشغيلية وتزيد الإنتاجية
- تعزز سلامة العاملين وتقلل المخاطر والحوادث

أبرز الوظائف الناشئة في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

أدى التحول الذكي طهور فجمةٍ من الوظائف امتحطائف الخخصصفي نتوقفٍ ةوتوقع بنمهوا فلموا متزايداً خلال السنوات القادمة، ومن أبرزها:

(Research / Future Only) غير مستخدمة فعلياً | (Emerging / Scaling) مستخدمة جزئياً / في طور التوسع | (Industry Standard – Market Active) مستخدمة فعليةً اليوم

15 مهندس الطاقة النظيفة للمناجم
(Clean Energy Mining Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة الطاقة الشمسية والرياح للمناجم.
- تطوير حلول تخزين الطاقة وإدارة الأحمال.
- دمج مصادر الطاقة النظيفة مع الأنظمة التشغيلية.
- تقييم كفاءة الطاقة وخفض الانبعاثات.
- دعم خطط التحول نحو التعدين منخفض الكربون.

المهارات المطلوبة:
- الطاقة المتجددة
- أنظمة الهيدروجين الأخضر
- وإلكترونيات القدرة
- إدارة الطاقة
- تحليل الأداء الطاقي

14 مهندس الاستكشاف المعدني بالذكاء الاصطناعي التوليدي
(AI Generative Mineral Exploration Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج توليدية للمكامن المعدنية.
- تحليل البيانات الجيولوجية والجيوفيزيائية متعددة المصادر.
- اقتراح مواقع استكشافية واعدة باستخدام الذكاء الاصطناعي.
- تحسين دقة النماذج الجيولوجية ثلاثية الأبعاد.
- دعم قرارات الحفر والاستكشاف.

المهارات المطلوبة:
- الذكاء الاصطناعي التوليدي
- تعلم الآلة والنمذجة التنبؤية
- GIS و Geostatistics و Python
- النمذجة الجيولوجية ثلاثية الأبعاد.

13 مهندس الطائرات المسيّرة والاستشعار الجيومكاني للتعدين
(Mining Drone and Geospatial Engineer)

المسؤوليات:
- تشغيل وإدارة الطائرات المسيّرة التعدينية.
- تنفيذ أعمال المسح الطبوغرافي ثلاثي الأبعاد.
- مراقبة المخزون والتشوهات الجيولوجية.
- إنتاج الخرائط والنماذج الرقمية للمناجم.
- دعم التخطيط التشغيلي والاستكشاف.

المهارات المطلوبة:
- UAV Systems.
- Photogrammetry.
- LiDAR.
- GIS والاستشعار عن بعد
- معالجة البيانات المكانية

12 مهندس الأمن السيبراني للأنظمة التعدينية
(Mining Cybersecurity Engineer)

المسؤوليات:
- حماية أنظمة SCADA وOT التعدينية.
- تقييم المخاطر السيبرانية.
- مراقبة التهديدات والاستجابة للحوادث.
- تطوير سياسات الأمن الصناعي.
- ضمان استمرارية التشغيل الأمن.

المهارات المطلوبة:
- Industrial Cybersecurity.
- OT SCADA وأنظمة أمن.
- إدارة المخاطر الرقمية
- تحليل التهديدات السيبرانية
- معايير IEC 62443 و ISO 27001.

11 مهندس إدارة الكربون منخفض الانبعاثات
(Low-Carbon Mining Engineer)

المسؤوليات:
- قياس الانبعاثات الكربونية للعمليات التعدينية.
- تطوير استراتيجيات خفض الانبعاثات.
- تقييم مصادر الطاقة النظيفة للمناجم.
- إعداد تقارير الاستدامة والحوكمة البيئية.
- دعم تطبيق معايير ESG.

المهارات المطلوبة:
- إدارة الكربون والاستدامة
- تحليل دورة لحياة (LCA)
- معايير ESG
- الطاقة المتجددة
- تحليل البيانات البيئية

الوظائف المستقبلية في هندسة التعدين والمناجم (ما بعد عام 2035)

20 مهندس الأنظمة السيبرانية الفيزيائية للتعدين
(Mining Cyber-Physical Systems Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير البنية التحتية للأنظمة السيبرانية الفيزيائية في المناجم.
- دمج المعدات الذكية والحساسات والتوائم الرقمية ضمن منصة موحدة.
- تطوير أنظمة المراقبة والتحكم الفوري.
- تحسين استجابة الأنظمة للأحداث التشغيلية الطارئة.
- ضمان موثوقية وأمن الأنظمة الرقمية المتكاملة.

المهارات المطلوبة:
- الأنظمة السيبرانية الفيزيائية (CPS)
- إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)
- الحوسبة والحافة الذكية (Edge Computing)
- الذكاء الاصطناعي الصناعي.
- الأمن السيبراني الصناعي.
- هندسة الأنظمة المتكاملة

19 مهندس التعدين الفضائي
(Space Mining Engineer)

المسؤولية:
- تصميم أنظمة التعدين المخصصة للبيئات الفضائية منخفضة الجاذبية.
- تطوير استراتيجيات استخراج ونقل الموارد من الكويكبات والأجرام السماوية.
- إدارة الروبوتات وأنظمة التعدين الذاتية في الفضاء.
- تحليل البيانات الجيولوجية والفضائية لتحديد المواقع التعدينية الواعدة.
- تطوير حلول مستدامة لاستخدام الموارد الفضائية في دعم البعثات طويلة الأمد.
- دعم البعثات المستقبلية.

المهارات المطلوبة:
- هندسة التعدين الفضائي وعلوم الكواكب.
- الروبوتات الفضائية والأنظمة الذاتية.
- الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الفضائية.
- هندسة الطيران والفضاء.
- المحاكاة الرقمية والأنظمة المستقلة.
- البرمجة باستخدام Python و C++.

18 مهندس الاقتصاد الدائري للتعدين
(Circular Economy Mining Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير استراتيجيات إعادة استخدام المخلفات التعدينية.
- تحسين كفاءة استهلاك الموارد والمواد الخام.
- تقييم فرص استعادة المعادن من النفايات التعدينية.
- دعم برامج الاستدامة وإدارة النفايات.
- إعداد دراسات دورة الحياة البيئية للمشروعات التعدينية.

المهارات المطلوبة:
- الاقتصاد الدائري والاستدامة
- تقييم دورة الحياة (LCA)
- إدارة النفايات التعدينية
- معايير ESG والاستدامة البيئية
- نظم المعلومات الجغرافية وتحليل البيانات البيئية

17 مهندس التعاون بين البشر والروبوتات في التعدين
(Human-Robot Collaboration Mining Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم أنظمة تعاون آمنة بين البشر والروبوتات.
- تطوير استراتيجيات التشغيل المشترك للمعدات الذاتية.
- دمج الحساسات وأنظمة الإدراك البيني.
- تقييم مخاطر التفاعل بين الإنسان والآلة.
- تحسين كفاءة للعمليات المؤتمتة في المناجم.

المهارات المطلوبة:
- الروبوتات الصناعية والتعدينية
- ROS وأنظمة
- (Sensor Fusion) حساسات Fusion
- معايير السلامة الصناعية
- Python و C++.

16 مهندس إعادة التأهيل البيئي الذكي
(AI Environmental Rehabilitation Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج رقمية لإعادة التأهيل البيني.
- تقييم أثار التعدين طويلة المدى.
- تخطيط استعادة الغطاء النباتي والتربة.
- مراقبة مؤشرات الاستدامة البيئية.
- دعم الامتثال للمعايير البيئية الدولية.

المهارات المطلوبة:
- الروبوتات البيئية
- الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات
- إدارة والاستشعار عن بعد
- أدوات المحاكاة البيئية
- معايير ESG والاستدامة

لماذا هذه الوظائف مهمة ؟

- اتخاذ قرارات مبنية على البيانات والتحليلات الذكية
- تمكين التحول الرقمي نحو مناجم ذكية ومستدامة
- خفض الانبعاثات وتحقيق أهداف الاستدامة
- زيادة الإنتاجية وتحسين الكفاءة التشغيلية
- تعزيز السلامة وتقليل المخاطر وتقليل الحوادث

8.6.1 مهارات المستقبل في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول في عصر الذكاء الاصطناعي

1. المهارات التقنية المستقبلية في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

يتطلب التحول نحو التعدين الذكي امتلاك مجموعة متقدمة من المهارات الرقمية والتقنية، من أبرزها:

- تطبيقات الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة في التعدين.
- تحليل البيانات الضخمة والبيانات الجيولوجية.
- نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد.
- الرؤية الحاسوبية وتحليل الصور الجيولوجية.
- تقنيات SLAM ودمج الحساسات.
- الروبوتات الصناعية والمركبات الذاتية.
- التوائم الرقمية والمحاكاة الصناعية.
- البرمجة باستخدام SQL, C++ , Python
- الحوسبة السحابية وإنترنت الأشياء الصناعي.
- الصيانة التنبؤية وتحليل الأعطال.
- أنظمة التحكم والأتمتة الصناعية.
- تحليل البيانات الجيومكانية المتقدمة.
- الذكاء الاصطناعي الجيولوجي وتقدير الموارد المعدنية.

2. المهارات المهنية والتحليلية

إلى جانب المهارات التقنية، تتزايد أهمية المهارات المهنية التي تمكّن مهندس التعدين من العمل بفاعلية في بيئات التعدين الذكية، ومن أبرزها:

- التفكير المنظومي وتحليل المشكلات المعقدة.
- اتخاذ القرارات المبنية على البيانات.
- إدارة المخاطر والسلامة المهنية.
- إدارة المشاريع التقنية والتحول الرقمي.
- العمل ضمن فرق متعددة التخصصات.
- مهارات التواصل والعرض الفني.
- الابتكار وتطوير الحلول الهندسية.
- إدارة التغيير المؤسسي.
- فهم مبادئ الاستدامة والتعدين المسؤول.
- القدرة على التعلم المستمر ومواكبة التطورات التقنية

8.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

على الرغم من الفوائد الكبيرة للذكاء الاصطناعي في قطاع التعدين، فإن تطبيقه يواجه مجموعة من التحديات التقنية والاقتصادية والتنظيمية التي قد تعيق التبني واسع النطاق لهذه التقنيات.

8.7.1 التحديات التقنية

تُعد التحديات التقنية من أبرز العقبات التي تواجه التحول نحو التعدين الذكي، وتشمل:

- ضعف جودة البيانات الجيولوجية والتشغيلية وعدم تجانسها .
- صعوبة دمج البيانات القادمة من أنظمة متعددة ومختلفة الصيغ .
- محدودية قابلية تفسير بعض نماذج الذكاء الاصطناعي، خاصة نماذج التعلم العميق التي تُعرف بـ الصندوق الأسود (Black Box Models)
- تعقيد التكامل بين الأنظمة الذكية والبنى التحتية القديمة (Legacy Systems).
- الحاجة إلى بنية تحتية رقمية متقدمة تشمل الحوسبة السحابية وأجهزة الاستشعار وإنترنت الأشياء .
- التحديات المرتبطة بالعمل في بيئات تشغيلية قاسية ومعزولة جغرافياً .

8.7.2 التحديات الاقتصادية والبشرية

- ارتفاع التكاليف الأولية للتحول الرقمي وتحديث المعدات والبنية التحتية .
- نقص الكفاءات البشرية المتخصصة التي تجمع بين علوم التعدين والذكاء الاصطناعي وعلوم البيانات .
- مقاومة التغيير داخل المؤسسات التعدينية التقليدية .
- الحاجة إلى برامج تدريب وتأهيل مستمرة للمهندسين والفنيين .
- المخاوف المتعلقة بتأثير الأتمتة على فرص العمل التقليدية في القطاع .

8.7.3 التحديات الأمنية والتنظيمية

مع التوسع في استخدام الأنظمة الذكية والشبكات المتصلة، ظهرت تحديات جديدة مرتبطة بالأمن السيبراني والتنظيمات الصناعية، ومن أبرزها:

- مخاطر الهجمات السيبرانية على أنظمة التشغيل الذاتي والبنية الرقمية للمناجم .
- الحاجة إلى تطوير معايير وتشريعات تنظم استخدام الذكاء الاصطناعي في التعدين .
- قضايا حماية البيانات الصناعية الحساسة .
- التحديات الأخلاقية المرتبطة باتخاذ القرار الآلي في البيئات الخطرة .
- الحاجة إلى ضمان موثوقية الأنظمة الذكية في العمليات الحرجة المتعلقة بالسلامة.

8.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين التعدينين

في ظل التحول المتسارع نحو التعدين الذكي، تُوصى المؤسسات والمهندسون المناجم والتعدين بالتوجهات التالية:

1. **تعزيز الكفاءات الرقمية:** الاستثمار في تدريب المهندسين على علوم البيانات والذكاء الاصطناعي والتحليل الرقمي والتوائم الرقمية .
2. **تبني التحول الرقمي التدريجي:** دمج الأنظمة الذكية بشكل مرحلي بما يضمن التوافق مع الأنظمة التشغيلية الحالية وتقليل مخاطر التحول المفاجئ .
3. **تطوير البنية التحتية الرقمية:** الاستثمار في أجهزة الاستشعار الذكية، وإنترنت الأشياء، والحوسبة السحابية، وشبكات الاتصال الصناعية .
4. **تعزيز الأمن السيبراني:** تطوير أنظمة حماية متقدمة للبنية الرقمية للمناجم ومنظومات التشغيل الذاتي .
5. **تشجيع البحث والتطوير:** دعم الشراكات بين الجامعات وشركات التعدين لتطوير حلول ذكاء اصطناعي متخصصة للقطاع التعديني .
6. **تعزيز الاستدامة البيئية:** استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة الطاقة وتقليل الانبعاثات ودعم مفهوم التعدين الأخضر .
7. **تعزيز التكامل متعدد التخصصات:** بناء فرق عمل تجمع بين مهندسي التعدين والجيولوجيين وخبراء البيانات والذكاء الاصطناعي .
8. **تطوير نماذج ذكاء اصطناعي قابلة للتفسير (Explainable AI) :** بما يعزز الثقة بالأنظمة الذكية ويدعم اتخاذ القرارات الهندسية الدقيقة في البيئات التشغيلية الحرجة.

8.9 الخاتمة

أصبح الذكاء الاصطناعي يشكل محوراً استراتيجياً في تطوير قطاع المناجم والتعدين، حيث أحدث تحولاً جذرياً في أساليب الاستكشاف والإنتاج، والمعالجة، وإدارة السلامة، والصيانة. وقد أثبتت التطبيقات الحديثة في أستراليا وكندا والسعودية أن التعدين الذكي قادر على تحقيق مستويات أعلى من الكفاءة التشغيلية والاستدامة وتقليل المخاطر البشرية والبيئية.

ومع استمرار تطور تقنيات التعلم الآلي والتوائم الرقمية والأنظمة الذاتية، يتجه قطاع التعدين نحو نموذج تشغيلي أكثر ذكاءً واستقلالية يعتمد على البيانات والتحليل التنبؤي في الزمن الحقيقي. إلا أن تحقيق هذا التحول يتطلب تطوير البنية التحتية الرقمية، وتأهيل الكفاءات البشرية، وتعزيز التكامل بين علوم التعدين والذكاء الاصطناعي لبناء صناعة تعدين مستدامة وآمنة وقادرة على مواجهة تحديات المستقبل.

الفصل التاسع

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

9.1 مقدمة: التحول الرقمي في الهندسة الكيميائية

شهدت الهندسة الكيميائية خلال العقدين الأخيرين تحولًا جذريًا بفعل التطور المتسارع في تقنيات الذكاء الاصطناعي، حيث أصبحت هذه التقنيات أحد المحركات الرئيسة لإعادة تشكيل الصناعات الكيميائية والبتروكيميائية والدوائية. ويعود ذلك إلى قدرة الذكاء الاصطناعي على التعامل مع الأنظمة الصناعية المعقدة، وتحليل البيانات التشغيلية الضخمة، وتحسين عمليات التحكم والإنتاج، ودعم اتخاذ القرار في الزمن الحقيقي وبدرجة عالية من الدقة والاعتمادية (IBM, 2024).

وقد اعتمدت الهندسة الكيميائية تاريخيًا على النماذج الرياضية والفيزيائية القائمة على قوانين الديناميكا الحرارية وانتقال الكتلة والحرارة والحركية الكيميائية. إلا أن ازدياد تعقيد العمليات الصناعية الحديثة، وتعدد المتغيرات غير الخطية، وتداخل ظروف التشغيل، جعلت هذه النماذج التقليدية أقل قدرة على تمثيل السلوك الفعلي للأنظمة الصناعية بدقة كافية. ونتيجة لذلك، برز الذكاء الاصطناعي بوصفه إطارًا تكامليًا يعتمد على البيانات التشغيلية الفعلية (Data-driven Models) لتحسين النمذجة، والتنبؤ، والتحكم، ورفع كفاءة العمليات الصناعية بشكل مستمر (McKinsey & Company, 2025).

كما ساهم التحول نحو الثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0) في تسريع دمج الذكاء الاصطناعي داخل المصانع الكيميائية الذكية، حيث أصبحت أنظمة التحكم المتقدمة، والتحليلات التنبؤية، والتوائم الرقمية (Digital Twins) ، وإنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)، والتعلم الآلي، مكونات أساسية في البنية التحتية الصناعية الحديثة. وقد أدى ذلك إلى الانتقال من أنظمة تشغيل تقليدية تعتمد على التدخل البشري إلى أنظمة شبه ذاتية أو ذاتية التشغيل تعتمد على البيانات في اتخاذ القرار (Siemens, 2024).

وعلى الرغم من التوسع المتسارع في الخطاب التقني حول تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الصناعة الكيميائية، فإن معدلات التبني الفعلي ما تزال في مرحلة انتقالية. إذ تشير تقارير McKinsey و Deloitte (2025) إلى أن نحو 70%–80% من الشركات الصناعية العالمية بدأت في استخدام الذكاء الاصطناعي في وظيفة تشغيلية واحدة على الأقل، إلا أن نسبة أقل بكثير من هذه الشركات (تتراوح بين 20%–30%) وصلت إلى مستويات تكامل متقدمة عبر كامل سلسلة القيمة الإنتاجية. كما يتركز التبني الفعلي بشكل أساسي في الشركات الكيميائية الكبرى التي تمتلك بنية تحتية رقمية متقدمة وقدرات تحليل بيانات واسعة، بينما لا تزال الشركات الصغيرة والمتوسطة في مراحل التجريب أو الاستخدام المحدود.

وفيما يتعلق بالأثر التشغيلي، تشير الدراسات الصناعية الحديثة إلى أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في العمليات الكيميائية يمكن أن تحقق تحسينات ملموسة في الأداء، بما في ذلك زيادة كفاءة الإنتاج بنسبة تتراوح بين 10 % و30 % ، وتقليل استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 20% في بعض التطبيقات المتقدمة، إضافة إلى خفض معدلات الفاقد التشغيلي وتحسين جودة المنتج النهائي بشكل ملحوظ (WEF, 2025; McKinsey & Company, 2025). كما أثبتت أنظمة الصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي قدرتها على تقليل فترات التوقف غير المخطط لها بنسبة قد تصل إلى 40 % في بعض المنشآت الصناعية الكبرى.

ومن منظور العائد على الاستثمار(ROI) ، تُظهر التقارير الاقتصادية أن مشاريع الذكاء الاصطناعي في الصناعة الكيميائية غالبًا ما تحقق عوائد إيجابية خلال فترة تتراوح بين 12 و36 شهرًا، خصوصًا في تطبيقات تحسين العمليات (Process Optimization) ، والتحكم الذكي، وإدارة الطاقة، والصيانة التنبؤية. ويرتبط تحقيق هذه العوائد بشكل مباشر بجودة البيانات، ومستوى نضج البنية الرقمية، وقدرة المؤسسة على دمج الأنظمة الذكية ضمن بيئة التشغيل الحالية (PwC, 2025; IBM Institute for Business Value, 2025).

ومع ذلك، لا تزال هناك فجوة واضحة بين الإمكانات النظرية الكبيرة للذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية وبين مستوى التبني الفعلي على أرض الواقع. وتعود هذه الفجوة إلى عدة عوامل، من أبرزها: تعقيد العمليات الكيميائية، وصعوبة نمذجة التفاعلات غير

الخطية، وارتفاع تكاليف التحول الرقمي، ونقص الكفاءات المتخصصة في علوم البيانات والهندسة الكيميائية الرقمية، إضافة إلى التحديات المتعلقة بتكامل الأنظمة الحديثة مع المصانع التقليدية القديمة (legacy systems) (Deloitte, 2025).

وفي هذا السياق، لم يعد الذكاء الاصطناعي مجرد أداة داعمة في الهندسة الكيميائية، بل أصبح عنصرًا أساسيًا ضمن إطار الصناعة الكيميائية الذكية، حيث يتم توظيفه في مختلف مراحل دورة الحياة الصناعية، بدءًا من تصميم العمليات الكيميائية وتحسينها، مرورًا بالتشغيل والتحكم الفوري، ووصولًا إلى إدارة السلامة الصناعية والاستدامة البيئية وإعادة التدوير (Process Systems Engineering 4.0).

وفي ضوء ذلك، يتناول هذا الفصل بصورة منهجية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية، بما يشمل مجالات الاستخدام المختلفة، والأدوات والتقنيات الحديثة، والفوائد الاستراتيجية المتحققة، إضافة إلى الوظائف المستقبلية والمهارات المطلوبة، والتحديات والمعوقات الرئيسة، وصولًا إلى مجموعة من التوصيات التطبيقية والاستراتيجية التي تدعم التحول نحو مصانع كيميائية ذكية أكثر كفاءة واستدامة وأمانًا.

9.2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

يشهد قطاع الهندسة الكيميائية تحولًا جذريًا ومتسارعًا نتيجة التوسع في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي ضمن مختلف مراحل العمليات الصناعية، بدءًا من النمذجة والتصميم، مرورًا بالتشغيل والتحكم، وصولًا إلى الإنتاج والصيانة وإدارة الموارد. وقد أسهم هذا التحول في تعزيز كفاءة الأنظمة الكيميائية، وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الخام، وتحسين جودة المنتجات، ورفع مستويات السلامة الصناعية والاستدامة البيئية، إلى جانب دعم عمليات اتخاذ القرار في البيئات الصناعية المعقدة.

ولم يعد دور الذكاء الاصطناعي مقتصرًا على أتمتة العمليات التقليدية، بل امتد ليشمل مجالات متقدمة ومتنوعة داخل الهندسة الكيميائية، من أبرزها النمذجة والمحاكاة الكيميائية، والتحكم الذكي في العمليات الصناعية، وتحسين تصميم وتشغيل المفاعلات الكيميائية، والصيانة التنبؤية للمعدات والأنظمة، إضافة إلى تطبيقاته في الصناعات البتروكيميائية والتكرير، ومعالجة المياه والاستدامة البيئية، واكتشاف المواد وتصميم المركبات الكيميائية، وتعزيز السلامة الصناعية وإدارة المخاطر الكيميائية.

كما أسهم دمج تقنيات التعلم الآلي والتعلم العميق والتحليلات التنبؤية والتوأم الرقمي في تطوير نماذج أكثر دقة لمحاكاة الأنظمة الصناعية وتحسين الأداء التشغيلي والتنبؤ بالأعطال واختبار سيناريوهات التشغيل المختلفة. وقد أدى ذلك إلى رفع الإنتاجية، وتقليل الفاقد الصناعي، وتحسين استغلال الموارد، وتعزيز القدرة على الابتكار في تطوير المواد والعمليات الكيميائية.ومع التطور المستمر في القدرات الحاسوبية وتكامل الذكاء الاصطناعي مع تقنيات الثورة الصناعية الرابعة، مثل إنترنت الأشياء الصناعي وتحليل البيانات الضخمة وأنظمة التحكم المستقلة، يُتوقع أن تشهد الهندسة الكيميائية تحولًا نوعيًا نحو مصانع أكثر ذكاءً واستدامة واعتمادية، بما يدعم تطوير تطبيقات مستقبلية تشمل الكيمياء الحاسوبية الذكية، وإنتاج الهيدروجين الأخضر، وتقنيات التقاط الكربون وإدارته، ويسهم في تعزيز التنافسية الصناعية وتسريع الابتكار في القطاع الكيميائي عالميًا.

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

9.2.1 النمذجة والمحاكاة الكيميائية

تُعد النمذجة والمحاكاة من أبرز المجالات التي استفادت من تقنيات الذكاء الاصطناعي، حيث تُستخدم خوارزميات التعلم الآلي في تطوير نماذج تنبؤية دقيقة لسلوك العمليات الكيميائية المعقدة، بما في ذلك انتقال الحرارة والكتلة، والتفاعلات الكيميائية، وسلوك الموائع داخل المفاعلات وأبراج التقطير.

وتعتمد هذه التطبيقات بشكل أساسي على الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) للتنبؤ بسلوك الأنظمة الصناعية اعتمادًا على البيانات التشغيلية التاريخية دون الحاجة إلى نماذج فيزيائية تفصيلية، مما ينعكس على:

- تقليل الاعتماد على التجارب المخبرية المكلفة
- تسريع عمليات التصميم الصناعي
- تحسين دقة التنبؤ بالأداء التشغيلي
- تقليص زمن تطوير المنتجات الكيميائية

كما يُستخدم التعلم العميق في مجالات التصميم العكسي للجزيئات (Inverse Molecular Design) عبر نماذج توليدية مثل الشبكات التوليدية الخصومية (GANs) والتشفير التلقائي المتغير (VAEs) (Goodfellow, Bengio and Courville, 2016).

9.2.2 التحكم الذكي في العمليات الصناعية

تمثل أنظمة التحكم الذكي أحد الأعمدة الأساسية للتحول الرقمي في الصناعات الكيميائية، حيث تُستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لتطوير أنظمة قادرة على المراقبة والتحكم اللحظي والديناميكي في العمليات الصناعية.

وتشمل هذه التقنيات:

- التحكم التنبؤي المعتمد على النماذج (MPC)
- أنظمة التحكم التكيفي الذكي
- النظم الهجينة المعتمدة على ANFIS
- التحكم في العمليات غير الخطية

وتسهم هذه الأنظمة في تحقيق:

- تقليل الانحرافات التشغيلية
- تعزيز استقرار العمليات الصناعية
- تحسين جودة المنتج النهائي
- خفض استهلاك الطاقة والمواد الخام

ويُستخدم الذكاء الاصطناعي على نطاق واسع في التحكم بالمفاعلات الكيميائية، ووحدات التقطير المعقدة، والتفاعلات الطاردة للحرارة (Siemens, 2024).

9.2.3 تحسين تصميم وتشغيل المفاعلات الكيميائية

يسهم الذكاء الاصطناعي في تحسين تصميم وتشغيل المفاعلات الكيميائية من خلال تحليل البيانات التشغيلية وتحديد الظروف المثلى للتشغيل، بما يعزز الكفاءة الإنتاجية ويقلل الفاقد الصناعي.

وتشمل التطبيقات:

- تحسين معدلات التحويل الكيميائي
- تحليل ديناميكية الموائع
- تحسين انتقال الحرارة والكتلة
- رفع كفاءة الحفازات
- تقليل استهلاك الطاقة

كما تم توظيف الخوارزميات الجينية بالتكامل مع الشبكات العصبية لتحسين أداء مفاعلات البلمرة وزيادة الإنتاجية التشغيلية.

9.2.4 الصيانة التنبؤية للمعدات والأنظمة

تُعد الصيانة التنبؤية من أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاع الكيميائي، حيث تعتمد على تحليل بيانات الحساسات للكشف المبكر عن الأعطال قبل وقوعها (He, Xu and Xu, 2019).

وتشمل التطبيقات:

- المضخات والضواغط
- المبادلات الحرارية
- المفاعلات الكيميائية
- التوربينات الصناعية
- خطوط الأنابيب والصمامات

وتحقق هذه التقنيات:

- تقليل التوقفات غير المخططة
- خفض تكاليف الصيانة
- رفع الاعتمادية التشغيلية
- إطالة العمر التشغيلي للمعدات

كما تُستخدم تقنيات كشف الأعطال وتشخيصها (FDD) بالاعتماد على الشبكات العصبية وآلات المتجهات الداعمة.

9.2.5 الذكاء الاصطناعي في الصناعات البتروكيميائية والتكرير

أصبح الذكاء الاصطناعي عنصرًا محوريًا في الصناعات البتروكيميائية، نظرًا لتعقيد العمليات وكثافة البيانات التشغيلية.

وتشمل التطبيقات:

- تحسين عمليات التكرير
- التنبؤ بجودة المنتجات النفطية
- تحسين أداء وحدات التكسير والتقطير
- إدارة الطاقة الصناعية
- مراقبة الانبعاثات

كما تُستخدم تقنيات التحليل التنبؤي في تحسين جدولة الإنتاج وإدارة المخزون واستقرار العمليات، مما ينعكس على رفع الإنتاجية وتقليل الفاقد الصناعي وتحسين الكفاءة الاقتصادية.

9.2.6 معالجة المياه والاستدامة البيئية

يُسهم الذكاء الاصطناعي في دعم الاستدامة البيئية من خلال تحسين عمليات معالجة المياه وإدارة النفايات الصناعية.

وتشمل التطبيقات:

- تحسين كفاءة معالجة المياه
- مراقبة جودة المياه
- التنبؤ بمستويات التلوث
- إدارة النفايات الكيميائية
- تحسين أنظمة التحلية

كما تساعد الخوارزميات الذكية في:

- تقليل استهلاك المواد الكيميائية
- خفض الانبعاثات الصناعية
- تحسين كفاءة المعالجة
- دعم أهداف الاستدامة البيئية (Li et al., 2017)

9.2.7 اكتشاف المواد وتصميم المركبات الكيميائية

أحدث الذكاء الاصطناعي تحولًا جوهريًا في مجال اكتشاف المواد وتصميم المركبات الكيميائية، من خلال تحليل الخصائص الجزيئية والتنبؤ بسلوك المواد.

وتشمل التطبيقات:

- تطوير مواد متقدمة

- تصميم محفزات عالية الكفاءة
- تحسين خصائص البوليمرات
- تطوير مواد صديقة للبيئة

وتُستخدم نماذج التعلم العميق لتقليل الزمن والتكلفة المرتبطة بتطوير المواد الجديدة، خاصة في مجالات الطاقة المتقدمة والصناعات النانوية والصناعات الدوائية.

9.2.8 السلامة الصناعية وإدارة المخاطر الكيميائية

يُسهم الذكاء الاصطناعي في تعزيز السلامة الصناعية عبر تطوير أنظمة ذكية قادرة على الكشف المبكر عن المخاطر التشغيلية.

وتشمل التطبيقات:

- الكشف عن التسربات الكيميائية
- التنبؤ بالحوادث الصناعية
- مراقبة الغازات السامة
- تحليل المخاطر التشغيلية
- دعم أنظمة الاستجابة للطوارئ

كما تُستخدم تقنيات الرؤية الحاسوبية والتحليلات التنبؤية لمراقبة العمليات الصناعية في الزمن الحقيقي، مما يقلل من احتمالية وقوع الحوادث(Chaudhuri et al., 2021).

9.2.9 التوأم الرقمي والمحاكاة الصناعية

يُعد التوأم الرقمي (Digital Twin) أحد أهم التقنيات الداعمة للتحول الرقمي في الهندسة الكيميائية، حيث يُستخدم لإنشاء نماذج افتراضية تحاكي الأنظمة الصناعية بشكل لحظي.

وتشمل الاستخدامات:

- مراقبة الأداء التشغيلي
- تحسين استهلاك الطاقة
- التنبؤ بالأعطال
- اختبار سيناريوهات التشغيل
- دعم اتخاذ القرار

ويُستخدم على نطاق واسع في المصانع الكيميائية والمصافي ووحدات الإنتاج (Tao and Qi, 2019).

9.2.10 التطبيقات الناشئة والمستقبلية

تشير الاتجاهات الحديثة إلى توسع كبير في تطبيقات الذكاء الاصطناعي داخل الهندسة الكيميائية، وتشمل:

- المصانع ذاتية التشغيل
- أنظمة التحكم المستقلة
- الكيمياء الحاسوبية الذكية
- إنتاج الهيدروجين الأخضر
- تقنيات التقاط الكربون وإدارته
- إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)
- التحليلات الضخمة للبيانات الصناعية

ومن المتوقع أن يصبح الذكاء الاصطناعي عنصرًا محوريًا في تطوير صناعات كيميائية أكثر كفاءة واستدامة وأمانًا خلال العقود القادمة .

9.3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

تعتمد تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية على مجموعة متنوعة من التقنيات والخوارزميات المتقدمة التي تُستخدم في تصميم العمليات الكيميائية، والتحكم الصناعي، وتشغيل المفاعلات، والصيانة التنبؤية، والصناعات البتروكيميائية، ومعالجة المياه، واكتشاف المواد الجديدة، والتوائم الرقمية للمصانع الذكية. وتختلف التقنيات المستخدمة تبعًا لطبيعة العملية الكيميائية ومستوى تعقيدها وحجم البيانات التشغيلية المتاحة. ويوضح الجدول التالي أبرز التقنيات المستخدمة في المجالات الكيميائية المختلفة:

جدول (9.1). أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات الهندسة الكيميائية

مجال التطبيق	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة
النمذجة والمحاكاة الكيميائية	الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، التعلم الآلي (ML)، التعلم العميق (DL)
التحكم الذكي في العمليات الصناعية	التحكم التنبؤي (MPC)، المنطق الضبابي (Fuzzy Logic)، ANFIS، التعلم المعزز (RL)
تصميم وتشغيل المفاعلات الكيميائية	الخوارزميات الجينية (GA)، الشبكات العصبية، التعلم الآلي
الصيانة التنبؤية للمعدات	التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics)، الشبكات العصبية، كشف الشذوذ (Detection Anomaly)
الصناعات البتروكيميائية والتكرير	التعلم الآلي، التعلم العميق، التحليلات التنبؤية
معالجة المياه والاستدامة البيئية	التعلم الآلي، الشبكات العصبية، التحليلات التنبؤية
اكتشاف المواد وتصميم المركبات الكيميائية	التعلم العميق، الذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI)، GANs، VAEs

السلامة الصناعية وإدارة المخاطر	الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)، التعلم العميق، التحليلات التنبؤية
التوأم الرقمي والمحاكاة الصناعية	التوأم الرقمي (Digital Twins)، إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)، التحليلات التنبؤية
إدارة الطاقة وكفاءة التشغيل	التعلم الآلي، التحسين الذكي (Optimization Algorithms)، التحليلات التنبؤية
إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)	Edge AI، التعلم الآلي، تحليل البيانات الضخمة
الكيمياء الحاسوبية الذكية	التعلم العميق، الشبكات العصبية البيانية (GNNs)، الذكاء الاصطناعي التوليدي
المصانع الذكية والتشغيل الذاتي	التعلم المعزز، الأنظمة الذاتية، التوأم الرقمي

المصدر: الأدبيات العلمية المنشورة في Computers & Chemical Engineering و Chemical Engineering Journal و Chemical Engineering Science و Journal of Process Control و Water Research و Process Safety and Environmental Protection.

9.3.1 التقنيات الأكثر استخداماً في الهندسة الكيميائية

يمكن تصنيف التقنيات الأساسية المستخدمة في معظم تطبيقات الهندسة الكيميائية وفق الترتيب الآتي:

1. **التعلم الآلي (Machine Learning) :** يُستخدم في نمذجة العمليات الكيميائية، وتحسين الإنتاج، والتنبؤ بالجودة، وتحليل الأداء التشغيلي.
2. **التعلم العميق (Deep Learning) :** يُستخدم في تحليل العمليات المعقدة، واكتشاف المواد الجديدة، وتشخيص الأعطال الصناعية، وتحليل البيانات الضخمة.
3. **الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks) :** تُستخدم في التنبؤ بسلوك العمليات الكيميائية، ومحاكاة المفاعلات، وتحسين الأداء التشغيلي.
4. **التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics) :**تُستخدم في الصيانة التنبؤية، وتحسين إدارة الأصول، والتنبؤ بالمشكلات التشغيلية قبل حدوثها.
5. **التعلم المعزز (Reinforcement Learning) :** يُستخدم في أنظمة التحكم الذكية، وتحسين تشغيل المفاعلات الكيميائية والعمليات الصناعية الديناميكية.
6. **الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms) :** تُستخدم في تحسين تصميم العمليات الكيميائية، وتحسين أداء المفاعلات، وإيجاد أفضل ظروف التشغيل.
7. **المنطق الضبابي وأنظمة ANFIS :** تُستخدم في التحكم بالعمليات غير الخطية واتخاذ القرار في البيئات الصناعية التي تتسم بعدم اليقين.
8. **الرؤية الحاسوبية (Computer Vision) :** تُستخدم في مراقبة السلامة الصناعية، والكشف عن التسربات والعيوب التشغيلية، ومراقبة خطوط الإنتاج.
9. **التوأم الرقمي (Digital Twins) :** يُستخدم لمحاكاة المصانع والعمليات الكيميائية ومراقبة الأداء التشغيلي والتنبؤ بالأعطال في الزمن الحقيقي.
10. **إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT) : يُستخدم** في جمع البيانات التشغيلية وربط المعدات الصناعية وتمكين المراقبة والتحكم الذكي.
11. **الذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI) :** يُستخدم في تصميم الجزيئات الجديدة، واكتشاف المواد المتقدمة، وتطوير المحفزات والمواد الكيميائية المبتكرة.

9.4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

يشهد قطاع الهندسة الكيميائية تحولًا رقميًا متسارعًا نتيجة التوسع في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في مختلف مراحل البحث والتطوير والإنتاج الصناعي، حيث انتقلت تطبيقاته من الاستخدامات التقليدية في مراقبة العمليات والكشف عن الأعطال إلى منظومات ذكية تدعم تصميم المواد، ومحاكاة العمليات الكيميائية، وتحسين تشغيل المصانع، وأتمتة المختبرات، وتحليل البيانات الكيميائية، وإدارة السلامة الصناعية. وقد أسهم هذا التحول في تعزيز الابتكار، وتحسين كفاءة استغلال الموارد، وتقليل التكاليف التشغيلية، ورفع جودة المنتجات، ودعم الاستدامة في الصناعات الكيميائية والبتروكيميائية والدوائية والغذائية (Deloitte, 2024; IBM Research, 2023).

ويبين الجدول (9.2) أن أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية يمكن تصنيفها **ضمن ستة محاور رئيسية مترابطة**، تشمل: تصميم المواد واكتشافها، ومحاكاة وتصميم العمليات الكيميائية، وتحسين العمليات والتحكم الذكي، وتصميم المفاعلات والمختبرات الذكية، والتحليل الكيميائي وضبط الجودة، والسلامة وإدارة المخاطر. ويعكس هذا التصنيف التكامل الوظيفي بين هذه الأدوات في دعم مختلف مراحل تطوير المنتجات والعمليات الكيميائية، ابتداءً من البحث العلمي وحتى التشغيل الصناعي.

يركز **المحور الأول، تصميم المواد واكتشافها**، على الأدوات التي توظف الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بخصائص المواد واقتراح تراكيب جديدة، مثل Citrine Platform و Atinary SDLabs وتعتمد هذه المنصات على تحليل البيانات العلمية والتجريبية لتطوير مواد ومركبات جديدة، وتحسين تصميم البوليمرات والمواد المتقدمة، وأتمتة التجارب المخبرية، مما يسهم في تقليل عدد التجارب التقليدية، وتسريع عمليات البحث والتطوير، وتعزيز الابتكار في الصناعات الكيميائية.

أما المحور الثاني، محاكاة وتصميم العمليات الكيميائية، فيضم منصات متقدمة مثل AVEVA Process Simulation و AspenPlus وAspen HYSYS، والتي توفر بيئات رقمية لمحاكاة العمليات الصناعية، ونمذجة التفاعلات الكيميائية، وعمليات الفصل والتقطير، وتحليل عمليات التكرير والبتروكيماويات. وتساعد هذه الأدوات في تحسين تصميم المصانع، ورفع كفاءة التشغيل، وتقليل الفاقد، ودعم اتخاذ القرارات الهندسية خلال مراحل التصميم والتشغيل.

ويمثل **المحور الثالث، تحسين العمليات والتحكم الذكي**، أحد أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الصناعة الكيميائية، حيث يشمل أدوات مثل Aspen DMC3 وHoneywell Forge، التي تعتمد على تقنيات التحكم التنبؤي وتحليل البيانات التشغيلية في الزمن الحقيقي لتحسين أداء العمليات الصناعية، وإدارة الموارد، ورفع كفاءة الإنتاج، وتقليل استهلاك الطاقة والتكاليف التشغيلية، بما يعزز استقرار العمليات وجودة المنتجات. ويختص **المحور الرابع، تصميم المفاعلات والمختبرات الذكية**، بمنصات مثل ChemOS وAtinary SDLabs، التي تدعم أتمتة التجارب الكيميائية، وإدارة المختبرات، وتحسين تصميم التجارب، وتسريع دورات البحث والتطوير. وتسهم هذه الأدوات في تحسين كفاءة العمل المخبري، وتقليل الزمن اللازم لتطوير المنتجات والمواد الجديدة، وتعزيز إنتاجية فرق البحث العلمي. أما **المحور الخامس، التحليل الكيميائي وضبط الجودة**، فيشمل أطر التعلم العميق مثل TensorFlow وPyTorch، والتي تُستخدم في تحليل البيانات الكيميائية، وتطوير النماذج التنبؤية، ومعالجة نتائج القياسات والتحاليل الصناعية. وتساعد هذه الأدوات في تحسين دقة النماذج التحليلية، ودعم مراقبة الجودة، وتعزيز القدرة على تفسير البيانات الكيميائية المعقدة، بما يرفع موثوقية العمليات الصناعية. ويركز **المحور السادس، السلامة وإدارة المخاطر**، على أنظمة مثل Aspen HYSYS Safety Analysis وHoneywell Safety Manager، التي تعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل مخاطر العمليات الصناعية، وتقييم سيناريوهات الحوادث، ومراقبة المتغيرات التشغيلية، والكشف المبكر عن المخاطر المحتملة. وتسهم هذه التطبيقات في تعزيز السلامة التشغيلية، وتقليل الحوادث والخسائر، ورفع موثوقية تشغيل المنشآت الكيميائية.

جدول (9.2). أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

المحور الرئيسي	الأداة / النظام	الفئة التقنية	الوظائف والخصائص الرئيسية	التطبيقات الكيميائية والصناعية	الفوائد التشغيلية
أولاً: تصميم المواد واكتشافها	Citrine Platform	تصميم مواد مدعوم بالذكاء الاصطناعي	التنبؤ بخصائص المواد واقتراح تركيبات جديدة	المواد والبوليمرات	تسريع البحث وتقليل التجارب
	Atinary SDLabs	مختبرات ذاتية ذكية	تحسين التجارب وربطها بالأتمتة	البحث والتطوير الكيميائي	تقليل زمن التطوير
ثانياً: محاكاة وتصميم العمليات الكيميائية	AVEVA Process Simulation	محاكاة عمليات صناعية	نمذجة العمليات وتحسين الأداء	المصانع الكيميائية	رفع الكفاءة التشغيلية
	Aspen Plus	محاكاة عمليات كيميائية	نمذجة التفاعلات والفصل والتقطير	تصميم المصانع الكيميائية	تحسين التصميم وتقليل الفاقد
	Aspen HYSYS	محاكاة عمليات الغاز والسوائل	تحليل عمليات التكرير والبتروكيماويات	الصناعات النفطية والكيميائية	تحسين التشغيل وتقليل التكلفة
ثالثاً: تحسين العمليات والتحكم الذكي	Aspen DMC3	تحكم تنبؤي متقدم	تحسين العمليات في الزمن الحقيقي	المصانع الكيميائية	رفع الكفاءة التشغيلية
	Honeywell Forge	منصة تحسين صناعي	تحليل البيانات التشغيلية وتحسين الأداء	الصناعات الكيميائية	تقليل التكاليف وتحسين الإنتاج
رابعاً: تصميم المفاعلات والمختبرات الذكية	ChemOS	إدارة تجارب ذكية	تنظيم وتحسين التجارب الكيميائية	البحث والتطوير	تسريع الابتكار الكيميائي
	Atinary SDLabs	مختبرات ذاتية	أتمتة التجارب وتحسين النتائج	تطوير المواد	رفع كفاءة البحث
خامساً: التحليل الكيميائي وضبط الجودة	TensorFlow	تعلم عميق	تحليل البيانات الكيميائية والنمذجة	التحليل الصناعي	تحسين دقة التنبؤ
	PyTorch	تعلم عميق	تطوير نماذج تحليل كيميائي	البحث والتحليل	دعم النمذجة المتقدمة
سادساً: السلامة وإدارة المخاطر	Aspen HYSYS Safety Analysis	تحليل مخاطر العمليات	تقييم سيناريوهات الحوادث	المصانع الكيميائية	تعزيز السلامة
	Honeywell Safety Manager	إدارة سلامة صناعية	مراقبة العمليات واكتشاف المخاطر	المنشآت الصناعية	تقليل الحوادث

المصدر: الاعتماد على وثائق الشركات المطورة للأدوات، والأدبيات العلمية الحديثة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية (AIChE, 2024; IChemE, 2024; Citrine Informatics, 2025; AVEVA, 2025; Atinary Technologies, 2025).

فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

يحدث دمج الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية تحولاً نوعياً في تصميم وتشغيل وتحسين العمليات الصناعية، إذ يسهم في رفع كفاءة التحكم، وتحسين الجودة، وتقليل التكاليف التشغيلية، ودعم الاستدامة البيئية. كما مكّن الذكاء الاصطناعي المصانع الكيميائية من الانتقال من التشغيل التفاعلي إلى التشغيل التنبؤي والاستباقي، مما عزز مرونة الأنظمة الصناعية وقدرتها على التكيف مع تغيرات التشغيل والطلب والأسواق.
(Deloitte, 2025)

الفوائد التقنية

تحسين التحكم الديناميكي
في العمليات الكيميائية المعقدة باستخدام خوارزميات التعلم الآلي والتعلم المعزز.

رفع دقة النمذجة والمحاكاة
للعمليات الحرارية والتفاعلات الكيميائية متعددة المتغيرات.

تحسين أداء أنظمة التحكم المتقدم
(Advanced Process Control – APC) لرفع كفاءة التشغيل واستقرار العملية.

تعزيز الصيانة التنبؤية
للمعدات مثل المفاعلات والمضخات والمبادلات الحرارية.

تقليل الأعطال والتوقفات
غير المخططة عبر التحليل اللحظي للبيانات.

تسريع اكتشاف المواد الجديدة
وتصميم المحفزات الصناعية باستخدام الذكاء الاصطناعي التوليدي.

تحسين جودة المنتجات الكيميائية
وتقليل التباين في العمليات الإنتاجية.

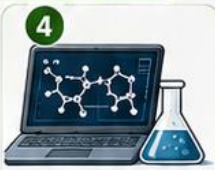
(Ahmed et al., 2026)

الفوائد الاقتصادية

خفض استهلاك الطاقة والمواد الخام
عبر تحسين ظروف التشغيل المثلى.

تقليل تكاليف الصيانة والإصلاح
نتيجة تنطيق الصيانة التنبؤية.

زيادة معدلات الإنتاج
وتحسين استقرار العمليات الصناعية.



تسريع البحث والتطوير
وتقليل زمن تطوير المنتجات الجديدة.

تحسين كفاءة سلاسل التوريد
والتخزين والنقل الكيميائي.

دعم اتخاذ القرار الاستثماري والإنتاجي
اعتماداً على التحليل الذكي للبيانات.

تشير تقارير الصناعة الكيميائية الحديثة إلى أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي يمكن أن تقلل التكاليف التشغيلية بنسبة تتراوح بين

15% – 30%

في بعض العمليات الصناعية كثيفة الاستهلاك للطاقة.

(McKinsey & Company, 2025)

الفوائد البيئية

تقليل الانبعاثات الكربونية
وتحسين كفاءة الطاقة.

خفض استهلاك المياه والمواد الكيميائية الخطرة
عبر تحسين التشغيل وتقليل الفاقد.

تحسين إدارة المخلفات الصناعية
وإعادة التدوير.

التنبؤ بالتسربات والانبعاثات الخطرة
قبل حدوثها.

دعم تصميم عمليات إنتاج خضراء
منخفضة الانبعاثات.

تحسين كفاءة احتجاز الكربون
(Carbon Capture)

الذكاء الاصطناعي يقود مستقبل الهندسة الكيميائية

كفاءة أعلى • جودة أفضل • استدامة أكبر • تشغيل أذكى

9.6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

يشهد قطاع الهندسة الكيميائية تحولاً نوعياً غير مسبوق نتيجة التقدم المتسارع في تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليلات البيانات الضخمة والتوائم الرقمية وإنترنت الأشياء الصناعي والحوسبة عالية الأداء. وقد أسهم هذا التحول في إعادة تشكيل بيئات الإنتاج الكيميائي، حيث انتقلت العديد من المنشآت الصناعية من نماذج التشغيل التقليدية إلى مفهوم المصانع الكيميائية الذكية (Smart Chemical Plants)، التي تعتمد على جمع البيانات وتحليلها في الزمن الحقيقي، وتوظيف النماذج التنبؤية، وأنظمة التحكم الذاتي، والخوارزميات الذكية لتحسين الأداء التشغيلي وتعزيز الاستدامة والموثوقية والسلامة الصناعية.

وفي ظل هذه التحولات، لم يعد دور المهندس الكيميائي مقتصراً على تصميم وتشغيل العمليات الصناعية وفق المفاهيم التقليدية، بل أصبح يتطلب القدرة على التعامل مع النظم الرقمية المتقدمة وتحليل البيانات الصناعية وتطوير النماذج الذكية وإدارة الأنظمة المؤتمتة. ونتيجة لذلك، برزت مجموعة من الوظائف الجديدة التي تجمع بين المعرفة العميقة بالهندسة الكيميائية والمهارات المتقدمة في علوم البيانات والذكاء الاصطناعي والحوسبة العلمية.

الوظائف الناشئة في الهندسة الكيميائية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

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

1 مهندس تحسين وتحكم العمليات الكيميائية بالذكاء الاصطناعي
(AI Process Optimization & Control Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج ذكاء اصطناعي وخوارزميات تحسين.
- تحليل البيانات التشغيلية لرفع الكفاءة وتقليل الهدر.
- تحسين استقرار العمليات وتقليل التذبذبات.
- التحليل التنبؤي لاكتشاف الانحرافات والأعطال.
- تصميم استراتيجيات التحكم المتقدم.
- تحسين استهلاك الطاقة والمواد الخام.
- دمج الذكاء الاصطناعي مع SCADA / DCS.
- دعم الأتمتة الذكية وتحسين جودة المنتجات.
- تطوير نماذج محاكاة لدعم اتخاذ القرار.

المهارات المطلوبة:
- الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة
- خوارزميات التحسين الرياضي
- Python و MATLAB
- تحليل البيانات الصناعية والضخمة
- أنظمة التحكم الصناعي (SCADA / DCS)

2 أخصائي التوائم الرقمية والمحاكاة الكيميائية
(Digital Twin Specialist)

المسؤوليات:
- بناء نماذج التوأم الرقمي للممدات والعمليات.
- محاكاة الأداء وتحليل السيناريوهات المختلفة.
- ربط الأنظمة الصناعية بالبيانات الحية عبر IoT.
- دعم الصيانة التنبؤية وتحسين موثوقية التشغيل.
- تقييم وتحسين أداء العمليات الصناعية.

المهارات المطلوبة:
- MATLAB و Aspen Plus
- تقنيات التوأم الرقمي والمحاكاة
- إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT)
- تحليل البيانات الصناعية
- النمذجة الديناميكية للعمليات الكيميائية

3 محلل البيانات الصناعية الكيميائية
(Industrial Chemical Data Analyst)

المسؤوليات:
- جمع وتنظيم وتحليل البيانات التشغيلية والإنتاجية.
- تطوير نماذج تنبؤية للأداء والجودة.
- اكتشاف الأنماط غير الطبيعية والانحرافات.
- إعداد التقارير ولوحات المعلومات الذكية.
- تقديم توصيات لتحسين الكفاءة والإنتاجية.

المهارات المطلوبة:
- Python و SQL
- Power BI و5I وأدوات العرض للبيانات
- الإحصاء التطبيقي وتحليل البيانات
- تعلم الآلة وتحليل الأنماط
- إدارة قواعد البيانات الصناعية

4 مهندس الاستدامة الذكي
(AI Sustainability Engineer)

المسؤوليات:
- تقييم الأداء البيئي للعمليات الصناعية.
- تقليل الانبعاثات واستهلاك الطاقة.
- تطوير نماذج تنبؤية للأثر البيئي.
- دعم تطبيقات الاقتصاد الدائري.
- تحسين كفاءة استخدام الموارد الطبيعية.

المهارات المطلوبة:
- تقييم دورة الحياة (LCA)
- معايير ESG والاستدامة الصناعية
- نماذج التنبؤ البيئي
- تحليل كفاءة الطاقة
- المحاكاة البيئية والطاقية

5 مهندس الأمن السيبراني الصناعي
(Industrial Cybersecurity Engineer)

المسؤوليات:
- حماية أنظمة التحكم الصناعية والشبكات الذكية.
- تقييم المخاطر السيبرانية للمنشآت الكيميائية.
- مراقبة أمن أنظمة SCADA والأتمتة الصناعية.
- تطوير استراتيجيات الاستجابة للحوادث الرقمية.
- ضمان استمرارية التشغيل وأمن المعلومات.

المهارات المطلوبة:
- أمن الشبكات الصناعية
- حماية أنظمة SCADA
- تقييم المخاطر السيبرانية
- الأمن الصناعي الرقمي
- إدارة الحوادث والاستجابة الأمنية

6 مهندس الصيانة التنبؤية
(Predictive Maintenance Engineer)

المسؤوليات:
- التنبؤ بأعطال المعدات قبل وقوعها.
- مراقبة أداء المعدات وتحليل البيانات.
- اكتشاف العيوب والانحرافات التشغيلية.
- تطوير أنظمة الصيانة التنبؤية.
- تقليل التوقفات غير المخطط لها.

المهارات المطلوبة:
- التعلم الآلي ونماذج التنبؤ
- معالجة بيانات المستشعرات وإنترنت الأشياء
- تحليل البيانات التاريخية والفورية
- برمجة Python
- فهم أنظمة القياس والمراقبة الصناعية

7 مهندس السلامة الكيميائية وإدارة المخاطر بالذكاء الاصطناعي
(AI-Driven Chemical Safety & Risk Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج ذكاء اصطناعي للتنبؤ بالمخاطر والحوادث.
- تحليل بيانات العمليات والحوادث لاستخراج مؤشرات الخطر.
- أنظمة ذكية للكشف المبكر عن التسربات والمخاطر.
- أنظمة إنذار واستجابة آلية (Real-time Monitoring).
- مراقبة العمليات عبر (IoT) وأجهزة الاستشعار.
- تقييم مخاطر الانفجارات والتفاعلات غير المرغوبة.
- دعم معايير السلامة: HAZOP , LOPA , IEC 61511.
- التعاون مع الفرق لتحسين السلامة وتقليل الحوادث.

المهارات المطلوبة:
- الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة
- تحليل البيانات الصناعية والإحصائية
- Python وأدوات تحليل Python
- الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)
- إنترنت الأشياء (IoT) وأنظمة الاستشعار
- أنظمة التحكم والمراقبة الصناعية (SCADA / DCS)

8 مهندس تصميم المواد والكيمياء التوليدية بالذكاء الاصطناعي
(AI-Driven Chemical & Materials Design Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج توليدية لتصميم مركبات كيميائية جديدة.
- التنبؤ بالخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد.
- اقتراح وتحسين مسارات التفاعل الكيميائي.
- تحليل قواعد البيانات الكيميائية لاستخراج أنماط.
- تحسين التركيبات والمواد لرفع الأداء والكفاءة.
- نماذج محاكاة ونمذجة جزيئية لدعم التصميم.
- تسريع اكتشاف المواد المتقدمة (بوليمرات، نانوية ...).
- دعم فرق البحث والتطوير في مختلف القطاعات.

المهارات المطلوبة:
- الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة
- الذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI)
- تحليل البيانات الكيميائية الحيوية والكبيرة
- Python و MATLAB والحوسبة العلمية
- النمذجة والمحاكاة الجزيئية (Molecular Modeling & Simulation)

9 مهندس الكيمياء الحسابية والنمذجة العلمية
(Computational Chemistry and AI for Science Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج فيزيائية وكيميائية ذكية.
- محاكاة التفاعلات الكيميائية وانتقال الحرارة والموائع.
- بناء نماذج وكيلة لتقليل زمن المحاكاة.
- دعم مشاريع البحث والتطوير.
- تحسين دقة وكفاءة النماذج العلمية.

المهارات المطلوبة:
- الشبكات العصبية الفيزيائية (PINNs)
- الديناميكا الحرارية وميكانيكا الموائع
- النمذجة الرياضية والمحلكاة
- الذكاء الاصطناعي العلمي (AI for Science)
- الحوسبة العلمية عالية الأداء

10 باحث هندسة العمليات المعززة بالعوامل الذكية
(AI-Driven Process Engineering Researcher)

المسؤوليات:
- تصميم وتطوير أطر عمل للعوامل الذكية.
- بناء عوامل ذكاء اصطناعي مستقلة للمهام الهندسية.
- تطوير حلول للتحسين والتشغيل الذكي.
- دمج أدوات المحاكاة والتحسين كمبير بيئات مؤتمتة.
- تحسين موثوقية وقابلية تفسير الأنظمة الذكية.

المهارات المطلوبة:
- Python والحوسبة
- هندسة العمليات والنظم
- أدوات المحاكاة والتحسين
- تطوير أنظمة الذكية والعوامل البرمجية
- التكامل عبر واجهات برمجة التطبيقات (APIs)

لماذا هذه الوظائف مهمة؟

- تسهم في بناء صناعة كيميائية ذكية مستدامة وآمنة
- تعزز السلامة والجودة في المنشآت الصناعية
- تخلق فرص عمل نوعية ذات مستقبل واعد
- تدعم اتخاذ القرار القائم على البيانات
- تحسن الكفاءة التشغيلية وتقلل التكاليف
- تعزز الاستدامة البيئية والاقتصاد الدائري

الوظائف الناشئة في الهندسة الكيميائية المدعومة بالذكاء الاصطناعي (الجزء الثاني)

أفرزت الثورة الرقمية مجموعة من التخصصات المهنية الجديدة التي يُتوقع أن تشهد نمواً متزايداً خلال الستوات المقبلة، ومن أبرزها:

11 مهندس هندسة المطاليات في المجال الكيميائي
(Chemical Prompt Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم استراتيجيات متقدمة لهندسة المطاليات.
- تطوير أطر عمل مدمجة بمعرفة المجال الكيميائي.
- استخراج المعلومات من الأدبيات والبيانات الكيميائية.
- تقييم أداء النماذج وتحسين جودة المخرجات.
- تقليل أخطاء وهلوسة النماذج اللغوية.

المهارات المطلوبة:
- فهم النماذج اللغوية الكبيرة وتقنيات هندسة المطاليات.
- المعرفة بالمصطلحات والمفاهيم الكيميائية.
- LangChain وأطر العمل مثل Hugging Face وPython.
- تحليل وتقييم مخرجات النماذج.
- مهارات التفكير التحليلي وحل المشكلات.

12 مهندس الطاقة المتجددة الكيميائية
(Chemical Renewable Energy Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم وتطوير أنظمة إنتاج الهيدروجين الأخضر.
- تحسين أداء البطاريات وأنظمة تخزين الطاقة.
- تطوير عمليات إنتاج الوقود الحيوي والوقود المستدام.
- دمج تقنيات الطاقة المتجددة في العمليات الصناعية.
- تحسين كفاءة استهلاك الطاقة وتقليل الانبعاثات الكربونية.

المهارات المطلوبة:
- هندسة الطاقة الكيميائية.
- تقنيات الهيدروجين والبطاريات.
- هندسة العمليات الكيميائية.
- الديناميكا الحرارية والنقل الحراري.
- Python وأدوات المحاكاة الهندسية.

13 مهندس الاقتصاد الدائري الكيميائي
(Chemical Circular Economy Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير استراتيجيات استعادة وإعادة استخدام المواد الكيميائية.
- تحسين كفاءة استغلال الموارد وتقليل النفايات.
- تصميم عمليات إنتاج مستدامة ودائرية.
- تنفيذ دراسات تقييم دورة الحياة البيئية.
- دعم تحقيق أهداف الاستدامة والحياد الكربوني.

المهارات المطلوبة:
- الاقتصاد الدائري والاستدامة الصناعية.
- إعادة التدوير واستعادة الموارد.
- تحسين العمليات الكيميائية.
- تقييم دورة الحياة (LCA).
- معايير ESG والاستدامة البيئية.

14 مهندس الروبوتات الكيميائية
(Chemical Robotics Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم وتطوير الروبوتات الصناعية للمنشآت الكيميائية.
- تنفيذ عمليات التفتيش والصيانة الآلية.
- دمج الروبوتات مع أنظمة التحكم الصناعية.
- تحسين السلامة التشغيلية وتقليل الاطناطر البشرية.
- تطوير حلول روبوتية للبيئات عالية الخطورة.

المهارات المطلوبة:
- الروبوتات الصناعية.
- أنظمة ROS.
- أنظمة التحكم والأتمتة الصناعية.
- دمج الحساسات (Sensor Fusion).
- C++ وPython.

15 مهندس النقل والموائع الكيميائي الذكي
(Smart Chemical Fluid Transport Engineer)

المسؤوليات:
- تحسين أداء شبكات نقل الموائع الكيميائية.
- تطوير أنظمة تحكم تكيفية لخطوط الأنابيب والخزانات.
- تحليل بيانات التدفق والضغط والكفاءة التشغيلية.
- تقليل الفاقد واستهلاك الطاقة.
- دعم التشغيل الذكي لمنظومات النقل والتخزين.

المهارات المطلوبة:
- ميكانيكا الموائع ونقل الموائع.
- هندسة العمليات الكيميائية.
- الذكاء الاصطناعي والتحكم الذكي.
- Python وتحليل البيانات التشغيلية.
- أنظمة التحكم الصناعية.

16 مهندس التفاعلات الكيميائية بالذكاء الاصطناعي
(AI Chemical Reaction Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج لمحاكاة التفاعلات الكيميائية.
- تصيؤ بالنوائج وتحسين الانتقائية والكفاءة.
- تحسين ظروف التشغيل والتفاعل.
- تحليل الحركية الكيميائية باستخدام الذكاء الاصطناعي.
- دعم تصميم المفاعلات الكيميائية الذكية.

المهارات المطلوبة:
- هندسة التفاعلات الكيميائية.
- الحركية الكيميائية (Chemical Kinetics).
- الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي.
- Python وMATLAB.
- المحاكاة والنمذجة الكيميائية.

17 مهندس الإستشعار الناعم للعمليات الكيميائية
(Chemical Soft Sensor Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج استشعار ناعم للمنفيرات الحرجة في العمليات الكيميائية.
- تحليل البيانات التشغيلية لبناء نماذج تنبؤية دقيقة.
- دمج نماذج الاستشعار الناعم مع أنظمة التحكم الصناعية.
- تحسين جودة القياسات وتقليل الاعتماد على القياسات المخبرية المتأخرة.
- دعم مراقبة الأداء وتحسين استقرار العمليات الإنتاجية.

المهارات المطلوبة:
- تعلم الآلة والتحليل التنبؤي.
- MATLAB وPython.
- هندسة العمليات الكيميائية.
- تحليل البيانات الزمنية والصناعية.
- أنظمة التحكم الصناعية وSCADA.
- الإحصاء التطبيقي ونمذجة العمليات.

18 مهندس التعاون بين البشر والروبوتات في الصناعات الكيميائية
(Human-Robot Collaboration Chemical Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم بيئات عمل آمنة للتعاون بين الإنسان والروبوت.
- تطوير استراتيجيات تشغيل الروبوتات التعاونية في العمليات الكيميائية.
- دمج الحساسات الذكية وأنظمة الإدراك البيئي.
- تحسين كفاءة المناولة والتفتيش والصيانة المؤتمتة.
- تقييم مخاطر السلامة المرتبطة بالتشغيل المشترك.

المهارات المطلوبة:
- الروبوتات الصناعية والتعاونية (Cobots).
- أنظمة التحكم الذكية.
- ROS وبرمجة الروبوتات.
- دمج الحساسات والرؤية الحاسوبية.
- معايير السلامة الصناعية والوظيفية.
- C++ وPython.

19 مهندس جودة المنتجات الكيميائية بالذكاء الاصطناعي
(AI Chemical Product Quality Engineer)

المسؤوليات:
- تطوير نماذج ذكاء اصطناعي للتنبؤ بجودة المنتجات الكيميائية.
- مراقبة مؤشرات الجودة في الزمن الحقيقي.
- تحليل أسباب الانحرافات والعيوب الإنتاجية.
- تحسين العمليات التشغيلية لتحقيق استقرار الجودة.
- دعم برامج التحسين المستمر وضبط الجودة.

المهارات المطلوبة:
- مراقبة الجودة الكيميائية.
- تعلم الآلة والتحليلات التنبؤية.
- الإحصاء الصناعي وضودة الإحصائي (SPC).
- SQL وPython وأدوات تحليل البيانات.
- أنظمة وإتصالات الجودة الصناعية.
- هندسة العمليات الكيميائية وتحليل الأداء التشغيلي.

20 مهندس أنظمة الذكاء الاصطناعي للمنشآت الكيميائية
(AI Systems Engineer for Chemical Plants)

المسؤوليات:
- تصميم وبناء وتشغيل البنية التحتية للذكاء الاصطناعي داخل البيئات الصناعية.
- دمج البيانات التشغيلية من أنظمة المصنع المختلفة.
- نشر نماذج الذكاء الاصطناعي في بيئة الإنتاج بشكل موثوق وأمن.
- إدارة دورة حياة نماذج التعلم الآلي (MLOps).
- ضمان جودة البيانات، استقرار الأنظمة، وأمن البنية التحتية.
- دعم فرق التشغيل والهندسة عبر توفير تحليلات لحظية ونماذج تنبؤية تساعد في اتخاذ القرار.

المهارات المطلوبة:
- (Data Engineering)
- برمجة الأنظمة الصناعية
- الحوسبة (Cloud Computing)
- MLOps وأدوات التشغيل
- بناء وإدارة خطوط المعالجة (ETL / Data Pipelines)
- SCADA Systems
- DCS (Distributed Control Systems)
- ERP Systems
- LIMS
- Industrial Data Historian Systems مثل PI System

21 مهندس بيانات العمليات الكيميائية
(Chemical Process Data Engineer)

المسؤوليات:
- تصميم وبناء وإدارة البنية التحتية للبيانات داخل المنشآت الكيميائية والصناعية.
- جمع البيانات التشغيلية من أنظمة الإنتاج المختلفة، وتنظيمها، وتخزينها، وإتاحتها بشكل موثوق.
- دعم التحليلات المتقدمة والذكاء الاصطناعي.

المهارات المطلوبة:
- قواعد SQL (Relational & Time-Series Databases)
- Data Pipelines (ETL/ELT) والهندسة
- نظم لمعالجة البيانات وأتمتتها
- Cloud Data Platforms (AWS / Azure / GCP)
- Data Engineering Tools
- SCADA Systems
- DCS (Distributed Control Systems)
- LIMS (Laboratory Information Management Systems)
- ERP Systems
- Industrial Historian Systems مثل OSisoft PI System

لماذا هذه الوظائف مهمة؟

- وظائف مستقبلية ذات طلب عالمي
- تسريع الابتكار الكيميائي
- الاستدامة والاقتصاد الدائري
- تعزيز السلامة والأمن السيبراني
- اتخاذ القرار المعتمد على البيانات
- رفع كفاءة التشغيل والإنتاج
- التحول الرقمي للصناعات الكيميائية

9.6.1 مهارات المستقبل في الهندسة الكيميائية في عصر الذكاء الاصطناعي

1. المهارات التقنية المستقبلية

تتطلب الوظائف الناشئة في قطاع الهندسة الكيميائية امتلاك مجموعة متقدمة من المهارات الرقمية والتقنية، من أبرزها:

- البرمجة العلمية باستخدام Python وMATLAB
- تحليل البيانات الضخمة ومعالجة البيانات الصناعية.
- تعلم الآلة والتعلم العميق وتطوير النماذج التنبؤية.
- نمذجة ومحاكاة العمليات الكيميائية باستخدام Aspen Plus وHYSYS
- تطوير واستخدام التوائم الرقمية للعمليات الصناعية.
- تطبيقات إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT) .
- التحسين الرياضي والتحسين متعدد الأهداف.
- النمذجة الهجينة التي تجمع بين النماذج الفيزيائية والتعلم الآلي.
- استخدام أطر الذكاء الاصطناعي الحديثة مثل TensorFlow وPyTorch
- تطوير التطبيقات القائمة على النماذج اللغوية الكبيرة (LLMs).
- الشبكات العصبية الفيزيائية (Physics-Informed Neural Networks).
- التحليل المتقدم للسلاسل الزمنية وكشف الشذوذ.
- الأمن السيبراني الصناعي وحماية أنظمة التحكم والمراقبة الصناعية.
- الحوسبة العلمية عالية الأداء والحوسبة السحابية الصناعية.

2. المهارات التحليلية والمهنية

إلى جانب المهارات التقنية، تزداد أهمية مجموعة من المهارات المهنية والشخصية التي تمكّن المهندس الكيميائي من العمل بفاعلية في البيئات الصناعية الذكية، ومن أبرزها:

- التفكير التحليلي والمنهجي في حل المشكلات المعقدة.
- اتخاذ القرارات المبنية على البيانات والأدلة العلمية.
- القدرة على إدارة المشاريع التقنية والتحول الرقمي.
- العمل ضمن فرق متعددة التخصصات.
- مهارات التواصل الفعال وعرض النتائج الفنية.
- إدارة المخاطر الصناعية والسلامة التشغيلية.
- فهم مبادئ الاستدامة البيئية والاقتصاد الدائري.
- الابتكار وتطوير الحلول الهندسية الذكية.
- القدرة على التعلم المستمر ومواكبة التطورات التقنية المتسارعة.
- فهم أخلاقيات الذكاء الاصطناعي ومتطلبات الحوكمة الرقمية.
- إدارة التغيير المؤسسي المصاحب للتحول الرقمي.

9.7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

على الرغم من الفوائد الكبيرة للذكاء الاصطناعي، فإن تطبيقه يواجه مجموعة من التحديات التقنية والاقتصادية والتنظيمية التي قد تعيق التبني واسع النطاق لهذه التقنيات.

9.7.1 التحديات التقنية

- ضعف جودة البيانات الصناعية وعدم تكاملها .
- تعقيد العمليات الكيميائية متعددة المتغيرات .
- صعوبة تفسير نتائج نماذج التعلم العميق (Black Box Models).
- الحاجة إلى بيانات تشغيلية ضخمة ودقيقة لتدريب النماذج .
- تحديات دمج الذكاء الاصطناعي مع أنظمة التحكم الصناعية القديمة (Legacy Systems).
- محدودية الاعتمادية في بعض التطبيقات الحرجة المتعلقة بالسلامة .
- صعوبة تطوير نماذج قادرة على التكيف مع تغير خصائص المواد والعمليات .

وتُعد قابلية التفسير (Explainable AI – XAI) من أهم التحديات الحالية، خاصة في الصناعات الكيميائية الحساسة التي تتطلب قرارات تشغيلية دقيقة وقابلة للتدقيق (Zhang et al., 2025).

9.7.2 التحديات الاقتصادية والبشرية

- ارتفاع تكاليف البنية التحتية الرقمية وأجهزة الاستشعار .
- الحاجة إلى استثمارات كبيرة في الحوسبة الصناعية والتحول الرقمي .
- نقص الكفاءات البشرية القادرة على الدمج بين الهندسة الكيميائية وعلوم البيانات .
- مقاومة التغيير داخل المؤسسات الصناعية التقليدية .
- الحاجة إلى برامج تدريب وتأهيل مستمرة للمهندسين والفنيين .
- التحديات المتعلقة بإعادة هيكلة الوظائف التقليدية داخل المصانع الذكية .

كما تواجه بعض الشركات الصغيرة والمتوسطة صعوبة في تحمل تكاليف التحول نحو المصانع الكيميائية الذكية مقارنة بالشركات العالمية الكبرى (PwC, 2025).

9.7.3 التحديات الأمنية والتنظيمية

مع ازدياد الاعتماد على الأنظمة الذكية والاتصال الرقمي، ظهرت تحديات أمنية وتنظيمية متزايدة، تشمل:

- مخاطر الأمن السيبراني والهجمات على أنظمة التحكم الصناعية .
- احتمالية التلاعب بالبيانات الصناعية الحساسة .
- الحاجة إلى أطر تنظيمية وتشريعية واضحة لاستخدام الذكاء الاصطناعي الصناعي .

- قضايا المسؤولية القانونية عند حدوث أخطاء تشغيلية ناتجة عن الأنظمة الذكية .
- تحديات حماية الملكية الفكرية والبيانات الصناعية .
- ضرورة الامتثال لمعايير السلامة الصناعية والبيئية الدولية .

وتؤكد المؤسسات الصناعية العالمية أن نجاح تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية يتطلب تطوير أنظمة حوكمة رقمية قوية تضمن الأمان والشفافية والموثوقية (World Economic Forum, 2025).

9.8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين الكيميائيين

في ظل التحول المتسارع الذي يشهده قطاع الهندسة الكيميائية نتيجة التطور في تقنيات الذكاء الاصطناعي والتحول الرقمي، يُوصى المهندسون الكيميائيون والمؤسسات الصناعية بالتوجهات التالية:

1. تطوير المهارات الرقمية في مجالات علم البيانات، البرمجة (Python, R)، والتقنيات التحليلية الحديثة.
2. اكتساب مهارات في التعلم الآلي والتعلم العميق وتطبيقاتها في العمليات الكيميائية.
3. تعزيز القدرة على استخدام أدوات المحاكاة الهندسية وربطها بتقنيات الذكاء الاصطناعي.
4. دمج الذكاء الاصطناعي في تصميم وتشغيل العمليات الكيميائية لتحسين الكفاءة وتقليل الهدر.
5. تطبيق تقنيات تحسين التحكم بالعمليات لرفع استقرار الأنظمة التشغيلية.
6. استخدام أنظمة الصيانة التنبؤية للحد من الأعطال وتحسين موثوقية المعدات.
7. دعم التحول الرقمي في القطاع الكيميائي عبر تبني إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT).
8. إنشاء منصات بيانات مركزية لدمج وتحليل بيانات التشغيل والجودة وسلاسل الإمداد.
9. تطوير المصانع الذكية المعتمدة على التحليل اللحظي للبيانات.
10. توجيه البحث والتطوير نحو استخدام النمذجة والمحاكاة في تطوير المواد والعمليات.

9.9 الخاتمة

أصبح الذكاء الاصطناعي أحد المحركات الاستراتيجية الرئيسة لمستقبل الهندسة الكيميائية، حيث أسهم في إعادة تشكيل أساليب تصميم وتشغيل وإدارة العمليات الصناعية. وقد انعكس هذا التحول في تحسين الكفاءة التشغيلية، ورفع مستويات الاستدامة البيئية، وتعزيز معايير السلامة الصناعية داخل المنشآت الكيميائية.

كما أتاح الذكاء الاصطناعي إمكانات متقدمة في مجالات النمذجة الذكية للعمليات الكيميائية، والتحكم التنبؤي (Predictive Control)، والصيانة التنبؤية (Predictive Maintenance) ، بالإضافة إلى تسريع عمليات اكتشاف وتطوير المواد الجديدة عبر تقنيات التعلم الآلي والتحليل الحسابي المتقدم. ويعزز ذلك قدرة القطاع الكيميائي على التعامل مع التعقيد المتزايد في العمليات الصناعية وتحسين استجابته للمتغيرات التشغيلية.

وفي ضوء ذلك، يتضح أن الذكاء الاصطناعي يشكل ركيزة أساسية في تمكين الصناعة الكيميائية من مواكبة متطلبات الثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0)، والانتقال نحو نموذج المصانع الذكية المستدامة القادرة على تحقيق التوازن بين الكفاءة الاقتصادية والأداء البيئي والسلامة التشغيلية.

الفصل العاشر

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاعات الهندسية الأردنية

10.1 السياق الوطني والرؤية الاستراتيجية

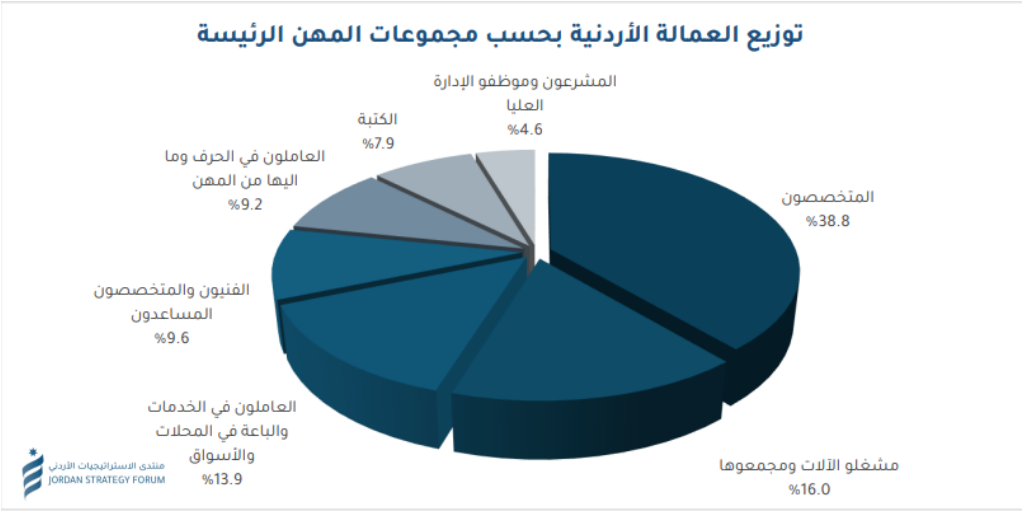
تشهد المملكة الأردنية الهاشمية تحولًا تدريجيًا نحو دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في قطاعاتها الهندسية، مستندةً إلى محركات استراتيجية واضحة أبرزها:

- رؤية التحديث الاقتصادي 2033: تضع الرقمنة والابتكار التقني في صميم أهداف التنمية الاقتصادية الوطنية.
- الاستراتيجية الوطنية للذكاء الاصطناعي (2023-2027): تهدف إلى تعزيز القدرات التقنية الوطنية وتطوير بنية تحتية معرفية متقدمة في قطاعات الطاقة والمياه والزراعة والنقل.
- مشاريع البنية التحتية الكبرى: تشمل التوسع في الطاقة المتجددة والنقل الذكي والمدن الذكية لتعزيز كفاءة القطاع الهندسي.

10.2 تأثيرات الذكاء الاصطناعي على سوق العمل الأردني

ولدراسة مدى تأثير الذكاء الاصطناعي وأدواته على سوق العمل في الأردن، قام **منتدى الاستراتيجيات الأردني** بتحليل المهام المكونة للمهن المختلفة، والتي بلغ عددها نحو **30 ألف مهمة وظيفية** موزعة على المجموعات المهنية الرئيسية السبع. واستند التحليل إلى نتائج تقرير **منظمة العمل الدولية** بعنوان *"الذكاء الاصطناعي التوليدي والوظائف 2025"*، حيث جرى مواءمة نتائج التقرير مع بيانات **دائرة الإحصاءات العامة الأردنية** الصادرة عن **مسح الاستخدام لعام 2023** وفق تصنيف المهن الرئيسة (Digit-2 ISCO Classification).

وأظهرت بيانات مسح الاستخدام لعام 2023 أن النسبة الأكبر من العمالة الأردنية تتركز ضمن فئة **المتخصصين (Professionals)**، حيث بلغت نسبتهم **38.8%** من إجمالي العاملين. وتلتها فئة **مشغلي الآلات والمعدات ومجمعيها** بنسبة **16%**، ثم فئة **الفنيين والمتخصصين المساعدين**، إلى جانب فئات مهنية أخرى تتفاوت في حجم العمالة ومستوى تعرضها لتأثيرات تقنيات الذكاء الاصطناعي.



المصدر: منتدى الاستراتيجيات الأردني بالاستناد إلى بيانات دائرة الإحصاءات العامة الأردنية 2025.

الشكل 10.1. يوضح توزيع العمالة الأردنية بحسب مجموعات المهن الرئيسية

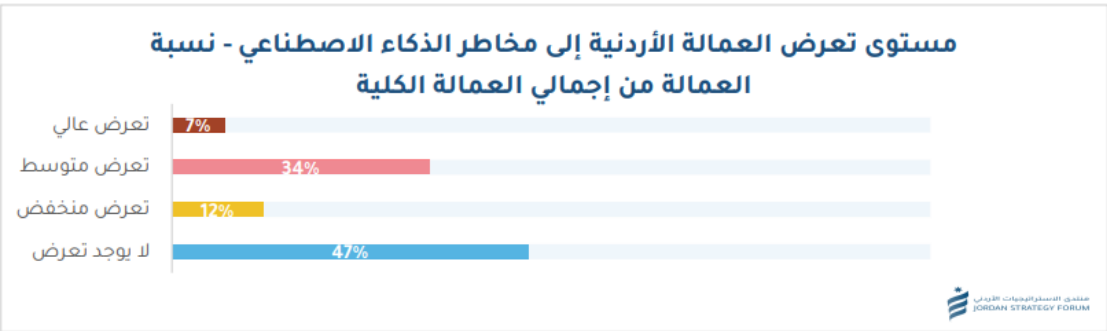
تشير نتائج التحليل المستندة إلى مواءمة بيانات تقرير منظمة العمل الدولية بشأن الذكاء الاصطناعي التوليدي والوظائف مع بيانات مسح الاستخدام الصادر عن دائرة الإحصاءات العامة الأردنية إلى أن نحو 41 % من إجمالي القوى العاملة في الأردن تقع ضمن دائرة التأثر المباشر بتطبيقات الذكاء الاصطناعي وتطوراته المتسارعة. وتختلف مستويات هذا التأثر تبعًا لطبيعة المهن والمهام الوظيفية، الأمر الذي يعكس التفاوت في قابلية الوظائف للأتمتة أو لإعادة تشكيل أنماط العمل المرتبطة بها.

وتُظهر النتائج أن ما يقارب 7% من العاملين يشغلون وظائف ذات مستوى مرتفع من التعرض لتأثيرات الذكاء الاصطناعي، في حين تقع نسبة تقدر بنحو 34% ضمن فئة التعرض المتوسط. ويعني ذلك أن ما يزيد على ثلث القوى العاملة الأردنية قد تواجه تحولات جوهرية في طبيعة المهام والمسؤوليات الوظيفية خلال السنوات المقبلة، نتيجة التوسع في استخدام الأنظمة الذكية والتطبيقات الرقمية المتقدمة. ومن المتوقع أن ينعكس هذا التحول على متطلبات سوق العمل من خلال زيادة الطلب على المهارات الرقمية والتحليلية والتقنية، إلى جانب تنامي الحاجة إلى برامج إعادة التأهيل والتدريب المستمر لضمان قدرة العاملين على التكيف مع البيئة المهنية الجديدة. كما قد تتعرض بعض الوظائف إلى درجات متفاوتة من الإحلال أو إعادة الهيكلة الوظيفية في حال عدم مواكبة العاملين للمهارات والكفايات المستقبلية المطلوبة، **كما هو موضح في الشكل 10.2.**

وفي المقابل، تبين النتائج أن نحو 12% من العاملين يندرجون ضمن فئة التعرض المنخفض لتأثيرات الذكاء الاصطناعي، وهي فئة تضم مهنًا تتطلب مستويات أعلى من التفاعل الإنساني أو الخبرة المتخصصة أو الحكم المهني، بما يمنحها قدرة أكبر على التكيف مع التطورات التقنية ويحد من احتمالية أتمتتها بشكل كامل على المدى القريب.

أما الفئة الأكبر من القوى العاملة الأردنية، والتي تمثل ما يقارب 47% من إجمالي العاملين، فتقع ضمن المهن غير المعرضة حاليًا لمخاطر الذكاء الاصطناعي بصورة مباشرة. ويُعزى ذلك إلى الطبيعة التشغيلية لهذه المهن التي تعتمد بدرجة كبيرة على الجهد البدني والعمل الميداني والمهارات الحركية، وهي خصائص لا تزال تشكل تحديًا أمام تقنيات الأتمتة والذكاء الاصطناعي من الناحية التقنية والاقتصادية. وتشمل هذه الفئة العديد من المهن المرتبطة بقطاعات البناء والتشييد، والأعمال الإنشائية، والخدمات الميدانية، وأعمال التحميل والتفريغ والتغليف، وغيرها من الأنشطة التي تتطلب حضورًا بشريًا مباشرًا في بيئة العمل. كما أن جزءًا مهمًا من هذه الوظائف يشغله عمال وافدون أو عمالة غير أردني، **كما هو موضح في الشكل 10.2.**

وتؤكد هذه المؤشرات أن التأثير المتوقع للذكاء الاصطناعي على سوق العمل الأردني يتجاوز مفهوم الاستبدال المباشر للوظائف ليشمل إعادة تشكيل هيكل المهن ومتطلبات الكفاءات والمهارات المستقبلية. ومن ثم، فإن تعزيز جاهزية القوى العاملة الوطنية يتطلب تبني سياسات استباقية ترتكز على تطوير منظومة التعليم والتدريب المهني والتقني، وتوسيع برامج إعادة التأهيل ورفع المهارات، بما يسهم في تعظيم الاستفادة من الفرص الاقتصادية والإنتاجية التي تتيحها تطبيقات الذكاء الاصطناعي، وفي الوقت ذاته الحد من المخاطر المحتملة المرتبطة بالتحولات المتسارعة في سوق العمل.



المصدر: *منتدى الاستراتيجيات الأردني، استنادًا إلى بيانات دائرة الإحصاءات العامة الأردنية ونتائج تقرير منظمة العمل الدولية الذكاء الاصطناعي التوليدي والوظائف 2025.*

الشكل 10.2. مستوى تعرض العمالة الأردنية الى مخاطر الذكاء الاصطناعي-نسبة العمالة من اجمالي العمالة الكلية

جدول10.1. توزيع الوظائف حسب درجة التعرض لمخاطر الذكاء الاصطناعي في الأردن

خطر التعرض العالي	خطر التعرض المتوسط	خطر التعرض المنخفض	لا يوجد خطر من التعرض
المحللون الماليون	مديرو خدمات الأعمال والإدارة	مديرو الفنادق	الصيادون
مطورو المواقع الإلكترونية	مديرو الخدمات المالية والتأمينية	مختصو أساليب التعليم	البناؤون بالطوب والعمال المرتبطون بهم
مسؤولو الائتمان والقروض	مديرو تكنولوجيا المعلومات	الفيزيائيون وعلماء الفلك	عمال هياكل البناء
تجار ووسطاء الأوراق المالية	مديرو تجارة التجزئة والجملة	المختصون النفسيون	عمال تنظيف المباني
كتبة المحاسبة والدفاتر	مديرو المبيعات والتسويق	فنيو المعارض والمتاحف	عمال الإنشاءات
عمال الدعم الكتابي	المذيعون في الإذاعة والتلفزيون	الفنيون المساعدون في المجال القانوني	عمال الهندسة المدنية
مدخلو البيانات	أمناء المحفوظات وأمناء المتاحف	فنيو علوم الحياة	عمال المزارع النباتية
موظفو المكاتب العامة	علماء الأحياء والنبات والحيوان	مساعدو الأطباء	عمال الغابات
مسؤولو الرواتب وشؤون الموظفين	رسامو الخرائط والمساحون	المصورون	جامعو النفايات
موظفو الإحصاء والمالية والتأمين	اختصاصيو قواعد البيانات والشبكات	كتبة الأرشفة والنسخ	جامعو المياه
الطابعون ومعالجو النصوص	مهندسو الإلكترونيات	أمناء الصناديق وبائعو التذاكر وما شابههم	معدّو المعادن الإنشائية وركّابها
مندوبو مبيعات مراكز الاتصال	مصممو الجرافيك	مساعدو المبيعات	عمال المناجم والمحاجر

المصدر: تحليلات منتدى الاستراتيجيات الأردني بالاستناد إلى تقرير منظمة العمل الدولية وبيانات دائرة الإحصاءات العامة الأردنية، 2025.

ملاحظات تحليلية

- تتركز الوظائف ذات **التعرض العالي** في الأعمال المكتبية والإدارية والمالية التي تعتمد على معالجة البيانات والمعلومات الرقمية .
- تشمل الوظائف ذات **التعرض المتوسط** المناصب الإدارية والتقنية والإبداعية التي يمكن للذكاء الاصطناعي دعمها دون استبدالها بالكامل .
- تضم الوظائف ذات **التعرض المنخفض** المهن التي تتطلب خبرة تخصصية أو تفاعلاً بشرياً مباشراً أو حكماً مهنياً يصعب أتمتته .
- تتركز الوظائف **غير المعرضة نسبياً** في المهن اليدوية والميدانية التي تعتمد على الجهد البدني والعمل في البيئات الواقعية.

10.3 التطبيقات الحالية عبر القطاعات الهندسية

أولاً: الهندسة الكهربائية والطاقة

تشير بعض المبادرات الوطنية والتجارب التطبيقية إلى لتطبيق نظام ذكاء اصطناعي في التخطيط والتشغيل للأحمال الكهربائية، بهدف تحسين جدولة الأحمال ودعم استقرار الشبكة وترشيد استهلاك الطاقة. وتُدار مزرعة طاقة الرياح في الطفيلة بأنظمة تنبؤية

لضمان الكفاءة القصوى، كما تُوظَّف تقنيات الذكاء الاصطناعي في تخطيط الألواح الشمسية وإدارة الشبكة الوطنية لتقليل الفاقد الكهربائي.

ثانياً: الهندسة المدنية والبنية التحتية

تُوظَّف تقنيات الاستشعار عن بعد والرادار الأرضي (InSAR) لمراقبة الجسور والطرق وتحليل الهبوطات والتشققات. وتُستخدم كاميرات مدعومة بالذكاء الاصطناعي في العاصمة عمان لتحليل حركة المرور ضمن أنظمة النقل الذكي (ITS)، فضلًا عن تبني نماذج تنبؤية لتحليل مخاطر الفيضانات والانهيارات، وتوظيف الذكاء الاصطناعي في تحليل الأنماط الزلزالية لصدع البحر الميت.

ثالثاً: الهندسة الكيميائية والصناعة

تشمل التطبيقات تحسين استهلاك الطاقة في محطات تحلية المياه وتقنيات تنقيتها، وتطبيق نماذج تنبؤية في القطاع الدوائي لضمان جودة المنتجات، وتحسين عمليات الاستخلاص والإنتاج في قطاع الأسمدة والبوتاس.

رابعاً: هندسة التعدين والمناجم

تدمج شركة الفوسفات الأردنية والبوتاس أنظمة ذكاء اصطناعي لتحليل جودة الخام وتحسين الإنتاجية. وتُستخدم طائرات مسيّرة مزوّدة بتقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل طبقات الأرض واستكشاف الموارد المعدنية، إلى جانب أنظمة رصد المخاطر الجيولوجية في المقالع والمحاجر.

رابعاً: الزراعة الذكية

طوّرت هيئة وادي الأردن منظومة زراعة ذكية تحسب حاجة المحاصيل من المياه وتُراقب معدلات التبخر وتختار أنسب المحاصيل للظروف المناخية السائدة، مما يُعزز الأمن الغذائي والمائي في ظل شُح الموارد الطبيعية.

10.4 ملخص المشاريع التطبيقية الرائدة في الأردن

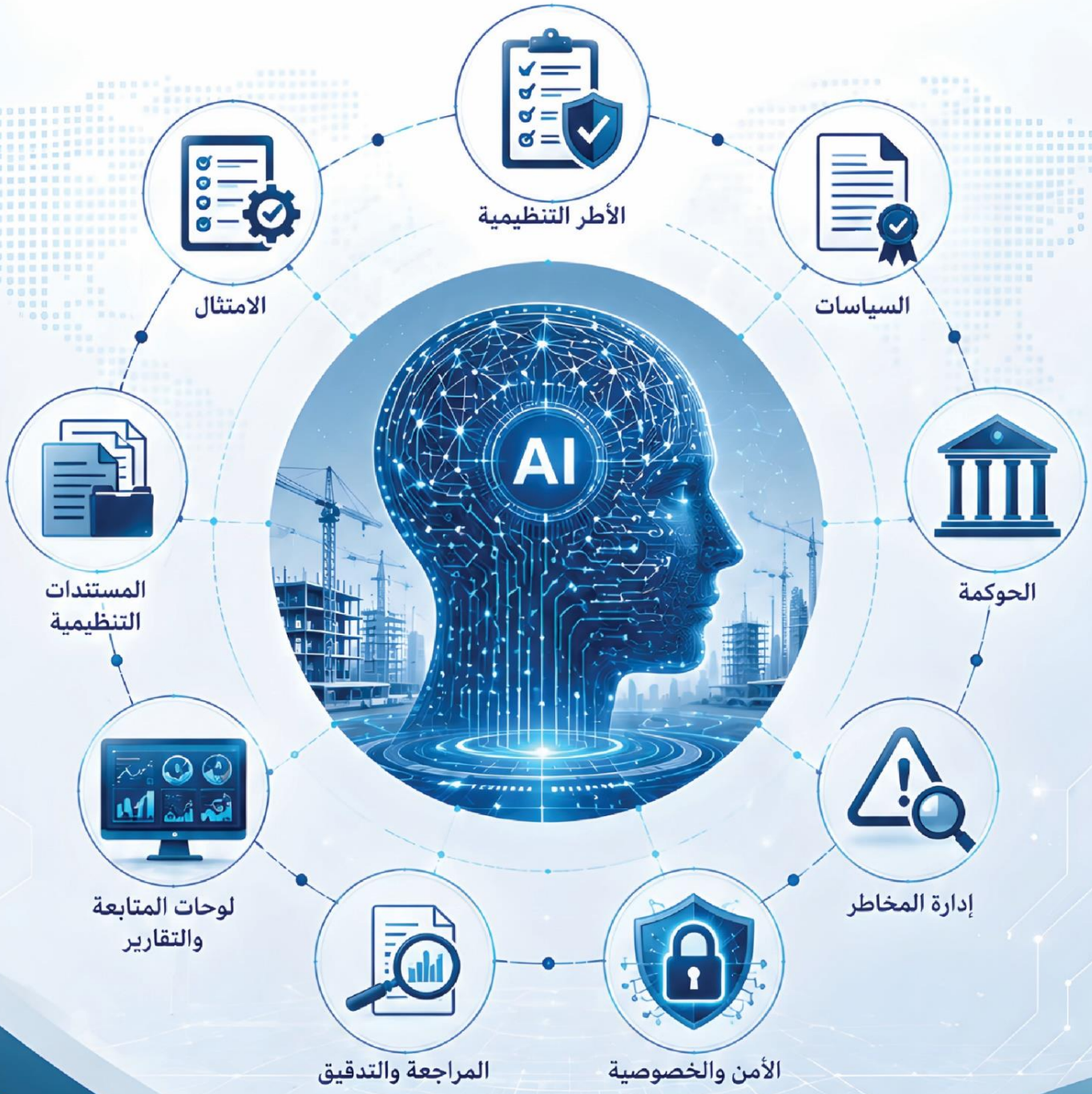
جدول 10.2. المشاريع التطبيقية الرائدة للذكاء الاصطناعي في الأردن

المشروع	الشركاء المنفذون	الأهداف	الفوائد المتوقعة
نظام تخطيط وتشغيل الأحمال الكهربائية	وزارة الطاقة والثروة المعدنية + Algebra Intelligence + Japan International Cooperation Agency (JICA)	تحليل وجدولة الأحمال الكهربائية باستخدام نماذج تحليل متقدمة	تقليل الفاقد ورفع كفاءة الشبكة الكهربائية
إدارة الطاقة والمياه باستخدام الأنظمة الرقمية والتحليلات الذكية	ABB + German Agency International for + Cooperation (GIZ) سلطة المياه الأردنية	مراقبة وتحليل بيانات محطات الضخ والمعالجة باستخدام أنظمة رقمية وتحليل بيانات	خفض الاستهلاك وتعزيز الاستدامة المائية والطاقة
إدارة أصول الطرق باستخدام الأنظمة الرقمية وتحليل البيانات	جهات حكومية وطنية	استخدام أنظمة رقمية وتحليلات بيانات لرصد وإدارة البنية التحتية للطرق	تحسين الصيانة وخفض التكاليف التشغيلية
الزراعة الذكية وتحليل البيانات الزراعية في وادي الأردن	هيئة وادي الأردن	استخدام تحليل البيانات وصور الأقمار الصناعية لدعم اتخاذ القرار الزراعي	تحسين إدارة المياه ورفع كفاءة الإنتاج الزراعي
أنظمة HVAC الذكية في القطاع الصناعي	+ Schneider Electric Petra Engineering Industries	تحسين كفاءة أنظمة التدفئة والتهوية والتكييف باستخدام أنظمة تحكم ذكية	خفض استهلاك الطاقة وتقليل الانبعاثات

المصدر: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ) (2024) *ENERGY EFFICIENCY IN WATER SECTOR JORDAN.*

الفصل الحادي عشر

الحوكمة والأطر التنظيمية للذكاء الاصطناعي في الهندسة



11.1 المقدمة

أصبح الذكاء الاصطناعي أحد الركائز الأساسية للتحول الرقمي في مختلف التخصصات الهندسية، بعد أن انتقل من كونه أداة تحليلية مساعدة إلى عنصر محوري يؤثر في مراحل التصميم، والمحاكاة، والتنبؤ، واتخاذ القرار، وإدارة الأصول، والتشغيل، والتحكم الذكي. وقد أدى هذا التحول إلى إعادة تشكيل الممارسات الهندسية التقليدية، وإلى ظهور حاجة ملحة لبناء أطر تنظيمية وحوكمية تضمن الاستخدام الآمن والموثوق والمسؤول لهذه التقنيات، خصوصاً في البيئات التي ترتبط فيها القرارات الهندسية بسلامة الإنسان، واستمرارية البنية التحتية، وحماية الموارد، وتحقيق الكفاءة التشغيلية.

وفي البيئات الهندسية عالية الحساسية، لا يرتبط نجاح تطبيق الذكاء الاصطناعي بقدرات النماذج الحسابية أو دقة الخوارزميات فقط، بل يعتمد بصورة متزايدة على وجود منظومة حوكمة متكاملة تشمل إدارة المخاطر، ووضوح المسؤوليات، وجودة البيانات، والامتثال للمعايير المهنية والتنظيمية، وآليات المراجعة والتدقيق، وضمان الشفافية وقابلية التتبع. فالنظام الذكي الذي يعمل بكفاءة في المختبر أو في بيئة تجريبية قد يفشل في التطبيق العملي إذا لم يكن محكوماً بإطار مؤسسي واضح يحدد من يطوره، ومن يراجعه، ومن يعتمد نتائجه، وكيف يتم تحديثه ومراقبته عند التشغيل.

ويقصد بحوكمة الذكاء الاصطناعي في الهندسة منظومة السياسات والإجراءات والمعايير والهياكل المؤسسية التي تنظم دورة حياة الأنظمة الذكية، بدءاً من تحديد الحاجة إليها، مروراً بتطويرها واختبارها ونشرها، وانتهاءً بمراقبتها وتقييمها وتحسينها المستمر، بما يضمن توافقها مع المتطلبات التشغيلية والقانونية والأخلاقية. كما تشمل الحوكمة تحديد الأدوار والمسؤوليات، ووضع ضوابط استخدام البيانات، وتقييم الأثر، وإدارة المخاطر، والتأكد من أن الأنظمة الذكية تعمل ضمن حدود واضحة لا تتجاوزها دون رقابة بشرية مناسبة.

وتزداد أهمية هذا الموضوع مع توسع استخدام الذكاء الاصطناعي في قطاعات مثل الهندسة المدنية، والميكانيكية، والكهربائية، والكيميائية، والمعمارية، والتعدين، والطاقة، والنقل، حيث أصبحت الأنظمة الذكية تُستخدم في التنبؤ بالأعطال، وتحسين الأداء، وتقليل التكاليف، ورفع السلامة، ودعم الاستدامة. ومن هنا فإن الحوكمة لم تعد خياراً تنظيمياً ثانوياً، بل أصبحت شرطاً أساسياً لضمان أن يكون الذكاء الاصطناعي أداة للتطوير لا مصدراً للمخاطر أو الغموض المؤسسي.

11.2 أهداف حوكمة الذكاء الاصطناعي في الهندسة

تهدف الحوكمة الهندسية إلى تحقيق مجموعة من الأهداف الاستراتيجية التي تتجاوز مجرد تنظيم الاستخدام التقني، لتشمل بناء الثقة، وتعزيز السلامة، وضمان الاستدامة، وتحقيق التوازن بين الابتكار والمسؤولية. ويمكن تلخيص هذه الأهداف في النقاط الآتية:

- ضمان سلامة وموثوقية الأنظمة الهندسية الذكية، من خلال التأكد من أن مخرجاتها قابلة للاعتماد في البيئات الحرجة، وأنها لا تؤدي إلى قرارات غير آمنة أو غير دقيقة.
- تنظيم استخدام البيانات وإدارة المخاطر، عبر وضع سياسات واضحة لجمع البيانات وتخزينها ومعالجتها ومشاركتها، وتحديد المخاطر المرتبطة بالتحيز أو الفقد أو سوء الاستخدام.
- دعم الامتثال التنظيمي والتشريعي، بحيث تعمل الأنظمة الذكية ضمن حدود القوانين المحلية والدولية والمعايير المهنية المعتمدة في كل قطاع هندسي.

- تعزيز قابلية التتبع والمراجعة، من خلال توثيق مصادر البيانات، وخطوات التطوير، ونتائج الاختبار، وقرارات التشغيل، بما يسمح بفهم كيفية الوصول إلى المخرجات ومراجعتها عند الحاجة.
- حماية الملكية الفكرية والأصول الرقمية، سواء كانت نماذج تعلم آلي، أو قواعد بيانات، أو خوارزميات مملوكة، أو تصاميم هندسية رقمية، أو توائم رقمية مرتبطة بالبنية التحتية.
- رفع الثقة المؤسسية والمجتمعية، إذ إن وجود حوكمة واضحة يزيد من قبول المستخدمين والجهات التنظيمية والمستفيدين النهائيين للأنظمة الذكية.
- دعم الابتكار المسؤول والاستدامة، بحيث لا يكون التطوير التقني منفصلاً عن الاعتبارات البيئية والاجتماعية والاقتصادية، بل موجهاً نحو حلول طويلة الأمد وأكثر كفاءة.

وتتفرع عن هذه الأهداف أهداف تشغيلية أكثر تفصيلاً، مثل تقليل الأخطاء البشرية، وتحسين سرعة الاستجابة، وتوحيد إجراءات الاعتماد، وتسهيل التكامل بين الفرق متعددة التخصصات، وتوفير بيئة تسمح بتجريب التقنيات الجديدة دون الإخلال بمتطلبات السلامة أو الجودة.

11.3 الأطر التنظيمية والمعايير الدولية

تشكل المعايير الدولية المرجعية الأساسية لحوكمة تطبيقات الذكاء الاصطناعي في البيئات الهندسية، لأنها توفر لغة مشتركة بين المؤسسات والجهات التنظيمية والمطورين والمستخدمين. وتساعد هذه المعايير على تحويل المبادئ العامة مثل السلامة والشفافية والمساءلة إلى متطلبات عملية قابلة للتنفيذ والقياس والمراجعة.

11.3.1 معيار ISO/IEC 42001: 2023

يمثل معيار ISO/IEC 42001:2023 أول معيار عالمي متخصص في أنظمة إدارة الذكاء الاصطناعي (AI Management System – AIMS)، ويعد خطوة محورية نحو بناء إطار مؤسسي منظم لإدارة وتطبيق أنظمة الذكاء الاصطناعي داخل المؤسسات. ويكمن تميّزه الأساسي في أنه **ليس معياراً تقنياً يحدد خوارزميات أو نماذج الذكاء الاصطناعي، بل معيار لنظام إدارة (Management System Standard)** يركز على الحوكمة، والعمليات التنظيمية، وآليات التحكم المؤسسي.

ويقدم هذا المعيار إطاراً متكاملاً يشمل:

- **إدارة المخاطر :**تحديد وتحليل المخاطر المرتبطة بأنظمة الذكاء الاصطناعي مثل التحيز، الانحراف في الأداء، ضعف القابلية للتفسير، والمخاطر التشغيلية الناتجة عن الأتمتة .
- **الحوكمة المؤسسية :**تحديد السياسات، الأدوار، المسؤوليات، وآليات الإشراف الداخلي على تطوير وتشغيل الأنظمة الذكية .
- **إدارة دورة حياة الأنظمة الذكية :**تغطي جميع المراحل من التطوير، الاختبار، النشر، التشغيل، المراقبة، التحديث، وحتى الإيقاف عند الحاجة .

- **التحسين المستمر :**اعتبار أنظمة الذكاء الاصطناعي أنظمة ديناميكية قابلة للتطور المستمر وفق البيانات الجديدة والظروف التشغيلية المتغيرة .
- **التوثيق والتدقيق :**ضمان وجود سجل منهجي يوضح بيانات التدريب، منهجيات التطوير، اختبارات التحقق، وحدود الاستخدام .

وتبرز أهمية هذا المعيار بشكل خاص في المؤسسات الهندسية الكبرى والبنى التحتية الحرجة، حيث يسهم في توحيد الممارسات التنظيمية، وتقليل التباين بين الفرق، وتعزيز قابلية التدقيق والمراجعة من قبل الجهات الرقابية أو الشركاء أو العملاء.

11.3.2 التكامل مع المعايير الهندسية القطاعية

لا يمكن النظر إلى حوكمة الذكاء الاصطناعي بمعزل عن المعايير الهندسية القطاعية، لأن كل تخصص هندسي يمتلك متطلبات خاصة تتعلق بالسلامة والجودة والاعتمادية والاستدامة. ومن ثم فإن نجاح الحوكمة يعتمد على التكامل بين معيار إدارة الذكاء الاصطناعي والمعايير الفنية المعمول بها في كل قطاع.

الهندسة المدنية والمعمارية: ISO 19650

يركز هذا المعيار على إدارة المعلومات في بيئة البناء، وخاصة في نمذجة معلومات البناء(BIM) ، وهو مهم لضمان تنظيم البيانات الهندسية وتبادلها بين الأطراف المختلفة بطريقة دقيقة وآمنة.

الهندسة الميكانيكية: ISO 9001 – ISO 55000 – IEC 61508

يسهم ISO 9001 في ضبط الجودة، بينما يدعم ISO 55000 إدارة الأصول، ويعالج IEC 61508 السلامة الوظيفية للأنظمة الكهربائية والإلكترونية القابلة للبرمجة، وهو أمر بالغ الأهمية عند دمج الذكاء الاصطناعي في أنظمة التحكم والصيانة التنبؤية.

الهندسة الكهربائية: IEC 61850 – IEEE 1547 – ISO 50001

تدعم هذه المعايير التشغيل البيني في أنظمة الطاقة، وربط مصادر الطاقة الموزعة بالشبكة، وتحسين كفاءة الطاقة، وهي مجالات تتزايد فيها تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالأحمال وإدارة الشبكات الذكية.

الهندسة الكيميائية: IEC 61511 – REACH – OSHA PSM

تتعلق هذه المعايير بالسلامة في الأنظمة الصناعية والعمليات الكيميائية، وإدارة المواد الخطرة، والوقاية من الحوادث الصناعية، وهي بيئات تتطلب رقابة صارمة على أي نظام ذكي يتخذ قرارات تشغيلية أو تنبؤية.

هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول: ISO 45001 – ISO 17757

يركز ISO 17757 على الأنظمة الذاتية وشبه الذاتية في التعدين، بينما يعالج ISO 45001 إدارة الصحة والسلامة المهنية، وهو أمر أساسي في بيئات التعدين التي تتسم بارتفاع المخاطر التشغيلية.

الحوكمة العامة: ISO 31000 – NIST AI RMF

يوفر ISO 31000 إطاراً عاماً لإدارة المخاطر، بينما يقدم NIST AI RMF نموذجاً عملياً لإدارة مخاطر الذكاء الاصطناعي، بما يشمل الحوكمة والقياس والإدارة والتقييم.

ويهدف هذا التكامل إلى ضمان توافق القرارات الذكية مع متطلبات السلامة والجودة والاستدامة، وعدم السماح للنظام الذكي بأن يعمل وفق منطق تقني منفصل عن الواقع الهندسي أو التنظيمي الذي يطبق فيه.

11.4 حوكمة البيانات والمعلومات الهندسية

تُعد البيانات مورداً استراتيجياً في الأنظمة الذكية، لأنها تمثل المادة الخام التي تُبنى عليها النماذج التحليلية والتنبؤية. وإذا كانت الخوارزمية هي "العقل" الذي يعالج المعلومات، فإن البيانات هي "المدخل" الذي يحدد جودة هذا العقل وفاعليته. لذلك فإن حوكمة البيانات تمثل أحد أهم أركان حوكمة الذكاء الاصطناعي في الهندسة.

وتقوم الحوكمة هنا على مجموعة من المبادئ والإجراءات، من أهمها:

- سياسات جمع البيانات، بحيث يتم تحديد مصادر البيانات المسموح بها، وآليات الحصول عليها، وشروط استخدامها، ومدى قانونية جمعها.
- إدارة جودة البيانات، من خلال التحقق من الدقة، والاكتمال، والاتساق، والحداثة، والملاءمة للغرض المطلوب.
- توثيق المصادر، لضمان معرفة أصل البيانات وكيفية إنتاجها أو قياسها أو نقلها، وهو أمر مهم جداً عند مراجعة النتائج أو تتبع الأخطاء.
- التحكم في الوصول والمشاركة، بحيث لا تتاح البيانات الحساسة إلا للأشخاص أو الأنظمة المخولة بذلك، مع وجود سجلات واضحة لعمليات الدخول والتعديل والنقل.
- إدارة دورة حياة البيانات، بدءاً من الإنشاء أو الجمع، مروراً بالتخزين والمعالجة والتحليل، وانتهاءً بالأرشفة أو الإتلاف الآمن.

وتشمل البيئات الهندسية الحديثة مصادر متعددة للبيانات، مثل:

- BIM – GIS – Digital Twins – IIoT قواعد البيانات الصناعية – أنظمة الاستشعار.

ويعني ذلك أن البيانات لم تعد تأتي من مصدر واحد أو من نوع واحد، بل أصبحت تتدفق من منصات تصميم، وأجهزة استشعار، وشبكات تشغيل، وأنظمة مراقبة، وتوائم رقمية، ما يزيد من أهمية التكامل بين هذه المصادر وتوحيد معاييرها.

كما برزت أدوات داعمة تشمل:

- Metadata Management
- Common Data Environment (CDE)
- Knowledge Graphs

وتساعد هذه الأدوات على تنظيم البيانات الوصفية، وتوفير بيئة مشتركة لتبادل المعلومات بين الفرق، وبناء علاقات دلالية بين العناصر الهندسية المختلفة، مما يسهل على الأنظمة الذكية فهم السياق وليس فقط معالجة الأرقام الخام. كما أن وجود حوكمة قوية للبيانات يحد من أخطاء النماذج، ويقلل من التحيز، ويعزز قابلية التفسير، ويرفع جودة القرارات الهندسية.

11.5 إدارة دورة حياة أنظمة الذكاء الاصطناعي

تتعامل المؤسسات الحديثة مع النماذج الذكية بوصفها أصولاً مؤسسية تخضع لدورة حياة واضحة، وليست مجرد أدوات تُستخدم ثم تُترك دون متابعة. فالنظام الذكي يتغير أداؤه مع تغير البيانات والبيئة التشغيلية، وقد يصبح أقل دقة أو أقل ملاءمة إذا لم تتم مراقبته وتحديثه بانتظام.

وتشمل دورة الحياة المراحل الآتية:

1. **التخطيط وتحديد المتطلبات:** في هذه المرحلة يتم تحديد المشكلة الهندسية المراد حلها، والأهداف المتوقعة من النظام الذكي، وحدود الاستخدام، ومؤشرات الأداء، والمخاطر المحتملة، والموارد المطلوبة.
2. **إعداد البيانات والتطوير:** تتضمن هذه المرحلة جمع البيانات وتنظيفها وتصنيفها وتهيئتها، ثم اختيار النموذج المناسب وتدريبه وضبطه وفقاً لطبيعة المهمة الهندسية.
3. **الاختبار والتحقق:** يتم هنا تقييم أداء النموذج باستخدام بيانات مستقلة أو سيناريوهات تشغيلية متنوعة، مع التحقق من الدقة، والاستقرار، والموثوقية، وقابلية التفسير، والقدرة على العمل في الظروف غير المثالية.
4. **التشغيل والمراقبة:** بعد النشر، يجب مراقبة أداء النظام بشكل مستمر، ورصد الانحرافات، والتأكد من أن النتائج لا تتدهور مع الزمن أو مع تغير البيئة التشغيلية.
5. **المراجعة والتحديث المستمر:** تشمل هذه المرحلة إعادة تدريب النموذج أو تعديله أو استبداله عند الحاجة، إضافة إلى مراجعة السياسات والإجراءات المرتبطة به لضمان استمرار ملاءمته.

وتتطلب إدارة دورة الحياة وجود آليات واضحة لتحديد متى يُسمح للنظام بالعمل بشكل مستقل، ومتى يجب أن يخضع لمراجعة بشرية، ومتى ينبغي إيقافه مؤقتاً أو نهائياً إذا ظهرت مؤشرات على ضعف الأداء أو ارتفاع المخاطر. كما أن التوثيق في كل مرحلة يعد عنصراً أساسياً، لأنه يتيح تتبع القرارات وفهم أسبابها وتقييمها لاحقاً.

11.6 الحوكمة المؤسسية والامتثال

يتطلب التطبيق المؤسسي للذكاء الاصطناعي إنشاء هيكل تنظيمي واضح يضمن توزيع المسؤوليات، ويمنع التداخل بين الأدوار، ويحد من الاستخدام غير المنضبط أو غير الموثق للأنظمة الذكية. ولا تقتصر الحوكمة المؤسسية على وجود سياسات مكتوبة، بل تمتد لتشمل منظومة تشغيلية وإدارية قادرة على تنفيذ هذه السياسات ومراقبة الالتزام بها بشكل مستمر.

ويتضمن هذا الهيكل عادةً:

- **مجلس حوكمة الذكاء الاصطناعي :**الجهة العليا المسؤولة عن اعتماد السياسات العامة، وتحديد الأولويات الاستراتيجية، ومراجعة حالات الاستخدام عالية المخاطر .
- **لجان إدارة المخاطر :**مسؤولة عن تقييم المخاطر التقنية والتشغيلية والقانونية والأخلاقية المرتبطة بتطبيقات الذكاء الاصطناعي .
- **فرق التدقيق والمراجعة :**تتولى التحقق من امتثال الأنظمة والإجراءات للمعايير والسياسات المعتمدة، وضمان الشفافية التشغيلية .
- **وحدات الامتثال والتنظيم :**تتابع الالتزام باللوائح والمعايير الدولية والمتطلبات الداخلية والخارجية ذات الصلة .

وتشمل أدوات الامتثال الأساسية:

- AI Impact Assessment
- Risk Assessment

- Internal Audit
- Documentation Systems

حيث يُستخدم **AI Impact Assessment** لتقييم التأثيرات المحتملة لأنظمة الذكاء الاصطناعي على السلامة، الخصوصية، العدالة، وسير العمليات المؤسسية. بينما يركز **Risk Assessment** على تحديد المخاطر وترتيبها حسب الأولوية ووضع خطط التخفيف المناسبة. ويسهم **Internal Audit** في مراجعة الأداء الفعلي ومقارنته بالسياسات والمعايير المعتمدة، في حين توفر **Documentation Systems** سجلاً منهجياً ومنظماً يشمل البيانات والنماذج وقرارات التطوير والتحديث.

ويُفهم الامتثال هنا ليس بوصفه عبئاً إدارياً يحد من الابتكار، بل كآلية تمكينية تسهم في تقليل الأخطاء المكلفة، وتعزيز الثقة في الأنظمة الذكية، ورفع قدرة المؤسسات على التوسع في استخدام الذكاء الاصطناعي بطريقة مستقرة ومستدامة.

11.6.1 الإطار التنظيمي الأوروبي للذكاء الاصطناعي (EU AI Act)

يُعد **قانون الذكاء الاصطناعي الأوروبي (EU AI Act)** أحد أهم الأطر التنظيمية العالمية الحديثة في حوكمة الذكاء الاصطناعي، حيث دخل حيز النفاذ في **1آب 2024**، مع بدء التطبيق التدريجي لمتطلباته، على أن يتم التطبيق الكامل لمعظم أحكامه بحلول **2آب 2026**، مع وجود مراحل انتقالية واستثناءات تنظيمية لبعض الفئات.

ويقوم هذا القانون على **نهج المخاطر (Risk-Based Approach)** ، حيث يتم تصنيف أنظمة الذكاء الاصطناعي إلى مستويات مختلفة حسب درجة الخطورة، وتشمل:

- أنظمة ذات مخاطر غير مقبولة (محظورة)
- أنظمة عالية المخاطر (High-Risk Systems)
- أنظمة محدودة المخاطر
- أنظمة منخفضة أو معدومة المخاطر

ويركز الإطار الأوروبي بشكل خاص على الأنظمة عالية المخاطر المستخدمة في القطاعات الحيوية مثل الصحة، البنية التحتية، الطاقة، النقل، والتعليم، والإنفاذ القانوني، حيث يفرض متطلبات صارمة تشمل:

- الشفافية وقابلية التفسير
- إدارة المخاطر طوال دورة حياة النظام
- جودة البيانات وتقليل التحيز
- التوثيق الفني والتشغيلي
- الإشراف البشري (Human Oversight)
- الامتثال والتقييم المستمر قبل وبعد النشر

ويمثل EU AI Act تحولاً مهماً في البيئة التنظيمية العالمية، لأنه لا يكتفي بوضع مبادئ عامة، بل يقدم **إطاراً قانونياً ملزماً** يربط بين تطوير أنظمة الذكاء الاصطناعي واستخدامها والمسؤولية القانونية المترتبة عليها.

ومن الناحية المؤسسية، يفرض هذا القانون على المؤسسات خارج الاتحاد الأوروبي أيضاً – عند التعامل مع السوق الأوروبية أو بياناتها – إعادة هيكلة سياساتها الداخلية بما يتوافق مع متطلبات الامتثال، مما يجعله أحد أكثر الأطر تأثيراً عالمياً في عام 2026.

11.7 الخاتمة

تمثل الحوكمة الإطار المؤسسي الذي يسمح بتحويل الذكاء الاصطناعي من تقنية واعدة إلى ممارسة هندسية موثوقة ومستدامة. فهي لا تقتصر على وضع قواعد عامة، بل تشمل بناء منظومة متكاملة لإدارة البيانات، وتقييم المخاطر، وتحديد المسؤوليات، وضمان الامتثال، ومراقبة الأداء، وتحسين الأنظمة بشكل مستمر. ومن دون هذا الإطار، قد تتحول التطبيقات الذكية إلى مصادر للغموض أو التحيز أو المخاطر التشغيلية، بدلاً من أن تكون أدوات لتعزيز الكفاءة والسلامة والابتكار.

ومع ازدياد اعتماد القطاعات الهندسية على الأنظمة الذكية، ستصبح الحوكمة والامتثال التنظيمي شرطاً أساسياً لاعتماد هذه الأنظمة مستقبلاً، خاصة في المجالات التي تتصل بالبنية التحتية الحيوية، والسلامة العامة، وإدارة الموارد، والاستدامة. ولذلك فإن بناء أطر حوكمة قوية ومتكاملة لم يعد مجرد خيار تنظيمي، بل أصبح ضرورة استراتيجية لضمان أن يسهم الذكاء الاصطناعي في تطوير الهندسة بصورة مسؤولة وآمنة وفعالة.

الفصل الثاني عشر

التحديات والاعتبارات الأخلاقية والقانونية لتطبيق الذكاء الاصطناعي

12.1 المقدمة

على الرغم من الإمكانات الكبيرة التي يوفرها الذكاء الاصطناعي في تطوير الممارسات الهندسية وتحسين كفاءة التصميم والتشغيل واتخاذ القرار، فإن تطبيقه العملي لا يزال يواجه مجموعة واسعة من التحديات التقنية والتنظيمية والأخلاقية والقانونية التي قد تؤثر في سرعة تبنيه وموثوقية نتائجه واستدامة استخدامه. ولا تقتصر هذه التحديات على أداء الخوارزميات أو دقة النماذج، بل تمتد لتشمل جودة البيانات، وتكامل الأنظمة، وأمن المعلومات، والحوكمة المؤسسية، والمسؤولية المهنية، والامتثال التشريعي، والآثار الاجتماعية والبيئية المصاحبة لاستخدام الأنظمة الذكية داخل البيئات الهندسية. ومع تزايد الاعتماد على تقنيات الذكاء الاصطناعي التوليدي والنماذج اللغوية الكبيرة، أصبحت الحاجة أكثر إلحاحاً إلى بناء منظومات هندسية تتسم بالشفافية والموثوقية والعدالة والاستدامة، بما يضمن تحقيق الابتكار المسؤول وتقليل المخاطر المرتبطة بهذه التقنيات.

12.2 التحديات التقنية

1. تحديات جودة البيانات وتوافرها

تمثل البيانات الأساس الذي تعتمد عليه أنظمة الذكاء الاصطناعي في التعلم والاستنتاج، ولذلك فإن انخفاض جودة البيانات ينعكس مباشرة على جودة المخرجات والقرارات الهندسية. ومن أبرز هذه التحديات:

- البيانات غير المكتملة أو المفقودة .
- الضوضاء والأخطاء في القياسات .
- ندرة البيانات الخاصة بالحالات الحرجة أو النادرة .
- عدم التجانس بين مصادر البيانات المختلفة .
- تحيز البيانات وعدم تمثيلها لجميع الحالات التشغيلية .
- صعوبة الحصول على بيانات تاريخية عالية الجودة في بعض المشاريع الهندسية.

2. تحديات الموثوقية والتحقق

يتطلب استخدام الذكاء الاصطناعي في التطبيقات الهندسية الحرجة التأكد من موثوقية النماذج قبل وأثناء التشغيل، إلا أن ذلك يواجه عدداً من الصعوبات، منها:

- صعوبة اختبار جميع السيناريوهات التشغيلية الممكنة .
- محدودية أساليب الاختبار التقليدية للنماذج الذكية .
- الحاجة إلى التحقق المستمر أثناء التشغيل (Continuous Validation).
- تغير أداء النموذج بمرور الزمن نتيجة تغير البيانات (Model Drift).
- صعوبة اعتماد النماذج في التطبيقات ذات المتطلبات العالية للسلامة.

3. تحديات قابلية التفسير والشفافية

تعتمد العديد من نماذج الذكاء الاصطناعي الحديثة على شبكات عصبية عميقة يصعب تفسير آلية اتخاذها للقرار، وهو ما يمثل تحدياً كبيراً في التطبيقات الهندسية التي تتطلب تفسيراً علمياً واضحاً للنتائج.

وتشمل أبرز التحديات:

- محدودية تفسير القرارات .
- انخفاض مستوى الشفافية .
- صعوبة توثيق أسباب التوصيات الهندسية .
- الحاجة إلى دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي القابل للتفسير (Explainable AI).

4. تحديات الأمن السيبراني والسلامة

أصبحت الأنظمة الذكية هدفاً للهجمات السيبرانية التي قد تؤثر في سلامة المنشآت والبنية التحتية، وتشمل هذه التحديات:

- الهجمات على النماذج الذكية (Adversarial Attacks).
- تسميم بيانات التدريب (Data Poisoning).
- التلاعب بمدخلات النظام .
- سرقة النماذج والبيانات .
- تعطيل الأنظمة الصناعية .
- تهديد أنظمة التحكم الصناعية والبنية التحتية الحرجة .

5. تحديات البنية الحاسوبية

تتطلب تطبيقات الذكاء الاصطناعي المتقدمة موارد حاسوبية كبيرة قد لا تكون متاحة لجميع المؤسسات، وتشمل:

- الحاجة إلى وحدات معالجة عالية الأداء .
- ارتفاع تكاليف الحوسبة السحابية .
- متطلبات التخزين الضخم .
- صعوبة تشغيل النماذج الضخمة في الزمن الحقيقي .
- استهلاك مرتفع للطاقة.

12.3 التحديات المؤسسية والتنظيمية

1. التكامل مع الأنظمة القائمة

يتطلب دمج تطبيقات الذكاء الاصطناعي إعادة تصميم العمليات التشغيلية وربط الأنظمة الذكية بالبنية الرقمية الحالية، مع ضمان توافقها مع أنظمة المعلومات والهندسة المستخدمة داخل المؤسسة.

2. نقص المهارات متعددة التخصصات

يتطلب نجاح تطبيق الذكاء الاصطناعي وجود كوادر تمتلك خبرات متكاملة تشمل:

- الهندسة .
- الذكاء الاصطناعي .
- علوم البيانات .
- الأمن السيبراني .
- الحوكمة وإدارة المخاطر .
- أخلاقيات الذكاء الاصطناعي .

3. مقاومة التغيير المؤسسي

يواجه التحول الرقمي مقاومة تنظيمية وثقافية تتمثل في:

- ضعف تقبل التقنيات الجديدة .
- التخوف من فقدان الوظائف .
- محدودية الثقافة الرقمية .
- ضعف القيادة الداعمة للتحول الرقمي .

4. متطلبات البنية التحتية الرقمية

تشمل:

- الحوسبة عالية الأداء .
- التخزين الضخم .
- الحوسبة السحابية .
- شبكات الاتصال السريعة .
- إنترنت الأشياء الصناعي (IIoT).
- منصات البيانات الموحدة .

5. حوكمة الذكاء الاصطناعي وإدارة المخاطر

أصبحت الحوكمة من أهم التحديات المؤسسية، وتشمل:

- وضع سياسات استخدام واضحة .
- إدارة دورة حياة النماذج .
- مراقبة الأداء بعد التشغيل .
- إدارة المخاطر التقنية .
- الامتثال للمعايير الدولية .
- توثيق القرارات الآلية.

12.4 الاعتبارات الأخلاقية والقانونية

1. المساءلة والمسؤولية المهنية

تثير الأنظمة الذكية تساؤلات حول الجهة المسؤولة عن القرارات الهندسية عند وقوع الأخطاء، إلا أن المرجعيات المهنية تؤكد استمرار مسؤولية المهندس المختص عن مراجعة واعتماد القرار النهائي، حتى عند الاستعانة بأنظمة الذكاء الاصطناعي.

2. العدالة وتقليل التحيز

يتطلب الاستخدام المسؤول للذكاء الاصطناعي الحد من التحيزات التي قد تؤثر في القرارات الهندسية، وذلك من خلال:

- مراجعة جودة البيانات .
- تقييم العدالة والإنصاف .
- تدقيق النماذج بصورة دورية .
- اختبار الأداء على مجموعات بيانات متنوعة .
- توثيق مصادر الانحياز المحتملة .

3. الخصوصية وحماية البيانات

تشمل الاعتبارات الرئيسة:

- تقليل جمع البيانات إلى الحد الأدنى .
- حماية المعلومات الحساسة .
- إدارة صلاحيات الوصول .
- تشفير البيانات .
- الامتثال لتشريعات حماية البيانات .

4. التأثير على الوظائف والمهارات

لا يؤدي الذكاء الاصطناعي إلى استبدال المهندسين بصورة كاملة، وإنما يعيد تشكيل طبيعة العمل الهندسي، مما يستدعي:

- إعادة تأهيل القوى العاملة .
- تطوير المناهج الهندسية .
- تعزيز مهارات تحليل البيانات .
- تنمية مهارات التعاون بين الإنسان والآلة .

5. الاستدامة البيئية

يتطلب تطوير وتشغيل النماذج الذكية مراعاة الآثار البيئية الناتجة عن استهلاك الموارد الحاسوبية، وتشمل:

- استهلاك الطاقة الكهربائية .
- الانبعاثات الكربونية لمراكز البيانات .
- تحسين الكفاءة الحاسوبية .
- استخدام نماذج أقل استهلاكاً للطاقة .
- توظيف الحوسبة الخضراء (Green AI).

6. التحديات القانونية والتنظيمية

تشمل الجوانب القانونية المرتبطة باستخدام الذكاء الاصطناعي في الهندسة:

- المسؤولية القانونية عن القرارات الآلية .
- حماية الملكية الفكرية .
- حقوق استخدام البيانات .
- الامتثال للتشريعات والمعايير التنظيمية .
- حماية البيانات الصناعية .
- تنظيم استخدام الذكاء الاصطناعي التوليدي في الأعمال الهندسية.

يمثل تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة تحولاً استراتيجياً يتجاوز مجرد التطور التقني ليشمل إعادة تشكيل النظم المؤسسية والهياكل المهنية وآليات اتخاذ القرار الهندسي. ويعتمد نجاح هذا التحول على القدرة على تحقيق توازن بين الابتكار والكفاءة من جهة، وإدارة المخاطر التقنية والتنظيمية والأخلاقية والقانونية من جهة أخرى. ومن ثم، فإن بناء منظومات حوكمة فعالة، وتعزيز جودة البيانات، وتطوير الكفاءات البشرية، وترسيخ مبادئ الشفافية والعدالة والاستدامة، تعد جميعها ركائز أساسية لضمان الاستخدام المسؤول والموثوق لتقنيات الذكاء الاصطناعي في مختلف التخصصات الهندسية، بما يسهم في تحقيق تنمية هندسية مستدامة وقادرة على مواكبة التطورات التقنية المستقبلية.

الفصل الثالث عشر

التوصيات

13.1 التوصيات على المستوى الوطني

لتأسيس بيئة وطنية متكاملة تدعم تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي في مختلف القطاعات الهندسية، يُوصى بتنفيذ المحاور الاستراتيجية الآتية:

- **بناء منصة وطنية للبيانات الهندسية :**إنشاء مستودع وطني موحد يضم بيانات التصاميم والمواصفات وأداء المشاريع الهندسية، مع اعتماد معايير موحدة لضمان جودة البيانات، وقابليتها للتبادل، وإتاحة الوصول الآمن إليها للباحثين والجهات الهندسية .
- **تطوير الإطار التشريعي والتنظيمي :**تحديث التشريعات والكودات والمواصفات الهندسية الوطنية بما يتوافق مع تطبيقات الذكاء الاصطناعي، ووضع أطر قانونية تنظم المسؤولية المهنية، وتحمي خصوصية البيانات، وتعزز الاستخدام الآمن والأخلاقي للتقنيات الذكية .
- **تعزيز البنية التحتية الرقمية :**الاستثمار في تطوير شبكات الاتصالات عالية السرعة، وإنشاء مراكز بيانات وطنية، وتوسيع خدمات الحوسبة السحابية، بما يوفر بيئة تقنية قادرة على دعم التطبيقات الهندسية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي .
- **تسريع تنفيذ مبادرات المدن الذكية :**دعم مشاريع المدن والمناطق الذكية من خلال دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في إدارة البنية التحتية، وأنظمة النقل والطاقة والمياه والخدمات الحضرية، بما يعزز كفاءة التشغيل واستدامة الموارد .
- **تعزيز دور وزارة الاقتصاد الرقمي والريادة في قيادة التحول نحو الذكاء الاصطناعي :**مواصلة تنفيذ الاستراتيجية الوطنية للذكاء الاصطناعي، وتوسيع برامج بناء القدرات والمهارات الرقمية، ودعم الابتكار والشركات الناشئة، وتعزيز التعاون مع الجامعات والقطاع الخاص والشركات العالمية، بما يسهم في تسريع التحول الرقمي، ورفع جاهزية الكفاءات الوطنية، وتوسيع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاعات الهندسية والإنتاجية المختلفة.

13.2 التوصيات على المستوى المؤسسي والصناعي

- تعزيز الشراكات الاستراتيجية بين النقابات المهنية والجامعات ومراكز البحث والقطاع الخاص لتطوير حلول ذكاء اصطناعي تُلبّي احتياجات السوق المحلية.
- إنشاء مراكز التميز وحاضنات الأعمال: مراكز وطنية متخصصة في الذكاء الاصطناعي الهندسي تُحتضن الشركات الناشئة وتدعم مشاريع البحث التطبيقي.
- تبني التحول الرقمي التدريجي: تنفيذ مشاريع تجريبية مدروسة في القطاعات ذات الأولوية، والتوسع التدريجي بناءً على النتائج والدروس المستخلصة.
- الاستثمار في البحث والتطوير المحلي: توجيه الجهود نحو حلول ذكاء اصطناعي مُخصّصة للظروف المحلية وتحديات البيئة العربية.

13.3 التوصيات على المستوى الأكاديمي والتعليمي

- تحديث المناهج الهندسية لتشمل مقررات متخصصة في الذكاء الاصطناعي وعلوم البيانات والتعلم الآلي ضمن جميع التخصصات الهندسية.
- تطوير برامج الدراسات العليا المتخصصة في الذكاء الاصطناعي الهندسي وتطبيقاته القطاعية.
- إطلاق برامج التدريب المستمر والشهادات المهنية المعتمدة للمهندسين الممارسين.
- تعزيز المهارات الهجينة متعددة التخصصات مع التركيز على التفكير النقدي والعمل الجماعي وحل المشكلات المعقدة.

13.4 التوصيات للمهندسين على المستوى الفردي

لكي يحافظ المهندسون على تنافسيتهم في سوق العمل المتحوّل، يُوصى بتبني استراتيجية التطوير الذاتي المستمر وفق المحاور التالية:

- التدريب على أدوات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي وتحليل البيانات وأنظمة التحكم الصناعي.
- اكتساب مهارات برمجية متقدمة في Python و MATLABوالمنصات المتخصصة كـ TensorFlow و Simulink وETAP
- المشاركة في برامج التحول الرقمي وتطوير الثقافة التقنية والرقمية.
- التركيز على مجالات الاستدامة والطاقة الذكية والشبكات المتقدمة.
- الانخراط في مجتمعات البحث والمؤتمرات العلمية المتخصصة لتعزيز تبادل المعرفة.
- تبني الصيانة التنبؤية وأساليب التصميم التوليدي والنمذجة الرقمية في الممارسة الهندسية اليومية.

13.5 النظرة المستقبلية

يُشكّل الذكاء الاصطناعي حجر الزاوية في مستقبل الهندسة، إذ أصبح دمجه ضرورة استراتيجية لتحقيق التنافسية والاستدامة والكفاءة. تتجلى ملامح العقد القادم في **أربع توجهات محورية:**

- **الهندسة ذاتية التحسين:** أنظمة هندسية تتعلم وتطور نفسها تلقائيًا وتتكيف مع الظروف المتغيرة في الزمن الحقيقي.
- **التوائم الرقمية الشاملة:** نماذج رقمية متكاملة للمدن والمصانع والشبكات مع القدرة على محاكاة السيناريوهات قبل التنفيذ.
- **الاستدامة المدفوعة بالذكاء الاصطناعي:** تحقيق الحياد الكربوني والاقتصاد الدائري باستخدام أنظمة إدارة موارد ذكية.
- **الهندسة التعاونية إنسان-آلة:** تكامل بين خبرة المهندسين وقدرات الذكاء الاصطناعي لتعزيز الإبداع البشري لا استبداله.

الفصل الرابع عشر: المراجع الرئيسية

14.1 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.

14.2 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*.
- Frontiers (2025) 'AI-based heritage conservation and digital documentation systems', *Frontiers in Built Environment*.
- 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*.
- Khatri, V. and Brown, C.V. (2010) 'Designing data governance', *Communications of the ACM*, 53(1), pp. 148–152.
- 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.

14.3 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الميكانيكية

- ABB (2025) *Industrial Automation and AI-Driven Control Systems Report*. ABB Corporate Publications.
- Ayub, M., et al. (2023) ‘Predictive maintenance in industrial systems using machine learning’, *Journal of Manufacturing Systems*, 68, pp. 112–130.
- ASHRAE (2025) *HVAC Systems and Energy Optimization Guidelines*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASNT (2025) *Non-Destructive Testing Handbook*. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing.
- AWS (2025) *Welding Inspection and Quality Standards Report*. American Welding Society.
- Bogue, R. (2018) ‘Robots in industry: The evolution of industrial robotics’, *Industrial Robot: An International Journal*, 45(3), pp. 290–295.
- Bolton, W. (2009) *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*. 4th edn. Harlow: Pearson.
- BP (2024) *Energy Outlook and Digital Transformation in Oil and Gas*. London: BP plc.
- Chen, X., et al. (2023) ‘Digital twin-driven smart manufacturing systems’, *Journal of Manufacturing Systems*, 66, pp. 1–18.
- DeepMind (2025) *Reinforcement Learning and Autonomous Systems Research Overview*. London: DeepMind Technologies.
- Deloitte (2025) *AI in Industry and Manufacturing: Global Survey Report*. Deloitte Insights.
- Elsevier Materials Today (2025) *AI in Materials Science: Advances and Applications*. Elsevier.
- European Commission (2025) *AI Act and Human Oversight Requirements in Industrial Systems*. Brussels.
- Goodfellow, I., Bengio, Y. and Courville, A. (2016) *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gradišar, D., et al. (2024) ‘Topology optimization in modern engineering design’, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 120, pp. 1–15.
- He, D., Xu, X. and Xu, J. (2019) ‘Predictive maintenance using machine learning’, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 122, pp. 417–431.
- Honeywell (2025) *Industrial AI and Smart Process Automation Report*. Honeywell International.
- Huang, H., et al. (2023) ‘Autonomous robotic systems in industrial environments’, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 79, pp. 102–118.
- IBM Institute for Business Value (2025) *AI-Driven Predictive Maintenance and Asset Optimization*. IBM Corporation.
- IEA (2019) *Digitalization and Energy Systems*. Paris: International Energy Agency.
- IEA (2025) *Energy Efficiency and Smart HVAC Systems Report*. Paris: International Energy Agency.
- IFAC (2024) *Advanced Control Systems and Intelligent Automation Trends*. International Federation of Automatic Control.
- IEEE Access (2025) ‘AI-based thermal imaging and defect detection systems’, *IEEE Access*, 13, pp. 1–20.
- IEEE Control Systems Society (2025) *AI in Control Engineering: Emerging Trends*. IEEE.
- ISO (2024) *ISO 23247: Digital Twin Framework for Manufacturing*. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (2025) *ISO/IEC 42001 Artificial Intelligence Management System Standard*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Jiang, Z., et al. (2021) ‘AI in product lifecycle management’, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(4), pp. 789–810.
- Kusiak, A. (2018) ‘Smart manufacturing systems’, *International Journal of Production Research*, 56(1–2), pp. 508–521.
- Lee, J., et al. (2015) ‘Cyber-physical systems and smart factories’, *Manufacturing Letters*, 3, pp. 18–23.

- Lu, Y. (2017) ‘Industry 4.0: A survey on technologies and applications’, *Journal of Industrial Information Integration*, 6, pp. 1–10.
- Lu, Y., et al. (2018) ‘Smart manufacturing systems integration’, *Journal of Manufacturing Systems*, 48, pp. 1–14.
- Materials Genome Initiative (2024) *Accelerating Materials Innovation through AI*. U.S. Government Report.
- McKinsey & Company (2025) *The State of AI in Industry 2025*. McKinsey Global Institute.
- Nature Materials (2025) ‘AI-driven materials discovery trends’, *Nature Materials*, 24, pp. 1–10.
- Nature Reviews Materials (2025) ‘Machine learning for materials design’, *Nature Reviews Materials*, 10, pp. 1–15.
- NIST (2023) *AI Risk Management Framework (AI RMF 1.0) and Industrial Applications*. National Institute of Standards and Technology.
- Qin, S.J. and Badgwell, T.A. (2024) ‘Model predictive control in industrial applications’, *Journal of Process Control*, 112, pp. 1–25.
- Rao, S.S. (2018) *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 5th edn. Hoboken: Wiley.
- Russell, S. and Norvig, P. (2021) *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th edn. Boston: Pearson.
- Shalev-Shwartz, S. and Ben-David, S. (2014) *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shyr, W.J., et al. (2019) ‘Fault diagnosis of rotating machinery using AI’, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 123, pp. 45–60.
- Siemens Energy (2025) *AI in Turbine Optimization and Industrial Energy Systems*. Siemens.
- Siemens Digital Industries (2025) *Digital Twin and Industrial AI Integration Report*. Siemens.
- Tao, F. and Qi, Q. (2019) ‘Digital twin and cyber-physical systems in manufacturing’, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), pp. 1–12.
- UNEP (2025) *Green Buildings and Net-Zero Energy Systems Report*. United Nations Environment Programme.
- WEF (2025) *The Future of Manufacturing in the Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.
- Wuest, T., et al. (2016) ‘Machine learning in manufacturing’, *CIRP Annals*, 65(2), pp. 499–502.
- Zhang, W., et al. (2017) ‘Machine learning for predictive maintenance’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(5), pp. 1–10.

14.4 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكهربائية

- Alpaydin, E. (2021) *Introduction to Machine Learning*. 4th edn. Cambridge, MA: MIT Press.
- Deloitte (2025) *AI in Energy and Utilities: Digital Transformation and Operational Efficiency*. London: Deloitte Insights.
- Henao, N., et al. (2025) ‘Real-time digital simulation and neural network integration for power systems control’, *IEEE Transactions on Power Systems*, forthcoming/early access.
- IEEE (2025) *Guidelines for Artificial Intelligence in Safety-Critical Power Systems*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- IEEE-USA (2025) *Cybersecurity and Artificial Intelligence in Critical Infrastructure Systems*. Washington, DC: IEEE-USA.
- International Energy Agency (IEA) (2025) *Digitalisation and AI in the Energy Sector: Smart Grids and Future Power Systems*. Paris: IEA.
- International Organization for Standardization (ISO) (2023) *ISO/IEC 42001:2023 Artificial Intelligence Management System*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization (ISO) (2018) *ISO 50001:2018 Energy Management Systems – Requirements with Guidance for Use*. Geneva: ISO.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2013) *IEC 61850: Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*. Geneva: IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2012) *IEC 61970: Energy Management System Application Program Interface (EMS-API)*. Geneva: IEC.

- IEEE (2003) *IEEE 1547: Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. New York: IEEE.
- Lee, J., Bagheri, B. and Kao, H.A. (2015) 'A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems', *Manufacturing Letters*, 3, pp. 18–23.
- Lu, Y., et al. (2018) 'Artificial intelligence enabled cyber-physical systems for smart manufacturing', *Journal of Manufacturing Systems*, 48, pp. 1–12.
- McKinsey & Company (2025) *The State of AI in Energy and Utilities: Global Survey Report*. New York: McKinsey Global Institute.
- National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024) *Cybersecurity Framework and AI Risk Management for Critical Infrastructure*. Gaithersburg, MD: NIST.
- Nguyen, T., et al. (2025) 'Deep learning approaches for renewable energy forecasting and optimization', *Renewable Energy*, 202, pp. 1–15.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2024) *AI Governance in Critical Infrastructure Systems*. Paris: OECD Publishing.
- PwC (2025) *Artificial Intelligence in Power and Utilities: ROI and Operational Impact Report*. London: PricewaterhouseCoopers.
- Russell, S. and Norvig, P. (2021) *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th edn. Harlow: Pearson.
- Safari, A., et al. (2025) 'Physics-informed neural networks for power system stability and control', *Applied Energy*, 350, pp. 1–18.
- World Economic Forum (WEF) (2025) *Artificial Intelligence and the Future of Energy Systems*. Geneva: World Economic Forum.
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2022–2025) *Advanced Analytics and AI Applications in Power Systems*. Palo Alto, CA: EPRI.
- Industrial Internet Consortium (IIC) (2023–2025) *Industrial AI and Edge Computing in Energy Systems*. Boston: IIC.
- IEEE Power & Energy Society (2022–2025) *Smart Grid and AI Integration Technical Reports*. New York: IEEE PES.

14.5 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين والهندسة الجيولوجية والبترول

- Deloitte (2025) *Digital transformation and AI adoption in the mining sector: Industry outlook report*. Deloitte Insights.
- Deloitte (2025) *Mining industry report: Operational efficiency and digital maturity in mining*. Deloitte Mining Research.
- Dutta, S., et al. (2020) 'Machine learning applications in mineral resource modelling and mining optimization', *Minerals Engineering*.
- Elsevier Resources Policy (2025) *Artificial intelligence and digital transformation in resource industries*. Elsevier.
- Harris, J., et al. (2020) 'Machine learning applications in mineral exploration and geoscience analytics', *Ore Geology Reviews*.
- IBM Institute for Business Value (2025) *AI in asset-intensive industries: Mining and heavy industry transformation*. IBM.
- ICMM (International Council on Mining and Metals) (2025) *Safety and sustainability in modern mining operations*. ICMM Report.
- IEA (International Energy Agency) (2025) *Critical minerals and mining sector transformation report*. Paris: IEA.
- Industry Mining Review (2025) *Autonomous mining systems and productivity impacts*. Industry Mining Journal.
- ISO (2025) *ISO/IEC 42001 Artificial intelligence management system – Requirements*. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (2025) *ISO 45001 Occupational health and safety management systems*. Geneva: ISO.
- ISO (2025) *ISO 14001 Environmental management systems*. Geneva: ISO.

- ISO (2025) *ISO 22400 Automation systems and integration – KPIs for manufacturing operations*. Geneva: ISO.
- ISO (2025) *ISO 17757 Earth-moving machinery and mining – Autonomous and semi-autonomous machine safety*. Geneva: ISO.
- Journal of Technologies (2026) 'Digital twins and AI integration in mineral processing systems', *Journal of Advanced Industrial Technologies*.
- McKinsey & Company (2023) *The state of AI in heavy industry and mining*. McKinsey Global Institute.
- McKinsey & Company (2025) *Smart mining: Digital transformation and productivity enhancement in mining operations*. McKinsey Report.
- MDPI (2026) *Artificial intelligence applications in mining and mineral engineering*. *Algorithms / Applied Sciences (MDPI Special Issue)*.
- Metso (2023) *Predictive maintenance in mining equipment: Industry case studies*. Metso Technical Report.
- PwC (2025) *AI-driven value creation in mining and metals industries*. PricewaterhouseCoopers Insights.
- Rahman, A., et al. (2026) 'Reinforcement learning for autonomous haulage systems in mining', *International Journal of Mining Science and Technology*.
- Rodriguez-Galiano, V.F., et al. (2015) 'Machine learning classification approaches for mineral prospectivity mapping', *Computers & Geosciences*.
- Whittle, J. (2024) *Strategic mine planning and optimisation using AI-enabled systems*. Mining Engineering Publications.
- World Bank (2025) *Digital transformation and governance in extractive industries*. World Bank Report.
- World Economic Forum (WEF) (2025) *Mining and metals in the age of AI: Smart mining and digital twins*. Geneva: WEF.
- Xiong, Y., et al. (2021) 'Multi-source geoscience data integration using machine learning for mineral exploration', *Remote Sensing and Geoinformatics*.
- Yang, H., et al. (2025) 'Artificial intelligence in mineral processing and mining automation systems', *Minerals Engineering*.
- Zuo, R., et al. (2019) 'Machine learning approaches for mineral resource estimation and uncertainty reduction', *Ore Geology Reviews*.

14.6 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

- AIChE (2025) *Process safety and artificial intelligence governance in chemical industries*. American Institute of Chemical Engineers, New York.
- CCPS (2022–2025) *Guidelines and reports on process safety and risk management in chemical industries*. Center for Chemical Process Safety, AIChE.
- Chaudhuri, S., et al. (2021) 'AI-based safety monitoring and hazard detection in industrial chemical processes', *Process Safety and Environmental Protection*, 150, pp. 1–15.
- Deloitte (2024) *AI in manufacturing and process industries: Digital transformation insights*. Deloitte Insights, London.
- Deloitte (2025) *Industrial AI adoption and legacy system integration challenges*. Deloitte Insights, London.
- Digital Twin Consortium (2022–2025) *Industrial digital twin frameworks and implementation guidelines*. Boston: Digital Twin Consortium.
- Goodfellow, I., Bengio, Y. and Courville, A. (2016) *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- He, X., Xu, Y. and Xu, Z. (2019) 'Predictive maintenance and fault diagnosis using machine learning techniques in industrial systems', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 123, pp. 1–18.
- IBM (2024) *Artificial intelligence in industrial transformation*. IBM Corporation, Armonk, NY.
- IBM Institute for Business Value (2025) *AI-driven value creation in process industries*. IBM Research Report.
- IEA (2025) *Digitalization and AI in energy and chemical industries*. International Energy Agency, Paris.

- Industrial Internet Consortium (2022–2025) *Industrial Internet of Things (IIoT) reference architecture and use cases*. IIC Publications.
- ISO (2025) *ISO standards for AI governance and industrial systems integration*. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO/IEC (2023) *ISO/IEC 42001: Artificial intelligence management system*. Geneva: ISO.
- Li, J., Wang, H., Zhang, Y. and Liu, S. (2017) 'Machine learning applications in water treatment and environmental sustainability', *Water Research*, 115, pp. 1–12.
- McKinsey & Company (2025) *The state of AI in manufacturing and process industries*. McKinsey Global Institute, New York.
- NIST (2024) *Cybersecurity framework for industrial control systems and AI-enabled infrastructures*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- PwC (2025) *Global AI industrial transformation and ROI analysis in process industries*. PricewaterhouseCoopers, London.
- Siemens (2024) *Digital industries and AI-based process automation in chemical engineering*. Siemens AG Technical Report.
- Tao, F. and Qi, Q. (2019) 'Digital twin and cyber–physical systems in manufacturing', *Engineering*, 5(4), pp. 1–16.
- World Economic Forum (WEF) (2025) *Artificial intelligence and the future of industrial chemicals*. Geneva: WEF.
- Zhang, T., et al. (2025) 'Explainable AI (XAI) for safe industrial chemical process control', *Journal of Process Control*, 132, pp. 1–20.

14.7 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاعات الهندسية الأردنية

- ABB (2024) Industrial Automation and Smart Energy Solutions in the Middle East. Zurich: ABB.
- Arab Potash Company (2024) *Operational Optimization and Smart Mining Systems*. Amman: Arab Potash Company.
- Deloitte (2025) Digital Transformation in the Middle East Mining Sector. London: Deloitte.
- GIZ (2024) Water and Energy Efficiency Programs in Jordan. Amman: GIZ.
- Government of Jordan (2023) *Economic Modernization Vision 2033*. Amman: Government of Jordan.
- JICA (2024) *Jordan Energy Sector Support Program Reports*. Tokyo: Japan International Cooperation Agency.
- Jordan Phosphate Mines Company (2024) *Digital Transformation and AI Applications in Mining Operations*. Amman: Jordan Phosphate Mines Company.
- Jordan Valley Authority (2024) *Smart Agriculture and Water Management Programs*. Amman: Jordan Valley Authority.
- Ministry of Digital Economy and Entrepreneurship (2023) *National Artificial Intelligence Strategy 2023-2027*. Amman: Ministry of Digital Economy and Entrepreneurship.
- Ministry of Energy and Mineral Resources (2024) *Annual Energy Report and Smart Grid Initiatives*. Amman: Ministry of Energy and Mineral Resources.
- Petra Engineering Industries (2024) *HVAC Systems and Energy Optimization in Industrial Facilities*. Amman: Petra Engineering Industries.
- Schneider Electric (2024) *Smart Buildings and Energy Efficiency Solutions*. Paris: Schneider Electric.
- Siemens (2024) Smart Infrastructure and AI-based Urban Systems. Munich: Siemens.

14.8 المراجع الخاصة بالتحديات والاعتبارات الأخلاقية

- Arrieta, A.B., et al. (2020) 'Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI', *Information Fusion*, 58, pp. 82-115.

- ASCE (American Society of Civil Engineers) (2024) Policy Statement 573: Artificial Intelligence and Engineering Responsibility. Reston, VA: ASCE.
- Autor, D.H. (2015) 'Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation', *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), pp. 3-30.
- Huang, X., et al. (2017) 'Adversarial Attacks on Neural Network Policies', *arXiv preprint arXiv:1702.02284*.
- Janiesch, C., Zschech, P. and Heinrich, K. (2021) 'Machine learning and deep learning', *Electronic Markets*, 31(3), pp. 685-695.
- Obermeyer, Z., et al. (2019) 'Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations', *Science*, 366(6464), pp. 447-453.
- Peres, R.S., et al. (2020) 'Industrial Artificial Intelligence: A systematic literature review', *Journal of Manufacturing Systems*, 57, pp. 63-83.
- Raji, I.D., et al. (2020) 'Closing the AI accountability gap: Defining an end-to-end framework for internal algorithmic auditing', in *Proceedings of the 2020 Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, pp. 33-44.
- Strubell, E., Ganesh, A. and McCallum, A. (2019) 'Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP', in *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pp. 3645-3650.

14.9 المراجع العامة المشتركة الواردة في كافة الفصول

- Ahmad, K., Bano, M., Abdelrazek, M., Arora, C. and Grundy, J. (2021) ‘What’s up with Requirements Engineering for Artificial Intelligence Systems?’, *Proceedings of the 29th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2021)*, pp. 1–12.
- Ahmad, T. et al. (2021) ‘Artificial intelligence in sustainable construction’, *Journal of Cleaner Production*, 312, p. 127678.
- Bock, T. and Linner, T. (2016) *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bock, T. and Linner, T. (2016) *Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Production*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Fuller, R. (1995) *Neural Fuzzy Systems*. Uppsala: Åbo Akademi University.
- Goodfellow, I., Bengio, Y. and Courville, A. (2016) *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- He, K., Xu, X. and Xu, J. (2019) ‘Predictive maintenance in industrial systems’ (reference as cited in engineering literature).
- Hopfield, J.J. (1982) ‘Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities’, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(8), pp. 2554–2558.
- Kaplan, A. and Haenlein, M. (2019) ‘Siri, Siri, in my hand: Who’s the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence’, *Business Horizons*, 62(1), pp. 15–25.
- Kusiak, A. (2018) ‘Smart manufacturing’, *International Journal of Production Research*, 56(1–2), pp. 508–517.
- LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. (2015) ‘Deep learning’, *Nature*, 521(7553), pp. 436–444.
- Lee, J., Davari, H., Singh, J. and Pandhare, V. (2018) ‘Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-based manufacturing systems’, *Manufacturing Letters*, 18, pp. 20–23.
- Lee, J. et al. (2018) ‘Predictive maintenance for Industry 4.0’, *Journal of Manufacturing Systems*, 46, pp. 140–151.
- Li, et al. (2017) ‘Machine learning applications in water treatment and environmental systems’, *Water Research*.
- McCarthy, J. (2007) *What Is Artificial Intelligence?* Stanford University. Available at: http://jmc.stanford.edu/articles/whatisai/whatisai.pdf (Accessed: 22 June 2026).
- McCarthy, J., Minsky, M.L., Rochester, N. and Shannon, C.E. (2006) ‘A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955’, *AI Magazine*, 27(4), pp. 12–14.

- McKinsey & Company (2025) *AI in Industrial Operations Report*. McKinsey Global Institute.
- Nilsson, N.J. (1998) *Artificial Intelligence: A New Synthesis*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann.
- Pan, Y. and Zhang, L. (2021) 'Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends', *Automation in Construction*, 122, p. 103517.
- Pan, Z., Hu, Y. et al. (2021) 'A Maxwell's Equations Based Deep Learning Method for Time Domain Electromagnetic Simulations', *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 6, pp. 35–40.
- Poole, D.L. and Mackworth, A.K. (2017) *Artificial Intelligence: Foundations of Computational Agents*. 2nd edn. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. and Williams, R.J. (1986) 'Learning representations by back-propagating errors', *Nature*, 323(6088), pp. 533–536.
- Russell, S. and Norvig, P. (2021) *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th edn. Harlow: Pearson.
- Schmidhuber, J. (2015) 'Deep learning in neural networks: An overview', *Neural Networks*, 61, pp. 85–117.
- Sutton, R.S. and Barto, A.G. (2018) *Reinforcement Learning: An Introduction*. 2nd edn. Cambridge, MA: MIT Press.
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L. and Nee, A.Y.C. (2019) 'Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison', *Engineering*, 5(4), pp. 653–661.
- Turing, A.M. (1950) 'Computing machinery and intelligence', *Mind*, 59(236), pp. 433–460.
- World Economic Forum (2025) *Future of Jobs Report 2025*. Geneva: World Economic Forum.

إعداد

مركز الدراسات والبحوث