نقابة المهندسين الأردنيين
Jordan Engineers Association

مركز الدراسات والبحوث
Studies and Research Center

تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية

الفهرس

1 مقدمة: التحول الرقمي في الهندسة الكيميائية..... 1
2 مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 2
2.1 النمذجة والمحاكاة الكيميائية..... 4
2.2 التحكم الذكي في العمليات الصناعية..... 4
2.3 تحسين تصميم وتشغيل المفاعلات الكيميائية..... 5
2.4 الصيانة التنبؤية للمعدات والأنظمة..... 5
2.5 الذكاء الاصطناعي في الصناعات البتروكيميائية والتكرير... 6
2.6 معالجة المياه والاستدامة البيئية..... 6
2.7 اكتشاف المواد وتصميم المركبات الكيميائية..... 6
2.8 السلامة الصناعية وإدارة المخاطر الكيميائية..... 7
2.9 التوأم الرقمي والمحاكاة الصناعية..... 7
2.10 التطبيقات الناشئة والمستقبلية..... 7
3 التقنيات المستخدمة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 8
3.1 التقنيات الأكثر استخداماً في الهندسة الكيميائية..... 9
4 أدوات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 9
5 فوائد الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 12
6 الوظائف الناشئة والمهارات المطلوبة في عصر الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 13
6.1 مهارات المستقبل في الهندسة الكيميائية في عصر الذكاء الاصطناعي..... 16
7 التحديات والمعوقات في تطبيق الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 17
7.1 التحديات التقنية..... 17
7.2التحديات الاقتصادية والبشرية..... 17
7.3 التحديات الأمنية والتنظيمية..... 17
8 التوصيات الاستراتيجية للمهندسين الكيميائيين..... 18
9 الخاتمة..... 18
10 المراجع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الهندسة الكيميائية..... 19

محتويات الجدول

رقم الجدول	محتويات	رقم الصفحة
جدول .1	أبرز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مجالات هندسة المناجم والتعدين	9
جدول .2	أدوات الذكاء الاصطناعي في هندسة المناجم والتعدين	12

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.

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:

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).

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).

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.

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.

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.

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)

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.

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).

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).

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 .

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:

جدول1. 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 (Anomaly Detection)
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.

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.

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 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 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

1

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

2

رفع دقة النمذجة والمحاكاة
للعمليات الحرارية والتفاعلات الكيميائية متعددة المتغيرات.

3

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

4

تعزيز الصيانة التنبؤية
للمعدات مثل المفاعلات والمضخات والمبادلات الحرارية.

5

تقليل الأعطال والتوقفات
غير المخططة عبر التحليل اللحظي للبيانات.

6

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

7

تحسين جودة المنتجات الكيميائية
وتقليل التباين في العمليات الإنتاجية.

(Ahmed et al., 2026)

الفوائد الاقتصادية

1

خفض استهلاك الطاقة والمواد الخام
عبر تحسين ظروف التشغيل المثلى.

2

تقليل تكاليف الصيانة والإصلاح
نتيجة تطبيق الصيانة التنبؤية.

3

زيادة معدلات الإنتاج
وتحسين استقرار العمليات الصناعية.

4

تسريع البحث والتطوير
وتقليل زمن تطوير المنتجات الجديدة.

5

تحسين كفاءة سلاسل التوريد
والتخزين والنقل الكيميائي.

6

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

1

تقليل الانبعاثات الكربونية
وتحسين كفاءة الطاقة.

2

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

3

تحسين إدارة المخلفات الصناعية
وإعادة التدوير.

4

التنبؤ بالتسربات والانبعاثات الخطرة
قبل حدوثها.

5

دعم تصميم عمليات إنتاج خضراء
منخفضة الانبعاثات.

6

تحسين كفاءة احتجاز الكربون
(Carbon Capture)

الذكاء الاصطناعي يقود مستقبل الهندسة الكيميائية

كفاءة أعلى • جودة أفضل • استدامة أكبر • تشغيل أذكى

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

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.

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.

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).

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).

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).

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 الخاتمة

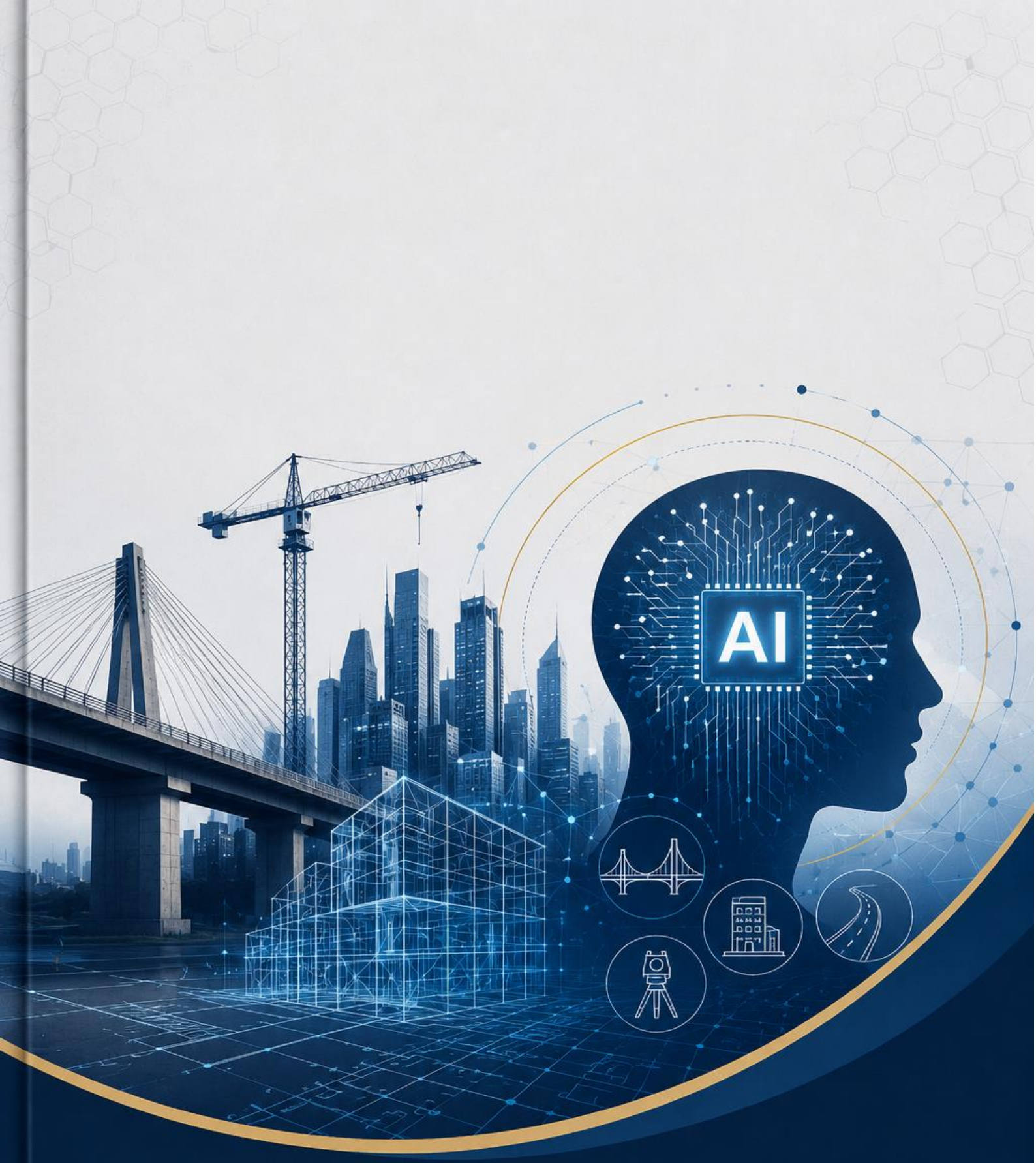
أصبح الذكاء الاصطناعي أحد المحركات الاستراتيجية الرئيسة لمستقبل الهندسة الكيميائية، حيث أسهم في إعادة تشكيل أساليب تصميم وتشغيل وإدارة العمليات الصناعية. وقد انعكس هذا التحول في تحسين الكفاءة التشغيلية، ورفع مستويات الاستدامة البيئية، وتعزيز معايير السلامة الصناعية داخل المنشآت الكيميائية.

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.

10 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.



إعداد

مركز الدراسات والبحوث