مسارات الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية

م. عبير عدنان الخوري د.م بشرى درويش العكاري

الملخص:

يهدف المقال إلى تقديم دراسة عن توظيف الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية وماهي الأدوات المستخدمة حديثا في تصميم المنشآت الهندسية،كما يستعرض مسارات المهندس المدني في ظل التحول الرقمي. وأبرز التحديات لتطبيق الذكاء الاصطناعي في سورية.

-Abstract: This article aims to present a study on the application of artificial intelligence in civil engineering ,highlighting the modern tools used in the design of engineering structures.It also explores the career pathways of civil engineers in the context of digital transformation ,as well as the key challenges associated with implementing artificial intelligence in Syria

-الكلمات المفتاحية:

الذكاء الاصطناعي، المدن الذكية، التعلم العميق(DL)، التصميم الإنشائي التوليدي، تعلم الآلة(ML).

١. مقدمة تاريخية:

ظهر مصطلح الذكاء الاصطناعي لأول مرة في بداية الخمسينات على يد عالم الحاسوب الأمريكي (JOHN MCCARTHY) في مؤتمر دارتموث، بدأ دخول الذكاء الاصطناعي إلى عالم الهندسة المدنية بشكل تدريجي منذ مطلع الثمانينات من خلال تطبيقات محدودة وبسيطة كانت تقتصر على تحويل خبرة المهندس إلى قواعد (IF-THEN) داخل نظام حاسوبي[1].

ظهر التطور العملي الحقيقي بداية التسعينات حيث دخلت الشبكات العصبونية الاصطناعية (ANN) بقوة في التنبؤ بمقاومة الخرسانة (تحليل الهبوط في التربة، التنبؤ بالأحمال المرورية)، كما استخدمت الخوارزميات الجينية(GeneticAlgorithms) لتحسين التصاميم

الإنشائية وتقليل الكلفة[2] وتم دمج الذكاء الاصطناعي مع برامج التصميم الهندسي AUTOCAD,MATLAB عبر أدوات تحليل متقدمة.

وفي الفترة الممتدة بين(2000-2015) أصبح الذكاء الاصطناعي أداة تنبؤية لا مجرد محاكاة قرار فقد أصبح يستخدم في التنبؤ ع الأضرار والمخاطر في المنشآت.[3]

ومع ظهور التعلم العميق منذ 2015 وحتى الآن اندمج الذكاء الاصطناعي في نمذجة معلومات البناء والروبوتات في المواقع وظهر مفهوم المدن الذكية وتحليل البنية التحتية بالاعتماد على التعلم العميق.[4] فأصبح الذكاء الاصطناعي عنصراً عملياً ضمن دورة حياة التصاميم الهندسية.

٢. مفاهيم أساسية رقمية هندسية:

٢-١. الذكاء الاصطناعي (Artificial intelligence-AI): هو فرع من علوم الحاسوب يهدف إلى بناء أنظمة وبرمجيات قادرة على محاكاة القدرات الذهنية البشرية، مثل: الاستنتاج، حل المشكلات/التعلم ،اتخاذ القرارات

تعمل هذه التقنيات على تحليل البيانات الضخمة والتعرف على الأنماط وتوليد محتوى جديد مما يتيح للآلات التصرف بشكل مستقل.

٢-٢. تعلم الآلة (ML): هي خوارزميات تتعلم من البيانات لاستخراج أنماط تساعد على التنبؤ أو التصنيف.

٢-٢. التعلم العميق(Deep Learning): هو فرع من فروع تعلم الآلة يعتمد على طبقات متعددة من الشبكات العصبونية العميقة تمكن الآلة من معالجة المعلومات بطريقة مشابهة لدماغ الإنسان.

٢-٣. التصميم الإنشائي التوليدي (Generative design): هومنهج حديث في الهندسة المعمارية والمدنية يعتمد على الذكاء الاصطناعي والخوارزميات الحاسوبية لإنشاء حلول تصميمية مبتكرة للأنظمة الإنشائية بدلاً من أن يصمم المهندس كل التفاصيل يدوياً، يحدد المصمم : المعايير، القيود، والأهداف، ويقوم البرنامج أو الخوارزمية بتوليد عدد كبير من الخيارات الممكنة، ثم يتم اختيار الأنسب منها.

٢-٤. التوأمة الرقمية (Digital Twin): هي منهجية تستخدم منظومة متكاملة من التطبيقات والأدوات لإنشاء نسخة افتراضية دقيقة من نظام مبنى أو بنية تحتية حقيقية يتم تحديثها مع الوقت الحقيقي باستخدام البيانات الحية من المستشعرات وأجهزة القياس الفكرة هي إنشاء نموذج حي رقمي يعكس الواقع تماما بحيث يمكن مراقبته وتحليله ومحاكاته قبل اتخاذ أي قرار في الواقع.

٣- مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي:

اندمج الذكاء الاصطناعي في مختلف مجالات التعليم، الصحة، التجارة، النقل (سيارات وطائرات ذاتية القيادة)، الإعلام، الصناعة، الزراعة (الري الذكي)

في هذا المقال سيتم التركيز على مجالات استخدامه في الهندسة المدنية.

٤- مجالات استخدام الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية:[5]

يمكن استخدام الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية من أجل:

١. تحسين كفاءة ودقة التصاميم: حيث يتيح الذكاء الاصطناعي تحليل نماذج التصاميم الهندسية واكتشاف الأخطاء المحتملة قبل التنفيذ واستخدام التصميم الإنشائي التوليدي في ذلك.
٢. إدارة المشاريع والجدولة الذكية: يساعد في وضع جداول زمنية محسنة تتوقع المخاطر المحتملة مثل تقلبات الطقس أو نقص الموارد.

٣. الصيانة التنبؤية للبنية التحتية: يتم استخدام حساسات وكاميرات لمراقبة الحالة الإنشائية للمبنى (توقع انهيار الهياكل أو تدهورها، التنبؤ بسلوك التربة...) حيث يقوم الذكاء الاصطناعي بتحليل البيانات للتنبؤ بأي تدهورأو أعطال وشيكة مما يطيل العمر الافتراضي للمنشأ ويستخدم لذلك التوأمة الرقمية.
٤. تعزيز السلامة في مواقع العمل: يقوم الذكاء الاصطناعي بمراقبة سلوك العمال وحالة المعدات (استخدام الروبوتات الذكية، الطائرات بدون طيار لمراقبة الموقع...) إضافة للكشف الفعلي عن عدم الالتزام بمعايير السلامة، مما يساهم بشكل كبير في تقليل حوادث العمل.

٥. الاستدامة وإدارة الموارد :يساهم في تقليل الهدر في مواد البناء، وتحسين استخدام الطاقة والموارد الطبيعية، مما يدعم توجهات التنمية المستدامة.

٦. أتمتة المهام المتكررة والمجهدة: يقلل الذكاء الاصطناعي من الحاجة للتدخل البشري في المهام الرتيبة، مثل حصر الكميات أو عمليات البناء الآلية بحيث يزيد من الإنتاجية والدقة، ويقلل الأخطاء البشرية في الحسابات المعقدة.

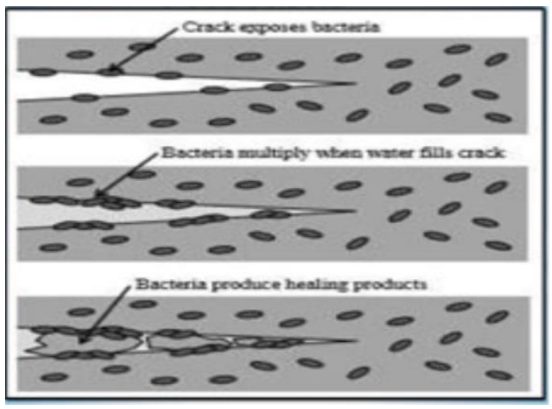
٧. تحليل البيانات الضخمة :يوفر القدرة على معالجة كميات ضخمة من البيانات ممايساعد على السرعة والقدرة في اتخاذ القرارات.

٥- أمثلة تطبيقية على استخدام الذكاء الاصطناعي في الهندسة المدنية:

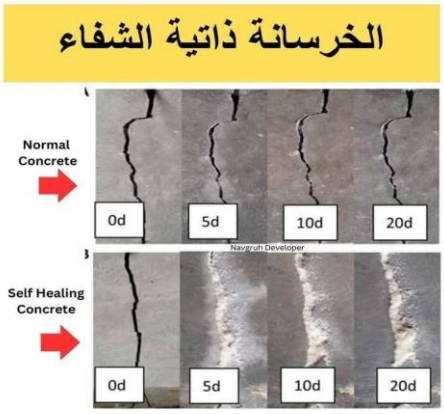
5-1.المواد ذاتية الشفاء المدعومة بالذكاء الاصطناعي(self-Healing Materials):

تعتبر هذه التقنية من أحدث التقنيات المستخدمة عالميا في مواد البناء وتشمل :

أ- الخرسانة ذاتية الشفاء:آلية عملها تعتمد على بكتيريا (Bacillus pseudofirmus) محصورة داخل كبسولات من الطين الممدد (قطر 4-2مم)تفرز كربونات الكالسيوم لتسد الشقوق إضافة إلى أليلف بصرية دقيقة (0.1مم)تنقل الضوء لتغذية البكتيريا وتحفيزها على النشاط،هذه الخرسانة تكون مدعمة بشبكة استشعار لاسلكية مكونة من أجهزة كهرضغطية تقيس الاهتزازات وترسلها على شكل بيانات لأجهزة مزودة بخوارزميات محددة تستطيع تحديد موقع التشقق بدقة 2سم، بعد تحديد موقع التشقق وكان عرض الشق أكبر من 0.05مم يضخ النظام خليطاً مغذياً (يوريات الكالسيوم واللاكتات)عبر شبكة أنابيب شعرية مدمجةفي الخرسانة تساعد التقنية السابقة بإغلاق تشققات خرسانية تصل إلى 0.8مم خلال 14يوم.



الشكل (1) عمل البكتيريا في الخرسانة ذاتية الشفاء



الشكل(2)مثال عملي عن خرسانة ذاتية الشفاء

ب- الاسفلت الذاتي الإصلاح:آلية عمله عبارة عن ألياف معدنية قصيرة (طول 5مم) مخلوطة في الإسفلت، وتذوب عند تسخينها بالحث الكهرومغناطيسي لتملأ التشققات الموجودة في جسم الطريق ،وجسيمات نانوية من أكسيد الحديد توزع بنمط محدد بواسطة الذكاء الاصطناعي لزيادة امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية،ويستخدم لإتمام عملية الترميم كاميرات حرارية وأشعة تحت حمراء لمسح الطرق بسرعة 80كم/ساعة تكتشف الشقوق السطحية والتشققات الداخلية وترسلهاعلى شكل بيانات لبرامج تحوي على خوارزميات لتحسين التدفئة تحدد تردد وتيار ملف الحث المار أسفل الطريق لتسخين المنطقة المصابة فقط حتى 130ºC(درجة انصهار الألياف)دون إتلاف المناطق المجاورة.

تساعد التقنية السابقة في إصلاح شقوق بعمق 4سم في أقل من3 دقائق،وفي زيادة العمر الافتراضي للطريق من 12 إلى 25 سنة.

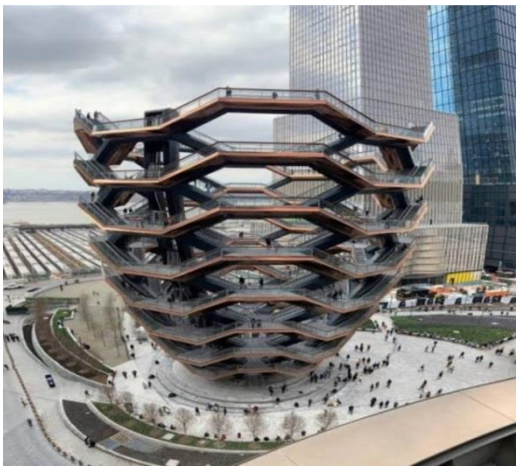
ت- البوليمرات ذات الشفاء الذاتي (للعزل):آلية عملها يعتمد على ميكروكابسولات(قطر50ميكرومتر) تحوي على بوليمرات وعامل محفز تنفجر عند حدوث شروخ عن طريق تفاعل البلمرة تعتمد هذه التقنية على الذكاء الاصطناعي عن طريق استخدام كاميرات تصور السطح المتضرر وتكتشف الشقوق قبل أن يتجاوز عرضها 0.01مم.

تستخدم التقنية السابقة بشكل فعال في عوازل الكابلات الكهربائية بإصلاح ذاتي يمنع الحرائق الناتجة عن التسرب،إضافة إلى استخدامها في الجسور البحرية لإغلاق الخدوش.

2-5 . استخدام التصميم الإنشائي التوليدي (Generative Design) لتقديم حلول تصميمية عديدة لمختلف المباني مثال على ذلك:

أ_برج" THE Vessel" في مجمع(*Hudson Yards) في نيويورك:*

تم استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي ضمن عمليات التصميم من خلال الاعتماد على التصميم الإنشائي التوليدي (Generative Design) [6] حيث اعتمد المصمم على خوارزميات تصميم بارامتري توليدي لتوليد شكل الهيكل المعقد المكوَن من سلالم متشابكة،حيث تم إدخال معايير متعددة في النظام (مثل عدد الزوار ،مسارات الحركة،الارتفاع،الأحمال) ثم توليد مئات النماذج المحتملة ثم تم ربط التصميم التوليدي ببرامج تحليل إنشائي لمحاكاة الإجهادات والاهتزازات مما سمح باختيار حل أكثر أمان وكفاءة.



الشكل (3) برج the vessel حالياً

الشكل(4) برج the vessel أثناء الإنشاء.

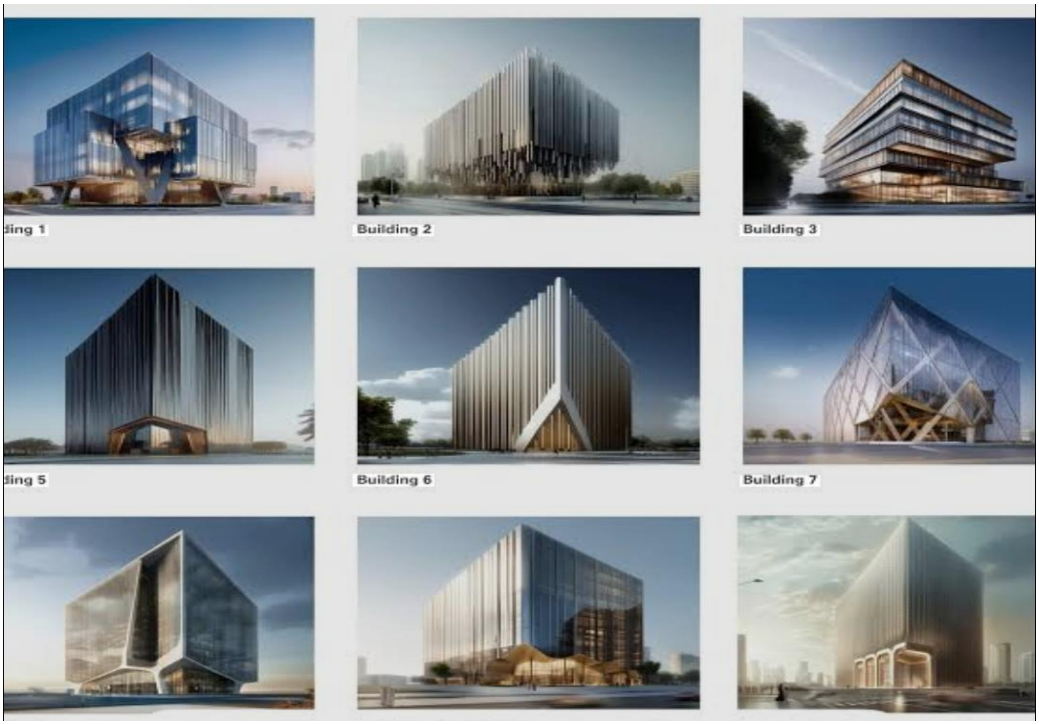
ب_مشروع District 11 الشارقة، الإمارات:

هو أول حي ذكي في الإمارات يحوي على نظام بيئي مصمم بالذكاء الاصطناعي لتحديد مدى تدفق الهواء في الشوارع حيث أدخل المصممون معايير متعددة (المناخ الحار،الظل، حركة المستخدمين ،الوظائف المختلفة) تم قامت الخوارزميات بتوليد حلول تصميمية متنوعة ساعدت هذه الحلول المصممين على توزيع الكتل المعمارية وتحسين كفاءة الطاقة وخلق بيئة مرنة تجمع بين العمل والرفاهية، حيث تم إنتاج 11 مبنى مختلف من مكاتب، ومتاجر البيع بالتجزئة وفنادق ومساحات مخصصة لركن السيارات وغيرها.[7]

يظهر الشكل (5) الحي كاملاً، والشكل(6) صورة من داخل الحي، كما يبين الشكل (7) المباني الموجودة ضمن الحي.

الشكل(5) نموذج تصميمي توليدي لكامل حي "DISTACT11"

الشكل(6) نموذج تصميمي توليدي لداخل حي "DISTRICT11"



الشكل (7) نماذج تصميمية توليدية للمباني ضمن حي"DISTRICT11"

3-5.استخدام التوأمة الرقمية (digital twin) في جسر(Nibelungen Bridge)ألمانيا:

تـم تطبيـق التوأمـة الرقميـة لإدارة دورة حيـاة الجسـر مـن التصـميم إلـى الصـيانة التشـغيلية**[9]** ويظهـر فـي الشـكل (8)،حيـث تـم تركيـب نظـام مراقبـة صـحية إنشـائية علـى الجسـر يشـمل اسـتخدام حساسات لقياس(درجات الحرارة والرطوبة والتسارع والاهتزاز والإزاحة والإجهادات).

وبنـاء بنـاء نمـوذج افتراضـي رقمـي باسـتخدام تقنيـات نمذجـة معلومـات البنـاء**(BIM)** ونمذجـة العناصـر المحـدودة التـي تسـاعد فـي حسـاب الإجهـادات والتشـوهات الحاصـلة فـي الجسربالإضـافة إلـى ربـط البيانـات التـي ترسـل مـن الحساسـات بنمـوذج رقمـي يـتم تحديثـه بشـكل مستمر ممـا يسـمح بمحاكـاة الحالـة الحاليـة للجسـر بدقـة عاليـة هـذا يتـيح للنظـام اكتشـاف الأضـرار مبكراً وإصدار انذارات تلقائية واقتراح إجراءات مثل (الصيانة أو إغلاق الجسر عند الخطر)

الشكل(8) "Nibelungen bridge"

٦- الفرق بين التوأمة الرقمية والتصميم الإنشائي التوليدي:

هناك فرق بين التوأمة الرقمية والتصميم الإنشائي التوليدي من حيث الهدف والمرحلة والمخرجات وطبيعة العمل كما يظهر في الجدول(١)

الجدول (١) الفرق بين التوأمة الرقمية والتصميم الإنشائي التوليدي

المقارنة	التصميم الإنشائي التوليدي	التوأمة الرقمية
المرحلة	قبل تنفيذ المنشأ	بعد التنفيذ المنشأ
الهدف	إيجاد أفضل تصميم إنشائي	مراقبة وتحليل الأداء الواقعي
المدخلات	قيود هندسية،أحمال،نوع المواد،حدود التكلفة،متطلبات معمارية	بيانات حقيقية من الحساسات
المخرجات	بدائل تصميمية متعددة	نموذج حي محدث باستمرار
طبيعة العمل	تطويرية	مراقبة وتحليل وتشغيل
بعض التطبيقات المستخدمة	Rhino 3D,REVIT,DYNAMO, ANSYS,ETABS,SAP2000,ROBOT	TEKLA,REVIT,GIS, أنظمة انترنيت الأشياء IOT ,ANSYS,SAP2000 وغيرها

٧- القيود والتحديات لاستخدام الذكاء الاصطناعي في سورية :

هناك العديد من التحديات التي تعرقل استخدام الذكاء الاصطناعي في بلدنا في الوقت الحالي وأبرزها:

٧-١ . *على الصعيد الفردي*: يوجد عدة تحديات أهمها:

١. نقص المهارات الفردية في مجال لغات البرمجة التخصصية.
٢. صعوبة تفسير نماذج الذكاء الاصطناعي.
٣. مقاومة التغيير في بعض المؤسسات من قبل المكون البشري خوفاً أن يلغي الذكاء الاصطناعي بعض وظائفه.

٧-٢ .*على صعيد المؤسسات*: أبرز التحديات التي تواجه المؤسسات من الناحية التقنية والإجرائية لاستخدام الذكاء الاصطناعي في المؤسسات تتلخص بالنقاط التالية:

١. الحاجة إلى بيانات عالية الجودة.
٢. التكلفة الأولية لتطبيق الأنظمة الذكية.
٣. الحاجة إلى تشريعات واضحة ومخاوف تتعلق بالأمان والمسؤولية القانونية.
٤. مخاطر الأمن السيبراني.
٥. عدم وضوح العائد من الاستثمار.

٦. مشكلة " الصندوق الأسود" حيث تفتقر النماذج العميقة لقابلية التفسير.

٨- مسارات المهندس المدني على خارطة العالم الرقمي مستقبلاً:[10]

أهم مسارات المهندس المدني:

٨-١. *مهندس نمذجة معلومات بناء (BIM ENGINEER): يقوم* المهندس بإنشاء نماذج رقمية ثلاثية الأبعاد للمباني والبنية التحتية واستخدام الذكاء الاصطناعي لاكتشاف الأخطاء قبل التنفيذ

٨-٢. *مهندس مدن ذكية: يعمل على* تطوير أنظمة مرور ذكية، شبكات مياه وكهرباء متصلة.

٨-٣. *مهندس إدارة مشاريع بالذكاء* الاصطناعي: يقوم المهندس باستخدام أدوات "تحليل بيانات" للتنبؤ بالتأخير في المشاريع المختلفة، كذلك يقوم بتحسين الجداول الزمنية والتكلفة عبر خوارزميات ذكية ، ويمكنه إدارة المخاطر باستخدام أنظمة تنبؤية.

٨-٤. *مهندس استدامة وبناء أخضر: حيث يعمل على* تصميم مباني صديقة للبيئة، واستخدام أنظمة ذكاء اصطناعي لتقليل استهلاك الطاقة، ويقوم بتطوير حلول لتقليل الانبعاثات الكربونية.

٨-٥. مهندس بنية تحتية رقمية: يعد من أهم المسارات حيث يقوم بتحليل البيانات للكشف المبكر عن التشققات والأعطال، كما يقوم بتطبيق الصيانة التنبؤية بدل التقليدية.

٨-٦. مهندس روبوتات وإنشاءات آلية: حيث يشرف على روبوتات البناء والطباعة ثلاثية الأبعاد.

٨-٧. مهندس تحليل بيانات إنشائية: يقوم بتحليل بيانات الأحمال والاهتزازات للمباني باستخدام التعلم الآلي، والتنبؤ بأحمال المباني في الزلازل والكوارث، تحسين تصميم الهياكل باستخدام خوارزميات متقدمة.

٨-٨. مهندس سلامة باستخدام الذكاء الاصطناعي: يعمل على تركيب كاميرات وأنظمة رؤية حاسوبية، وتحسين معايير السلامة المهنية باستخدام البيانات.

٩- النتيجة:

بالرغم من القدرات المذهلة للذكاء الاصطناعي هناك مهارات بشرية لا يمكن للذكاء استبدالها ومن بينها المعيار في:

١. حل المشكلات المعقدة: فعلى الرغم من أن الذكاء الاصطناعي أظهر قدرات على تحسين المهام المحددة إلا أنه يبقى يعتمد على الحكم البشري لمعالجة المواقف الغامضة ذات المتغيرات المتعددة وعدم وجود حلول واضحة أو محددة مسبقاً.

٢. القدرة على التعاون: على الرغم من أن الخوارزميات قادرة على العمل بشكل مستقل إلا أن العمل الجماعي لا يزال يعتمد على المهارات البشرية مثل الاستماع النشط والتعاطف والتفاوض وإدارة الصراعات.

٣. التعلم المستمر:

التعلم المستمر هو مهارة إنسانية لايستطيع الذكاء الاصطناعي محاكاتها بالكامل. على عكس نماذج الذكاء الاصطناعي التي تتطلب كميات كبيرة من البيانات والتدريب المحددة لمواكبة التطورات، يتعلم البشر بمرونة وبشكل سياقي ويتكيفون مع البيئات المتغيرة والتجارب الجديدةحيث يدمج البشر العواطف والحدس والحكم في عمليات التعلم الخاصة بهم ممايسمح لهم بالاستجابة بشكل إبداعي لما هو غير متوقع.

٤.التفكير النقدي:

إن التحميل الزائد بالمعلومات أصبح يشكل تحدياً في عصر الذكاء الاصطناعي في ظل ذلك يصبح الحكم البشري ضرورياَ للتحقق من المصادر واكتشاف التحيزات المحتملة التي يمكن للذكاء الاصطناعي تكرارها أو حتى تكثيفها فلن يكون كافياً معالجة المعلومات بل فهمها والتساؤل حولها واستخدامها بشكل مسؤول.

بالتالي على المهندس في العالم الرقمي امتلاك:

فهم عميق للتصاميم ومهارات التفكير النقدي واتخاذ القرارات إضافة إلى القدرة على العمل الجماعي والتواصل و إدارة المشاريع المعقدة والإبقاء على الإبداع في التصميم الهندسي وليس فقط أتمتة عمليات حسابية.

١٠-التوصيات:

للاستفادة المثلى من الذكاء الاصطناعي ينصح :

بالاستثمار في تأهيل الكوادر وبناء المهارات الرقمية .

البدء بمشاريع تجريبية محدودة لتقييم الجدوى قبل التوسع.

التركيز على جودة البيانات وتوحيدها كأساس لأي نظام ذكاء اصطناعي.

تطوير أطر حوكمة أخلاقية مسبقة للاستخدام المسؤول للتقنية.

١١ـ الخاتمة:

يمثل الذكاء الاصطناعي مساراً تحويلياً في الهندسة المدنية،يمتد من التصميم التوليدي إلى المراقبة الذكية وإدارة المشاريع غير أن هذا الانتقال من مرحلة التفاؤل إلى التبني الواسع يتطلب تخطيطاً استراتيجياً واستثمار في المهارات والبنية التحتية للبيانات وتطوير أطر تنظيمية تضمن الاستخدام الآمن والفعّال بما يضمن التزام صارم بحماية ملكية بيانات المهندسين ،فالنجاح لم يعد في بناء أسرع بل في بناء أكثر ذكاء واستدامة.

١٢ـ المراجع المستخدمة:

[1]- Adeli, H.(2001).Neural Networks in Civil Engineering:1989-2000 Computer-Aided civil and Infrastructure Engineering, 16(2), 126-142

[2]- Flood, I.,& Kartam, N (1994).Neural Networks in Civil Engineering I:Principles and Understanding.Journal Of Computing in Civil Engineering, ASCE

[3]- Woden, K.,& Manson, G.(2007).The application of machine Learning to structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A.

[4]- Pan,Y.,Zhang,L.(2021).Roles of artificial intelligence in construction.engineering and management.Automation in Construction,122

Zhao¸X.AI in civil Engineering.AI -[5]
civ.Eng.1¸1(2022).http://doi.org/10.1007/s43503-022-00006-8

American Society Of Civil Engineers(ASCE).(2025).Vessel at -[6]
Hudson Yards: Design¸ fabrication¸ and construction of a complex steel structure. ASCE Library.

Marchese¸K.(2025¸November19).Artifical intelligence takes the [7]
lead in urban design with sharjah's District11.AD Middle East.https://www.admiddheeast.com/story/artifical-intelligence-takes-the-lead-with-sharjahs-district-11

A. et al.(2025). Digital twin technologies for bridge lifecycle - [8]
management-Literature insights and a pilot study on the Nibelungen Bridge.Results in
Engineering.http//doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108288

Kang¸ C.¸ Walker¸ M.¸ Bartels¸ J.¸-H.¸ Marzahn¸ -[9]
G.¸&Marx¸S.(2025) Digital twin technologies for bridge lifecycle management-Literature insights and a pilot study on the Nibelungen Bridge. http://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108288