Vol 10 / Issue 40 / June 2026
ISSN 2568-6739 p214-260

Journal of social sciences
Democratic Arabic Center For Strategic, Political & Economic Studies, Germany-Berlin

# *Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions*

**David B. Olawade, et.al.**

**( Hygiene & Environmental Health Advances. 12 (2024).10014)**

**Translators**

**Mohamed Kamel Abdel-Daem***
**Port Said University, Egypt**
**mabdeldaem999@gmail.com**
**https://orcid.org/0009-0007-0386-1454**
**Sanad Motlaq Al-Sobaie**
**Shaqra University, KSA**
**salsobaei@su.edu.sa**

**https://doi.org/10.63939/JSS.2026-Vol10.N40.214-260**
**Received**: 08/05/2026, **Accepted**: 19/06/2026, **Published:** 30/06/2026

**Abstract:** The application of Artificial Intelligence (AI) in environmental monitoring offers accurate disaster forecasts, pollution source detection, and comprehensive air and water quality monitoring. This article provides an overview of the value of environmental monitoring, the challenges of conventional methods, and potential AI-based solutions. Several significant AI applications in environmental monitoring are highlighted, showcasing their contributions to effective environnemental management. AI technologies enhance environemental monitoring by enabling better understanding, prediction, and mitigation of environmental risks. However, realizing the full potential of AI faces hurdles such as a shortage of specialized AI experts in the environmental sector and challenges related to data access, control, and privacy. These issues are more pronounced in regions with developing technological infrastructure. The paper advocates for proactive data governance measures by governments to protect sensitive information. Despite these challenges, the future of AI in environmental monitoring remains promising, with advancements in AI algorithms, data collection techniques, and computing power expected to further improve accuracy and efficiency in pollution monitoring and management.

**Keywords**: Artificial Intelligence, Environmental Monitoring, Environmental Disasters, Environmental Risks.

©2026, Mohamed Kamel Abdel-Daem. Sanad Motlaq Al-Sobaie, licensee DemocraticArab Center.This article is published under the terms of the Creative Commons Attribution -NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC4.0), which permits non-commercial use of the material, appropriate credit, and indication if changes in the material were made. You can copy and red istribute the material inanymedium or format as well as remix, transform, and build upon the material, provided the original work is properly cited.// https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

**Corresponding author*

المجلد:10/العدد 40/جوان 2026
ISSN 2568-6739 ص214-260
مجلة العلوم الإجتماعية
المركز الديمقراطي العربي ألمانيا-برلين

# الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية: التطورات والتحديات والتوجهات المستقبلية

**دايفيد ب. أولاويد وآخرون**

**المترجمان**

**د. محمد كامل عبد الدايم**

**جامعة بورسعيد، مصر**

**mabdeldaem999@gmail.com**

**https://orcid.org/0009-0007-0386-1454**

**أ.د سند مطلق السبيعي**

**جامعة شقراء – السعودية**

**salsobaei@su.edu.sa**

**https://doi.org/10.63939/JSS.2026-Vol10.N40.214-260**

**تاريخ الإرسال**: 2026/05/08 **تاريخ القبول**: 2026/06/19 **تاريخ النشر**: 2026/06/30

**ملخص:** تتميز تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستعملة في المراقبة البيئية بعرضها لتنبؤات دقيقة بالكوارث البيئية و الكشف الدقيق عن مصادر التلوث والمراقبة الشاملة لجودة الهواء والمياه. ففي هذه المقالة البحثية دراسة موجزة عن أهمية المراقبة البيئية والتحديات التي تواجه طرق المراقبة التقليدية وإمكانية إيجاد حلول قائمة على الذكاء الاصطناعي لتلك التحديات. ويسلط البحث الضوء على العديد من تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستعملة في المراقبة البيئية، مع بيان فائدتها للوصول إلى إدارة بيئية ذات فاعلية. حيث تسهم تقنيات الذكاء الاصطناعي في تعزيز المراقبة البيئية وذلك عن طريق إتاحة فهم أفضل للمخاطر البيئية وتوقع حدوثها والحد من تلك المخاطر. ومع ذلك فإن الوصول لإمكانات قصوى للذكاء الاصطناعي تواجهه بعض المعوقات مثل نقص عدد خبراء الذكاء الاصطناعي المختصين في القطاع البيئي بالإضافة إلى صعوبات تتعلق بالبيانات من حيث سهولة الوصول إليها وتنظيمها و خصوصيتها. وغالبا ما تثار هذه القضايا في بلدان نامية من حيث البنية التحتية التقنية. ويحث الباحثون الحكومات على اتخاذ إجراءات استباقية فيما يخص حوكمة البيانات من أجل حماية المعلومات الحساسة. ومع كل هذا التقدم في مجالات خوارزميات الذكاء الاصطناعي وأساليب جمع البيانات والقدرات الحوسبية، فإن ثمة مستقبل واعد أمام استعمال الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية رغم كل التحديات، مما يبشر بمزيد من التطور في عمليات مراقبة وإدارة التلوث البيئي.

**الكلمات المفتاحية:** الذكاء الإصطناعي، المراقبة البيئية، الكوارث البيئية، المخاطر البيئية.

©2026, Mohamed Kamel Abdel-Daem. Sanad Motlaq Al-Sobaie, licensee DemocraticArab Center.This article is published under the terms of the Creative Commons Attribution -NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC4.0), which permits non-commercial use of the material, appropriate credit, and indication if changes in the material were made. You can copy and red istribute the material inanymedium or format as well as remix, transform, and build upon the material, provided the original work is properly cited.// https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

*Corresponding author

**مقدمة:**

إن لعملية المراقبة البيئية ضرورة بالغة، وهي تتضمن عدة إجراءات منظمة مثل ملاحظةوقياس وتقييم حالة البيئة الطبيعية بكل عناصرها. فالهدف الرئيس لهذه العملية هو مراقبة الوضع البيئي لحظة بلحظة وتحديد التغيرات التي قد تضر بالنظام البيئي أو الصحة العامة. وفي هذا تفوق على الأساليب التقليدية للمراقبة البيئية والمتمثلة في التحليل الإحصائي والتحليل المخبري والتصنيف اليدوي للعينات. حيث إن ما يعيب تلك الوسائل التقليدية هو التكلفة الباهظة وطول مدة الإجراءات وعدم توافر الدقة اللازمة.

فهناك العديد من المشكلات التي تفرض قيودا على كفاءة الوسائل التقليدية للمراقبة البيئية، ويعد ارتفاع تكلفة هذه الوسائل واحدا من أكبر تلك المعوقات، حيث تزداد التكلفة المتعلقة بكل من التصنيف اليدوي للعينات والتحليل المخبري،فهي تتضمن تكلفة العمالة الماهرة والمعدات والمواد الكيميائية اللازمة. لذا تفتقد برامج المراقبة البيئية إلى القدر الكافي من الاهتمام، حيث تعتمد على حجم ضئيل من العينات، وبالتالي لا يمكنها تقديم صورة شاملة عن حالة البيئة. كما أن التكثيف الزمني للطرق التقليدية يعد من المشكلات المهمة أيضا. فقد تستغرق عملية إعطاء النتائج باستعمال الطرق التقليدية للتصنيف اليدوي للعينات والتحليل المخبري بضعة أسابيع أو حتى شهور، مما يؤدي إلى تأخير عملية صنع القرار والاستجابة للطوارئ في حال حدوث كوارث طبيعية أو أزمات بيئية بسبب التلوث. كما أن الملاحظة البشرية قد تتأثر بعوامل شخصية مما يزيد من احتمالية حدوث أخطاء بشرية، وبالتالي فإن ذلك يؤثر سلبا على دقة الأساليب التقليدية للمراقبة البيئية. حيث أن قيام الأشخاص بإنجاز التفسيرات اللازمة للتصنيف اليدوي للعينات قد ينتج عنه تذبذب في عملية جمع ومعالجة البيانات.

علاوة على أن قيود التكلفة وندرة العمالة المؤهلة غالبا ما تعيق استخدام التقنيات المتطورة، كما أنها لا تسمح بتوافر طاقم فني حاصل على التدريب الكافي ليتمكن من إنجاز مراقبة بيئية تتصف بالدقة العالية، مما يجعل عملية المراقبة عملا شاقا لا سيما في البلدان ذات الموارد

المحدودة، ويظهر هذا جليا في المناطق التي تفتقد لوجود مستلزمات التكنولوجيا،من بنية تحتية وخبرات بشرية.

لذا يتم استعمال الذكاء الاصطناعي باعتباره أحد العناصر الأساسية في عمليات المراقبة البيئية، ولقد أدي ذلك إلى تعزيز عملية إخراج نتائج موضوعية وتطوير لإمكانية الوصول إلى المناطق التي تعاني من محدودية الموارد. ويعد الذكاء الاصطناعي واحدا من فروع علوم الحاسوب، والذي يركز على ابتكار خوارزميات وبرامج حاسوبية يمكنها القيام بعدة مهام مثل الاستشعار و الاستنتاج والتعلم واتخاذ القرار، ومن الطبيعي أن يحتاج إنجاز تلك المهام إلى تدخل العقل البشري. حيث يفيد الذكاء الاصطناعي في تحليل مجموعات كبيرة من البيانات و تحديد أنماطها وعمل توقعات دقيقة بشأنها. وتتنوع مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية: ومن تلك المجالات التنبؤ بالكوارث الطبيعية ومراقبة جودة الهواء وجودة المياه و تحديد أنواع الملوثات. ويعرض جدول رقم "1" تحليلا مقارنا بين أساليب الذكاء الاصطناعي والطرق التقليدية، من حيث: الدقة والسرعة والتكلفة وقابلية القياس وتوحيد البيانات والصيانة و الأثر البيئي. حيث تظهر هذه المقارنة مزايا الذكاء الاصطناعي والمتمثلة في تعزيز كفاءة وفعالية المراقبة البيئية، بينما تسلط الضوء على التكاليف المبدئية المتوقعة، كما توضح أهمية التركيز على أوجه الاستفادة بعيدة المدى.

فعلى سبيل المثال, تعد الشبكات العصبية التلفيفية (CNNs)أحد نماذج الذكاء الاصطناعي، والذي يستعمل في مهام المراقبة البيئية التصويرية مثل الكشف عن حالات إزالة الغابات واستكشاف الحياة البرية. ويتم استعمال الآلات ناقلة الدعم (SVMs) للتنبؤ بعملية إزهار الطحالب الضارة في البحيرات، مما يوضح كفاءة هذا النموذج في التعامل مع بيانات واسعة النطاق. أما الشبكات العصبية الدورية(RNNs) فيتم توظيفها لإنجاز التوقعات المتوالية زمنيا مثل التنبؤ بحدوث الفيضانات بالاستناد إلى بيانات عن تاريخ هطول الأمطار.

ومع هذا، فإن قيود التكلفة وندرة الكفاءات المدربة غالبا ما تعوقان الاستفادة من التقنيات المتطورة،ولا تؤديان إلى توافر الفنيين المزودين بتدريب متميز،و يعد كل ذلك من ضرورات المراقبة البيئية. ولذلك تصعب مهمة الوصول إلى مراقبة بيئية منتظمة، لاسيما في المناطق ذات الموارد المحدودة، كما هو الحال في البلدان النامية والفقيرة. لذا ظهر الذكاء الاصطناعي في السنوات الأخيرة باعتباره جزءًا لا يتجزأ من مساعي المراقبة البيئية، مستهدفا تعزيز موضوعية النتائج وتيسير إمكانية الوصول إلى المناطق التي تعاني من قصور في الموارد. حيث يتضمن هذا البحث دراسة وتقييما شاملا للوضع الحالي لاستعمال تقنيات الذكاء الاصطناعي في مجالات حيوية للمراقبة البيئية، كما يتم تسليط الضوء على مدى فعالية تلك التقنيات وأثرها المستقبلي على البحوث والتطبيقات العملية.

**نماذج الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية:-**

هناك عدة عوامل يتعين أخذها في الاعتبار عند القيام بانتقاء أحد نماذج الذكاء الاصطناعي من أجل تطبيقه في المراقبة البيئية، وتتمثل هذه العوامل فيما يلي:- توافر البيانات و الموارد والخبرات الحاسوبية. فبعض نماذج الذكاء الاصطناعي تتطلب قدرا هائلا من البيانات وقدرات حاسوبية كبيرة من أجل التدريب على استعمالها، بينما يمكن استخدام تطبيقات أخرى بالاعتماد على حجم أصغر من البيانات وبتكلفة حاسوبية أقل. فمثلا, يمكن تهيئة الآلات ناقلة الدعم (SVMs) من أجل التعامل مع بيانات عالية الأبعاد واستيعاب العلاقات المعقدة بين المتغيرات. حيث يمكن استخدام الآلات ناقلة الدعم (SVMs)مع أنواع مختلفة من البيانات مثل الصور والنصوص المكتوبة. فعلى سبيل المثال، تم استعمال الآلات ناقلة الدعم (SVMs) بكفاءة في مهام تصنيف الصور، مثل الكشف عن إزالة الغابات واستكشاف الحياة البرية. كما يتم تطبيقها أيضا في مجال المعالجة اللغوية الطبيعية من أجل استخلاص المعلومات اللازمة للتقارير البيئية. ويعد الارتداد ناقل الدعم(SVR) وهو من أنماط الآلات ناقلة الدعم (SVMs) والذي

يستعمل لمواجهة مشكلات تدهور المراقبة البيئية، حيث يقدم حلولا فعالة للتنبؤ بالمتغيرات في عملية المراقبة البيئية.

أما نموذج أشجار القرار فنجد أنه من اليسير نسبيا التدرب على استعماله واستيعابه، مما يسهل من إمكانية الوصول إلى انواع مختلفة من البيانات. وغالبا ما يتم تطبيق هذا النموذج في مهام مثل الكشف عن إزالة الغابات ومراقبة جودة الهواء وجودة المياه. ومع ذلك فإن نموذج أشجار القرار قد يتجاوز ملاءمته لاستعمالات عدة، لاسيما عند معالجة كميات هائلة من البيانات المعقدة، كما أنه قد لا يتصف بالتميز عند استعماله في مهام التعرف على الصور أو المعالجة اللغوية الطبيعية.

يتألف نموذج الغابات العشوائية من عدة أجزاء، حيث يتضمن تنبؤات عن نموذج أشجار القرار المتعدد. فهو يتميز بمتانة تركيبية أكبر تجعله أكثر ملاءمة من نموذج أشجار القرار الأحادي، كما يمكنه التعامل مع أنواع مختلفة من البيانات بما فيها الصور والنصوص المكتوبة. وغالبا ما يستخدم نموذج الغابات العشوائية في مهام المراقبة البيئية، مثل تصنيف الصور والمعالجة اللغوية الطبيعية و التوقعات المتوالية زمنيا. وبالرغم من متانة نموذج الغابات العشوائية، إلا أنه قد يتصف بكثافة حاسوبية شديدة، مما يتطلب قوة ذاكرة و معالجة كبيرة.

ويمكن استعمال نموذج الشبكات العصبية التلفيفية (CNNs) ليلائم مهام تصنيف الصور وكذلك المهام التي تتضمن البيانات المكانية. حيث أنه دون الحاجة إلى برمجة مباشرة،يتمكن نموذج الشبكات العصبية التلفيفية (CNNs) من استيعاب أنماط معقدة من الصور مما يجعله مناسبا تماما لعمليتي الكشف عن إزالة الغابات و استكشاف الحياة البرية. ومع هذا، فقد تزداد التكلفة الحاسوبية للتدريب على استعمال نموذج الشبكات العصبية التلفيفية (CNNs) ، مما يتطلب قدرا هائلا من البيانات المصنفة. وقد تصعب عملية التدريب على استعمال نموذج(CNNs)نظرا لعدم توافر تفسيرات لمجموعات البيانات اللازمة للتمييز البصري. ويمكن التغلب على هذه المشكلة عن طريق الاستعانة بنماذج ما قبل التدريب والتي تستخدم بيانات مأخوذة من مجالات مشابهة.

ويناسب نموذج الشبكات العصبية الدورية (RNNs) المهام التي تتضمن بيانات متسلسلة مثل التوقعات المتوالية زمنيا و المعالجة اللغوية الطبيعية. حيث يستطيع نموذج الشبكات العصبية الدورية (RNNs) استيعاب متتابعات طويلة المدى من البيانات، مما يمكنه من التنبؤ بحالات الطقس شديدة القسوة واستخلاص المعلومات من التقارير البيئية. ومع ذلك، قد تزداد التكلفة الحاسوبية للتدريب على استعمال نموذج (RNNs) مما يتطلب مجموعات كبيرة من البيانات. ولقد تم تطوير نماذج متقدمة مثل نموذج الذاكرة قصيرة المدى ذات التلافيف العميقة الطويلة (CDLSTM) من أجل دقة أكثر لعمل تنبؤات بالتغيرات المناخية وتصميم نماذج عن التغيرات في مخزون المياه الجوفية.

تجمع النماذج الهجينة بين نقاط القوة لكل من نماذج التعلم الآلي ونماذج التعلم العميق، مما يرفع درجة الدقة والمتانة بها. وتستخدم تلك النماذج في مهام المراقبة البيئية التي تتطلب تمثيل التفاعلات اللاخطية المعقدة بين متغيرات المدخلات والمخرجات. ورغم الصعوبة المحتملة لتفسير النماذج الهجينة والتدريب على استعمالها، إلا إنها توفر أداءًا فائقا للقيام بمهام المراقبة البيئية عالية المخاطر. وفي هذا الصدد، يمكن أيضا توظيف الذكاء الاصطناعي في استعمالات أخرى مثل تطوير نموذج التقنية الاصطناعية لأخذ عينات الأقلية باستعمال الشبكات العصبية العميقة (SMOTEDNN) وذلك للقيام بتوقعات عن تلوث الهواء وتصنيفات مؤشر جودة الهواء(AQI) .

و يعرض جدول رقم 2مجموعة متنوعة من نماذج الذكاء الاصطناعي المستعملة في المراقبة البيئية. فلكل نموذج من تلك النماذج مزايا وعيوب، مما يعطي أهمية لعملية اختيار النموذج المناسب لكل مهمة على حدا. وقد أظهر كل من نموذج (SVMs) و نموذج (SVR) فعالية للقيام بكل من المهام عالية الأبعاد ومهام الارتداد, إلا إن تكلفتهما الحاسوبية باهظة. ويتميز نموذج أشجار القرار ببساطته وسهولة تفسيره، إلا إنه عرضة لأن يكون ملائما أكثر مما يلزم. أما نموذج الغابات العشوائية فيتسم بمتانته وتعدد استعمالاته، إلا إنه يحتاج إلى موارد حاسوبية كبيرة. ويظهر تميز نموذج (CNNs) في المهام المرتكزة على الصور رغم احتياجه لتوافر كمية

كبيرة من مجموعات البيانات المصنفة، وكذلك ضرورة توافر قوة حاسوبية كبيرة. كما يتصف نموذج (RNNs) بفعاليته عند استعماله مع البيانات المتسلسلة، إلا إنه يحتاج أيضا إلى موارد حاسوبية هائلة، وكذلك توافر نماذج متطورة مثل نموذج (CDLSTM) وذلك لإتمام مهام معقدة مثل القيام بالتوقعات. أما النماذج الهجينة فيمكنها توفير أعلى درجة من الدقة والمتانة، رغم صعوبة تفسيرها والتدريب على استعمالها.

**المبادئ التي ترتكز عليها نماذج الذكاء الاصطناعي:**

يستند تصميم نماذج الذكاء الاصطناعي على عدد من المبادئ الاسترشادية والتي تشكل حجر الأساس لجميع النظم الذكية. وتعد هذه المبادئ بمثابة خارطة الطريق التي تسهم في تكوين نماذج الذكاء الاصطناعي التي يمكنها التعامل مع المشكلات المعقدة وأتمتة المهام واتخاذ قرارات مبنية على معلومات. ويرتكز تصميم نماذج الذكاء الاصطناعي في الأساس على مبدأ التعلم القائم على البيانات. فالإدعاء بدور بالغ الأهميةللبيانات في تصميم نماذج الذكاء الاصطناعي لا يعد مبالغة. حيث يمكن لنماذج الذكاء الاصطناعي استيعاب مجموعات واسعة من البيانات، والغوص عبر تلك البيانات من أجل فهم الأنماط والتوجهات والعلاقات. ففي عملية مراقبة جودة الهواء مثلا، تقوم نماذج الذكاء الاصطناعي بتحليل البيانات المسجلة على أجهزة الاستشعار المختلفة من أجل التنبؤ بمستويات التلوث وتحديد مصادره، كما هو موضح عن طريق نموذج (SMOTEDNN) والمستعمل للقيام بتوقعات تلوث الهواء وتصنيفات مؤشر جودة الهواء(AQI). وفي مثال آخر، تستعمل نماذج الذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة المياه عن طريق تحليل مجموعة من العوامل كالرقم الهيدروجيني والعكارة ومستويات النيترات، من أجل التنبؤ بحالات التلوث وضمان توفير مياه شرب آمنة. وفي هذا الخصوص, تبرز أهمية لوغاريتمات كل من التعلم الآلي والتعلم العميق, وذلك لقدرة كل منها على تسخير قوة البيانات من أجل صنع التنبؤات والقرارات.

كما يعتبر التعميم أيضا مبدأ رئيسا لتصميم نماذج الذكاء الاصطناعي. والمقصود بذلك هو عدم اقتصار نماذج الذكاء الاصطناعي في صنع التنبؤات أو القرارات على استيعاب مجموعات بيانات بعينها ولكن يتعين امتدادها إلى سياق أوسع. ويضمن توافر تلك المرونة تمكن نماذج الذكاء الاصطناعي من التعامل الفعال مع أية بيانات جديدة وغير ظاهرة. ويعطي نموذج (CDLSTM) تطبيقا عمليا لهذا المبدأ،حيث يكون فكرة تعميمية بدءًا من تسجيل بيانات مناخية متسلسلة زمنيا إلى توقع حدوث تغيرات مناخية مستقبلا، و بذلك يمكنه الإسهام في عمليات المراقبة البيئية واتخاذ القرارات اللازمة. وفي مجال الحفاظ على الحياة البرية أيضا، يمكن استخدام نماذج الذكاء الاصطناعي المستنبطة لبيانات مأخوذة من كاميرات المراقبة المخفيةلإصدار تعميمات تسهم في الكشف عن أنواع الحيوانات وتتبعها عبر مختلف البيئات الطبيعية، مما يساعد على حماية الأنواع المهددة بالانقراض. وتعد هندسة الخصائص من الممارسات الضرورية والتي تبرز الحاجة إلى استخلاص المتغيرات والخصائص المناسبة من البيانات. فلكي تتمكن نماذج الذكاء الاصطناعي من عمل تنبؤات دقيقة، فإنها تستلزم إدخال بيانات عن خصائص يمكن فهمها. وتتضمن هندسة الخصائص عدة خطوات مثل معالجة البيانات وانتقاء الخصائص والتعديل المعزز لأداء النموذج. فمن أجل إنجاز تنبؤات دقيقة في مجال كمراقبة جودة المياه, فإنه يتعين انتقاء الخصائص الملائمة مثل الرقم الهيدروجيني و العكارة ومستويات الأكسجين المذاب. و في مجال كالمراقبة الزراعية، يتم قياس بعض الخصائص مثل رطوبة التربة ودرجات الحرارة ومؤشرات سلامة المحصول من أجل التنبؤ بجودة وكمية الانتاج الزراعي والكشف عن أي تفشي محتمل للإصابة بالآفات.

يتعين إيجاد توازن دقيقبين صعوبة تطبيق النموذج وبساطته. فلا ينبغي المبالغة الشديدة في التعقيد أو السهولة المتناهية بنماذج الذكاء الاصطناعي. حيث يمكن أن تؤدي النماذج بالغة الصعوبة إلى تجاوز الملاءمة، فبينما يتميز أداؤها الاستثنائي في التعامل مع البيانات، إلا إنها تخفق في تكوين تعميمات بشأن أية بيانات تستجد عليها. وعلى النقيض من ذلك فإن النماذج

شديدة البساطة لايمكنها استيعاب أنماط البيانات المعقدة. ومن الملاحظ عند التطبيق أن ذلك التوازن يمكن تحقيقه في النماذج الخاصة بالمراقبة البيئية والتي تستعمل نموذج الغابات العشوائية، بينما تساعد الأساليب متعددة الأجزاء على تجنب تجاوز الملاءمة عند ضمان المتانة أثناء صنع التنبؤات. ففي سياق مشابه نجد أن نماذج الذكاء الاصطناع تسهم في عملية تخطيط المدن عن طريق التنبؤ بحركة المرور – كالسيولة و الازدحام – حيث يتعين إحداث توازن بين صعوبة النماذج المستعملة وبساطتها، من أجل موثوقية التوقعات الناتجة، وذلك دون إفراط في ملاءمة الأنماط المرورية المتسلسلة زمنيا. علاوة على ضرورة التزام نماذج الذكاء الاصطناعي بالاستمرارية في استيعاب البيانات. فينبغي تصميم تلك النماذج بطريقة تمكنها من قابلية التأقلم والتطور المتواصل، بحيث يتسنى لها استيعاب كل ما يستجد من بيانات كي تتمكن من تعزيز أدائها وجدارتها. فعلى سبيل المثال، دوما ما نجد أن أنظمة الذكاء الاصطناعي المستعملة في عمليات مراقبة إزالة الغابات تواصل استيعابها للصور الملتقطة بالأقمار الاصطناعية، حتى تتمكن من تحديث النماذج الملحقة بها، ومن ثم تقدير توقعات أكثر دقة. وفي مجال الرعاية الصحية، يلاحظ أن نماذج الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مراقبة تفشي الأمراض تواصل أيضا التطور تماشيا مع البيانات الوبائية الواردة, مما يعزز من دقة التنبؤات واستراتيجيات الاستجابة لديها.

وأخيرا يمكن القول بأن إمكانية تفسير النماذج وفهمها لها أهمية قصوى. فمن أجل نيل ثقة المستخدمين يتوجب إدراك كيفية ومبررات عملية صنع القرار لدى أي نموذج ذكاء اصطناعي، حيث أن لذلك أبعاد أخلاقية أيضا. ففي المجالات الصحية والحقوقية مثلا، ثمة ضرورة خاصة وملحة لتوافر نماذج قابلة للتفسير. أما في مجال المراقبة البيئية، فيمكن للنماذج القابلة للتفسير توعية المستفيدين بشأن العوامل المسببة للتلوث ،مما يسهل إتاحة المعلومات اللازمة لعمليتي اتخاذ القرار و تطوير السياسات. فمثلا، يقوم نموذج أشجار القرار المستعمل في المراقبة البيئية بتوفير لوائح واضحة ومعبرة لبيان كيفية حدوث نتائج معينة ناجمة عن ظروف بيئية معينة. و

يلاحظ في إطار مشابه أن نماذج الذكاء الاصطناعي المستعملة في مجال إدارة الطاقة يمكنها مساعدةالشركات مقدمة الخدمة على فهم الأنماط الاستهلاكية للطاقة وتحسين شبكات العمليات لديها.

**عيوب نماذج الذكاء الاصطناعي:**

رغم كثرة مميزات استعمال نماذج الذكاء الاصطناعي في مجال المراقبة البيئية، إلا إن ثمة العديد من العيوب والتحديات االواجب أخذها في الاعتبار. فمن أجل الوصول إلى تطوير نماذج الذكاء الاصطناعي بطريقة مبنية على الموثوقية والمعلومات، يجب أن نكون على دراية بتلك السلبيات. وتعد التبعية في استقاء البيانات واحدا من تلك العيوب البارزة. حيث تعتمد نماذج الذكاء الاصطناعي اعتمادا كبيرا على نوعية وكم البيانات. ففي حال اتصاف البيانات المستقاة بالنقص أو التحيز تكون النتيجة أداءا سيئا للنموذج أو حسابا لوغاريتماتيا مبنيا على التحيز، مما يطيل من أمد استخدام نتائج مبنية على التمييز. فعلى سبيل المثال، عند استعمال احد نماذج الذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة الهواء واقتصاره بصورة أساسية على بيانات مأخوذة من مناطق حضرية، فمن المحتمل أن يسوء أدائه في المناطق الريفية، مما يؤدي إلى عدم دقة التنبؤات و إمكانية حدوث أضرار بسبب اتخاذ قرارات قائمة على الخطط المتبعة.

كما يمثل تجاوز الملاءمة تحديا كبيرا أمام تصميم نماذج الذكاء الاصطناعي. ويحدث ذلك عندما يقوم نموذج ما باستيعاب البيانات التوجيهية بتميز يتخطى المطلوب، وينجم عن ذلك تعميم النموذج لأفكار دون المستوى عما يستجد من بيانات غير مرئية. ولإيجاد حل لتلك المشكلة يتعين إحداث نوع من التوازن في مستوى التعقيد التركيبي للنموذج. ومن الناحية التطبيقية، فإنهفي حال استيعاب نموذج ما لبيانات عن نهر ما, فإنه من المحتمل أن يصدر تنبؤات دقيقة عن جودة المياه في ذلك النهر،ولكنه يفشل في إصدار تعميمات عن أنهار أخرى ذات خصائص مختلفة. وتعتبر إمكانية تفسير النموذج من التحديات المزعجة أيضا، لاسيما في نماذج التعلم العميق. وغالبا ما يطلق على تلك النماذج مصطلح "الصناديق السوداء" وذلك لافتقادها لعامل

الشفافية. فمن أجل بناء ثقة المستخدمين يتعين إمكانية فهم كيفية ومبررات وصول أحد نماذج الذكاء الاصطناعي إلى إتخاذ القرارات، إلا إن ذلك ما يزال تحديا قائما. فمن المحتمل أن لا يرغب المستخدمون في التعاطي مع الإشعارات التي ينتجها الذكاء الاصطناعي عن إزالة الغابات مثلا، وذلك في حال عدم تمكنهم من فهم المبررات التي بنيت عليها توقعات النموذج عن هذه المشكلة البيئية.

ويعد تكثيف الموارد من المعوقات أمام تصميم النماذج أيضا. حيث إن التدريب على نماذج الذكاء الاصطناعي وتشغيلها يتطلب توافر موارد حاسوبية ضخمة، والذي يمثل عائقا أمام المؤسسات الصغيرة والدول النامية. ويمكن لهذا التفاوت مفاقمة التباينات القائمة، حيث لا تتمكن سوى الكيانات الأكثر ثراءًا من النجاح في توفير تقنيات الذكاء الاصطناعي المتقدمة. ومع هذا, تتزايد مشكلة المخاوف الأخلاقية أمام تطور الذكاء الاصطناعي. حيث لا تتعمد نماذج الذكاء الاصطناعي تعزيز صور التحيز القائم والكامنة في البيانات المتدرب على استيعابها. ويمثل ضمان العدالة ومجابهة المخاوف الأخلاقية تحديا كبيرا، لاسيما في التطبيقات التي تولي أهمية قصوى لقضايا العدالة وعدم التمييز. ومثال على ذلك قيام أحد نماذج الذكاء الاصطناعي المستعملة لاستجابات الكوارث بإعطاء أولوية لمناطق بعينها بناءا على بيانات مبنية على تحيزات مسبقة، مما يفقد ذلك النموذج العدالة اللازمة للاهتمام بالمناطق المعرضة للتضرر.

كما تمثل المخاطر الأمنية إحدى المخاوف الحقيقية أيضا. حيث تتعرض نماذج الذكاء الاصطناعي لهجمات معادية عن طريق تضليل النموذج وذلك بإدخال بعض البيانات التي تم تعديلها بدهاء. ومن المخاوف الملحة في مجال تطوير الذكاء الاصطناعي ضمان تأمين ومتانة النماذج لتقاوم تلك الهجمات. ويعد تطبيق نظم الذكاء الاصطناعي في شبكات الإنتاج الذكية مثالا معروفا، حيث تتمكن الهجمات المعادية من الإخلال بتوزيع الطاقة وإحداث أضرار اقتصادية بالغة. وأخيرا تتضح جسامة التأثيرات البيئية السلبية لاستعمال نماذج الذكاء الاصطناعي. حيث يؤدي استعمال الذكاء الاصطناعي واسع النطاق إلى استهلاك كبير لمصادر

الطاقة، مما يتسبب في مشكلات بيئية. ومن القضايا الملحة حاليا هي تقليل البصمة الكربونية لنماذج الذكاء الاصطناعي و ضرورة إيجاد حلولا فعالة لاستهلاك الطاقة. فمثلا، نجد أن استعمال أحد نماذج الذكاء الاصطناعي كبيرة الحجمقد يتسبب في إحداث انبعاثات كربونية تعادل ما تصدره خمسة سيارات خلال فترة عمرها، مما يبرز الحاجة إلى وجود ممارسات ذكاء اصطناعي تتسم بالاستدامة.

**سيناريوهات عملية لاستعمال الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية:**

فيما يلي سردا توضيحيا لأمثلة تطبيقية لتوظيف الذكاء الاصطناعي في عملية مراقبة سلامة البيئة والحفاظ على ازدهارها:

**التنبؤ بالكوارث الطبيعية**

تعتبر الكوارث الطبيعية تهديدا خطيرا للممتلكات والأراضي في أنحاء العالم، وتتمثل هذه الكوارث في الأعاصير والزلازل وحرائق الغابات. وللكوارث الطبيعية أثار مدمرة، فنجدها تدمر أجزاء هائلة من البنى التحتية وتتسبب في اضطرابات اقتصادية كما أنها تعرض حياة البشر للخطر. وفي السنوات الأخيرة اهتم المختصون كثيرا بتسخير إمكانيات الذكاء الاصطناعي من أجل التنبؤ بحدوث الكوارث الطبيعية والتقليل من تأثيراتها. حيث يمكن للحلول القائمة على الذكاء الاصطناعي توفير بيانات دقيقة و واقعية عن الكوارث الطبيعية، مما يساعد السلطات على تجهيز خطط الاستجابة المناسبة والحد من المخاطر التي تهدد سلامة المجتمعات. و يمكن للذكاء الاصطناعي التنبؤ بحدوث الكوارث الطبيعية كالزلازل وموجات تسونامي والعواصف. ويستعمل الذكاء الاصطناعي في إصدار توقعات بحدوث الكوارث الطبيعية من أجل تحديد أنماط تلك الكوارث وقياس درجة خطورتها، ويتم ذلك عن طريق دراسة البيانات المستقاة من مصادر مختلفة مثل صور الأقمار الاصطناعية وأجهزة استشعار الزلازل و توقعات الأرصاد الجوية. تقوم

تقنيات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالكوارث الطبيعية بتحذير المجتمعات وفرق الاستجابة للطوارئ وتزويدهم بإشعارات مبكرة، مما يمكنهم من التخطيط والتعامل مع تلك الكوارث بالطريقة المناسبة.

يعمل الذكاء الاصطناعي على تحليل البيانات الصادرة عن مصادر متنوعة كصور الأقمار الاصطناعية وبيانات الطقس والسجلات المتسلسلة زمنيا، ومن ثم يقوم بالتعرف على العوامل والظروف التي تنذر بوقوع كارثة طبيعية وشيكة، لذا يتم استعماله للتوقع المسبق بحدوث الكوارث الطبيعية. فمثلا يمكن ملاحظة بعض الإشارات الدالة على بداية حدوث كارثة طبيعية، مثل بعض التغيرات البيئية الطفيفة كوجود الدخان أو الرماد أو علامات أخرى تنذر بوقوع حرائق الغابات. كما يمكن التعرف على حدوث تغيرات في درجات الحرارة أو الرطوبة أو شدة الرياح عن طريق استعمال لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي.

ثمة العديد من نقاط التميز لدى الذكاء الاصطناعي والذي يتفوق على الأساليب التقليدية في مجال التنبؤ بالكوارث الطبيعية. وأولى تلك المميزات هي قدرة نظم الذكاء الاصطناعي على تحليل كميات هائلة من البيانات المستقاة من مصادر متعددة، مما يمكنها من إصدار تصور بيئي يتميز بالواقعية والدقة، مما يساعد السلطات على إعداد خطط مسبقة والتعاطي السريع مع أية كارثة طبيعية محتملة.علاوة على قدرة نظم الذكاء الاصطناعي على تجميع وتحليل البيانات بدقة وإتقان أعلى، مقارنة بالطرق التقليدية. ومن ثم تتزايد دقة التوقعات بحدوث الكوارث الطبيعية، نظرا لانخفاض احتمالية وقوع أخطاء أو نتائج متضاربة. كما نشدد على مقدرة نظم الذكاء الاصطناعي على تقديم حلول مبتكرة للتعامل مع مختلف أنواع الكوارث الطبيعية، وذلك على اختلاف مواقع حدوثها. حيث تتمكن لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي من الحد من مخاطر وتأثيرات تلك الكوارث من خلال تقييم البيانات الصادرة عن مناطق معينة وتحديد أنواع الكوارث الطبيعية، حيث تقوم لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي بتصميم طرق التدخل والتعامل مع تلك الكوارث، والمتمثلة في عمليات إخلاء السكان وأنظمة الإنذار المبكر أو الأنشطة الإغاثية.

في مختلف المجالات تتعدد استخدامات الطرق القائمة على الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالكوارث الطبيعية. وتعد إدارة الكوارث والطوارئ واحدا من تلك الاستخدامات الهامة. حيث تستطيع نظم الذكاء الاصطناعي العمل على تحليل البيانات الصادرة عن الكوارث الطبيعية وتحديد خططا متخصصة لإجراءات الاستجابة السريعة الطارئة مثل عمليات الإخلاء والبحث والإنقاذ والإغاثة. كما يعتبر تخطيط وإدارة المناطق الحضرية ثاني استخدامات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالكوارث الطبيعية. حيث تتمكن لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي من تحليل بيانات الكوارث ومن ثم اقتراح حلول متخصصة لتخطيط و تصميم المدن، وذلك للحد من مخاطر الكوارث الطبيعية وتأثيراتها. فمن أجل الحد من احتمالية وقوع أضرار ناجمة بسبب الفيضانات أو الزلازل أو حرائق الغابات مثلا، تستطيع لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي طرح مقترحات لتعديل ضوابط تقسيم المناطق بالمدن و إجراء تعديلات على أساليب تطوير البنية التحتية، وكذلك تعديل اللوائح المنظمة لعمليات البناء والتشييد. كما أن عمليات التنبؤ بالكوارث الطبيعية والقائمة على الذكاء الاصطناعي يمكن الاستفادة منها في عملية التأمين ضد المخاطر وإدارتها. حيث تتمكن لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي من وضع سياسات تأمين وخطط متخصصة لإدارة المخاطر، مما يخفض من تكلفة وأثار الكوارث الطبيعية وذلك عن طريق تحليل البيانات المتعلقة بالكوارث و مسببات المخاطر.

ورغما عن جميع مزايا استعمال الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالكوارث الطبيعية، إلا إنه يتعين إيجاد حلولا لعدد من المشكلات كي يتسنى الحصول على تطبيقات ناجحة. وتمثل جودة البيانات المستخدمة أحد تلك المعوقات الرئيسة. فدقة وموثوقية البيانات الخاضعة لتحليل نظم الذكاء الاصطناعي تعد شرطا أساسيا لإصدار خيارات وتنبؤات دقيقة. وفي حال انخفاض جودة البيانات، تقل دقة التنبؤات والخيارات مما قد يهدد سلامة الممتلكات الخاصة والعامة. أما المشكلة الثانية فتتمثل في توافر البيانات. فمن الصعب الوصول إلى دقة وموثوقية نظم للتنبؤ قائمة على الذكاء الاصطناعي، ويرجع ذلك إلى افتقار دول كثيرة إلى بيانات كافية عن الكوارث الطبيعية.

كما أن توافر البيانات لا يتأثر فقط بالمعوقات التقنية، ولكنه يتعثر أيضا بسبب الظروف السياسية والاقتصادية. وآخر تلك المعوقات التي يتعين أخذها في الاعتبار هي الآثار الأخلاقية المترتبة على تطبيق الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالكوارث الطبيعية، ومنها المخاوف المتعلقة بقضايا مثل الخصوصية وملكية البيانات و إمكانية استغلال البيانات. ولضمان استعمال أخلاقي للذكاء الاصطناعي في عملية التنبؤ بالكوارث الطبيعية، ثمة مجموعة من اللوائح والإرشادات الأخلاقية التي يلزم تطويرها. ويوضح جدول 3 (Table 3) عددا من الأمثلة لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في عمليات التنبؤ بحدوث الكوارث الطبيعية.

**مراقبة جودة الهواء**

يمثل تلوث الهواء إحدى المشكلات الخطيرة والتي تلقي بظلالها السلبية على كل من جودة الحياة والنمو الاقتصادي و الصحة العامة. فلتلوث الهواء تأثيرات صحية سيئة على المستويين المحلي والعالمي، حيث يتسبب في الإصابة بأمراض خطيرة كالسرطان وأمراض القلب وأمراض الجهاز التنفسي. ولمواجهة تلك المشكلة، فقد اهتم الباحثون كثيرا بتطبيق الذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة الهواء. حيث يمكن الحصول على بيانات دقيقة وواقعية عن جودة الهواء من خلال برامج الذكاء الاصطناعي، حتى يتسنى وضع خطط حكومية فعالة والقيام بالتدخل اللازم لتقليل نسبة تلوث الهواء، وضمان اتخاذ الإجراءات العاجلة للحفاظ على الصحة العامة، وذلك بناءا على النتائج والتوصيات المبنية على الذكاء الاصطناعي والتي تعزز عمليات الاستجابة الطارئة حال حدوث أي خلل في جودة الهواء. وللحصول على معلومات حقيقية عن جودة الهواء، تقوم لوغاريتمات الاستيعاب الآلي بتحليل البيانات المستقاة من مصادر مختلفة مثل مستشعرات جودة الهواء وصور الأقمار الاصطناعية وبيانات الطقس. فتنخرط هذه اللوغاريتمات في لتعرف على الأنماط والتوجهات البيانية، مما يمكنها من تحديد مصادر التلوث وقياس نسب التلوث واقتراح الإجراءات اللازمة لخفض تلوث الهواء.

ففي الآونة الأخيرة، ثمة عدد من لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي التي يغلب استعمالها في مجال تحليل جودة الهواء والتنبؤ بها، و منها الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) و الشبكات العصبية العميقة (DNN) والآلات ناقلة الدعم (SVM) و المنطق الضبابي. إلا أن اختيار نموذج الذكاء الاصطناعي المستخدم يعتمد بشكل كبير على المعلومات المطلوبة وطبيعة الملوثات الهوائية في منطقة ما. فمثلا، شرعت إحدى الدراسات ( مسعود وأحمد, 2021) في عمل تصنيف لأدوات الذكاء الاصطناعي المستعملة في إنتاج توقعات عن جودة الهواء، عن طريق التركيز على عدة عوامل مثل الأداء ومؤشرات الإدخال والتردد النسبي لتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي. وقد خلصت الدراسة إلى التفوق الأدائي لنموذج (DNN)على جميع أدوات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في المراقبة البيئية. ولكن بمقارنة تقنيات أو نماذج أخرى للذكاء الاصطناعي تم استعمالها للكشف عن الملوثات الهوائية، تم التوصل إلى أن كل من نموذج الارتداد ناقل الدعم (SVR) ونموذج المتوسط المتحرك المتكامل التلقائي (ARIMA) يعطيان أفضل الأداءات بين جميع التقنيات المستعملة لإنجاز تحليل السلاسل الزمنية للجسيمات العالقة (PM) (ذات الضرر الصحي الكبير)، و بأطوال قطر تصل إلى 10م و 2.5 م ( دوبريا وآخرون,2020).

وتشير دراسة أخرى (سوبرامانيام وآخرون, 2022) إلى تفوق أداء النماذج الهجينة عند استعمالها في المراقبة البيئية لوضع الخطط واتخاذ القرارات. حيث تضم النماذج الهجينةسمات أومزايا اثنين من لوغاريتمات أو منهجيات الذكاء الاصطناعي المستعملة لاتخاذ قرارات مبنية على معلومات من أجل إعطاء توقعات مسبقة عن ملوثات الهواء. ويمكن تأكيد ذلك وتأكيد الاعتماد بشكل أكبر على نماذج الذكاء الاصطناعي الهجينة في القيام بتوقعات عن جودة الهواء ( فو وآخرون, 2023).

ويتمتع استعمال الذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة الهواء بعدة مزايا مقارنة بالأساليب التقليدية. حيث تتمكن نظم الذكاء الاصطناعي من تحليل كميات هائلة من البيانات المستقاة من مصادر

عديدة، ويمكنها تقديم صورة شاملة عن واقع جودة الهواء، مما يساعد على اتخاذ القرارات الحكومية المبنية على المعلومات واتخاذ إجراءات عاجلة لخفض تلوث الهواء. كما تتمكن نظم الذكاء الاصطناعي من جمع وتحليل البيانات بشكل أكثر إحكام ودقة، وذلك مقارنة بالوسائل التقليدية، مما يقلل من نسبة الأخطاء والتناقضات في البيانات الواردة عن جودة الهواء. علاوة على تقديم لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي لحلول مفصلة عن مختلف مناطق التلوث ومصادره. فعن طريق تحليل البيانات المأخوذة من أماكن ومصادر متنوعة،يتسنى للذكاء الاصطناعي عرض الحلول المناسبة لمشكلة تلوث الهواء، ومنها تنظيم الانسياب المروري و وضع لوائح للأنشطة الصناعية أو إجراء تعديلات على التخطيط العمراني للمدن.

حيث تلعب التوصيات القائمة على الذكاء الاصطناعي دورا جوهريا في مراقبة جودة الهواء، وذلك من خلال تقديم مقترحات ملزمة تسهم في الحد من التلوث. فبإمكان لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي مثلا التوصية بإجراء تعديلات على تنظيم حركة المرور لاسيما في أوقات ذروة التلوث من أجل خفض الانبعاثات, كما يمكن للذكاء الاصطناعي اقتراح التوقيتات المناسبة للأنشطة الصناعية حتى يمكن تقليل الأثر البيئي لها، كما تتمكن اللوغاريتمات من تحديد المناطق البيئية التي تظل نسب التلوث بها في الحدود الآمنة. ولضمان الحفاظ على الصحة العامة وبقاء جودة الهواء في مستوى مقبول، تقوم الحكومات بتنفيذ خطط تدخل عاجل وذلك بالاستعانة بتلك التوصيات الذكائية.

ثمة العديد من التطبيقات المبنية على الذكاء الاصطناعي المستعملة لمراقبة جودة الهواء في العمليات الصناعية المختلفة. وتعد إدارة وتخطيط المدن من أهم تلك التطبيقات، حيث تقوم لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي بتحليل بيانات عن كل من جودة الهواء وترتيبات الحركة المرورية والتطوير الحضري من أجل تقديم حلول متخصصة تسهم في خفض تلوث الهواء بالمدن. فمثلا يستطيع الذكاء الاصطناعي اقتراح تعديلات على ترتيبات السيولة المرورية من أجل منع التكدس و تقليل تلوث الهواء، أو يمكن اقتراح تعديلات على عملية تخطيط المدن من

أجل تحسين انسيابية حركة الهواء والحد من التعرض للملوثات. أما فيما يخص العمليات الصناعية، فيمكن توظيف لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات الانبعاثات واقتراح التعديلات اللازمة لخفض مستويات التلوث، ويتمثل ذلك في الاعتماد على المزيد من المواد الخام ومصادر الطاقة صديقة البيئة، أو تحسين عمليات الإنتاج الصناعي بما يضمن الحد من النفايات والانبعاثات. كما يمكن الحفاظ على الصحة العامة باستخدام طرق مراقبة جودة الهواء بالاعتماد على الذكاء الاصطناعي. حيث تتمكن لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي من تحديد الفئات السكانية المعرضة لخطر التلوث وتقديم خطط تدخل مفصلة لتعزيز الصحة العامة، وذلك عن طريق تقييم البيانات المأخوذة عن كل من جودة الهواء والإحصائيات الصحية. فمثلا، تستطيع نظم الذكاء الاصطناعي اقتراح تعديلات على طرق العبور والانتظار وذلك للحد من تعرض تلك الفئات السكانية للملوثات الهوائية. ويقدم جدول رقم4 (Table 4) عرضا موجزا عن استخدامات الذكاء الاصطناعي في مراقبة جودة الهواء.

**مراقبة جودة المياه**

تقوم حياة الإنسان على الماء وتعد جودة المياه ضرورية للحفاظ على السلامة والصحة العامة. ولكن ثمة عدد من العوامل المهددة لجودة المياه، والمتمثلة في التلوث والتغيرات المناخية والزيادة السكانية. وتعتمد الطرق التقليدية لمراقبة جودة المياه على الأساليب اليدوية لأخذ العينات والتحليل المخبري، وهي وسائل باهظة التكلفة ومحدودة النطاق، كما أنها تتطلب جهدا يدويا مكثفا. إضافة إلى أن استخدام الوسائل التقليدية لإنجاز تنبؤات موثوقة يتطلب وقتا طويلا لمعالجة البيانات وجهودا حاسوبية هائلة، والتي غالبا ما تشوبها الأخطاء البشرية. ويعد الذكاء الاصطناعي من الطرق الواعدة التي تساعد على التغلب على تلك العيوب و مراقبة جودة المياه بصورة دقيقة وواقعية. حيث تقوم لوغاريتمات الاستيعاب الآلي بتكوين الأنماط والتوجهات التي تقدم مقترحات بتعديلات تعزز جودة المياه، ويتم ذلك عن طريق فحص البيانات المستقاة من مصادر متنوعة، مثل بيانات الطقس وسجلات التسلسل الزمني وأجهزة استشعار جودة المياه. كما

تتمكن لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي من التعرف على التغيرات الدقيقة التي تطرأ على جودة المياه، مثل التغيرات في درجة الحرارة و الرقم الهيدروجيني ومستويات الأكسجين المذاب و وجود الملوثات، وقد تشير تلك التغيرات إلى وجود تلوث أو أي عناصر غريبة أخرى تهدد جودة المياه.

ومن خلال الدراسات المختلفة التي أجريت على جودة المياه باستخدام تقنيات معينة للذكاء الاصطناعي يتبين أن نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) هو الأكثر فاعلية حيث يتسم بدقة وتميز الأداء في تحديد المتغيرات المختلفة في جودة المياه, حيث يتم قياسها في بيئة مائية معينة وخلال فترة زمنية محددة، وهو ما يعرف بمصطلح مؤشر جودة المياه (WQI) ( حميد وآخرون، 2017: جايا وآخرون، 2020). كما تقدم دراسة مشابهة وصفالإمكانية التنبؤ الدقيق بالتغيرات المستقبلية التي قد تطرأ على جودة المياه, مع التأكيد على فهم خصائص ملوثات الماء وتحديد مصادرها. وباستخدام نموذج الذكاء الاصطناعي المعروف باسم الذاكرة الطويلة قصيرة المدى (LSTM) ، يتبين أن ثمة طرق مختلفة تسهم في تأثر جودة المياه, كما تتنوع مصادر الملوثات بالمسطحات المائية. وقد قامت إحدى الدراسات بطرح نموذج للشبكات العصبية الاصطناعية، ويضم على وجه الخصوص كل من الشبكة العصبية اللاخطية ذاتية التراجع (NARNET) ونموذج (LSTM)، وهي تقنيات متطورة للتصنيف والتنبؤ بمؤشر جودة المياه, كما أنها تعد من أدوات الذكاء الاصطناعي الواعدة، حيث تسهم في عملية إدارة المياه (الدحياني وآخرون،2020).

تتميز تقنيات الذكاء الاصطناعي المستعملة لقياس جودة المياه بالعديد من المزايا ،إذا ما قورنت بالوسائل التقليدية. حيث تستطيع نظم الذكاء الاصطناعي مراقبة جودة المياه بصورة مستمرة ولحظية، مما يساعد السلطات على سرعة تحديد المشكلات المتعلقة بجودة المياه ومعالجتها على نحو عاجل، وبذلك يمكن الحد من المخاطر التي يسببها تلوث المياهوالتي تهدد الصحة العامة وسلامة البيئة. علاوة على قدرة نظم الذكاء الاصطناعي على تحليل كميات هائلة من البيانات الصادرة من مصادر عديدة، ومن ثم رسم صورة شاملة عما يطرأ من تغيرات في المياه وجودتها.

وتساعد تلك الإمكانية على التعرف على الاتجاهات والأنماط النَاشِئة في جودة المياه، كما تساعد على توقع ما يطرأ من مشكلات مستقبلية وتطوير أساليب التدخل الفوري التي تستهدف معالجة تلك المشكلات. كما أن التوصيات المولدة بالذكاء الاصطناعي تسهل عملية اتخاذ الإجراءات الفورية للحد من المخاطر التي تهدد جودة المياه. فمثلا يستطيع الذكاء الاصطناعي اقتراح التوقيتات المثلى للتدخل ومعالجة المياه،و الاستناد إلى البيانات الواقعية لتقديم التوصيات اللازمة لاتخاذ إجراءات محددة لضبط نسبة الملوثات. وقد تستهدف لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي طرح حلولا للتدخل العاجل، مثل خطط المعالجة أو طرق منع التلوث، وذلك عن طريق تحليل البيانات المسجلة عن نوعيات المشكلات المهددة لجودة المياه والمأخوذة من مناطق معينة، من أجل تخفيف أثر تلك المخاطر والمشكلات.

ثمة العديد من الصناعات التي تستفيد من التطبيقات المتعددة لمراقبة جودة المياه باستخدام الذكاء الاصطناعي. وتعد مراقبة المياه ومعالجتها واحدا من أهم تلك التطبيقات. حيث تستطيع لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي تقييم البيانات المعبرة عن جودة المياه ووضع الحلول الخاصة بعملية معالجة المياه وإدارتها، مثل نظم التنقية وطرق المعالجة الكيميائية، وذلك من أجل الحد من مخاطر المشكلات التي تخل بجودة المياه، وتقليل تأثيراتها السلبية. كما يمكن لصناعات المنتجات الزراعية والغذائية الاستفادة من عملية مراقبة جودة المياه باستخدام الذكاء الاصطناعي. حيث تتم دراسة بيانات جودة المياه باستخدام لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي، والتي تقوم بتجهيز استراتيجيات متخصصة لادراة الري والمحاصيل، ومن ثم مجابهة المشكلات التي تمس جودة المياه. فمثلا يمكن إعادة تحديد الأوقات المناسبة للري وانتقاء المحاصيل التي يمكنها مقاومة تلوثالمياه على نحو أفضل. كما يمكن استخدام المراقبة الذكو–اصطناعية لجودة المياه في مجال حماية البيئة والحفاظ عليها. فعن طريق تحليل البيانات المسجلة عن كل من جودة المياه والظروف البيئية تتمكن لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي من وضع الحلول المناسبة

للإسهام في ضبط التلوث وحماية البيئات الطبيعية، حتى يتسنى الحفاظ على النظم البيئية المائية وصون التنوع البيولوجي المائي.

من الملاحظ اهتمام العديد من الباحثين بدراسة تطبيقات الذكاء الاصطناعي في عمليات مراقبة جودة المياه بالمسطحات المائية، وكذلك تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مهام أخرى لمراقبة جودة المياه. حيث تم تطبيق نماذج الذكاء الاصطناعي للاستعمال في مهام مختلفة، مثل قياس مؤشرات التنبؤ والكشف عن أوجه الاختلاف وتصنيف عينات المياه. حيث قامت إحدى الدراسات باستخدام نماذج الاستيعاب العميق لعمل توقعات عن عدد من متغيرات جودة المياه، كالرقم الهيدروجيني ودرجة الحرارة والأكسجين المذاب. كما قامت دراسة أخرى باستخدام لوغاريتم أشجار القرار لتصنيف عينات المياه حسب جودتها. وقد استفادت هذه الدراسات من عدة نماذج للذكاء الاصطناعي، بما فيها التعلم العميق وأشجار القرار و الآلات ناقلة الدعم والشبكات العصبية الاصطناعية( أحمد وآخرون، 2019: الدحياني، 2020). حيث يتم استعمال أنماط مختلفة من مؤشرات المدخلات وذلك حسب نوعية النموذج المستخدم والغرض من ورائه. فيلاحظ مثلا استفادة بعض الدراسات من عدة عوامل كيميائية مثل الأكسجين المذاب والنقص البيوكيميائي في الأكسجين والقدر الإجمالي من النيتروجين, بينما اعتمدت دراسات أخرى على بضعة مقاييس فيزيائية مثل درجة الحرارة والرقم الهيدروجيني والعكارة (الشغبي وآخرون، 2020: لوكمان وآخرون،2021). ورغم اختلاف المهام التي استهدفها كل من تلك الأبحاث، إلا أن هناك عدد من المقاييس المشتركة فيما بينها، و المتمثلة في درجة الدقة وقابلية التأثر والتخصيص والنطاق أسفل المنحنى. وقد أجريت هذه الدراسات بعدة مواقع مختلفة كالأنهار والبحيرات وأحواض تخزين المياه، وقد اعتمدت على طرق متنوعة لجمع البيانات، كانتقاء العينات يدويا والاستشعار عن بعد. و من خلال هذه الدراسات المعتمدة يتبين تفوق الدقة التي تعمل بها نماذج الذكاء الاصطناعي عن تلك الخاصة بالوسائل التقليدية، حيث تتمكن النماذج الذكية من إيجاد حلول دقيقة وفعالة لمشكلات مراقبة جودة المياه.

وقد خلصت تلك البحوث المرجعية إلى عدد من النتائج الهامة، ومنها تطوير نماذج جديدة للذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة المياه، و عمل مقارنة بين نماذج الذكاء الاصطناعي والوسائل التقليدية، وتحديد كل من التحديات والفرص التي يمكن دراستها مستقبلا. وقد أوصت تلك الأبحاث بضرورة إيجاد حلول لبعض المعوقات، مثل غياب المعايير الضابطة لعملية جمع ومعالجة البيانات و محدودية توافر بيانات متميزة. ويوصي الباحثون بضرورة التركيز مستقبلا على استحداث نماذج ذكاء اصطناعي أكثر متانة بحيث يمكنها التعامل مع العديد من مصادر البيانات وإخراج توقعات دقيقة عن المؤشرات المختلفة لجودة المياه. ويلخص جدول رقم5 (Table5) عددا من الأمثلة لاستعمالات نماذج الذكاء الاصطناعي في مراقبة جودة المياه.

**مراقبة التربة**

إن استعمال الذكاء الاصطناعي لمراقبة التربة يعكس تقدما كبيرا في مجالات الإدارة الزراعية وحماية البيئة وتخطيط الأراضي. حيث إن الأساليب التقليدية لمراقبة التربة لها عدة سلبيات، منها إهدار والوقت والحاجة لأعداد كبيرة من الأيدي العاملة ومحدودية النطاق، والتي تتصف بها عمليات تقليدية كالجمع اليدوي للعينات و التحليل المخبري. أما الذكاء الاصطناعي فيمكنه تقديم حلولا مبتكرة تتميز بالدقة والكفاءة والشمول، والذي من شأنه أن يحدث نقلة نوعية في مجال مراقبة وإدارة سلامة التربة.

وباستخدام نماذج كالغابات العشوائية وأشجار القرار, يلاحظ إظهار لوغاريتمات التعلم الآلي فعالية مميزة في التعامل مع مجموعات بيانات معقدة ذات متغيرات عديدة. حيث تقوم هذه اللوغاريتمات بتحليل كميات ضخمة من البيانات الصادرة عن مصادر متنوعة، وذلك من أجل وضع تنبؤات عن عدد من خصائص التربة كمقدار الرطوبة ومستويات العناصر الغذائية والرقم الهيدروجيني. فقد أظهر نموذج أشجار القرار،مثلا، دقة أكبر عند استخدامه لقياس مخزونات الكربون العضوي بالتربة وذلك مقارنة بأساليب الإحصاء التقليدية. ويساعد نموذج الآلات الناقلة للدعم(SVM) في عمليات تصنيف التربة, حيث يتم تحديد أنواع التربة بناءا على الخصائص

الفيزيائية والكيميائية.ويتضح بذلك مساهمة تقنيات التعلم الآلي في إجراء اختبارات دقيقة لقياس سلامة التربة ودعم عملية إدارة التربة عن طريق اتخاذ قرارات مستندة إلى معلومات.

كما تلعب نماذج التعلم الآلي دورا حيويا في عمليات مراقبة التربة. حيث يستعمل نموذج الشبكات العصبية التلفيفية (CNNs) في عمل تحليلات للتربة من خلال الصور. فمن خلال معالجة صورا للتربة مأخوذة بالأقمار الاصطناعية أو الطائرات المسيرة, يتمكن نموذج (CNNs) من تحديد الأنماط الدالة على كل من سلامة التربة وتآكلها و مستوى التلوث بها. فعلى سبيل المثال, تقوم لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي بمعالجة صورا للتربة تتصف بدقتها العالية، تم التقاطها بواسطة مسيرات مزودة بكاميرات متعددة الطيف أو فرط طيفية، وذلك من أجل تقييم سلامة التربة والكشف عما يشوبها من عيوب مثل نقص العناصر الغذائية أو تفشي الآفات. كما يتم توظيف نموذج الشبكات العصبية الدورية (RNNs) لإجراء تحليل التسلسل الزمني لبيانات التربة، والتنبؤ بأي تغيرات تطرأ على مكونات التربة خلال فترات زمنية ممتدة وذلك بناءا على أية بيانات سابقة. وتتمتع هذه النماذج الذكية بإمكانات تنبؤية متطورة، يكون بمقدورها تعزيز عملية إدارة سلامة التربة بصورة أكثر فاعلية.

ويمكن أن تزداد إمكانات الذكاء الاصطناعي المستخدمة لمراقبة التربة وذلك عن طريق الجمع بين كل من أجهزة (IoT) و أجهزة الاستشعار الذكية. حيث إن المستشعرات الذكية المزودة بأجهزة (IoT) – والتي يتم تثبيتها في جوانب الحقل الزراعي – يمكنها القيام بالمراقبة المستمرة لجميع حالات التربة كنسب الرطوبة و درجة الحرارة ومستوى العناصر الغذائية. حيث تقوم تلك المستشعرات بجمع بيانات واقعية يتم تحليلها بواسطة اللوغاريتمات الذكو–اصطناعية, مما يسهل من إعطاء نتائج موجبة للاستجابة. ومن الأمثلة المعروفة على ذلك ،نذكر برامجا ذكية كبرنامج (Mark2) للأراضي الصالحة للزراعة و جهاز (IoT) والذي يضم بيانات عن كل من الطقس والتربة والمحاصيل لإخراج نتائج شاملة عن حالة الحقول الزراعية. إضافة إلى برنامج مركز

جون دير للعمليات والذي يقوم بدمج البيانات الناتجة عن المستشعرات وذلك من أجل إعطاء مقترحات عملية لتعزيز ممارسات إدارة التربة.

للذكاء الاصطناعي فوائد كبيرة في عمليات مراقبة التربة. حيث إن أجهزة الاستشعار التي تعمل بالذكاء الاصطناعي وأجهزة (IoT)كلاهما يمكنه القيام بالمراقبة المستمرة والواقعية لحالة التربة، مما يتيح للمزارعين ومختصي الإدارة الزراعية اتخاذ القرارات المناسبة استنادا إلى بيانات محدثة باستمرار عن سلامة التربة. تتمتع اللوغاريتمات الذكية بدقة كبيرة مما يحد من الأخطاء البشرية, ومن ثم يتم إصدار تنبؤات أكثر دقة عن خصائص التربة. فالذكاء الاصطناعي بمكنه تقديم حلول قابلة للقياس, وبالتالي فإنه عند اختبار سلامة التربة عبر مساحات وأراضي زراعية شاسعة يتم إصدار تقييمات شاملة عن ذلك، والذي من شأنه أن يفيد في عمليات الزراعة واسعة النطاق على وجه الخصوص. إن النتائج التنبؤية التي تعطيها النماذج الذكو–اصطناعية تدعم عمليات إدارة التربة بصورة أكثر فاعلية، وتتمثل تلك العمليات في إجراء تعديلات على جداول توقيتات الري وتحسين استخدام المخصبات وتنفيذ إجراءات للحد من تآكل الرقعة الزراعية وتعزيز استدامة الممارسات الزراعية وقدرتها الإنتاجية.

ورغما عن كل هذه المميزات لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجال مراقبة التربة، إلا أنها تواجه عددا من التحديات. حيث يعتمد نجاح نماذج الذكاء الاصطناعي بشكل هائل على جودة البيانات الخاصة بالتربة وسهولة الحصول عليها. فالبيانات التي ينقصها الدقة أو يعيبها عدم الاكتمال غالبا ما ينتج عنها تنبؤات غير موثوقة، مما يشدد على الحاجة لتوافر أساليب قوية لجمع البيانات. كما أن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي يتطلب في الأساس توافر استثمارات كبيرة في مجالات البنية التحتية والتدريب. إلا إن تناقص الحاجة إلى العنصر البشري وزيادة الاعتماد على الأتمتة قد أدي في العموم إلى انخفاض التكاليف العملياتية طويلة المدى مقارنة بوسائل المراقبة التقليدية. ويتحتم مجابهة تلك التحديات من أجل بلوغ أقصى استفادة من إمكانيات الذكاء الاصطناعي في مجال مراقبة التربة وضمان استعماله على نطاق واسع.

وعموما، يمكن إحداث تحولات ملحوظة في المجال الزراعي والبيئي وذلك بفضل التقنيات المتقدمة والتي تتمثل في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مراقبة التربة. حيث يوفر الذكاء الاصطناعي حلولا لأية مشكلات تعوق عملية مراقبة سلامة التربة، حيث تتميز تلك الحلول بالدقة والواقعية والقابلية للقياس، ويتم ذلك عن طريق رفع كفاء التعلم الآلي والتعلم العميق وتقنيات (IoT). ومع زيادة تطور التقنية يمكنها مستقبلا رفع سقف الرؤى وكفاءة المخرجات، مما ينتج ممارسات أكثر استدامة وإنتاجية في أساليب إدارة الأراضي.

**المراقبة الصحية والفحص الوبائي للملوثات البيئية**

إن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجال المراقبة الصحية والفحوصات الوبائية المتعلقة بالملوثات البيئية تعد مجالا واعدا لتقديم وتطبيق حلولا دقيقة ومناسبة لتأثيرات الملوثات على صحة الإنسان. حيث يمكن تعزيز مخرجات الصحة العامة كثيرا, وذلك عن طريق هذه التقنيات المتطورة التي يمكنها تيسير إحداث تدخلات أكثر فاعلية وتوفير المعلومات اللازمة لصنع القرارات المتعلقة بالسياسات الصحية العامة. وللنماذج المدارة بالذكاء الاصطناعي أهميتها في تحليل مجموعات هائلة من البيانات, حتى يتسنى لها التنبؤ بحدوث أية تفشيات مرضية جراء تلوث البيئة, حيث تستقى هذه البيانات من عدة مصادر كقياسات جودة الهواء وجودة المياه وبيانات الأرصاد الجوية والسجلات الصحية. وقد تم التنبؤ بتفشي أمراض يسببها تلوث الهواء كأمراض الجهاز التنفسي وأمراض القلب الأوعية الدموية, وذلك عن طريق استعمال بعض لوغاريتمات التعلم الآلي مثل نموذج الغابات العشوائية ونموذج آلات التعزيز المتدرج. فمثلا, تمت الاستفادة من برنامج الصحة الذكي (IBM Watson Health) في مختلف المؤسسات الصحية, حيث يمكنه تحليل البيانات البيئية والتنبؤ بالمخاطر الصحية, مما يعطي إنذارا مبكرا لمقدمي الرعاية الصحية وهيئات الإحصاء العامة. فعن طريق أنظمة الإنذار المبكر يمكن التدخل في الوقت المناسب لمنع تفشي الأمراض وتخفيف الأعباء التي تتحملها نظم الرعاية الصحية.

علاوة على الوظيفة الهامة التي تقوم بها أدوات الذكاء الاصطناعي في قياس مدى تعرض الانسان للملوثات البيئية وتحليل الأثر الصحي لها. حيث إن بعض نماذج التعلم العميق – كنموذج الشبكات العصبية التلفيفية (CNNs) ونموذج الشبكات العصبية الدورية (RNNs) – يمكنها قياس مستويات تعرض الأفراد للتلوث ومقارنة هذه المستويات بالنتائج الصحية، ويتم ذلك عن طريق معالجة قدرا هائلا من البيانات المستقاة من عدة مصادر كأجهزة الاستشعار القابلة للارتداء وصور الأقمار الاصطناعية والسجلات الطبية. والمثال على ذلك هو ما يسمى بمشروع البيضة لقياس جودة الهواء, والذي يقوم بدمج مستشعرات (IoT) ولوغاريتمات الذكاء الاصطناعي لإجراء مراقبة واقعية لجودة الهواء، وعمل قياسات شخصية لمدى التعرض للملوثات وإصدار التوصيات الصحية اللازمة. ويساعد هذا المستوى من التحليل التفصيلي على تحديد الفئات السكانية المعرضة للتلوث ومن ثم توفير المعلومات اللازمة لاستهداف التدخلات الصحية العامة.

كما يقوم الذكاء الاصطناعي بتعزيز عمليات المراقبة الوبائية بصورة كبيرة, وذلك من خلالأتمتة عمليات جمع وتحليل البيانات. حيث تتيح هذه الأتمتة الكشف عن الأنماط والتوجهات التي قد لا تتمكن الوسائل التقليدية من رصدها. أما لوغاريتمات المعالجة اللغوية الطبيعية(NLP) فيمكنها الكشف عن احتمالات تفشي الأمراض المرتبطة بالتلوث البيئي ، وذلك من خلال تحليل عدد من البيانات العشوائية المستقاة من عدة مصادر كوسائل التواصل الاجتماعي والمنتديات الصحية والمقالات الإخبارية. حيث تتمكن بعض الأدوات الذكية – كنموذج الخريطة الصحية – من إجراء مراقبة واقعية وكشف مبكر عن المخاطر الصحية البيئية, من خلال تتبع حالات تفشي الأمراض على نطاق عالمي، وذلك عن طريق الاستفادة من كل من نموذج (NLP) والتعلم الآلي. وتعمل هذه الميزة على تيسير عملية الاستجابة السريعة وتدابير الاحتواء، مما يسهم في الحد من أثر الملوثات على الصحة العامة. كما أن الإحصاءاتالتحليلية الصادرة بالذكاء الاصطناعي يمكنها عمل توقعات عن الآثار الصحيةطويلة المدى للملوثات البيئية، مما يساعد على توفير المعلومات

اللازمة لإصدار القرارات والسياسات الصحية، وذلك بالإضافة إلى قدرة تلك الإحصاءات الذكو-اصطناعية على انجاز عملية مراقبة ورقابة واقعية. ويمكن لنماذج الذكاء الاصطناعي محاكاة سيناريوهات مختلفة وعرض تنبؤات مستقبلية بالتوجهات الصحية، وذلك من خلال دمج بيانات خاصة بالتسلسل الزمني لكل منمستويات التلوث والمخرجات الصحية والمعلومات الديموغرافية. ولهذه الإمكانية الاستباقية قيمة عالية للغاية لدى المسئولين عن وضع السياسات الصحية، مما يسهم في خفض التلوث والحفاظ على الصحة العامة من خلال وضع اللوائح وإنجاز عمليات التدخل إذا لزم الأمر. فمثلا نجد أن المنصة الأوروبية لجودة الهواء تستخدم الذكاء الاصطناعي لتوفير الأدلة اللازمة لإصدار التوصيات الخاصة بالإجراءات القانونية المنظمة, وذلك عن طريق تقييم أثر تلك الإجراءات الصحية المتخذة على كل من جودة الهواء والصحة العامة.

كما يتسنى للأفراد تلقي تنبيهات واقعية عن مدى تعرضهم للملوثات البيئية الضارة وذلك باستخدام أنظمة المراقبة الصحية المدارة بالذكاء الاصطناعي. كما يمكن إجراء مراقبة مستمرة لعدد من العوامل الفسيولوجية كمعدل نبضات القلب ومعدل عملية التنفس ودرجة حرارة الجلد، ومقارنة كل ذلك بالبيانات البيئية من أجل الكشف عن أية علامات مبكرة على وجود مشكلات صحية قد تنشأ عن التعرض للتلوث, ويتم ذلك باستخدام الأجهزة القابلة للارتداء والمزودة بلوغاريتمات الذكاء الاصطناعي. و باستخدام بعض الأجهزة المزودة بإمكانات الذكاء الاصطناعي، كجهاز (Fibit) وجهاز ساعة أبل(Apple Watch)،يتمكن الأشخاص من اتخاذ الإجراءات الوقائية للحفاظ على صحتهم، حيث يتم تزويدهم بما يلزم من توقعات وإشعارات صحية حسب الظروف البيئية المحيطة.

ومع كل هذه الفوائد،إلا أن ثمة العديد من الصعوبات والاعتبارات الأخلاقية التي تعوق استخدام الذكاء الاصطناعي في عمليات المراقبة الصحية والفحوصات الوبائية. ومن أهم هذه الصعوبات خصوصية وأمن البيانات, حيث إن عملية جمع وتحليل بيانات عن صحية و بيئية عن الأفراد تتضمن معلومات قد تتصف بالحساسية. فمن أجل نيل ثقة أفراد المجتمع, يتعين ضمان توافر

إجراءات قوية لحماية البيانات وكذلك توافر الشفافية في خطط استخدام تلك البيانات. كما يتحتم الحد من مخاطر التحيزات اللوغاريتمية وذلك عن طريق استعمال عدد متنوع و تمثيلي من مجموعات البيانات أثناء التطبيق التجريبي لنماذج الذكاء الاصطناعي. ومن أجل ضبط عملية استعمال الذكاء الاصطناعي في مجال الصحة العامة، فإنه من الحتمي وضع الأطر والإرشادات اللازمة، مما يحدث نوعا من التوازن بين الاستخدامات التقنية والحقوق الشخصية.

**فوائد المراقبة البيئية القائمة على الذكاء الاصطناعي**

تتصف عملية استخدام الذكاء الاصطناعي بعدد من المزايا, إذا ما قورنت بالوسائل التقليدية. وأولى هذه المزايا هي أن الأنظمة الذكية للمراقبة البيئية يمكنها تقييم قدر هائل من البيانات المستقاة من مصادر متعددة، ومن ثم رسم صورة دقيقة وآنية عن الحالة الواقعية للبيئة، مما يتيح للحكومات اتخاذ القرارات الصائبة والإجراءات العاجلة لتوفير الحماية اللازمة لكل من البيئة والمجتمع بأسره.كما أن نظم المراقبة البيئية الذكو–اصطناعية يمكنها خفض تكلفة برامج المراقبة من خلال أتمتة عمليتي جمع وتحليل البيانات. ويسهم ذلك في الحفاظ على الموارد الهامة، كما يسمح بانتشار برامج المراقبة البيئية على نطاق أوسع وزيادة حجم استخدامها. ويبدو أن نظم المراقبة البيئية المرتكزة على الذكاء الاصطناعي تتفوق على الأساليب التقليدية في جمع وتحليل البيانات بصورة دقيقة ومحكمة أكثر، وذلك بفضل تضاؤل فرص حدوث أية تضاربات أو أخطاء.

وبالرغم من تلك المزايا التي تتصف بها المراقبة البيئية الذكية،إلا أن ثمة عدد من المشكلات التي يتعين التعامل معها من أجل نجاح تطبيق هذه العملية. وتمثل جودة البيانات المستخدمة في التحليل أحد تلك المعوقات الرئيسية. فتوافر بيانات دقيقة وموثوقة من شأنه أن يساعد أنظمة الذكاء الاصطناعي على إصدار تنبؤات وخيارات دقيقة. فالأخطاء قد تحدث في التنبؤات والقرارات حال عدم كفاءة جودة البيانات، مما يؤدي إلى أثر سلبي على كل من البيئة والصحة العامة. أما المشكلة الثانية فتتمثل في توافر البيانات. فالكثير من المناطق على المستوى العالمي

لا تتوافر بها بيانات دقيقة عن العوامل البيئية, لذا يصعب تكوين أنظمة مراقبة ذكية تتسم بالدقة والموثوقية. أيضا، تتأثر عملية توافر البيانات بالمعوقات السياسية والاقتصادية، ناهيك عن القيود التقنية. كما ينبغي تدارك الآثار الأخلاقية لاستعمال المراقبة البيئية التي تعمل بالذكاء الاصطناعي. فتطبيقات الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية من شانها أن تثير عددا من المخاوف المتعلقة بكل من ملكية وخصوصية البيانات واحتمالات إساءة استخدامها. لذا يتوجب تطوير معايير ولوائح أخلاقية من أجل ضمان استخدام أخلاقي للذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية.

**الأثر البيئي المحتمل لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية**

من الضروري توقع حدوث تداعيات غير مقصودة لاستعمال نماذج الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية، رغما عن كثرة فوائدها. حيث تنشأ بصمات بيئية ملحوظة بسبب استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، لاسيما تلك المتضمنة لعدد هائل من العمليات الحاسوبية، ويتحتم التعامل بحرص مع تلك البصمات من أجل ضمان استدامة شاملة. حيث إن عملية تجريب وتشغيل نماذج الذكاء الاصطناعي تتسبب في زيادة استهلاك الطاقة، ويمثل هذا أحد المخاوف الرئيسية. فالكثير والكثير من الكهرباء الناتجة غالبا من مصادر غير متجددة يتم استهلاكها بواسطة مراكز البيانات التي تدعم عمليات الذكاء الاصطناعي الحاسوبية. ويبدو أن هذا الاستهلاك الكبير للطاقة يتسبب في زيادة الانبعاثات الكربونية، مما يقوض من المزايا التي قد تتمتع بها تطبيقات الذكاء الاصطناعي في عمليات المراقبة والحد من المشكلات البيئية. وتعد هذه القضية محل اهتمام تقارير أصدرتها كبرى شركات التقنية مؤخرا. لذا نجد أن شركة مثل جوجل قد تفشل جهودها الرامية لخفض بصمتها المناخية، نظرا لاضطرارها إلى تشغيل برامج الذكاء الاصطناعي التي تنتجها، بالاعتماد على مراكز البيانات التي تستهلك قدرا هائلا من الطاقة. فبحسب التقرير البيئي السنوي للشركة، يلاحظ ارتفاع انبعاثات غازات الدفيئة بنسبة تزيد عن 48% ،وذلك خلال الخمس سنوات الماضية، ويرجع ذلك في الأساس إلى كل من الانبعاثات التي تسببها سلاسل

الإمداد وكميات الكهرباء التي تستهلكها مراكز البيانات. ففي خلال العام 2023 وحده، ارتفعت انبعاثات شركة جوجل بنسبة 13% مقارنة بالعام السابق، حيث وصلت كمية انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون إلى 14.3 مليون طن متري، متخطية كمية الانبعاثات في العام 2019 والتي بلغت حينئذ 9.7 مليون طن متري. ومن خلال قراءة مشابهة للتقرير البيئي لشركة مايكروسوفت للعام 2024، نلاحظ ارتفاعا كبيرا في انبعاثات غازات الدفيئة, لاسيما الانبعاثات من النوع رقم3، والتي تخطت نسبة 30%، وذلك جراء مضاعفة أعداد مراكز البيانات وتزايد استهلاك المكونات الحاسوبية الصلبة اللازمة لإجراء أبحاث الذكاء الاصطناعي. ويتضح من خلال ارتفاع انبعاثات النوع رقم 3، مدى التحديات البيئية التي يفرضها وجود بنية تحتية للذكاء الاصطناعي، وذلك بالرغم من نجاح شركة مايكروسوفت في خفض انبعاثاتها من النوع رقم1 والنوع رقم2، بنسبة بلغت 6.3% مقارنة بالعام 2020.

كما يتعين إنجاز بعض العمليات التصنيعية التي غالبا ما تتضمن استخلاص كل من عناصر أرضية نادرة (REE) وعدد آخر من الموارد الغير متجددة, حتى يتسنى توفير المكونات الحاسوبية الصلبة للذكاء الاصطناعي والتي تشمل خوادم توصيل الانترنت ونظم تخزين البيانات. فمثلا، يلاحظ أن تصنيع مكونات صلبة مثل الألياف البصرية والمكثفات ومشغلات HD و أشباه الموصلات وغيرها، كل ذلك يحتم توافر عدد من المعادن النادرة مثل الإربيوم والهولميوم والتربيوم والجادولينيوم واللانثانيوم والأوروبيوم. ويلاحظ أن مراحل استخلاص ومعالجة تلك المعادن، لاسيما المنتهية بعمليات مثل ( مقالب النفايات و حرقها والتخلص منها)، كل ذلك يتسبب في تدهور و أضرار بيئية وتلوث بالتربة والمياه، ومن ثم تزايد البصمات الكربونية. حيث إن الآلات المستخدمة في استخلاص المعادن ينشأ عنها كميات كبيرة من الغبار والانبعاثات والنفايات ( مثل العناصر الملوثة بالإشعاع و المعادن الثقيلة) والتي يتم انتشارها بسهولة، مما يؤدي إلى أضرار بيئية طويلة المدى. ففي أحد المصانع الصينية مثلا, تم تكرير مقدار طن واحد من أوكسيد العناصر الأرضية النادرة (REE) وقد بلغ حجم المخلفات الناتجة حوالي 63.000 متر

مكعب من أحماض الكبريتيك و الهيدروفلوريك، ومقدار 1.4 طن من النفايات الملوثة بالإشعاع. لذا تم الدفع نحو انتهاج أساليب صديقة للبيئة في عمليات استخلاص ومعالجة المعادن, وكذلك تشجيع الاستعمالات المتعددة للمعادن المستخلصة.

ونستخلص مما سبق ضرورة الإدارة الجادة للآثار البيئية المحتملة لنماذج الذكاء الاصطناعي، رغم ما أحدثته تلك النماذج من تقدم كبير في مجال المراقبة البيئية. وتوصي الدراسة كل من الباحثين وصناع القرار بضرورة التركيز مستقبلا على إيجاد الأطر التي تضمن استخداما مستداما لتقنيات الذكاء الاصطناعي، مما يعظم من فائدتها ويقلل من أثرها السلبي على البيئة.

**أوجه القصور ومجالات التطبيق المستقبلية**

بالرغم من المستقبل الواعد لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية، إلا أنه ينبغي معالجة بعض العيوب حتى تكتمل الاستفادة من تلك التطبيقات. فالاعتماد على نوعية عالية الجودة من مجموعات البيانات المتشابكة يعد أحد أهم هذه العيوب. حيث تتطلب النماذج الذكية وجود كميات ضخمة من البيانات الدقيقة النموذجية كي تنجح عملية تجريب هذه النماذج، ولكن يصعب توافر تلك البيانات بصورة كبيرة. بالإضافة إلى أن أشكال التحيز الناجمة عن البيانات يمكنها أن تتسبب في انحراف التنبؤات الناتجة و إطالة حالات اللامساواة القائمة أصلا، مما يؤكد على الحاجة للحرص على تقويم ومعالجة هذه البيانات.

وتعد مشكلة تجاوز الملاءمة ثاني تلك الصعوبات المهمة، ويقصد بها الأداء الاستثنائي الذي تظهره النماذج عند تعاملها مع بيانات تمت تجربتها عليها، ولكنها لا تنجح في تعميم التعامل مع أية بيانات جديدة غير معرفة لديها. ومن التحديات القائمة التي تعوق تطور الذكاء الاصطناعي هو إحداث توازن في مدى تعقيد النماذج لتفادي مشكلة تجاوز الملاءمة، بينما تظل قادرة على تسجيل أنماطا معقدة داخل البيانات. وأيضا من المشكلات التي تظل مزعجة للباحثين هي إمكانية تفسير نماذج الذكاء الاصطناعي، لاسيما نماذج التعلم العميق. حيث تعمل هذه النماذج

باعتبارها "صناديق سوداء" فيتعثر فهمها وتضعف الثقة في ما تتخذه من قرارات، ويعد هذا من القضايا الحرجة خصوصا في المجالات عالية المخاطر كالمراقبة البيئية.

كما تعتبر قضية تكثيف الموارد من القيود المعيقة أيضا, حيث ينبغي توافر قدر هائل من الموارد الحاسوبية اللازمة لإتمام عملية التوسع في استخدام نماذج الذكاء الاصطناعي المتطورة والتدريب عليها. ويعد هذا حاجزا أمام عدد من الشركات الصغيرة والدول النامية التي قد لا تتمكن من النجاح في رفع كفاءة تقنيات الذكاء الاصطناعي. أما المخاوف الأخلاقية فهي من التحديات الكبيرة أيضا, فمن المحتمل أن تتسبب النماذج الذكية في تقوية أشكال التحيز التي تكمن في عملية التدريب على البيانات. لذا يلزم ضمان العدالة ومجابهة التأثيرات الأخلاقية, لاسيما في حالة التطبيقات التي تحتم إظهار نتائج منصفة.

كما تتزايد المخاوف بشأن المخاطر الأمنية، والتي تتضمن التعرض لهجمات معادية، حيث تتم عملية خداع النموذج من خلال إحداث تغييرات ضئيلة محكمة على البيانات المدخلة. لذا يتحتم ضمان متانة نماذج الذكاء الاصطناعي وتأمينها ضد هذه الهجمات. ومن المشكلات التي تزداد حدتها أيضا هي التأثيرات البيئية التي تسببها عملية التدريب واسع النطاق لنماذج الذكاء الاصطناعي, والتي تستهلك قدرا كبيرا من موارد الطاقة، فينشأ عنها انبعاثات كربونية. وللحد من تلك التأثيرات يلزم تطوير حلول ذكاء اصطناعي والتي تتسم باستخدام كفؤ للطاقة.

ورغما عن كل تلك التحديات، إلا أن ثمة مستقبل واعد ينتظر مجال استعمال الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية. فمن المتوقع تعزيز مدى دقة وكفاءة نماذج الذكاء الاصطناعي عن طريق تطوير لوغاريتمات الذكاء الاصطناعي وتحسين طرق جمع البيانات وزيادة الطاقة الحاسوبية. وتوصي الدراسة بضرورة تركيز الباحثين مستقبلا على تطوير نماذج متينة للذكاء الاصطناعي, يمكنها التعامل مع أعداد مختلفة ومعقدة من البيانات البيئية، مما يحسن من إمكانية تفسير النماذج، كما يعالج المخاوف الأخلاقية والأمنية. فينبغي تكامل جهود كل من الباحثين وصانعي

القرار و أصحاب المصانع من أجل دعم إبداع مسئول وضمان تطبيق عادل للذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية.

**نتائج الدراسة**

تعرض هذه الدراسة نظرة شاملة على كل من مبادئ وتطبيقات وعيوب استعمال نماذج الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية, وقد تميزت عن سابقاتها من الدراسات الأخرى بعدة نقاط إيجابية. وأولى هذه المزايا هو عرض تحليل مفصل ودراسة مقارنة لمختلف نماذج الذكاء الاصطناعي، لإيضاح تطبيقات وإيجابيات وسلبيات كل نموذج مستعمل في المراقبة البيئية. فعلى عكس الأبحاث الأخرى, تعطي هذه المقارنة التفصيلية عددا من النتائج الهامة بخصوص اختيار ما يناسب من نماذج الذكاء الاصطناعي للقيام بمهام محددة.

ثانيا، يجمع البحث بين التمثيل العملي و الدراسة الميدانية لإيضاح مبادئ الذكاء الاصطناعي, مما ساهم في مناقشة الموضوع بصورة أكثر واقعية وإثارة للاهتمام. فقد ساعدت هذه المنهجية على تعزيز الصلة بين موضوع البحث و ما يحويه من مفاهيم نظرية أمكن تطبيقها بصورة كبيرة، مما يعطي للقارئ فهما أكثر وضوحا لكيفية التطبيق الواقعي لتقنيات الذكاء الاصطناعي في عمليات المراقبة البيئية.

ثالثا، تقدم الدراسة عرضا شاملا لكل من المعوقات التقنية والأخلاقية أمام موضوع البحث، مما يؤكد على أهمية التطوير المسئول لنظم الذكاء الاصطناعي. فقد تمكنت الدراسة من عرض منظور شامل للتحديات والفرص أمام تطبيق الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية، وذلك من خلال مناقشة عددا من القضايا الهامة, مثل تبعية الحصول على البيانات وتجاوز الملاءمة وإمكانية تفسير النماذج والمخاطر الأمنية، ناهيك عن الاعتبارات الأخلاقية.

وآخر تلك النتائج هو نجاح هذه الدراسة في رسم إطار واضح لمستقبل الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية، عن طريق تحديد عددا من المباحث الرئيسة التي يمكن التركيز عليها وتطويرها مستقبلا.

وقد خلص هذا البحث المتفرد إلى إجراء دراسة عملية وافية لاستعمال الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية، عن طريق إلقاء الضوء على كل من التطبيقات الحالية والتوجهات المستقبلية، وعرض وجهة نظر موضوعية بخصوص الاعتبارات التقنية والأخلاقية. إن كل تلك النتائج أو المزايا السابق ذكرها تجعل من البحث مرجعا قيما لكل من يهتم بالتطبيق المسئول للذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية، كالأكاديميين و المهنيين وصناع القرار.

**الخاتمة**

وفي الختام يمكن القول بأن ثمة فوائد نوعية قد ظهرت في مجالات مختلفة بفضل الدمج بين الذكاء الاصطناعي والمراقبة البيئية, وقد تمثلت هذه المجالات في مراقبة جودة كل من التربة والمياه والهواء، بالإضافة إلى إدارة الحركة المرورية وقياس البصمة الكربونية. ولهذا التطور إسهامات كبيرة في مجالات عدة، كحماية البيئة والصحة العامة والتنمية المستدامة. حيث أمكن إنجاز جميع ممارسات الإدارة البيئية بصورة أكثر كفاءة وفاعلية، وذلك نظرا للتنبؤات الدقيقة والمراقبة الواقعية التي يحققها الذكاء الاصطناعي. ولكن يتعين الإقرار بالعقبات المحتملة التي قد تواجه استعمال تقنيات الذكاء الاصطناعي على نطاق واسع. فمن أهم هذه المخاوف هو العبء الكبير لاستهلاك الطاقة والذي يتحمله كل من مراكز البيانات وسلاسل الإمداد، مما يؤدي إلى زيادة انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري. كما أن ثمة تدهور بيئي ملحوظ قد يحث جراء عملية استخلاص الموارد اللازمة, كالعناصر الأرضية النادرة (REEs) و المكونات الحاسوبية الصلبة للذكاء الاصطناعي, حيث يتسبب ذلك في تدمير البيئات الطبيعية وتلوث التربة والمياه وتوليد المخلفات السامة.

ومن التحديات التي تكبل مستقبل الذكاء الاصطناعي هو افتقار قطاع البيئة لما يكفي من أيدي عاملة من الفنيين ذوي المهارة، لاسيما في دول العالم الثالث. كما أن سلبيات مثل الاحتكار التجاري واستغلال التنبؤ بالكوارث تعد من صور سوء استخدام الذكاء الاصطناعي بغرض تحيق مكاسب خاصة، ولمنع ذلك يتعين الاهتمام بعدد من القضايا المتعلقة برقابة وخصوصية البيانات وإمكانية الوصول إليها. ومن أجل درء هذه المخاطر وضمان استخدام منصف وأخلاقي لتقنيات الذكاء الاصطناعي، يلزم وضع أطر قوية لحوكمة البيانات. ومع كل هذه التحديات، إلا أن ثمة مستقبل واعد لاستعمال الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية. وتشير الدراسة إلى الحاجة الماسة إلى التركيز البحثي مستقبلا على تقييم كل من الأثر الأخلاقي والبيئي لتقنيات الذكاء الاصطناعي. فمن خلال تطوير طرق قياسية لتقييم التأثيرات البيئية والأبعاد الأخلاقية لنظم الذكاء الاصطناعي، يمكن ضمان استخدامها بصورة مسئولة ومستدامة.

Abdallah, M., Talib, M.A., Feroz, S., Nasir, Q., Abdalla, H., Mahfood, B., 2020. Artificial intelligence applications in solid waste management: a systematic research review. Waste Manage. 109, 231–246. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.057.

Abdulraheem, M.I., Zhang, W., Li, S., Moshayedi, A.J., Farooque, A.A., Hu, J., 2023.

Advancement of remote sensing for soil measurements and applications: a comprehensive review. Sustainability 15 (21), 15444.

Abebe, W.T., Endalie, D., 2023. Artificial intelligence models for prediction of monthly rainfall without climatic data for meteorological stations in Ethiopia. J. Big Data 10 (1). https://doi.org/10.1186/s40537-022-00683-3.

Acevedo, S., Novta, N., 2017. Climate change will bring more frequent natural disasters and weigh on economic growth. Available from: https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2017/11/16/climate-change-will-bring-more-frequent-natural-disasters-weigh-on-economic-growth. [Accessed 30 April 2023].

Adefemi, A., Ukpoju, E.A., Adekoya, O., Abatan, A., Adegbite, A.O., 2023. Artificial intelligence in environmental health and public safety: a comprehensive review of USA strategies. World J. Adv. Res. Rev. 20 (3), 1420–1434.

Agbehadji, I.E., Awuzie, B.O., Ngowi, A.B., Millham, R.C., 2020. Review of big data analytics, artificial intelligence and nature-inspired computing models towards accurate detection of COVID-19 pandemic cases and contact tracing. Int. J. Environ. Res. Public Health 17 (15), 5330.

Ahmad, A., Aslam, Z., Bellitürk, K., S¨ozübek, A.P.D.B., 2023. Plant and soil data management via intelligent agricultural machinery and field robots. Clim. Change Soil-Plant-Environ. Interac. 9.

Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., Chen, H., 2021. Artificial intelligence in sustainable energy industry: status Quo, challenges and opportunities. J. Clean. Prod. 289, 125834.

Ahmed, A.N., Othman, F.B., Afan, H.A., Ibrahim, R.K., Fai, C.M., Hossain, M.S., Elshafie, A., 2019. Machine learning methods for better water quality prediction. J. Hydrol. 578, 124084.

Ahmed, T., Zounemat-Kermani, M., Scholz, M., 2020a. Climate change, water quality and water-related challenges: a review with focus on Pakistan. Int. J. Environ. Res. Public Health 17 (22), 8518.

Akinosho, T.D., 2024. Investigating a Deep Learning Approach To Real-Time Air Quality Prediction and Visualisation On UK Highways. University of the West of England, Bristol. ].

Alahmad, T., Nem´enyi, M., Ny´eki, A., 2023. Applying IoT sensors and big data to improve precision crop production: a review. Agronomy 13 (10), 2603.

Aldhyani, T.H., Al-Yaari, M., Alkahtani, H., Maashi, M., 2020. Water quality prediction using artificial intelligence algorithms. Appl. Bionics Biomech. 2020.

Aldoseri, A., Al-Khalifa, K.N., Hamouda, A.M., 2023. Re-thinking data strategy and integration for artificial intelligence: concepts, opportunities, and challenges. Appl. Sci. 13 (12), 7082.

Al-Garadi, M.A., Yang, Y.-C., Sarker, A., 2022. The Role of Natural Language Processing During the COVID-19 pandemic: Health applications, opportunities, and Challenges. Healthcare.

Alloghani, M.A., 2023. Harnessing AI for sustainability: applied AI and machine learning algorithms for air quality prediction. Artificial Intelligence and Sustainability.

Almalawi, A., Alsolami, F., Khan, A.I., Alkhathlan, A., Fahad, A., Irshad, K., Qaiyum, S., Alfakeeh, A.S., 2022. An IoT based system for

magnify air pollution monitoring and prognosis using hybrid artificial intelligence technique. Environ. Res. 206, 112576.

Alpan, K., Sekeroglu, B., 2020. Prediction of pollutant concentrations by meteorological data using machine learning algorithms. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. 44, 21–27.

Alsaber, A.R., Pan, J., Al-Hurban, A., 2021. Handling complex missing data using random forest approach for an air quality monitoring dataset: a case study of Kuwait environmental data (2012 to 2018). Int. J. Environ. Res. Publ. Health 18 (3), 1333.

Amuthadevi, C., Vijayan, D., Sudharsan, R.R., 2021. Retracted article: development of air quality monitoring (AQM) models using different machine learning approaches. J. Ambient Intell. Humaniz. Comput. 13 (S1), 33. https://doi.org/10.1007/s12652-020-02724-2.

Ananias, P.H.M., Negri, R.G., 2021. Anomalous behaviour detection using one-class support vector machine and remote sensing images: a case study of algal bloom occurrence in inland waters. Int. J. Digit. Earth 14 (7), 921–942.

Artiola, J., Pepper, I.L., Brusseau, M.L. (Eds.), 2004. Environmental Monitoring and Characterization. Academic Press.

Asha, P., Natrayan, L., Geetha, B., Beulah, J.R., Sumathy, R., Varalakshmi, G., Neelakandan, S., 2022. IoT enabled environmental toxicology for air pollution monitoring using AI techniques. Environ. Res. 205, 112574.

Azzi, S., Gagnon, S., Ramirez, A., Richards, G., 2020. Healthcare applications of artificial intelligence and analytics: a review and proposed framework. Appl. Sci. 10 (18), 6553.

Baclic, O., Tunis, M., Young, K., Doan, C., Swerdfeger, H., Schonfeld, J., 2020. Artificial intelligence in public health: challenges and opportunities for public health made possible by advances in natural language processing. Canada Commun. Dis. Rep. 46 (6), 161.

Bai, D., Lu, G., Zhu, Z., Tang, J., Fang, J., Wen, A., 2022. Using time series analysis and dual-stage attention-based recurrent neural network to predict landslide displacement. Environ. Earth Sci. 81 (21), 509.

Balaram, V., 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. Geosci. Front. 10, 1285–1303. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005.

Baniecki, H., Biecek, P., 2024. Adversarial attacks and defenses in explainable artificial intelligence: a survey. Inform. Fus., 102303

Chowdhury, M., Sadek, A.W., 2012. Advantages and limitations of artificial intelligence. Artificial Intelligence Applications to Critical Transportation Issues, 6, Transportation Research Circular E-C168.

Çınar, Z.M., Abdussalam Nuhu, A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M., Safaei, B., 2020. Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0. Sustainability 12 (19), 8211.

Coeckelbergh, M., 2021. AI for climate: freedom, justice, and other ethical and political challenges. AI Ethics 1, 67–72. https://doi.org/10.1007/s43681-020-00007-2.

Cordier, T., Alonso-S´aez, L., Apoth´eloz-Perret-Gentil, L., Aylagas, E., Bohan, D.A., Bouchez, A., Chariton, A., Creer, S., Frühe, L., Keck, F., 2021. Ecosystems monitoring powered by environmental genomics: a review of current strategies with an implementation roadmap. Mol. Ecol. 30 (13), 2937–2958.

Cort`es, U., S`anchez-Marr`e, M., Ceccaroni, L., R-Roda, I., Poch, M., 2000. Artificial intelligence and environmental decision support systems. Appl. Intell. 13, 77–91.

Costa, V.G., Pedreira, C.E., 2023. Recent advances in decision trees: an updated survey. Artif. Intell. Rev. 56 (5), 4765–4800.

Curry, R., Trotter, C., McGough, A.S., 2021. Application of deep learning to camera trap data for ecologists in planning/engineering–Can captivity imagery train a model which generalises to the wild?. In: 2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data).

Dailey M., Mamane D., 2021. Artificial intelligence and risk management in the insurance sector. Available from: https://www.financierworldwide. com/artificial-intelligence-and-risk-management-in-the-insurance-sector#.ZE 8AS3bMLIV. [Accessed 01 May 2023].

Dan Milmo (2024). Google's emissions climb nearly 50% in five years due to AI energy demand. *The Guardian*. Available at: https://www.theguardian.com/technology/art icle/2024/jul/02/google-ai-emissions (Accessed August 2, 2024).

De Bem, P.P., de Carvalho Junior, O.A., Fontes Guimar˜aes, R., Trancoso Gomes, R.A., 2020. Change detection of deforestation in the

Brazilian Amazon using landsat data and convolutional neural networks. Remote Sens. (Basel) 12 (6), 901.

DeCastro, A.L., Juliano, T.W., Kosovi´c, B., Ebrahimian, H., Balch, J.K., 2022. A computationally efficient method for updating fuel inputs for wildfire behaviormodels using sentinel imagery and random forest classification. Remote Sens. (Basel) 14 (6), 1447.

Degas, A., Islam, M.R., Hurter, C., Barua, S., Rahman, H., Poudel, M., Ruscio, D., Ahmed, M.U., Begum, S., Rahman, M.A., 2022. A survey on artificial intelligence (ai) and explainable ai in air traffic management: current trends and development withfuture research trajectory. Appl. Sci. 12 (3), 1295.

El-Chaghaby, G., Rashad, S., Moneem, M.A., 2020. Seasonal variation and correlation between the physical, chemical and microbiological parameters of Nile water in selected area in Egypt (Case study): physical, chemical and microbiological parameters of Nile water. Baghdad Sci. J. 17 (4), 1160. -1160.

Eling, M., Nuessle, D., Staubli, J., 2022. The impact of artificial intelligence along the insurance value chain and on the insurability of risks. Geneva Papers Risk Insur.- Issues Pract. 47 (2), 205–241.

El-Magd, S.A.A., Soliman, G., Morsy, M., Kharbish, S., 2022. Environmental hazard assessment and monitoring for air pollution using machine learning and remote sensing. Int. J. Environ. Sci. Technol. 20 (6), 6103–6116. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04367-6.

Elshaikh, A., Elsheikh, E., Mabrouki, J., 2024. Applications of Artificial Intelligence in Precision Irrigation. J. Environ. Earth Sci. 6 (2), 176–186.

Eskandari, H., Imani, M., Moghaddam, M.P., 2021. Convolutional and recurrent neural network based model for short-term load forecasting. Electr. Pow. Syst. Res. 195, 107173.

Essam, Y., Kumar, P., Ahmed, A., Murti, M.A., El-Shafie, A., 2021. Exploring the reliability of different artificial intelligence techniques in predicting earthquake for Malaysia. Soil Dyn. Earthq. Eng. 147, 106826. https://doi.org/10.1016/j. soildyn.2021.106826.

Fern´andez del Castillo, A., Yebra-Montes, C., Verduzco Garibay, M., de Anda, J., Garcia- Gonzalez, A., Gradilla-Hern´andez, M.S., 2022. Simple prediction of an ecosystemspecific water quality index and the water quality classification of a highly polluted river through supervised machine learning. Water (Basel) 14 (8), 1235.

Folorunso, O., Ojo, O., Busari, M., Adebayo, M., Joshua, A., Folorunso, D., Ugwunna, C. O., Olabanjo, O., Olabanjo, O., 2023. Exploring machine learning models for soil nutrient properties prediction: a systematic review. Big Data Cogn. Comput. 7 (2), 113.

Fu, L., Li, J., Chen, Y., 2023. An innovative decision making method for air quality monitoring based on big data-assisted artificial intelligence technique. J. Innov. Knowl. 8 (2), 100294.

Fuentes-Pe˜nailillo, F., Gutter, K., Vega, R., Silva, G.C., 2024. Transformative technologies in digital agriculture: leveraging internet of things, remote sensing, and artificial intelligence for smart crop management. J. Sens. Actuat. Netw. 13 (4), 39.

Gabriel, O.T., 2023. Data Privacy and Ethical Issues in Collecting Health Care Data Using Artificial Intelligence Among Health Workers. Center for Bioethics and Research. ].

Gaya, M.S., Abba, S.I., Abdu, A.M., Tukur, A.I., Saleh, M.A., Esmaili, P., Wahab, N.A., 2020. Estimation of water quality index using artificial intelligence approaches and multi-linear regression. Int. J. Artif. Intell. ISSN 2252, 8938.

Ghimire, S., Yaseen, Z.M., Farooque, A.A., Deo, R.C., Zhang, J., Tao, X., 2021. Streamflow prediction using an integrated methodology based on convolutional neural network and long short-term memory networks. Sci. Rep. 11 (1), 17497.

Ghorani-Azam, A., Riahi-Zanjani, B., Balali-Mood, M., 2016. Effects of air pollution onhuman health and practical measures for prevention in Iran. J. Res. Med. Sci.: Offic. J. Isfahan Univ. Med. Sci. 21.

Kernbach, J.M., Staartjes, V.E., 2022. Foundations of machine learning-based clinical prediction modeling: part II—Generalization and overfitting. Machine Learning in Clinical Neuroscience: Foundations and Applications, pp. 15–21.

Khan, Y., See, C.S., 2016. Predicting and analyzing water quality using machine learning: a comprehensive model. In: 2016 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT). IEEE, pp. 1–6.

Kothandaraman, D., Praveena, N., Varadarajkumar, K., Madhav Rao, B., Dhabliya, D., Satla, S., Abera, W., 2022. Intelligent forecasting of air quality and pollution prediction using machine learning. Adsorp. Sci. Technol. 2022, 5086622.

Krishan, M., Das, J., Singh, A., Goyal, M.K., Sekar, C., 2019. Air quality modelling using long short-term memory (LSTM) over NCT-Delhi, India. Air Qual. Atmosp. Health 12 (8), 899–908. https://doi.org/10.1007/s11869-019-00696-7.

Krupnova, T.G., Rakova, O.V., Bondarenko, K.A., Tretyakova, V.D., 2022. Environmental

justice and the use of artificial intelligence in urban air pollution monitoring. Big

Data Cogn. Comput. 6 (3), 75.

Lakshmi, V., & Corbett, J. (2020). How artificial intelligence improves agricultural

productivity and sustainability: a global thematic analysis.

Leal Filho, Kotter, R., ¨Ozuyar, P.G., Abubakar, I.R., Eustachio, J.H.P.P., Matandirotya, N. R., 2023. Understanding Rare Earth Elements as Critical Raw Materials. Sustainability 15, 1919. https://doi.org/10.3390/su15031919.

Leong, W., Kelani, R., Ahmad, Z., 2020. Prediction of air pollution index (API) using

support vector machine (SVM). J. Environ. Chem. Eng. 8 (3), 103208.

Li, Q., Zheng, H., 2023. Prediction of summer daytime land surface temperature in urban environments based on machine learning. Sustain. Cities Soc. 97, 104732.

Li, Y., Feng, Z., Chen, S., Zhao, Z., Wang, F., 2020a. Application of the artificial neural network and support vector machines in forest fire prediction in the Guangxi

autonomous region, China. Discrete Dyn. Nat. Soc. 1–14. https://doi.org/10.1155/

2020/5612650.

Li, Z., Basit, A., Daraz, A., Jan, A., 2024. Deep causal speech enhancement and

recognition using efficient long-short term memory recurrent neural network. PLoS

One 19 (1), e0291240.

Lim, C.H., Kim, H., Vilcassim, M.J.R., Thurston, G.D., Gordon, T., Chen, L., Lee, K.,

Heimbinder, M., Kim, S.Y., 2019. Mapping urban air quality using mobile sampling

with low-cost sensors and machine learning in Seoul, South

Masood, A., Ahmad, K., 2021. A review on emerging artificial intelligence (AI)

techniques for air pollution forecasting: fundamentals, application and performance.

J. Clean. Prod. 322, 129072.

Meza, J.K.S., Yepes, D.O., Rodrigo-Ilarri, J., Cassiraga, E., 2019. Predictive analysis of urban waste generation for the city of Bogot´a, Colombia, through the

implementation of decision trees-based machine learning, support vector machines

and artificial neural networks. Heliyon 5 (11), e02810. https://doi.org/10.1016/j.

heliyon.2019.e02810.

Microsoft (2024). 2024 Environmental Sustainability Report. Washington. Available at:

https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RW1lMjE (Accessed

August 2, 2024).

Mirmomeni, M., Fazio, T., von Cavallar, S., Harrer, S., 2021. From wearables to

THINKables: artificial intelligence-enabled sensors for health monitoring. Wearable

Sensors. Elsevier, pp. 339–356.

Mohanty, S.D., Jha, M.K., Raul, S.K., Panda, R.N., Sudheer, K.P., 2015. Using artificial neural network approach for simultaneous forecasting of weekly groundwater levels at multiple sites. Water Res. Manage. 29 (15), 5521–5532. https://doi.org/10.1007/ s11269-015-1132-6.

Montorio, R., P´erez-Cabello, F., Alves, D.B., García-Martín, A., 2020. Unitemporal

approach to fire severity mapping using multispectral synthetic databases and

random forests. Remote Sens. Environ. 249, 112025.

Nandini, K., Fathima, G., 2019. Urban air quality analysis and prediction using machine learning. In: 2019 1st International Conference on Advanced Technologies in

Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering (ICATIECE). IEEE, pp. 98–102.

Nasir, N., Kansal, A., Alshaltone, O., Barneih, F., Sameer, M., Shanableh, A., Al-

Shamma'a, A., 2022. Water quality classification using machine learning algorithms.

J. Water Process. Eng. 48, 102920.

Omidvarborna, H., Kumar, P., Hayward, J., Gupta, M., Nascimento, E.G.S., 2021. Lowcost air quality sensing towards smart homes. Atmosphere (Basel) 12 (4), 453.

Omrani, N., Rivieccio, G., Fiore, U., Schiavone, F., Agreda, S.G., 2022. To trust or not to trust? An assessment of trust in AI-based systems: concerns, ethics and contexts. Technol. Forecast. Soc. Change 181, 121763.

Ortega-Fern´andez, A., Martín-Rojas, R., García-Morales, V.J., 2020. Artificial intelligence in the urban environment: smart cities as models for developing innovation and sustainability. Sustainability 12 (19), 7860.

Osman, K. (2024). Improving transparency with technology in the transportation of

illegal wildlife.

Ouma, Y.O., Okuku, C.O., Njau, E.N., 2020. Use of artificial neural networks and multiple linear regression model for the prediction of dissolved oxygen in rivers: case study of hydrographic basin of River Nyando, Kenya. Complexity 2020 (1), 9570789.

Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A.B., 2020. Machine learning and soil sciences: a review aided by machine learning tools. Soil 6 (1), 35–52.

Palakurti, N.R., Kolasani, S., 2024. AI-driven modeling: from concept to implementation. Practical Applications of Data Processing, Algorithms, and Modeling. IGI Global, pp. 57–70.

Panigrahi, N., Patro, S.G.K., Kumar, R., Omar, M., Ngan, T.T., Giang, N.L., Thu, B.T., Thang, N.T., 2023. Groundwater quality analysis and drinkability prediction using artificial intelligence. Earth Sci. Inform. 16 (2), 1701–1725. https://doi.org/ 10.1007/s12145-023-00977-x.

Pappu, S., Vudatha, P., Niharika, A.V., Karthick, T., Sankaranarayanan, S., 2017.

Intelligent IoT based water quality monitoring system. Int. J. Appl. Eng. Res. 12 (16), 5447–5454.

Park, S.-H., Lee, B.-Y., Kim, M.-J., Sang, W., Seo, M.C., Baek, J.-K., Yang, J.E., Mo, C., 2023. Development of a soil moisture prediction model based on recurrent neural network long

Ruiz, I., Pompeu, J., Ruano, A., Franco, P., Balbi, S., Sanz, M.J., 2023. Combined

artificial intelligence, sustainable land management, and stakeholder engagement

for integrated landscape management in Mediterranean watersheds. Environ. Sci.

Policy 145, 217–227.

Ryo, M., Angelov, B., Mammola, S., Kass, J.M., Benito, B.M., Hartig, F., 2021.

Explainable artificial intelligence enhances the ecological interpretability of blackbox species distribution models. Ecography 44 (2), 199–205.

Sachithra, V., Subhashini, L., 2023. How artificial intelligence uses to achieve the

agriculture sustainability: systematic review. Artif. Intell. Agric. 8, 46–59.

Saheb, T., 2022. Ethically Contentious Aspects of Artificial Intelligence surveillance: a Social Science Perspective. AI Ethics. https://doi.org/10.1007/s43681-022-00196-y.

Thomson, M.C., Connor, S.J., Zebiak, S.E., Jancloes, M., Mihretie, A., 2011. Africa needs climate data to fight disease. Nature 471 (7339), 440–442.

Tsokov, S., Lazarova, M., Aleksieva-Petrova, A., 2022. A hybrid spatiotemporal deep

model based on CNN and LSTM for air pollution prediction. Sustainability 14 (9),

5104.

Ullo, S.L., Sinha, G.R., 2020. Advances in smart environment monitoring systems using

IoT and sensors. Sensors 20 (11), 3113.

van Goor, H.M., van Loon, K., Breteler, M.J., Kalkman, C.J., Kaasjager, K.A., 2022.

Circadian patterns of heart rate, respiratory rate and skin temperature in
hospitalized COVID-19 patients. PLoS One 17 (7), e0268065.
Veeramanju, K., 2024. Predictive models for optimal irrigation scheduling and water
management: a review of AI and ML approaches. Int. J. Manage. Technol. Soc. Sci.
(IJMTS) 9 (2), 94–110.
Wu, D., Wang, H., Mohammed, H., Seidu, R., 2019. Quality risk analysis for sustainable smart water supply using data perception. IEEE Trans. Sustain. Comput. 5 (3), 377–388.
Wu, J., Zhang, Z., Tong, R., Zhou, Y., Hu, Z., Liu, K., 2023. Imaging feature-based
clustering of financial time series. PLoS One 18 (7), e0288836.
Xiang, X., Li, Q., Khan, S., Khalaf, O.I., 2021. Urban water resource management for
sustainable environment planning using artificial intelligence techniques. Environ.
Impact Assess. Rev. 86, 106515.
Yang, L., Driscol, J., Sarigai, S., Wu, Q., Chen, H., Lippitt, C.D., 2022. Google earth engine and artificial intelligence (AI): a comprehensive review. Remote Sens. (Basel) 14 (14), 3253.
Ye, Z., Yang, J., Zhong, N., Tu, X., Jia, J., Wang, J., 2020. Tackling environmental
challenges in pollution controls using artificial intelligence: a review. Sci. Total
Environ. 699, 134279. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134279
Zakaria, M.Z., Malek, M.A., Zolkepli, M.B., Ahmed, A., 2021. Application of artificial intelligence algorithms for hourly river level forecast: a case study of Muda River, Malaysia. Alexandria Eng. J. 60 (4), 4015–4028. https://doi.org/10.1016/j. aej.2021.02.046.
Zaresefat, M., Derakhshani, R., 2023. Revolutionizing groundwater management with
hybrid AI models: a practical review. Water (Basel) 15 (9), 1750. https://doi.org/
10.3390/w15091750.

Zhang, W.E., Sheng, Q.Z., Alhazmi, A., Li, C., 2020. Adversarial attacks on deep-learning models in natural language processing: a survey. ACM Trans. Intell. Syst. Technol. (TIST) 11 (3), 1–41.

Zheng, T., Bergin, M., Wang, G., Carlson, D., 2021. Local PM2. 5 hotspot detector at 300 m resolution: A random forest–convolutional neural network joint model jointly

trained on satellite images and meteorology. Remote Sens. 13 (7), 1356.

Zhou, X., Chai, C., Li, G., Sun, J., 2020. Database meets artificial intelligence: a survey. IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 34 (3), 1096–1116.

Zhu, M., Wang, J., Yang, X., Zhang, Y., Zhang, L., Ren, H., Ye, L., 2022. A review of the application of machine learning in water quality evaluation. Eco-Environ. Health.