النمذجة في الأنظمة البيئية: دراسة تحليلية للتطبيقات والتحديات

Modeling in Environmental Systems: An Analytical Study of Applications and Challenges



بوهالي سهام [1] [*]،

[1] جامعة الجزائر 3، الجزائر،

bouhali.sihem@univ-alger3.dz

تاريخ الإرسال: 2026/03/15 تاريخ القبول: 2026/05/24 تاريخ النشر: 2026/06/01

****

ملخص: تعد الأنظمة البيئية منظومات معقدة تتفاعل فيها المكونات الحية وغير الحية ضمن شبكة ديناميكية من العلاقات البيولوجية والفيزيائية والكيميائية. تكمن أهمية دراسة هذه الأنظمة في قدرتها على توفير فهم شامل للتغيرات البيئية وتأثير الأنشطة البشرية عليها، بما يساهم في حماية الموارد الطبيعية وضمان استدامتها للأجيال القادمة، كما تهدف هذه الورقة البحثية إلى استعراض دور النماذج البيئية كأداة علمية فعّالة لتحليل الظواهر البيئية، والتنبؤ بسلوك الأنظمة البيئية تحت تأثير العوامل الطبيعية والبشرية، وتقديم بيانات دقيقة لدعم صنع القرار ووضع السياسات البيئية. كما يسعى البحث إلى تسليط الضوء على التحديات المرتبطة باستخدام النماذج البيئية، بما في ذلك الدقة، وتوافر البيانات، وصعوبة تكامل النماذج عبر المقاييس المكانية والزمانية، ممّا يسهم هذا التحليل في تطوير استراتيجيات فعّالة للإدارة البيئية المستدامة وتعزيز استدامة الموارد.

الكلمات المفتاحية: النظام البيئي؛ النمذجة البيئية؛ النمذجة المكانية؛ الاستدامة البيئية.

Abstract: Ecosystems are complex systems in which living and non-living components interact within a dynamic network of biological, physical, and chemical relationships. Studying these systems is crucial for gaining a comprehensive understanding of environmental changes and the impacts of human activities, contributing to the protection and sustainable management of natural resources for future generations. This paper aims to examine the role of environmental models as effective scientific tools for analyzing environmental phenomena, predicting ecosystem behavior under natural and anthropogenic influences, and providing accurate data to support decision-making and environmental policy formulation. The study also highlights the challenges associated with using environmental models, including issues of accuracy, data availability, and the difficulty of integrating models across spatial and temporal scales. By addressing these challenges, the research seeks to inform the development of effective strategies for sustainable environmental management and the long-term preservation of resources.
Key words: Ecosystem; Environmental Modeling; Spatial Modeling; Environmental Sustainability.

[*] المؤلف المرسل

مقدمة:

إنّ الأنظمة البيئية معقدة بطبيعتها، وتتضمن تفاعلات ديناميكية بين مكوناتها الفيزيائية والبيولوجية والاجتماعية والاقتصادية، وقد أصبحت النمذجة أداة أساسية لفهم هذه الأنظمة، والتنبؤ بالظروف المستقبلية، ودعم الإدارة البيئية.

إذن، تُعد نماذج النظم البيئية ضرورية لفهم ديناميكيات وآليات مختلف القضايا البيئية (مثل تلوث الهواء، وتلوث المياه، والفيضانات، والجفاف، وتغيّر المناخ). والأهم من ذلك، أنها تُستخدم على نطاق واسع للتنبؤ بالنتائج المستقبلية للنظم البيئية دعما لاتخاذ القرارات الفعالة وتطوير السياسات. مع ذلك، تستند معظم النماذج إلى حالة ثابتة تفترض افتراضيا عدم حدوث تغييرات كبيرة في المستقبل. وقد أُفيد بشكل متكرر في السنوات الأخيرة أنّ هذا الافتراض الثابت لم يعد قائما في سياق تغيّر المناخ العالمي والأنشطة البشرية المكثفة، فقد تغيّرت العديد من الشروط والمؤشرات الداخلية في هذه النماذج بمرور الوقت، مما يؤدي إلى قدر كبير من عدم اليقين في التنبؤ المستقبلي. لذلك، أصبحت معالجة الظروف المتغيّرة في عملية نمذجة وتحليل النظم البيئية واحدة من أكثر القضايا تحديا في هذا المجال.

تتمثّل **الأهداف** الرئيسية لهذه الدراسة كما يلي:

- تحديد وتحليل التحديات الرئيسية التي تحد من موثوقية النماذج البيئية وقابليتها للاستخدام؛

- اقتراح استراتيجيات لتحسين فعالية ومتانة النماذج البيئية، لاسيما في ظل عدم اليقين والتعقيد؛

- تقييم التطبيقات الرئيسية للنمذجة البيئية في سياقات علمية متنوعة.

عليه، تقدم هذه الورقة البحثية دراسة تحليلية لنمذجة الأنظمة البيئية، مع التركيز على تطبيقاتها الرئيسية، والتحديات المرتبطة بها، فغالبا ما تواجه النماذج البيئية حالة من عدم اليقين، وثغرات في البيانات، وقيودا منهجية تُقلل من موثوقيتها التنبؤية. لذلك، نطرح الإشكالية الآتية:

إلى أي مدى تسهم تطبيقات النمذجة في تحسين فهم الأنظمة البيئية والتحديات التي تحدّ من فاعلية هذه النماذج في السياقات البيئية المختلفة؟

تنبثق عن هاته الإشكالية مجموعة **التساؤلات** التالية:

- ما هي الاستخدامات السائدة للنمذجة في العلوم البيئية حاليا؟
- ما هي القيود التي تُقلل من موثوقية النموذج أو شفافيته أو قيمته التشغيلية؟
- كيف يُمكن للابتكارات العلمية والمنهجية تحسين أداء النموذج؟

عليه، سنعتمد من خلال دراسة مفاهيمية مدعومة برؤى نظرية، تُحلل الدراسة مناهج النمذجة، وتحدد القيود الرئيسية، وتقترح مسارات منهجية لتحسين متانة النموذج وفعاليته في اتخاذ القرارات.

تسترشد الدراسة **بالفرضية الرئيسية** التالية:

- تُحسّن مناهج النمذجة التكاملية - التي تجمع بين البيانات التجريبية وتحليل النظم والتقنيات الحسابية المتقدمة - دقة النماذج البيئية وقابليتها للتطبيق بشكل ملحوظ، على الرغم من أوجه عدم اليقين الكامنة فيها.

ستركز هذه الدراسات على نماذج في قطاعات بيئية مختلفة، بما في ذلك المناخ، ومكافحة التلوث والتصحر، كما تطبق الدراسة تحليل النظم كإطار منهجي، حيث تدرس كيفية تصرف النظم البيئية ككيانات مترابطة. وتُعتبر النماذج تبسيطا لهذه النظم المعقدة، وتُقيّم بدقة حدود هذه التبسيطات؛ إضافة إلى تجميع تقنيات النمذجة: التي تتراوح بين الكمية والنوعية، مثل نماذج ديناميكيات النظام، والنماذج القائمة على العوامل، وأساليب التعلم الآلي، حيث سيتم تقييم كل تقنية، مع إيلاء اهتمام خاص لقدرتها على استيعاب عدم اليقين والتعقيد.

تقسيم الدراسة:

المبحث الأول: الاستخدامات السائدة للنمذجة في العلوم البيئية

المبحث الثاني: تحسين أداء النموذج من خلال الابتكارات التنكولوجية والذكاء الاصطناعي

المبحث الثالث: التحديات التي تواجه موثوقية النموذج أو قيمته التشغيلية

المبحث الأول

الاستخدامات السائدة للنمذجة في العلوم البيئية

تسعى الدول في إطار إدارة التحولات المستقبلية إلى تبني مجموعة من المقاربات الإستراتيجية التي تمكنها من استشراف التغيرات المحتملة والتعامل معها بشكل استباقي قبل أن تتحول إلى أزمات معقدة. ومن بين أبرز الأدوات المعتمدة في هذا السياق ما يعرف بخطط العمل الوطنية، والتي تمثل إطارا تخطيطيا يحدد الرؤية المستقبلية للعمل البيئي على مستوى الدولة، ويعكس توجهاتها الإستراتيجية في مجال حماية البيئة وتحقيق التنمية المستدامة، إضافة إلى النماذج البيئية التي تسعى لتعزيز تلك الحماية.

المطلب الأول: التخطيط البيئي في إطار السياسات الوطنية

يُعد التخطيط البيئي أحد الآليات الأساسية التي تعتمدها الحكومات ضمن سياساتها العامة، حيث يتم إعداده وفق أفق زمني متوسط أو طويل المدى قد يمتد في بعض الأحيان إلى خمس عشرة سنة، حيث يهدف هذا النوع من التخطيط إلى تحديد أهم الإشكالات البيئية والأولويات الإستراتيجية التي ينبغي معالجتها خلال تلك الفترة، مع تحديد الأدوار والمسؤوليات الموكلة لمختلف القطاعات والمؤسسات المعنية، سواء كانت حكومية أو مجتمعية. كما يتضمن جملة من الإجراءات العملية وبرامج العمل ومقترحات المشاريع التي يُفترض أن تسهم

في معالجة التحديات البيئية المطروحة وتعزيز فعالية السياسات العمومية في هذا المجال.[1] عليه، فالغرض من التخطيط البيئي أساسا هو ضمان الاستخدام الأمثل والكفء للموارد الطبيعية بما يحقق تلبية احتياجات جميع السكان بشكل عادل ومستدام، مع مراعاة التنوع البيئي والجغرافي للمناطق المختلفة، ويعني هذا أنّ عملية التخطيط لا تقتصر على توزيع الموارد المادية فقط، بل تشمل أيضا دراسة العلاقات المعقدة بين الإنسان والبيئة، وفهم كيفية تأثير الأنشطة البشرية على توازن النظم البيئية.

من هذا المنطلق، يعد التخطيط البيئي أداة أساسية لتوجيه التنمية بحيث تتماشى مع قدرات واستيعاب البيئة، وتقلل من مخاطر الإفراط في الاستغلال أو التدهور البيئي. كما يتيح هذا التخطيط وضع سياسات واستراتيجيات طويلة المدى تضمن الحفاظ على الموارد للأجيال الحالية والمقبلة، مع التكيف مع التغيرات الاقتصادية والاجتماعية والمناخية التي يمكن أن تؤثر على الأنظمة البيئية.

كما تتمثل الركيزة العملية للتخطيط البيئي في الدراسات التقييمية التي تساهم في تحديد العناصر البيئية والاقتصادية والاجتماعية الأكثر أهمية للنظام البيئي والمجتمع المحلي. وتشمل هذه الدراسات تقييم الموارد المائية والتربة والغابات والمصادر الحيوية الأخرى، فضلا عن تحليل الاحتياجات الاقتصادية والاجتماعية للمجتمعات المختلفة. ومن خلال هذه التقييمات، يمكن التعرف على أولوية الموارد وأماكن تركيز الضغوط البشرية على البيئة، ما يمكّن من وضع خطط إدارة متكاملة وفعالة. علاوة على ذلك، تساعد هذه العملية في توجيه الاستثمارات البيئية، وتحديد التدابير الوقائية، ووضع برامج للحد من الأثر البيئي السلبي، بما يعزز القدرة على التكيف مع التحديات المستقبلية ويضمن استدامة الموارد الطبيعية على المدى الطويل.[2]

المطلب الثاني: النماذج البيئية

تعد النماذج البيئية أدوات أساسية لفهم ديناميات الأنظمة البيئية المعقدة وتحليل تأثير العوامل الطبيعية والبشرية عليها، حيث تمكّن هذه النماذج الباحثين من تقييم المخاطر، ومحاكاة السيناريوهات المستقبلية، ودعم اتخاذ القرار في إدارة الموارد.

الفرع الأول: نمذجة المناخ

التي تتمثل في وضع نماذج مبنية على معادلات رياضية معينة تصوّر المناخ وأحواله تحت ظروف ومتغيرات معينة و التداعيات الناجمة عنها، ويستخدم لهذا الغرض كمبيوترات عملاقة يمكنها التعامل مع عدد كبير من المعطيات والبيانات المتعلقة بالمناخ و أحواله، وللتعرف على الآثار المحتملة أو المتوقعة بسبب زيادة درجة حرارة الغلاف الجوي بفعل غازات الصوبة أو الاحتباس الحراري.

---

[1] عادل عبد الرشيد عبد الرزاق، "التشريعات البيئية العربية ودورها في إرساء دعائم التخطيط البيئي"، **في ندوة** :دور التشريعات والقوانين في حماية البيئة العربية الشارقة 7 - 11 ماي 2005، ص 9.

[2] حسن أحمد شحاتة، **البيئة والمشكلة السكانية**، مصر: الدار العربية للكتاب، 2000، ص 212.

يستخدم علماء المناخ كمبيوترات عملاقة (super computers) لمحاولة التنبؤ بالأحوال المناخية وتقلباتها في المستقبل من خلال الربط بين أنماط الدورة العامة للرياح في كوكب الأرض، ودورات تيارات المحيط، ودور السحب في عكس الإشعاع الشمسي الواقع على الأرض، ودور رذاذ الكبريتات والغبار والدخان وبقية ملوثات الهواء الجوي في عكس الإشعاع الشمسي الواقع على الأرض... الخ، وذلك بهدف الحصول على نماذج دوران مقترنة (coupled general circulation models) والتي بوسعها محاكاة الأحوال المناخية طويلة الأمد.

تجدر الإشارة إلى أن النماذج المناخية ونماذج المحاكاة الحالية لازلت غير قادرة على توقع الأثر الفعلي للسحب في التغيرات المناخية المستقبلية، ومع ذلك فقد شهدت هذه النماذج تطورا مستمرا منذ نهاية القرن العشرين، والمرجح أن تتطور أكثر وأكثر وقد تصل إلى المستوى الذي يمكنها من توضيح الآثار الفعلية للتغيرات المناخية على الأنماط الهيدرولية زمانيا ومكانيا في ظل المناخ، وسواء نجحت هذه النماذج أو لم تنجح في هذا الهدف، فإنّه من الحكمة التفكير بعناية وحذر في النتائج المحتملة للتغيرات المناخية هذه.[1]

إنّ وجود نماذج عديدة للتنبؤ بالطقس بشقيها قصير وطويل المدى عالمية وإقليمية ذات قدرات انحلال جبارة لدى كثير من دوائر الأرصاد الجوية في العالم التي تمارس عملها تحت اسم «Global Atmospheric Watch»، أسهم في تفعيل برامج البحث في مجال محاكاة الواقع والتنبؤ بالمستقبل، ولقد كانت لنتائج هذه البرامج الأثر الأكبر في دق ناقوس الخطر بالنسبة للكثير من القضايا البيئية والتي أصبحت فيما بعد على رأس أولويات الدول والمنظمات الدولية.[2]

الفرع الثاني: النمذجة المكانية

تمّ إجراء النمذجة المكانية لانتشار الانبعاثات باستخدام برنامج متخصص لمحاكاة تشتت الملوثات في الغلاف الجوي، وذلك بهدف تحليل ديناميات انتشار الملوثات وتقدير تراكيزها المحتملة في المجال المكاني للدراسة. وقد استندت عملية النمذجة إلى إدخال بيانات مناخية مفصلة على أساس ساعي تخص شهري جانفي وجويلية من السنة، باعتبارهما يمثلان فترتين مناخيتين متباينتين تعكسان الخصائص المناخية الموسمية للمنطقة.

كما تمّ إدراج تراكيز الملوثات الناتجة عن مختلف مصادر الانبعاث، والتي جرى تقديرها اعتمادا على معاملات الانبعاث المعتمدة، حيث عُبِّر عن معدلات الانبعاث بوحدة غرام في الثانية (غم/ثا). ولغرض تحليل سيناريوهات التعرض القصوى، تم اعتماد فترة زمنية مقدارها ساعة واحدة كوحدة أساسية للنمذجة، نظرا

---

[1] مصطفى محمود سليمان، **المياه والبيئة الطبيعية في العالم العربي وقصة المياه في الصراع العربي الإسرائيلي**، الإسكندرية: دار الكتاب الحديث 2009، ص ص 747 - 749.

[2] سحر أمين حسين، **موسوعة التلوث البيئي**، عمان: دار دجلة 2008، ص ص 216، 217.

لاعتماد هذا المقياس الزمني في العديد من المعايير البيئية لتقييم مستويات التعرض للملوثات الجوية، لاسيما خلال فترات الذروة التي تشهد عادة أعلى تراكيز للانبعاثات.

قد أخذت عملية النمذجة في الحسبان جملة من المتغيرات المناخية المؤثرة في حركة وانتشار الملوثات، وفي مقدمتها اتجاهات الرياح التي تم تسجيلها وفق ستة عشر اتجاها مختلفا خلال فترة الرصد. كما تم إدخال بيانات سرعة الرياح ودرجات الحرارة ونسبة الرطوبة ومستوى التغييم، والتي أظهرت تباينا ملحوظا خلال فترة الدراسة. وقد جُمّعت هذه المعطيات ضمن ملف مناخي متكامل جرى إدراجه في البرنامج من أجل محاكاة الظروف المناخية الفعلية السائدة في المنطقة محل الدراسة.

بناء على ذلك، تمثّل مخرجات هذه النمذجة تقديرا للحالات القصوى لتراكيز الانبعاثات خلال فترة زمنية مقدارها ساعة واحدة، وذلك في ظل الظروف المناخية الحقيقية المسجلة في موقع الدراسة. وعليه، فإن النماذج الناتجة تعكس محاكاة كمية ومكانية لحركة انتشار الملوثات خلال شهري جانفي وجويلية، بما يتيح فهما أدق لأنماط تشتت الانبعاثات وتأثير العوامل المناخية عليها.

أولا: تركيز الانبعاثات في الهواء

إنّ تمديد فترة النمذجة إلى أكثر من ساعة لا يؤدي بالضرورة إلى تقديم نتائج نوعية مختلفة، إذ إنّ الملوثات التي تنتشر خلال الساعة الأولى تبدأ بالابتعاد تدريجيا عن مصدر الانبعاث، مما يؤدي إلى انخفاض تراكيزها بفعل عمليات التشتت والانتقال في الغلاف الجوي. وبناء عليه، فإنّ استمرار النمذجة خلال الساعات اللاحقة غالبا ما يعكس المسار ذاته لانتشار الانبعاثات، حيث تتناقص تراكيز الملوثات تدريجيا خلال الساعة الثانية والثالثة والرابعة، وصولا إلى فترات زمنية أطول قد تمتد إلى أربع وعشرين ساعة.

في هذا السياق، تتيح نماذج تشتت الملوثات، ولاسيما النماذج المعتمدة على التوزيع الغاوسي (Gaussian Dispersion Models)، إمكانية تحليل مدى مساهمة مصادر الانبعاث في تلويث الهواء المحيط بها، إضافة إلى تقدير مستويات تراكيز الملوثات ضمن المجال المكاني المتأثر بالانبعاثات. إذ تتباين هذه التراكيز تبعا للمسافة عن مصدر الانبعاث وكذلك وفق الامتداد المكاني الذي تغطيه سحابة الملوثات، بما يعكس تأثير العوامل المناخية والبيئية المحيطة بموقع المصدر.

كما تتيح هذه النماذج تمثيلا مكانيا لتوزيع تراكيز الملوثات في صورة مستويات أو طبقات تركيز (Concentration Levels)، الأمر الذي يسهم في تحديد المناطق الأكثر تعرضا للتلوث، ويُعد هذا التمثيل المكاني

أداة مهمة في توجيه عمليات الرصد الميداني لجودة الهواء، من خلال اختيار مواقع محطات القياس وفقا لمناطق التركيز المرتفع التي تكشف عنها النماذج.[1]

انطلاقا من ذلك، يمكن توظيف برنامج (EARMOD view) لمحاكاة التشتت المكاني للملوثات الصادرة عن مصادر تلوث الهواء الرئيسة. ويعتمد البرنامج في ذلك على إدخال البيانات المناخية المحلية إلى جانب المعطيات المرتبطة بحساب تراكيز الملوثات في الانبعاثات، بما يسمح بتقدير أنماط انتشارها مكانيا. وتوفر مخرجات هذا النموذج مؤشرات كمية تساعد على تقييم جودة الهواء المحيط من خلال تحليل مستويات تراكيز الملوثات وتحديد مناطق التأثر المحتملة بها.[2]

تقتضي دراسة تشتت الملوثات الجوية اعتماد مقاربة نمذجة متكاملة تجمع بين العمليات الفيزيائية المرتبطة بالأرصاد الجوية والعمليات الكيميائية التي تتحكم في تحولات الملوثات في الغلاف الجوي، إذ يتيح هذا التكامل المنهجي تطوير نماذج قادرة على محاكاة انتقال الملوثات المتعددة عبر مقاييس زمنية ومكانية مختلفة، بما يسمح بفهم ديناميات انتشارها وتحديد الاستراتيجيات المناسبة للحد من تأثيراتها وتحسين جودة الهواء، ويعتمد اختيار نموذج جودة الهواء الملائم على مجموعة من العوامل المنهجية، من أبرزها حجم المجال الجغرافي للدراسة، والإطار الزمني الذي تغطيه عملية النمذجة، إضافة إلى مدى توفر بيانات الإدخال اللازمة، وكذلك أهمية التفاعلات الكيميائية التي قد تؤثر في سلوك الملوثات في الغلاف الجوي. وتؤثر هذه المتغيرات بدرجة كبيرة في تحديد نوع نموذج جودة الهواء الأنسب للاستخدام في الدراسة.

وتعد نماذج جودة الهواء الحتمية (Deterministic Air Quality Models) من أكثر النماذج استخداما في الدراسات التطبيقية، حيث تعتمد عليها العديد من الهيئات التنظيمية المختصة بإدارة تلوث الهواء، وفي مقدمتها (US EPA) United States Environmental Protection Agency، التي توظف هذه النماذج لتحديد مصادر التلوث المساهمة في تدهور جودة الهواء، إضافة إلى تصميم استراتيجيات فعالة للحد من الانبعاثات والتخفيف من آثارها البيئية والصحية.

كما تُستخدم نماذج جودة الهواء على نطاق واسع ضمن إجراءات الترخيص البيئي للمشروعات الصناعية، إذ تسمح بتقييم ما إذا كانت الانبعاثات الناتجة عن مصدر جديد قد تؤدي إلى تجاوز المعايير المعتمدة لجودة الهواء المحيط؛ وفي الحالات التي تكون فيها البدائل التقنية محدودة، تُوظف هذه النماذج كذلك كأدوات تنبؤية لتقدير مدى فعالية البرامج التنظيمية المقترحة، مثل متطلبات التحكم في الانبعاثات أو

---

[1] عبد الرضا مطر عبد الرضا الهاشمي، "النمذجة المكانية لانبعاثات مصادر تلوث الهواء في مدينة الديوانية ومستويات تعرض السكان لها"، أطروحة جزء من متطلبات نيل درجة الدكتوراه فلسفة في الجغرافيا، جامعة القادسية، كلية الآداب، قسم الجغرافيا، 2019، ص ص 213.

[2] المرجع السابق، ص 214.

إجراءات منح التراخيص البيئية، وذلك بهدف الحد من مستويات التعرض البشري والبيئي للملوثات الجوية وتحسين إدارة جودة الهواء.[1]

كما تفرض نمذجة تغير المناخ تقييما متكاملا لأنه من الضروري وضع تنبؤات حول المستقبل في عدة مجالات مختلفة:[2]

- الحالة الاجتماعية والاقتصادية المستقبلية (بما في ذلك النمو السكاني، ومستوى التصنيع بين مختلف السكان، والطلب الاجتماعي والاقتصادي على أنماط الحياة الملوثة وتوافرها، وتطوير تقنيات الحد من التلوث)؛

- معدل انبعاث غازات الدفيئة وتثبيتها (على شكل دوال للحالة الاجتماعية والاقتصادية للعالم)؛

- آثار المستويات الناتجة من غازات الدفيئة على المناخ؛

- آثار تغيّر المناخ على البشر (على سبيل المثال الزراعة، وإمدادات المياه، وفقدان الأراضي بسبب ارتفاع مستوى سطح البحر، والظواهر الجوية المتطرّفة، وانتشار الأمراض، والأضرار التي تلحق بالنظم البيئية)؛ وكذا تبيان طرق التغيير (الإجراءات العالمية والإجراءات المحلية).

ثانيا: الأمطار الحمضية

يُعد التحكم في الترسيب الحمضي في أوروبا أبرز نجاح حققته وكالة الطاقة الدولية في وضع السياسات، حيث أنّه في هذا الإطار، تمّ اعتماد البروتوكول الثاني*الخاص بالكبريت ضمن اتفاقية لجنة الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا المتعلقة بالتلوث الجوي العابر للحدود بعيد المدى، حيث جرى التوقيع عليه في مدينة أوسلو خلال شهر جوان من سنة 1994 من قبل وزراء 33 دولة، وذلك بهدف تعزيز الجهود الدولية الرامية إلى خفض انبعاثات الكبريت والحد من آثارها البيئية، ولاسيما ما يرتبط بظاهرة الترسبات الحمضية وتأثيراتها العابرة للحدود الوطنية، واتفقت المفاوضات الدولية في البداية على مستوى التخفيض المطلوب. وكان ذلك أنه ينبغي أن يكون هناك تخفيض بنسبة 60% في فائض الترسيب في عام 1990 على الأحمال الحرجة**، وينبغي أن تقلل إستراتيجية التخفيض من التكلفة وأنّ التخفيضات في الانبعاثات لن تكون موحدة عبر البلدان

[1] تقرير برنامج الأمم المتحدة للبيئة، "دليل نمذجة وتنبؤ جودة الهواء لدول مجلس التعاون الدول الخليج العربية"، أفريل 2022، ص ص 11 -13.

[2] Martin Peirce, "Computer-Based Models in Integrated Environmental Assessment", Technical report for the European Environment Agency, n° (14), February 1998, p. 11.

* تمّ التوقيع على هذا البروتوكول في إطار (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) التابعة لـ (United Nations Economic Commission for Europe)، حيث مثّل خطوة مهمة نحو وضع التزامات دولية أكثر صرامة لتقليص انبعاثات مركبات الكبريت في الدول الصناعية.

** الحد الحرج هو مقدار الترسيب الذي يمكن أن تدعمه بيئات المستقبلات دون ضرر.

(كان البروتوكول الأول عبارة عن تخفيض بنسبة 30% بمعدل ثابت)، ولكن يجب أن تستند إلى الآثار وأن تكون فعالة اقتصاديا. وقد اعتُبرت هذه الطرق لتحديد التخفيضات الأكثر إنصافا.[1]

الفرع الثالث: النمذجة الحاسوبية

على الرغم من الزيادة الكبيرة في طاقة الحاسوب بأسعار معقولة على مرّ السنين، لا تزال النماذج أحادية التخصص مقيدة بالقدرة المتاحة لتكنولوجيا الحاسوب الحالية. غالبا ما يستطيع واضعو النماذج تصوّر نماذج أكثر تعقيدا، ويرغبون في تنفيذها بدقة أكبر، لكنها غير مجدية بعد بسبب متطلباتها الحسابية، ومن باب أولى يجب أن تعتمد نماذج تقييم البيئة المتكامل، التي تجمع عادة بين عدة نماذج أحادية التخصص إلى جانب ميزات أخرى مثل التحسين، على نماذج مبسطة للغاية، حيث تحتاج نماذج مكونات تقييم البيئة المتكامل، على الرغم من بساطتها، إلى عملية تحليل بطريقة ما بحيث تلتقط بدقة أهم جوانب ما تحاكيه، حيث أنّه يعتبر تطوير مثل هذه النماذج المختصرة أمرا صعبا مثل تطوير نماذج كاملة.

تتمثل العيوب الرئيسية للنماذج الحاسوبية الرياضية التقليدية ضعفها في التعامل مع الجوانب النوعية للنظام. على سبيل المثال، سيعتمد نجاح محاولة تغيير سلوك الناس لمنع مشكلة بيئية على العديد من العوامل بخلاف الاقتصاد الكمي البسيط (الموجه نحو النقد)، مثل توافر المعلومات والثقة والمصداقية والمكانة والأخلاقيات وما إلى ذلك؛ و من الممكن تنفيذ الفهم العلمي لآثار هذه العوامل في نموذج حاسوبي، ربما من خلال نظام خبير، بدلا من أكواد فورتران التقليدية.[2]

المبحث الثاني

تحسين أداء النموذج من خلال الابتكارات التكنولوجية والذكاء الاصطناعي أدخل المحتوى

جادل ستيفن شنايدر عالم المناخ في (1990) فيما يتعلق بالاتجاهات المستقبلية بأنها غير مؤكدة، مثل تغيّر المناخ وأنّ المجتمعات قد تختار بين ثلاثة مسارات للعمل؛ **أولا:** الاعتماد على الحلول التكنولوجية أو التدابير التصحيحية مع تغيير طفيف في سلوك الإنسان والمؤسسات؛ **ثانيا:** التكيف مع الظروف البيئية المتغيرة دون محاولة للتصدي لها؛ **وثالثا:** في محاولة لمنع حدوث تغييرات سلبية عن طريق تغيير الممارسات التي تسببها لهم البيئة دائما، تقريبا يفضلون التدابير الوقائية، التي يعتقدون أنها ضرورية لتجنب عواقب شديدة مثل تغير المناخ العالمي .

[1] Martin Peirce, Op.cit; p. 12.
[2] Ibid; p. 19.

كما أنّ العديد من المتفائلين، يرون في التكيف عرض كبديل واقعي وأقل تكلفة، لاسيما إذا كانت الشكوك حول وجود خطر كبير يهدد البيئة، أما الطريقة في اللجوء إلى ذلك، على المواطنين وصناع القرار إجراء الخيار الواضح حول السياسة المفضلة، ومثل هذا الاختيار من المرجح أن يكون حسب شدة تصوراتهم النسبية للمخاطر والتكاليف والفوائد؛ ويوضح شنايدر ذلك، بأنّ هناك زيادة في التركيز على الوقاية من التدهور البيئي والمخاطر التي كثيرا ما تعترض الصحة العامة وتغير المناخ هو مثال جيد حتى يستمر النزاع بشأن قضايا السياسة العامة على جميع مستويات الحكومة، وقدر كبير من الاتفاق حول البيئة موجود على نطاق أوسع في جدول أعمال القرن الحادي والعشرين، والسياسة البيئية تعتمد على التقدم على جبهات كثيرة البحث العلمي والابتكار التكنولوجي وإعادة هندسة العمليات الصناعية وتحسينات في إدارة الشركات، وتعزيز المؤسسات الحكومية بالقدرات اللازمة لوضع السياسات وتنفيذها، وانتشار أكثر للقيم البيئية، وزيادة في المعارف العامة والمشاركة الشعبية، ووضع إستراتيجية لخلق مجتمع عادل ومستدام ويمكن صناع القرار والناشطين البحث عن سبل لجعل النظام السياسي أكثر انفتاحا على المشاركة العامة، وأيضا أكثر استجابة لاحتياجات الجمهور.[1]

المطلب الأول: العلاقة بين التطور التكنولوجي وتطبيقات الذكاء الاصطناعي في حماية البيئة

مع التطور التكنولوجي الهائل الذي شهده العالم، أصبح من الممكن تسخير الأدوات الرقمية والتقنيات الحديثة لمعالجة المشكلات البيئية بطرق لم تكن متاحة من قبل، ويُعد الذكاء الاصطناعي أحد أبرز هذه الأدوات بفضل قدرته على تحليل البيانات الضخمة واستخراج الأنماط منها، مما يساعد في التنبؤ بالمشكلات البيئية قبل وقوعها. كما يتيح الذكاء الاصطناعي أدوات متقدمة لتحليل كميات هائلة من البيانات البيئية المجمعة من مصادر متنوعة مثل الأقمار الصناعية، أجهزة الاستشعار الأرضية والتقارير الميدانية، مما يمكنّها أن تقدم رؤى دقيقة حول تغيّرات المناخ، انتشار التلوث والتغيرات في النظم البيئية، فعلى سبيل المثال، يمكن للذكاء الاصطناعي تحليل بيانات الأقمار الصناعية لرصد تغيرات الغابات أو قياس معدلات التلوث، هذا التحليل يُستخدم لرصد إزالة الغابات اكتشاف الحرائق في مراحلها المبكرة، أو تحديد المناطق الأكثر تضررا من الجفاف. إضافة إلى ذلك، يمكن استخدام الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالكوارث الطبيعية مثل الأعاصير أو الفيضانات من خلال تحليل أنماط الطقس والتغيرات المناخية، مما يساعد على تقليل الخسائر البشرية والمادية.[2]

تستخدم في مجال إدارة الموارد الطبيعية، تقنيات الذكاء الاصطناعي لتطوير حلول مستدامة مثل: أنظمة الري الذكي التي تقلل من هدر المياه عبر مراقبة احتياجات التربة والنباتات بدقة. كما تستخدم الأنظمة الذكية

[1] Michael E. Kraft, "Environmental policy and politics", 5th edition, Library of Congress Cataloging-in- Publication Data 2011, pp. 400,401.

[2] خالد علي الدرندلي، وآخرون، "الذكاء الاصطناعي والبيئة: دور الذكاء الاصطناعي في حماية البيئة وتحقيق الاستدامة"، جامعة الزقازيق، كلية الحاسبات والمعلومات، قطاع شئون البيئة وخدمة المجتمع، د. س. ن، ص 04.

في تحسين كفاءة استخدام الطاقة في المنازل والمصانع من خلال التحكم الآلي في استهلاك الطاقة اعتمادا على أنماط الاستخدام. وفي مجال التنوع البيولوجي، تسهم أدوات الذكاء الاصطناعي في حماية الحياة البرية من خلال مراقبة الحيوانات المهددة بالانقراض باستخدام الطائرات بدون طيار وكاميرات استشعار الحركة، كما تستخدم الخوارزميات لتحديد مسارات هجرة الحيوانات وضمان الحفاظ على مواردها الطبيعية.

على صعيد أخير يستخدم الذكاء الاصطناعي في مجال تعزيز كفاءة الزراعة، حيث يُسهم في تحسين الإنتاجية الزراعية من خلال تحليل بيانات التربة والطقس، مما يمكن المزارعين من اتخاذ قرارات أكثر ذكاء بشأن مواعيد الزراعة والري كما تساعد الأنظمة الذكية في تقليل استخدام المبيدات الحشرية من خلال رصد الآفات بشكل دقيق واستهدافها فقط عند الحاجة.[1]

هذه التطبيقات ليست مجرد أفكار نظرية؛ بل هي أدوات فعالة تستخدم بالفعل في العديد من البلدان لمواجهة التحديات البيئية، وذلك لأنّها تقدم فرصة ذهبية لإحداث تحول جذري في الطريقة التي نتعامل بها مع مشكلات البيئة، مما يعزز الجهود العالمية لتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

المطلب الثاني: مواءمة الذكاء الاصطناعي مع التنمية المستدامة

عند دراسة الدور المحوري للذكاء الاصطناعي في مكافحة تغير المناخ، نجد أن كلا من اتفاق باريس للمتاح وتوصية منظمة الأمم المتحدة للتربية والعلم والثقافة (اليونسكو) بشأن أخلاقيات الذكاء الاصطناعي يسلطان الضوء على ضرورة مواءمة التطورات التكنولوجية مع المسؤوليات البيئية العالمية، وعلى الرغم من أن اتفاق المناخ لا يتناول الذكاء الاصطناعي بشكل مباشر، إلا أن المادة **10** منه تقر بالدور الحاسم للتكنولوجيا في مكافحة تغير المناخ، وتشدد على ضرورة تطوير التكنولوجيا ونشرها للحد من انبعاثات غازات الدفيئة وتعزيز القدرة على التكيف ويشير هذا الإقرار إلى أهمية التقدم التكنولوجي بما في ذلك الذكاء الاصطناعي في تحقيق أهداف الاتفاق.

كما تحدد توصية اليونسكو المبادئ الأساسية للنمو الأخلاقي للذكاء الاصطناعي، حيث تحدد هذه الاتفاقية القيم الأساسية لتطوير الذكاء الاصطناعي بشكل مسؤول كما تحدد المعيار العالمي المبدئي لأخلاقيات الذكاء الاصطناعي، مما يمكن كل دولة من فرض هذه المعايير، ويؤكد الاتفاق بشدة على الحاجة إلى ممارسات فعالة؛ في تحليل البيانات، واستهلاك الطاقة، واستخدام الموارد في مجال تطوير الذكاء الاصطناعي لتعزيز دوره في معالجة تغير المناخ والشواغل البيئية، وتحث التوصية على مواءمة تطوير الذكاء الاصطناعي مع القوانين والمعايير الدولية الراسخة التي تركز على حماية البيئة والتنمية المستدامة، كما تشجع التوصية على دمج الذكاء الاصطناعي في قدرة الدول على التعامل مع الكوارث، والرصد البيئي، وتعزيز الاستهلاك والإنتاج بشكل مستدام، ويعمل ذلك على مواءمة مبادرات الذكاء الاصطناعي مع الأهداف الأوسع للبيئة والاستدامة، مثل أهداف التنمية

[1] المرجع السابق، ص 05.

المستدامة للأمم المتحدة، مما يؤكد على الدور الهام الذي يمكن أن يلعبه الذكاء الاصطناعي في تحقيق هذه الأهداف العالمية.

إذن، يظهر التركيز بشكل مواز لهذه الاتفاقيات الدولية على النمو الأخلاقي للذكاء الاصطناعي ودمجه في إطار مكافحة تغير المناخ تحالفا في غاية الأهمية بين التطورات التكنولوجية والمسؤوليات البيئية العالمية. حيث تسلط كل من اتفاق باريس وتوصية اليونسكو الضوء على ضرورة، مواءمة تنمية الذكاء الاصطناعي مع الممارسات المستدامة، مما يؤكد على دورها المحوري في معالجة تغير المناخ وتعزيز ذكاء اصطناعي ذو معايير مسؤولة وأخلاقية.[1]

يدفع دمج الذكاء الاصطناعي التحول نحو الممارسات الصديقة للبيئة في قطاعات متعددة الأوساط الأكاديمية، والنقل، وإدارة النفايات، وقطاعي المياه والطاقة. وتؤكد هذه التحولات على تنوع الذكاء الاصطناعي وتأثيره العميق عبر قطاعات متنوعة في المساهمة في الإدارة البيئية، ومع ذلك، لا تزال التحديات قائمة لتسخير إمكانات الذكاء الاصطناعي الكاملة لمكافحة تغير المناخ، حيث يؤكد وجود قضايا مثل: أطر السياسات الغامضة، ومحدودية الوصول إلى حلول الذكاء الاصطناعي المصممة خصيصا، ومقاومة العامة للتغيير والحجم الكبير للاستثمارات والبنية التحتية اللازمة على الحاجة إلى حلول إستراتيجية.[2]

مع تزايد الاهتمام بالاستدامة، بدأت الكثير من الشركات في استخدام الذكاء الاصطناعي لتطوير تحليل دورة الحياة للمنتجات على سبيل المثال، في صناعة الملابس، يمكن للذكاء الاصطناعي تحليل كل مرحلة من مراحل دورة حياة المنتج من استخدام الألياف الصديقة للبيئة إلى تقنيات تصنيع غير ملوثة. هذا التحليل يساعد الشركات على اتخاذ قرارات مستنيرة لتقليل التأثير البيئي لمنتجاتها.

على صعيد آخر زادت الابتكارات التكنولوجية التي تقلل من الأثر البيئي للصناعات كالذكاء الاصطناعي في الطاقة المتجددة: فمع تزايد الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح، يساهم الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة هذه المصادر في محطات للطاقة الشمسية في ولاية أريزونا الأمريكية على سبيل المثال، تستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات التي يتم جمعها من الألواح الشمسية، مثل درجة الحرارة، والإشعاع الشمسي وتوافر الضوء بناء على هذه البيانات، يتم تعديل زاوية الألواح الشمسية تلقائيا لتوفير أقصى قدر من الطاقة مما يساهم في تقليل التكاليف وزيادة الكفاءة؛ إضافة إلى **تصنيع منخفض للكربون:** من خلال استخدام الذكاء الاصطناعي لتحليل العمليات الصناعية، حيث يمكن تطوير طرق تصنيع منخفضة الكربون في صناعة الأسمنت، حيث تمثل الانبعاثات من تصنيع الأسمنت

---

[1] وزارة البيئة والتغير المناخي، "ورقة بيضاء من حوار قطر الوطني حول تغير المناخ 2023: حلول الذكاء الاصطناعي لمكافحة تغير المناخ"، 15،16 أكتوبر 2023، ص 09.

[2] المرجع نفسه، ص 14.

جزءا كبيرا من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية، أين بدأت بعض الشركات في استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين استخدام الوقود البديل، فهذا لا يقلل فقط من استهلاك الطاقة، ولكن أيضا يقلل من الانبعاثات الملوثة.

كما تعتبر **تقنية تخزين الطاقة** من العناصر الرئيسية التي تساهم في تعزيز قدرة الشبكات الذكية على دعم الطاقة المتجددة. في هذا الصدد، يلعب الذكاء الاصطناعي دورا كبيرا في تحسين إدارة البطاريات، سواء من حيث تحسين فترة الشحن أو إدارة الطاقة المخزنة. حيث استخدم الذكاء الاصطناعي لتطوير خوارزميات تتيح للبطاريات المحمولة تخزين الطاقة المتجددة من محطات الطاقة الشمسية عند توافرها بكثرة، ثم إعادة توزيعها على الشبكة الكهربائية خلال فترات انخفاض الإنتاج تمكن هذا النظام من تحقيق تحسين كبير في فعالية تخزين الطاقة مقارنة بالأنظمة التقليدية.[1]

كذلك هناك **تقنيات جديدة للمساعدة في التحليل البيئي:**

تستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحليل البيانات البيئية التي يتم جمعها من خلال أجهزة الاستشعار المنتشرة في المدن والمناطق الصناعية من خلال تحليل هذه البيانات، يمكن تحديد مصادر التلوث ومعرفة الأنماط المتعلقة بتلوث الهواء، فيساعد هذا في اتخاذ قرارات أفضل بشأن تقليل الانبعاثات وتطوير السياسات البيئية المناسبة. في مدينة بكين الصينية مثلا، يتم استخدام الذكاء الاصطناعي في تحليل بيانات جودة الهواء بشكل مستمر وتوجيه الإجراءات المناسبة للحد من تلوث الهواء؛ إلى جانب **استخدام الذكاء الاصطناعي في الوقود النظيف**: حيث يعد تطوير الوقود النظيف أحد أهداف العديد من الدول في إطار مواجهة التغير المناخي، من خلال استخدام الذكاء الاصطناعي في أبحاث الوقود النظيف، يتم اكتشاف حلول جديدة لاستخدام المواد المستدامة بشكل أكثر فعالية، أيضا تستخدم بعض شركات الطاقة الذكاء الاصطناعي لتطوير تقنيات إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة المتجددة، مما يساهم في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.[2]

المطلب الثالث: وسائل الذكاء الاصطناعي المستخدمة في المجال البيئي

شهد المجال البيئي خلال السنوات الأخيرة توسعا ملحوظا في توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي، وذلك بهدف تحسين قدرات التحليل والتنبؤ وفهم التغيرات البيئية المعقدة. وتستند هذه التطبيقات إلى مجموعة

[1] المرجع السابق، ص ص 18 -24.

[2] المرجع نفسه، ص 25.

متنوعة من الأدوات والمنصات الرقمية التي تدعم تطوير النماذج الذكية وتحليل البيانات البيئية. ويمكن إبراز أهم هذه الوسائل على النحو الآتي:[1]

1- **أنظمة استشعار البيانات البيئية:** تعتمد على أجهزة استشعار متصلة تُستخدم لجمع البيانات المتعلقة بجودة الهواء والمياه ودرجات الحرارة وغيرها من المؤشرات البيئية، بما يسمح بتوفير بيانات دقيقة تدعم عمليات التحليل والتنبؤ البيئي؛

2- **تقنيات الاستشعار عن بعد (Remote Sensing)**: تشمل استخدام الأقمار الصناعية والطائرات دون طيار (الدرون) لجمع البيانات المتعلقة باستخدامات الأراضي والتغيرات في الغطاء النباتي، الأمر الذي يسهم في مراقبة التحولات البيئية على نطاق واسع؛

3- **(Global Open Data for Agriculture and Nutrition: GODAN):** تمثل شبكة عالمية تضم أكثر من ألف مؤسسة ومبتكر يعملون على تعزيز مشاركة البيانات المفتوحة في مجالات الزراعة والتغذية، وتساهم هذه المبادرة في دعم الوصول إلى البيانات الزراعية والبيئية بما يعزز الابتكار في تطوير الحلول المستدامة؛

4- **(منصة Taranis الزراعية الذكية):** تُعد منصة قائمة على الذكاء الاصطناعي تقدم خدمات متقدمة في مجال الزراعة الدقيقة، حيث توفر أدوات للتحليل والتصوير الميداني وإعداد التقارير المقارنة للمزارعين. كما تعتمد على قاعدة بيانات معرفية تعرف باسم (AgroBrain)، والتي تضم معلومات موسعة حول تهديدات المحاصيل، مما يتيح تشخيص المشكلات الزراعية بدقة أكبر؛

5- **إطار عمل(TensorFlow):** يعد إطار عمل مفتوح المصدر طورته Google، ويستخدم على نطاق واسع في بناء نماذج الذكاء الاصطناعي وتدريبها وتشغيلها على مختلف الأجهزة، ويتميز بدعمه لعدة لغات برمجة وأنظمة تشغيل، إضافة إلى منظومة متكاملة من الأدوات والمكتبات التي تسهم في تطوير تطبيقات التعلم الآلي، بما في ذلك التطبيقات المرتبطة بتحليل البيانات البيئية؛

6- **منصات تطوير نماذج الذكاء الاصطناعي:** تشمل بيئات البرمجة المتخصصة مثل (PyTorch) إلى جانب مكتبات لغة (Python) والتي تُستخدم على نطاق واسع في تطوير نماذج التعلم العميق لتصنيف الصور البيئية وتحليل البيانات المرتبطة بالأنظمة البيئية؛

[1] عمر مخيلف حسون، "استخدام تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحقيق أهداف التنمية المستدامة في المجال البيئي"، **مجلة العلوم الإنسانية كلية التربية للعلوم الإنسانية**، المجلد (16)، العدد (02)، 2025، ص 1375.

7- **تحليل الصور بواسطة الذكاء الاصطناعي:** تعتمد أدوات مثل (OpenCV) على تقنيات الرؤية الحاسوبية لتحليل الصور البيئية، مثل التعرف على الأنواع النباتية أو الحيوانية ومتابعة التغيرات في الغطاء النباتي؛

8- **التطبيقات الذكية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي:** تشمل تطبيقات الهواتف الذكية التي توظف تقنيات الذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة الهواء أو المياه، مما يساعد الأفراد والمؤسسات على اتخاذ قرارات بيئية أكثر استنارة؛

9- **نظم المعلومات الجغرافية (GIS):** توفر أدوات تحليل البيانات المكانية مثل: (ArcGIS وQGIS) إمكانات متقدمة لتحليل العلاقات المكانية بين الظواهر البيئية ودراسة تأثيراتها الجغرافية؛

10- **الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks):** تُستخدم هذه النماذج الحسابية في محاكاة الظواهر البيئية المعقدة، مثل: نمذجة التغيرات المناخية أو تحليل الأنماط السلوكية للكائنات الحية في النظم البيئية المختلفة؛

11- **تحليل البيانات الضخمة (Big Data Analytics):** تُوظف منصات مثل: (HadoopوSpark) لتحليل كميات كبيرة من البيانات البيئية واستخلاص الأنماط والاتجاهات التي تساعد في دعم اتخاذ القرار البيئي؛

12- **منصات الحوسبة السحابية (Cloud Computing Platforms):** تسمح خدمات الحوسبة السحابية مثل: (Amazon Web Services وGoogle Cloud Platform) معالجة البيانات البيئية الضخمة وتوفير بنية تحتية مرنة لتطوير تطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئية؛

13- **تقنيات التعلم الآلي (Machine Learning):** تُستخدم الخوارزميات في التنبؤ بالتغيرات المناخية، مثل تقدير معدلات الأمطار والجفاف أو التنبؤ بالفيضانات، إضافة إلى تطبيقات تصنيف البيانات البيئية، مثل تصنيف الأنواع الحية أو تقييم حالة النظم البيئية المختلفة.

عليه، تسهم في المجمل هذه الأدوات والتقنيات في تطوير قدرات تحليل البيانات البيئية وتعزيز فهم التحديات المرتبطة بالتغيرات المناخية والتدهور البيئي، كما تدعم تصميم سياسات واستراتيجيات أكثر فاعلية لتحقيق أهداف الاستدامة وحماية البيئة.

المبحث الثالث: التحديات التي تواجه موثوقية النموذج أو قيمته التشغيلية

تتمثل تحديات نمذجة النظم البيئية في العديد من الثغرات والشفافية في استخدامها خاصة أنّ اهتمام معظم الدول وخاصة الكبرى مقترن باقتصادها رغم تبني التوجه نحو التنمية المستدامة منذ نهاية ثمانينات القرن العشرين، وكذا بعد قمة جوهانسبورغ عام 2002.

المطلب الأول: عدم اليقين وفجوات البيانات

يمثل عدم اليقين أحد التحديات المنهجية الرئيسة التي تواجه دراسات النمذجة البيئية، نظرا لتعقّد النظم البيئية وتداخل العوامل الطبيعية والبشرية المؤثرة فيها، فالنظم البيئية تتسم بطبيعة ديناميكية وغير خطية، كما أنها تتأثر بعدد كبير من المتغيرات المناخية والفيزيائية والكيميائية التي يصعب قياسها بدقة أو التحكم فيها. ونتيجة لذلك، تصبح عملية بناء النماذج البيئية عملية تقريبية تعتمد على تمثيل مبسط للواقع، وهو ما يفتح المجال لوجود مستويات متفاوتة من عدم اليقين في نتائج النمذجة.

يزداد هذا التحدي تعقيدا في ظل محدودية البيانات البيئية المتاحة أو عدم اكتمالها، إذ تعتمد النماذج البيئية بدرجة كبيرة على جودة بيانات الإدخال ودقتها الزمنية والمكانية. وفي كثير من الحالات، تعاني الدراسات البيئية من نقص البيانات طويلة المدى أو ضعف التغطية المكانية لمحطات الرصد، الأمر الذي يؤدي إلى فجوات معرفية قد تؤثر في موثوقية نتائج النمذجة، كما يمكن أن تسهم أخطاء القياس الميداني، وعدم تجانس قواعد البيانات، وغياب بعض المتغيرات المؤثرة في إدخال قدر إضافي من الغموض وعدم الدقة في مخرجات النماذج.

علاوة على ذلك، فإنّ الطبيعة الاحتمالية أو العشوائية لبعض العمليات البيئية تزيد من درجة عدم اليقين في النماذج، خاصة في ما يتعلق بالظواهر المناخية والهيدرولوجية. فعلى سبيل المثال، تتسم أنماط هطول الأمطار بتقلبات زمنية ومكانية كبيرة يصعب التنبؤ بها بدقة، كما أنّ عمليات انتقال الملوثات في الغلاف الجوي أو في الأنظمة المائية تتأثر بعدة عوامل متغيرة مثل سرعة الرياح ودرجة الحرارة والتضاريس، ويؤدي هذا التداخل المعقد بين العوامل الطبيعية إلى صعوبة تمثيل هذه العمليات بدقة كاملة ضمن النماذج الرياضية.[1]

للتعامل مع هذه الإشكاليات، تعتمد العديد من الدراسات الحديثة على تقنيات تحليل عدم اليقين واختبارات الحساسية (Sensitivity Analysis) لتقييم مدى تأثير المتغيرات المختلفة في نتائج النمذجة، إضافة إلى استخدام قواعد بيانات متعددة المصادر وتحسين أنظمة الرصد البيئي، ويسهم هذا النهج في تعزيز موثوقية

[1] keith Beven, **Environmental Modelling: An Uncertain Future**, London: Routledge, 2009, pp. 6-8.

النماذج البيئية وتوفير تقديرات أكثر دقة يمكن الاعتماد عليها في دعم عملية اتخاذ القرار في مجالات إدارة الموارد الطبيعية وحماية البيئة.[1]

المطلب الثاني: تحدي الجمع بين الأساليب النوعية والكمية ومصادر البيانات

يمثل دمج البيانات النوعية والكمية تحديات وفرصا لنمذجة الوضع الاجتماعي والاقتصادي لاحظ الفيزيائي جون بلات (1964) ملاحظته الشهيرة بأنّ "العديد من القضايا العلمية الكبرى، وربما معظمها، نوعية وليست كمية، حتى في الفيزياء والكيمياء". ومع ذلك، غالبا ما تُوصف البيانات النوعية بأنها أدنى من البيانات الكمية لأغراض النمذجة، وهو أمر يُعتمد عليه عندما يكون الحصول على البيانات الكمية مستحيلا أو غير عملي. قد ينشأ هذا التردد من الاعتقاد بأنّ النماذج المستمدة من البيانات النوعية غامضة، وبالتالي يصعب التحقق من صحتها أو دحضها. من ناحية أخرى، تُقدم البيانات النوعية التي يجمعها علماء الاجتماع، غالبا في شكل سرديات، وجهات نظر متعمقة حول الأفراد وتفاعلاتهم مع البيئة الطبيعية والاجتماعية. وبالتالي، يُشار إلى البيانات النوعية باسم "البيانات الكثيفة" للتأكيد على الجودة التي تأتي معها، وهو ما يتعارض بشكل خاص مع الاتجاه الحالي المتمثل في المبالغة في تقدير "البيانات الضخمة".[2]

إذن، يمثل دمج الأساليب النوعية والكمية في الدراسات البيئية تحديا رئيسيا، وذلك نظرا لاختلاف طبيعة كل منهما في جمع البيانات وتحليلها وتفسيرها، حيث تعتمد **الأساليب الكمية** بشكل أساسي على القياسات الدقيقة والملاحظات التجريبية والنماذج الرياضية التي تصف العمليات البيئية بشكل عددي، مما يسمح بتقدير المتغيرات البيئية والتنبؤ بتطورها في المستقبل. أما **الأساليب النوعية** فتتجه نحو تحليل الظواهر البيئية والسلوكية من منظور وصفي، مثل المقابلات مع أصحاب المصلحة، الملاحظات الميدانية، والتحليلات التفسيرية للبيانات غير الرقمية، وذلك لفهم السياق الاجتماعي والبيئي الذي قد لا تظهره البيانات الكمية وحدها.

يبرز هذا التحدي أيضا بشكل خاص عند دراسة تأثيرات الأنشطة البشرية على النظم البيئية، حيث تتداخل العوامل الطبيعية والاقتصادية والاجتماعية في تحديد النتائج البيئية، وقد يصعب قياس بعض المتغيرات الهامة بشكل مباشر، مثل فعالية الإدارة البيئية أو إدراك المجتمعات المحلية للمخاطر البيئية. ومن هنا، يصبح الدمج بين البيانات الكمية والنوعية ضرورة منهجية لفهم الظواهر البيئية بشكل شامل ومتعدد الأبعاد، مما يسمح بتقديم تقديرات أكثر دقة للمؤشرات البيئية الأساسية، مثل جودة الهواء والمياه، ودرجة التعرض للملوثات، ومستوى تأثير النشاط البشري على النظم البيئية.

تشير الأدبيات العلمية إلى أنّ تحقيق تكامل فعّال بين الأساليب النوعية والكمية يتطلب اعتماد استراتيجيات واضحة لجمع البيانات وتحليلها، واستخدام أدوات منهجية قادرة على التعامل مع عدم اليقين

---

[1] **Ibid**; p. 9.

[2] Sondess Elsawah, and al; Eight Socio-Environmental Systems Modelling, vol (02), avril 2020, available at: <10 18174/sesma 2020216226>

والفجوات المعلوماتية، مثل اختبارات الحساسية، وتحليل التباين، وأساليب دمج البيانات متعددة المصادر. ويؤكد المؤلفون أن عدم مراعاة هذه التحديات يؤدي إلى مخرجات نموذجية ذات موثوقية منخفضة، ما قد يضعف القدرة على اتخاذ القرارات البيئية المستندة إلى الأدلة العلمية.[1]

المطلب الثالث: التحديات التي تواجه تنفيذ حلول الذكاء الاصطناعي

على الرغم من الفوائد الكبيرة التي يمكن أن تحققها تطبيقات الذكاء الاصطناعي، إلّا أنّ هناك تحديات بارزة يجب التغلب عليها:[2]

- **التكلفة المرتفعة للتكنولوجيا:** التكلفة الأولية لتطوير وتصنيع الأنظمة الذكية قد تكون عالية، مما يجعل من الصعب على الشركات الصغيرة والمتوسطة الاستفادة من هذه التقنيات؛

- **قضايا الخصوصية والأمان:** مع استخدام البيانات الضخمة في العمليات الصناعية، تظهر مخاوف بشأن حماية البيانات الشخصية والأمن السيبراني؛

- **تدريب القوى العاملة:** من الضروري تدريب العاملين في الصناعات على كيفية استخدام الأنظمة المدعمة بالذكاء الاصطناعي بشكل فعال، مما يتطلب استثمارا في التعليم والتطوير.

إلى جانب تحديات أخرى تشمل ما يلي:

1- **الافتقار إلى الوعي العام ومقاومة التغيير**: لا يزال تشجيع القبول العام والتغيير السلوكي عقبة شائعة في جميع أنحاء العالم، بيد أنّ إقناع البلدان والشركات بتبني حلول مدعومة بالذكاء الاصطناعي لتغيّر المناخ يقابل بمقاومة بسبب العادات الراسخة، الأعراف الثقافية، والشكوك تجاه فعالية الحلول وحماية الخصوصية الشخصية؛

2- **ارتفاع الاستثمار الأولي ونقص البنية التحتية:** يتطلب تنفيذ الحلول المدفوعة بالذكاء الاصطناعي لمكافحة تغيّر المناخ استثمارات أولية كبيرة وتطوير البنية التحتية على نطاق واسع، حيث أكدّت الأبحاث من جامعة كاليفورنيا أنّ صناعة أجهزة الكمبيوتر يتضمن التعدين وإنتاج المواد الخام اللذان يتطلبان عمالة كثيفة، مما يساهم بشكل كبير في الأثر البيئي السلبي لاستخدام الذكاء الاصطناعي، أين تستهلك عملية تدريب نماذج الذكاء الاصطناعي مثل "تشات جي بي تي – 3" ما يقرب من 500 مليلتر من المياه للرد على 20 إلى 50 استفسارا؛ بعبارة أخرى، يوضح هذا المثال الآثار على الموارد المرتبطة بالطاقة الحاسوبية ومتطلبات معالجة البيانات لتدريب نماذج اللغات المتقدمة، حيث أنّ إنشاء نظم مستدامة ودمج التكنولوجيا المتقدمة يتطلب تكاليف كبيرة، بدء من تطوير البنية التحتية لجمع البيانات وصولا إلى إنشاء أنظمة للطاقة المتجددة؛ وعلى المستوى العام للمجال، تستخدم الأوساط الأكاديمية الذكاء الاصطناعي بشكل تحويلي في معالجة مجموعات

[1] keith Beven, **Op.cit;** pp. 45-49.

[2] الدرندلي وآخرون، مرجع سابق الذكر، ص ص 18،19.

البيانات الشاملة. وخاصة صور الأقمار الصناعية، مما يمثل تقدما كبيرا في نمذجة أنماط المناخ والتحليل التنبؤي، لقد أحدث دمج الذكاء الاصطناعي ثورة في عمق فهم ديناميكيات تغير المناخ، مما أتاح تطوير استراتيجيات أكثر دقة وفعالية لتخفيف أضراره.[1]

إنّ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في قطاع الطاقة كذلك تواجه تحديات كبيرة تؤثر على فعاليتها واعتمادها على نطاق واسع، ذلك أنّها تعتمد بشكل أساسي على البيانات، ورغم توفر كميات كبيرة منها في أنظمة الطاقة إلا أنّ معالجتها وتفسيرها يواجهان عقبات عديدة، مثل تعقيد البيانات وصعوبة تكاملها من مصادر متعددة. بالإضافة إلى ذلك، تعد تكاليف البنية التحتية تحديا رئيسيا، حيث إنّ تنفيذ تقنيات الذكاء الاصطناعي في قطاعات الطاقة يتطلب استثمارات كبيرة في المعدات البرامج، والتدريب. هذه التكاليف تكون أكثر تأثيرا في الدول النامية، التي غالبا ما تواجه صعوبة في تخصيص الموارد اللازمة لتبني هذه التقنيات المتقدمة، مما يشكل عائقا أمام استفادتها من الفوائد المحتملة للذكاء الاصطناعي في مجال الطاقة؛ فعلى على الرغم من الفوائد الهائلة التي يقدمها الذكاء الاصطناعي في معالجة التحديات البيئية، إلا أنّ هناك أخطار بيئية ناشئة قد تنجم عن استخدام هذه التقنية بشكل غير مدروس:[2]

- يتطلب تشغيل أنظمة الذكاء الاصطناعي كميات كبيرة من الطاقة، خاصة في مراكز البيانات التي تعتمد على عمليات حسابية مكثفة لمعالجة البيانات وتدريب النماذج وفقا لتقارير علمية، فإنّ تدريب نموذج ذكاء اصطناعي واحد يمكن أن يستهلك طاقة كبيرة جدا يؤدي الى انبعاثات كربونية كبيرة؛
- يؤدي الاعتماد المتزايد على أجهزة الاستشعار وانترنت الأشياء (IoT) المستخدمة في جمع البيانات البيئية إلى زيادة النفايات الإلكترونية، إذا لم تدار هذه النفايات بشكل صحيح، فقد تتسبب في تلوث التربة والمياه بسبب تسرب المواد السامة، حيث تشير التقارير إلى أنّ العالم ينتج سنويا أكثر من 50 مليون طن من النفايات الإلكترونية؛
- في بعض الأحيان، قد تستخدم أنظمة الذكاء الاصطناعي لتسريع العمليات الصناعية أو الزراعية بطرق غير مستدامة، مما قد يؤدي إلى استنزاف الموارد الطبيعية. على سبيل المثال، قد تؤدي تطبيقات الري الذكية إلى استغلال موارد المياه الجوفية بشكل مفرط إذا لم تدار بعناية، كما حدث في مناطق من الهند حيث انخفضت مستويات المياه الجوفية بشكل كبير، مما أثّر على الأمن المائي أيضا.

---

[1] وزارة البيئة والتغير المناخي، مرجع سابق الذكر، ص 14.

[2] الدرندلي وآخرون، مرجع سابق الذكر، ص 41.

خاتمة:

تُعدّ النمذجة في الأنظمة البيئية أداة محورية لفهم دينامية النظم المعقّدة التي تربط بين المكوّنات الحية وغير الحية. وقد أظهرت الدراسة أنّ النماذج البيئية – بمختلف أنواعها الرياضية والمحاكاة الحاسوبية ونماذج التعلم الآلي – أصبحت وسيلة لا غنى عنها للتنبؤ بالتغيرات البيئية، ودعم اتخاذ القرار، وتقييم الآثار المحتملة للأنشطة البشرية وتغيّر المناخ. ورغم التقدم الملحوظ في هذا المجال، ما تزال عدة تحديات قائمة، أبرزها محدودية البيانات، عدم اليقين في المدخلات والنتائج، وتعقّد التفاعلات البيئية التي تجعل عملية النمذجة أكثر حساسية لأيّ افتراضات أو اختلالات.

إلى جانب تأكيد المعطيات المستخلصة من الدراسة أنّ تحسين فعالية النماذج البيئية يتطلب تكاملا بين المعرفة العلمية، التقنيات الحديثة، والبيانات الموثوقة؛ كما يبرز دور التعاون بين الباحثين وصانعي السياسات في توجيه النماذج نحو خدمة حماية النظم البيئية وتعزيز التنمية المستدامة.

يعد الذكاء الاصطناعي وسيلة ثورية تساهم في حماية البيئة وتعزيز الاستدامة، إلا أنه يطرح في الوقت ذاته تحديات ومخاطر تستوجب التعامل معها بحكمة؛ ومن خلال اتخاذ خطوات استباقية لمواجهة هذه التحديات، يمكن ضمان أن تصبح هذه التقنية قوة محركة نحو مستقبل مستدام دون التأثير سلبا على البيئة أو المجتمعات.

كما أنّ السعي نحو التقدم التكنولوجي ينبغي أن يترافق مع الحرص على تحقيق الاستدامة البيئية، ويمكن تحقيق هذا التوازن من خلال تبني خطوات مدروسة تسهم في حماية البيئة والمحافظة عليها في ظل التطور التكنولوجي المستمر، ففي إطار حماية البيئة، قد يكون من الصعب تحديد الأطراف المسؤولة في حال تسببت الأنظمة بأضرار بيئية؛ لذلك، من الضروري أن تكون الخوارزميات متاحة كمصدر مفتوح لضمان الشفافية وتعزيز المساءلة. هذا **من جهة.**

من جهة أخرى، تلعب الحكومات دورا حيويا في تنظيم استخدام الذكاء الاصطناعي، وذلك عن طريق سن التشريعات التي تلزم الشركات بتقييم التأثير البيئي لتقنياتها قبل تبنيها؛ بالإضافة إلى ذلك، يمكن تعزيز الوعي بأهمية الاستدامة البيئية، مما يسهم بشكل إيجابي في تطوير وتصميم تقنيات مستقبلية أكثر صديقة للبيئة.

-التوصيات:

- لضمان الاستخدام الأمثل لتقنيات الابتكار التكنولوجي والذكاء الاصطناعي في مجال نمذجة الأنظمة البيئية، يمكن إتباع مجموعة من الخطوات الهامة:

- **أولا**، يجب دعم الأبحاث والتطوير في مجال خوارزميات الذكاء الاصطناعي بهدف تحسين كفاءتها وتقليل استهلاكها للطاقة؛

- **ثانيا**، يتطلب الأمر تعزيز وعي المهندسين والمطورين بأهمية تبني ممارسات تساهم في الحفاظ على البيئة، مما يسهم في تصميم تقنيات أكثر استدامة وأقل استهلاكا للطاقة؛

- **ثالثا**، يُعد التعاون الدولي بين الحكومات والمنظمات العالمية أمرا أساسيا لوضع خطط واستراتيجيات شاملة تحقق توازنا مثاليا بين التقدم التكنولوجي والحفاظ على البيئة؛

- **رابعا**، ينبغي وضع قوانين ولوائح تنظيمية تلزم الشركات بتقييم التأثير البيئي لتقنياتها قبل طرحها في السوق؛

- **أخيرا**، فإنّ إنشاء أنظمة متطورة لإعادة تدوير النفايات الإلكترونية، بما يشمل تأسيس مراكز خاصة لإعادة تدوير الأجهزة المستخدمة في مجال الذكاء الاصطناعي، يعد خطوة حيوية نحو تقليل الآثار البيئية.

قائمة المراجع:

أولا: باللغة العربية

-الموسوعة:

1. حسين سحر أمين، موسوعة التلوث البيئي، عمان: دار دجلة، 2008.

-Hussein, Sahar Amin, (2008), Encyclopedia of Environmental Pollution, Amman: Dar Dijlah.

-الكتب:

1. شحاتة حسن أحمد، (2000)، البيئة والمشكلة السكانية، مصر: الدار العربية للكتاب.

-Shehata, Hassan Ahmed, (2000), Environment and the Population Problem, Egypt: Al-Dar Al-Arabiya Lil-Kitab.

2. سليمان مصطفى محمود، (2009)، المياه والبيئة الطبيعية في العالم العربي وقصة المياه في الصراع العربي الإسرائيلي، الإسكندرية: دار الكتاب الحديث.

-Suleiman, Mustafa Mahmoud, (2009), Water and the Natural Environment in the Arab World and the Story of Water in the Arab-Israeli Conflict, Alexandria: Dar Al-Kitab Al-Hadith.

-المقال:

1. حسون عمر مخيلف، (2025)، "استخدام تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحقيق أهداف التنمية المستدامة في المجال البيئي"، مجلة العلوم الإنسانية كلية التربية للعلوم الإنسانية، المجلد 16، العدد 02.

-Hassoun, Omar Mukhaylif, (2025). "The Use of Artificial Intelligence Applications to Achieve Sustainable Development Goals in the Environmental Field", Journal of Human Sciences, Faculty of Education for Human Sciences, Vol. 16, No. 02.

-المواد غير المنشورة:

1- الدرندلي خالد علي، وآخرون، (د.س.ن)، "الذكاء الاصطناعي والبيئة: دور الذكاء الاصطناعي في حماية البيئة وتحقيق الاستدامة"، جامعة الزقازيق، كلية الحاسبات والمعلومات، قطاع شئون البيئة وخدمة المجتمع.

-Al-Darandali, Khaled Ali, et al; (n.d.), "Artificial Intelligence and the Environment: The Role of AI in Environmental Protection and Sustainability", Zagazig University, Faculty of Computers and Information, Department of Environmental Affairs and Community Service.

2- الهاشمي عبد الرضا مطر عبد الرضا، (2019)، "النمذجة المكانية لانبعاثات مصادر تلوث الهواء في مدينة الديوانية ومستويات تعرض السكان لها"، أطروحة جزء من متطلبات نيل درجة الدكتوراه فلسفة في الجغرافيا، جامعة القادسية، كلية الآداب، قسم الجغرافيا.

-Al-Hashimi, Abdul Redha Matar Abdul Redha, (2019), "Spatial Modeling of Emissions from Air Pollution Sources in Al-Diwaniyah City and Levels of Population Exposure", PhD Thesis (Geography), University of Al-Qadisiyah, Faculty of Arts, Department of Geography.

-التقارير

1- وزارة البيئة والتغير المناخي، (2023)، "ورقة بيضاء من حوار قطر الوطني حول تغير المناخ 2023: حلول الذكاء الاصطناعي لمكافحة تغير المناخ".

-Ministry of Environment and Climate Change, (2023), White Paper from Qatar National Dialogue on Climate Change 2023: AI Solutions to Combat Climate Change.

2- تقرير برنامج الأمم المتحدة للبيئة، (2022)، "دليل نمذجة وتنبؤ جودة الهواء لدول مجلس التعاون الدول الخليج العربية".

-United Nations Environment Program, (2022), Air Quality Modeling and Forecasting Guide for Gulf Cooperation Council Countries.

-ندوة

1- عبد الرزاق عادل عبد الرشيد، (2005)، " التشريعات البيئية العربية ودورها في إرساء دعائم التخطيط البيئي "، **في ندوة** :دور التشريعات والقوانين في حماية البيئة العربية الشارقة.

-Abdel-Razaq, Adel Abdul Rashid, (2005), "Arab Environmental Legislation and Its Role in Establishing the Foundations of Environmental Planning", In Seminar: The Role of Laws and Regulations in Protecting the Arab Environment, Sharjah**.**

ثانيا: باللغة الأجنبية

Book :

1. Beven keith, (2009), Environmental Modelling: An Uncertain Future, London: Routledge.

Reports :

1. Elsawah Sondess, and al;(2020), Eight Socio-Environmental Systems Modeling, vol. 02, available at: <10 18174/sesma 2020216226>
2. Kraft, E. Michael, (2011), "Environmental policy and politics", 5th edition. Library of Congress Cataloging-in- Publication Data.
3. Peirce Martin, (1998), "Computer-Based Models in Integrated Environmental Assessment", Technical report for the European Environment Agency, n° 14.