مؤسسة زايد الدولية للبيئة
Zayed International Foundation for the Environment

الذكاء الاصطناعي لكوكب أخضر

تسخير التكنولوجيا لتحقيق الاستدامة البيئية

د. أنور فتح الرحمن أحمد دفع الله

العنـــوان :

«الذكاء الاصطناعي لكوكب أخضر
تسخير التكنولوجيا لتحقيق الاستدامة البيئية»

د. أنور فتح الرحمن أحمد دفع الله

الموضـــــــــــوع : بـيـئـــــي
عـــــــــدد الصفحات : 252 صفحة
قيـــــــــاس الصفحة : 17 - 24 سم

التصنيف العمـــــري : **E**
إذن طباعة رقم : 2570207 - 01 - 03 - **MC**
الرقم الدولي للسلسلة : 978-9948-678-98-4 **(ISBN) :**

الطبعة الأولى
1447 هـ - **2025** م

جميع الحقوق محفوظة ®
يمنع نسخ هذا الإصدار أو أجزائه بكل الطرق، كالطبع، والتصوير، والنقل، والترجمة،
والتسجيل المرئي، والمسموع والإلكتروني، إلا بإذن خطي من
«مؤسسة زايد الدولية للبيئة»

تم تصنيف وتحديد الفئة العمرية التي تلائم محتوى الكتب
وفقاً لنظام التصنيف العمري الصادر عن المجلس الوطني للإعلام»

ص. ب: 28399 دبي - الإمارات العربية المتحدة
برج العلي - شارع الشيخ زايد - رقم (504)
هاتف : 3326666 4 971+ - فاكس : 3326777 4 971+
البريد الإلكتروني : **ea@zayedprize.org.ae**
الموقع الإلكتروني : **www.zayedprize.org.ae**

الآراء الواردة في هذا الكتاب
لا تعبر بالضرورة عن رأي «**مؤسسة زايد الدولية للبيئة**»، ولا تتحمل أي مسؤولية
مهما كانت طبيعتها ناشئة أو متصلة بمحتويات هذا الكتاب

الذكاء الاصطناعي
لكوكب أخضر

تقديم

نحن في مؤسسة زايد الدولية للبيئة نسعد بإطلاق أول كتاب باللغة العربية حول «الذكاء الإصطناعي الأخضر» في وقت نحتاج فيه إلى حلول مبتكرة وسريعة للتحديات الكبيرة التي تواجه قطاع البيئة والاستدامة على مستوى الوطن العربي. ويُعتبر هذا الكتاب دليلاً شاملاً لكيفية استخدام الذكاء الإصطناعي لتحقيق عالم أكثر استدامة وكوكب معافى. نحن نؤمن بأن الذكاء الإصطناعي يمكن أن يكون أداة قوية في مواجهة تحديات البيئة العالمية. من خلال تقديم هذا الكتاب، نهدف إلى تعزيز الوعي حول إمكانيات الذكاء الإصطناعي في هذا المجال، وتشجيع المزيد من البحث والتطبيق في هذا الاتجاه.

يتناول الكتاب مجموعة متنوعة من التطبيقات العملية للذكاء الإصطناعي في مجالات مثل الزراعة، والطاقة المتجددة، والنقل، وإدارة النفايات ويقدم الكتاب أمثلة حية وحالات نجاح من مختلف أنحاء العالم، مما يجعله مصدرًا ثمينًا للمهتمين بالتقنية والبيئة على حد سواء. وبفضل تحليله الشامل وتوثيقه الدقيق، يقدم الكتاب رؤى قيمة وحلول عملية يمكن تطبيقها لتحقيق كوكب أخضر ما يجعله مفيدًا للباحثين، والمهندسين، وصانعي السياسات، والطلاب، وكل من يهتم بالتقنية وتأثيرها على البيئة.

هذا الكتاب يتيح لبلدان المنطقة العربية اغتنام الفرص التكنولوجية لمواجهة التحديات البيئية المعقدة التي تواجهها في العصر الحالي من بين أمن مائي وغذائي وتصحر وتغير مناخي كاسح، إذ يمكن لدول المنطقة أن تقوم بتحويل التهديدات البيئية إلى فرص للابتكار والتكيف لتحقيق التنمية المستدامة. وهذا يتطلب حوكمة ذكية ومدروسة ومشاركة شاملة وتعاوناً إقليمياً حقيقياً.

وما يميز هذا الكتاب أنه مكتوب بلغة واضحة ومبسطة، مما يجعله متاحًا للجميع، سواء كانوا متخصصين في مجال الذكاء الإصطناعي أو مجرد مهتمين بالبيئة. يتضمن الكتاب أيضًا رسوم بيانية وأمثلة توضيحية تساعد في فهم المفاهيم المعقدة بسهولة. وهذا ديدن سلسلة كتاب عالم البيئة التي ترفع شعار: «كتابة المتخصصين لغير المتخصصين».

وبالرغم من أن الذكاء الاصطناعي يعتبر من أبرز الابتكارات التكنولوجية في القرن الحادي والعشرين بقدرته على إحداث تحولات جذرية في حياتنا، من الصحة والتعليم إلى الصناعة والترحال، إلا أن هناك تحفظات حول أثره البيئي، لا سيما فيما يتعلق ببصمته الكربونية واستهلاكه لكميات هائلة من الطاقة والمياه للتشغيل والتبريد. كما أن هناك تحديات أخرى قد تنشأ من تقاطع الذكاء الاصطناعي مع البيئة والأمن السيبراني. وهذا ما تم تناوله أيضاً في هذا الكتاب لتحقيق توازن بين التقدم التكنولوجي والمسؤولية البيئية والأخلاقية.

هذا الكتاب يهدف إلى رفع الوعي العام حول الأثر المتبادل بين البيئة والذكاء الاصطناعي بما يسهم في ترسيخ ثقافة الاستدامة بين كلا المستخدمين والمطورين ويعزز الطلب على ذكاء اصطناعي أكثر كفاءة وصديق للبيئة.

نرجو لكم قراءة شيقة لاكتشاف كيف يمكن للذكاء الإصطناعي أن يساهم في بناء مستقبل أخضر ومستدام و نتمنى أن يكون هذا الكتاب بمثابة نقطة انطلاق لمزيد من الابتكار والتطبيقات التي تعزز الاستدامة البيئية في جميع أنحاء العالم.

أ. د / محمد أحمد بن فهد

رئيس تحرير سلسلة كتاب عالم البيئة
رئيس اللجنة العليا لمؤسسة زايد الدولية للبيئة

المحتـويـات

فهـــرس الكـتـــاب

تقديم		٥
شكر وتقدير		٢٣
الفصل الأول		
مقدمة في الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية		٣٩
١.١	مقدمة	٤١
٢,١	أساسيات الذكاء الاصطناعي وتطوره	٤١
١,٢,١	التعلم الآلي: محرك الذكاء الاصطناعي	٤١
٢,٢,١	التعلم العميق ومعالجة اللغات الطبيعية: توسيع آفاق الذكاء الاصطناعي	٤٢
٣,١	التطبيقات البيئية للذكاء الاصطناعي	٤٤
١,٣,١	الطبيعة المزدوجة للذكاء الاصطناعي	٤٥
٢,٣,١	حدود البحث الناشئة: الذكاء الاصطناعي الأخضر والنمذجة البيئية	٤٥
٣,٣,١	الذكاء الاصطناعي لإدارة المياه الذكية	٤٧
٤,٣,١	الذكاء الاصطناعي للنمذجة البيئية	٤٩
٤,١	مشاريع مبتكرة بارزة	٥٠
١,٤,١	برنامج الذكاء الاصطناعي من أجل الأرض من مايكروسوفت	٥٠
٢,٤,١	تحالف Climate TRACE	٥٠

١,٤,١	مبادرات نوعية إضافية في مجال الذكاء الاصطناعي المستدام	٥١
١,٥	الذكاء الاصطناعي والاقتصاد الدائري	٥٢
١,٥,١	فرز النفايات وإعادة التدوير الذكية	٥٢
١,٥,٢	التحليلات التنبؤية وإطالة عمر المنتجات	٥٣
١,٥,٣	جوازات سفر المواد والتوائم الرقمية	٥٣
١,٦	الاعتبارات الأخلاقية في الذكاء الاصطناعي البيئي	٥٥
١,٦,١	عدالة البيانات والشمولية	٥٥
١,٦,٢	الشفافية وقابلية التفسير	٥٥
١,٦,٣	الموازنة بين الحلول التقنية والاجتماعية	٥٦
١,٦,٤	دمج معارف السكان الأصليين	٥٦
	الفصل الثاني	
	الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد الطبيعية وتغير المناخ	٥٩
٢,١	مقدمـــة	٥٦
٢,٢	الذكاء الاصطناعي في مراقبة المناخ والتنبؤ به	٦٠
٢,٢,١	تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مراقبة المناخ	٦٠
٢,٢,٢	نماذج المناخ المعززة بالذكاء الاصطناعي	٦٢
٢,٢,٣	المراقبة الصوتية القائمة على أجهزة الاستشعار	٦٣
٢,٣	التحليلات التنبؤية في تخصيص الموارد	٦٥
٢,٣,١	تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد	٦٥
٢,٣,٢	إدارة مخاطر الغابات والحرائق	٦٧

٢,٤	التحديات والاعتبارات الأخلاقية	٦٨
٢,٤,١	تحديات تطبيق الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد	٦٨
٢,٤,٢	أطر أخلاقية لتطبيق الذكاء الاصطناعي البيئي	٦٩
٢,٥	توصيات سياسية	٧٠
٢,٥,١	تعزيز البنية التحتية للبيانات البيئية	٧٠
٢,٥,٢	تحفيز البحث والتطوير في الذكاء الاصطناعي الأخضر	٧٠
٢,٥,٣	تطوير أطر تنظيمية وتشريعية فعّالة	٧١
٢,٦	آفاق ناشئة	٧١
٢,٧	فرص الاستفادة عربياً	٧٢
٢.٧.١	التنبؤ بمواسم الجفاف وإدارة الموارد المائية	٧٢
٢.٧.٢	الري الذكي والزراعة الدقيقة	٧٢
٣.٧.٢	مراقبة التصحر وتغير الغطاء النباتي	٧٢
٢.٨	الخاتمة	٧٤
	الفصل الثالث	
	المدن الذكية وتطبيقات الطاقة المستدامة	٧٧
٣,١	مقدمة	٧٧
٣,٢	البنية التحتية للمدن الذكية المدفوعة بالذكاء الاصطناعي	٧٨
٣,٢,١	تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تطوير المدن الذكية	٧٨
٣,٣	تحسين الطاقة المتجددة من خلال الذكاء الاصطناعي	٨٥
٣,٣,١	تطبيقات الذكاء الاصطناعي في أنظمة الطاقة المتجددة	٨٥
٣,٤	التمويل الأخضر والتصميم المستدام المدعوم بالذكاء الاصطناعي	٨٨

٣,٤,١	التمويل الأخضر للتنمية الحضرية المستدامة	٨٨
٣,٤,٢	التصميم المستدام المعتمد على الذكاء الاصطناعي	٨٩
٣,٥	الاعتبارات الأخلاقية والتحديات	٩٠
٣,٥,١	خصوصية البيانات وأمنها	٩٠
٣,٥.٢	الفجوة الرقمية والعدالة	٩١
٣,٥.٣	البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي	٩٢
٣,٥.٤	الاعتماد التقني المفرط	٩٢
٣,٦	فرص الاستفادة عربيًا	٩٣
٣,٦.١	التنبؤ بالجفاف وتحسين الاستعداد الزراعي	٩٣
٣,٦.٢	تحسين إدارة الموارد المائية	٩٤
٣,٦.٣	رصد التصحر ومراقبة الغطاء النباتي	٩٤
٣,٦.٤	بناء القدرات والابتكار المحلي	٩٥
٣,٧	خاتمـــة	٩٥
	الفصل الرابع	
	الذكاء الاصطناعي في حفظ التنوع البيولوجي والزراعة المستدامة	٩٩
٤,١	مقدمة	٩٩
٤,٢	الذكاء الاصطناعي في حماية الحياة البرية ومراقبة التنوع البيولوجي	١٠١
٤,٢,١	المراقبة البيئية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي	١٠١
٤,٢,٢	الكشف الصوتي والمراقبة	١٠٢
٤,٢,٣	نماذج الحفظ التنبؤية	١٠٣

٣,٤	الذكاء الاصطناعي في الزراعة المستدامة	١٠٥
١,٣,٤	تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الزراعة المستدامة	١٠٥
٢,٣,٤	تعزيز الأمن الغذائي وتقليل الفاقد	١١٠
٣,٣,٤	دور الذكاء الاصطناعي في مكافحة تغير المناخ	١١٠
٤,٤	التحديات والاعتبارات الأخلاقية	١١١
١,٤,٤	تحديات البيانات	١١١
٢,٤,٤	تحديات التنفيذ	١١١
٣,٤,٤	قضايا أخلاقية	١١٢
٥,٤	الدروس المستفادة والتوجهات المستقبلية	١١٢
١,٥.٤	التوجهات المستقبلية	١١٣
٦,٤	فرص الاستفادة عربيًا	١١٣
٧,٤	الخاتمـــة	١١٥
	الفصل الخامس	
	تمويل الذكاء الاصطناعي الأخضر: من المختبر إلى السوق	١١٩
١,٥	مقدمة: الوقود المالي للثورة التكنولوجية المستدامة	١١٩
٢,٥	المحفزات الحكومية والمؤسسية: وضع الأسس للابتكار الأخضر	١٢٠
١,٢,٥	Horizon Europe : أوروبا تقود الطريق ببرنامج	١٢٠
٢,٢,٥	المبادرات الأمريكية والصينية: سباق نحو القمة الخضراء	١٢١
٣,٥	عمالقة التكنولوجيا: الاستثمار الاستراتيجي في الاستدامة	١٢٢
١,٣,٥	من خفض التكاليف إلى قيادة السوق	١٢٣

٢,٣,٥	الشراكات بين القطاعين العام والخاص: تسريع وتيرة الابتكار	١٢٤
٤,٥	رأس المال الجريء: المراهنة على مستقبل المناخ	١٢٥
١,٤,٥	صناديق متخصصة ولاعبون جدد	١٢٦
٢,٤,٥	ما الذي يبحث عنه المستثمرون؟	١٢٧
٥,٥	التحديات والطريق إلى الأمام	١٢٧
٦,٥	خاتمة: بناء مستقبل ذكي ومستدام	١٢٩
	الفصل السادس	
	الوعي البيئي الرقمي والمشاركة المجتمعية	١٣٣
١,٦	المقدمة	١٣٣
٢,٦	التعليم البيئي والتوعية المدعومة بالذكاء الاصطناعي	١٣٤
١,٢,٦	تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التعلم البيئي	١٣٤
٣,٦	المشاركة المجتمعية من خلال الذكاء الاصطناعي	١٣٨
١,٣,٦	العلوم المواطنية المدعومة بالذكاء الاصطناعي والمراقبة البيئية التشاركية	١٣٨
٢. ٣.٦	الذكاء الاصطناعي لحملات الدعوة البيئية	١٤٢
٤,٦	العائد البيئي على الاستثمار (eROI) لمبادرات المجتمع المدعومة بالذكاء الاصطناعي	١٤٤
١,٤,٦	التحليل المقارن: قبل وبعد دمج الذكاء الاصطناعي	١٤٥
٥,٦	الاعتبارات والتحديات الأخلاقية	١٤٧
١,٥,٦	الفجوة الرقمية وإمكانية الوصول	١٤٧

٢,٥,٦	خصوصية البيانات والموافقة	١٤٧
٣,٥,٦	التحيز الخوارزمي والتمثيل	١٤٨
٤,٥,٦	الموازنة بين التكنولوجيا والمعرفة التقليدية	١٤٨
٦,٦	الخاتمـــــة	١٥٠
	الفصل السابع	
	التحديات المتقاطعة للذكاء الاصطناعي والبيئة والأمن السيبراني	١٥٥
١,٧	مقدمة: الحدود المتقاربة	١٥٥
٢,٧	مخاطر الأمن السيبراني في تطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئية	١٥٦
١,٢,٧	نقاط ضعف الأنظمة البيئية التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي	١٥٦
٢,٢,٧	التأثير على البنية التحتية البيئية الحيوية	١٥٧
٣,٢,٧	سلامة البيانات والذكاء الاصطناعي العدائي	١٥٩
٣,٧	تحدي المعلومات المضللة والتضليل في الخطاب البيئي	١٥٩
١,٣,٧	دور الذكاء الاصطناعي في تضخيم المعلومات المضللة	١٦١
٢,٣,٧	تأكل المعرفة العلمية وثقة الجمهور	١٦١
٤,٧	الاعتبارات الأخلاقية والحوكمة في تقاطع الذكاء الاصطناعي والبيئة والأمن السيبراني	١٦٢
١,٤,٧	تطوير الذكاء الاصطناعي المسؤول	١٦٣
٢,٤,٧	أطر السياسات والتنظيم	١٦٣
٣,٤,٧	التعاون الدولي	١٦٤
٥,٧	الخاتمة: التنقل في المستقبل بالمرونة والنزاهة	١٦٥

الفصل الثامن

	الأطر الاستراتيجية لاستدامة الذكاء الاصطناعي في المنطقة العربية	١٦٩
١,٨	المقدمة	١٦٩
٢,٨	التحديات البيئية في السياق العربي	١٧٠
١,٢,٨	ندرة المياه: أزمة وجودية تتطلب حلولاً ذكية	١٧٠
٢,٢,٨	الانبعاثات الكربونية المرتفعة: تحدي الاقتصادات المعتمدة على الوقود الأحفوري	١٧٢
٣,٢,٨	التصحر وتدهور الأراضي: تهديد للأمن الغذائي والنظم البيئية	١٧٣
٤,٢,٨	التوسع الحضري وضغط البنية التحتية	١٧٤
٥,٢,٨	التعرض لتغير المناخ: منطقة في خط المواجهة	١٧٥
٣,٨	المبادرات الحالية للذكاء الاصطناعي والبيئة في المنطقة	١٧٦
١,٣,٨	الإمارات العربية المتحدة	١٧٧
٢,٣,٨	المملكة العربية السعودية – نيوم وما بعدها	١٧٨
٣,٣,٨	قطر – الذكاء الاصطناعي لكفاءة الموارد	١٧٩
٤,٣,٨	مصر – التقارب الناشئ بين الذكاء الاصطناعي والبيئة	١٨٠
٥,٣,٨	المغرب – الريادة في الذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة	١٨٠
٦,٣,٨	الأردن – الذكاء الاصطناعي للتكيف مع المناخ	١٨١
٧.٣,٨	دول عربية أخرى: جهود ناشئة ومتفاوتة	١٨٢
٨. ٣.٨	دول عربية أخرى جهود ناشئة ومتفاوتة	١٨٣
٤,٨	الأطر الاستراتيجية وخرائط الطريق للاستدامة المدفوعة بالذكاء الاصطناعي	١٨٤

٨,٤,١	إنشاء منصات إقليمية للذكاء الاصطناعي البيئي	١٨٥
٨,٤,٢	إطلاق صناديق تحدي الذكاء الاصطناعي من أجل الاستدامة	١٨٧
٨,٤,٣	بناء شراكات عابرة للحدود في مجال الذكاء الاصطناعي والبيئة	١٨٨
٨,٤,٤	تطوير سياسات ذكاء اصطناعي أخلاقية وشاملة للبيئة	١٨٩
٨,٤,٥	إنشاء برامج محو الأمية في الذكاء الاصطناعي الأخضر	١٩٠
٨,٥	التحديات والمخاطر الاستراتيجية في نشر الذكاء الاصطناعي: منظور متعدد الأبعاد	١٩١
٨,٥,١	التحديات التقنية	١٩١
٨,٥,٢	الحواجز الاقتصادية	١٩٢
٨,٥,٣	الآثار الاجتماعية	١٩٢
٨,٥,٤	المخاوف الأخلاقية	١٩٣
٨,٥,٥	المخاطر الصحية (بمعنى أوسع)	١٩٣
٨,٦	الابتكارات الناشئة في الذكاء الاصطناعي من أجل مستقبل مستدام	١٩٣
٨,٦,١	نماذج تحسين الذكاء الاصطناعي الأخضر	١٩٤
٨,٦,٢	احتجاز الكربون والحلول المناخية المدعومة بالذكاء الاصطناعي	١٩٤
٨,٦,٣	الوقاية التنبؤية من الكوارث	١٩٥
٨,٦,٤	استعادة النظم البيئية بمساعدة الذكاء الاصطناعي	١٩٥
٨,٦,٥	أنظمة الذكاء الاصطناعي المستوحاة من الأحياء	١٩٥
٨,٦,٦	التعلم الموحد للبيانات البيئية	١٩٦
٨,٧	ضمان أن يخدم الذكاء الاصطناعي الاستدامة، لا ضدها	١٩٦
٨,٧,١	تصميم أنظمة ذكاء اصطناعي موفرة للطاقة	١٩٦

٢,٧,٨	توجيه الذكاء الاصطناعي نحو حلول الاستدامة	١٩٧
٣,٧,٨	ترسيخ مبادئ الذكاء الاصطناعي المسؤول	١٩٧
٤,٧,٨	تعزيز الأطر التنظيمية	١٩٨
٥,٧,٨	تعزيز التعاون بين القطاعات	١٩٨
٦,٧,٨	بناء الوعي والتدريب على الذكاء الاصطناعي المستدام	١٩٨
٧,٧,٨	رسالة إلى صناع القرار	١٩٩
٨,٨	الخاتمـــة	٢٠٠
	الفصل التاسع	
	البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي	٢٠٣
١,٩	المقدمة: الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية	٢٠٣
٢,٩	استهلاك الذكاء الاصطناعي للطاقة وانبعاثات الكربون	٢٠٤
١,٢,٩	التحديات العامة في استهلاك الطاقة	٢٠٥
٢,٢,٩	مقارنات استهلاك الطاقة ChatGPT مقابل بحث Google	٢٠٦
٣,٢,٩	مراكز البيانات المخصصة للذكاء الاصطناعي	٢٠٨
٣,٩	الأثر البيئي لدورة حياة الذكاء الاصطناعي	٢٠٩
١,٣,٩	تصنيع الأجهزة	٢٠٩
٢,٣,٩	مراكز البيانات (الكهرباء واستهلاك المياه)	٢٠٩
٣,٣,٩	تدريب النماذج	٢١١
٤,٣,٩	الاستخدام المستمر	٢١٢
٥,٣,٩	النفايات الإلكترونية	٢١٢
٤,٩	الأحكام القضائية والتحديات البيئية لمراكز البيانات	٢١٣

٥,٩	حلول مبتكرة لتقليل البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي	٢١٥
١,٥,٩	مراكز البيانات في الفضاء: المفهوم والفوائد	٢١٦
٢,٥,٩	تقنيات التبريد المتقدمة والطاقة المتجددة	٢١٨
٣,٥,٩	تطوير خوارزميات ذكاء اصطناعي أكثر كفاءة	٢١٩
٦,٩	التحديات الأخلاقية والاجتماعية	٢٢١
٧,٩	التحديات والفرص المستقبلية	٢٢٢
	خاتمـــة: فجر جديد يشرق فيه الذكاء على كوكبنا	٢٢٤

فهـــرس الجـــداول

الجدول ١: مؤشرات قياس استدامة النقل الذكي	٧٩
الجدول ٢: قبل وبعد دمج الذكاء الاصطناعي	١٤٥
الجدول ٣: جدول ملخص للتحديات البيئية الرئيسية	١٧٦
الجدول ٤: نقاط القوة والفجوات المقارنة عبر الدول العربية	١٨٤

فهـــرس الـمـلاحـق

ملحق رقم ١ : نماذج وأدوات لتقييم الأثر البيئي للتقنيات الرقمية والذكاء الاصطناعي	٢٣٦
ملحق رقم ٢ : المنهجية والمؤشرات	٢٤٢

فهرس الأشكـال

الشكل ١ : أنواع الذكاء الاصطناعي المختلفة	٤٣
الشكل٢ : تأثير الذكاء الاصطناعي على كفاءة استخدام المياه في الزراعة	٤٨
الشكل ٣ : الطبيعة المزدوجة للذكاء الاصطناعي	٥٤
الشكل٤ : المراقبة الفورية لإزالة الغابات باستخدام الذكاء الاصطناعي	٦٢
الشكل ٥ : تأثير نظام اطلمرور الذكي في بيتسبرغ (Surtrac)	٨٠
الشكل٦ : نموذج سلال ذكية لإدارة النفايات	٨١
الشكل ٧ : حصة المباني من استهلاك الطاقة العالمي	٨٤
الشكل٨ : تقنية الرؤية والرش (See & Spray): ثورة في استخدام مبيدات الأعشاب	١٠٨
الشكل ٩ : كيف يعمل تطبيق بلانتكس	١٠٩
الشكل ١٠ : نظام جوجل للتنبؤ بالفيضانات المدعوم بالذكاء الاصطناعي	١٤١
الشكل ١١ : iNaturalist : تمكين علم المواطن بالذكاء الاصطناعي	١٤٤
الشكل ١٢ : المخاطر السيبرانية على أنظمة الذكاء الاصطناعي البيئية	١٦٠
الشكل ١٣ : الضغوط البيئية الرئيسية في المنطقة العربية	١٧٢
الشكل١٤ : خريطة طريق للاستدامة البيئية المدفوعة بالذكاء الاصطناعي	١٨٦
الشكل ١٥ : دورة حياة الذكاء الاصطناعي وتأثير كل مرحلة على البصمة البيئية	٢٠٥

الشكل ١٦ : النسبة الحالية الافتراضية لاستخدام الطاقة المتجددة مقابل الأحفورية	٢٠٦
الشكل ١٧ : استهلاك الطاقة: استعلام واحد للذكاء الاصطناعي مقابل بحث جوجل	٢٠٧
الشكل ١٨ : نسبة الطاقة المستهلكة في مراكز البيانات بين الحوسبة والتبريد	٢٠٨
الشكل ١٩ : مقارنة استهلاك المياه في حالة مركز البيانات التابع لشركة جوجل في تشيلي	٢١٠
الشكل ٢٠ : دورة الحياة البيئية الخفية لأنظمة الذكاء الاصطناعي	٢١٣
الشكل٢١ : الأثر الكربوني المنخفض المتوقع لمراكز البيانات الفضائية مقارنة بالأرضية	٢١٧
الشكل٢٢ : مقارنة مرئية توضح كيف أن التبريد بالسائل أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة من التبريد بالهواء	٢١٩
الشكل٢٣ : يُبرز الكفاءة العالية للتعلم الفيدرالي من حيث تقليل استهلاك الطاقة المرتبط بنقل البيانات	٢٢٠
الشكل٢٤ : ظهر كيف يمكن للنماذج المصغّرة أو المحسّنة أن تستهلك طاقة أقل بنسبة كبيرة مقارنة بالنماذج الضخمة مثل GPT - 3	٢٢١

شكر وتقدير

أتوجّه بخالص الشكر والامتنان إلى هيئة تحرير سلسلة كتاب عالم البيئة بمؤسسة زايد الدولية للبيئة والسادة المحكّمين، د. سعد مامون أبو علوان ود. محسن الخديسي، الذين أسهموا بملاحظاتهم القيّمة في إثراء هذا الكتاب وصقله. لقد كانت إشاراتهم الدقيقة وتنبيهاتهم الموضوعية بمثابة بوصلة هادية، لفتت الانتباه إلى نقاط جوهرية تستحق التعمق والتوسّع، وألهمتني لإعادة النظر في بعض المواضع بما يخدم وحدة العمل ويزيده وضوحًا واتساقًا. إن ما أضفوه من رؤى نقدية بنّاءة لم يكن مجرد ملاحظات عابرة، بل مساهمات حقيقية أضافت للكتاب عمقًا وثراءً، وجعلت صفحاته أكثر توازنًا وفائدة للباحثين والقراء على حد سواء.

كما لا يفوتني أن أتقدّم بجزيل الشكر والعرفان لكل من ساعد وساهم ودعم خلال رحلة إعداد هذا العمل، سواء بمراجعة أو بمعلومة أو بإشارة نافعة. لقد كان لتلك اللمسات دور فاعل في أن يخرج هذا الكتاب بصورته الحالية، شاملاً ومتوازنًا.

فجزى الله الجميع خير الجزاء، وجعل ما بذلوه من وقت وجهد وعلم في ميزان حسناتهم، ونفع بهم وبعلمهم.

المـؤلـف

المُقَدِّمَة

GPS
ph

المُقَدِّمَة

يضعنا القرن الحادي والعشرين أمام مفارقة عميقة ومقلقة. فمن جهة، نشهد سباقًا عالميًا غير مسبوق نحو الهيمنة في مجال الذكاء الاصطناعي، حيث تتنافس الحكومات والشركات الكبرى على حد سواءً في ضخ استثمارات مليارية ووضع استراتيجيات طموحة، مدركةً أن السيطرة على هذه التقنية الثورية هي مفتاح القوة والنفوذ في المستقبل. ومن جهة أخرى، وبينما تصل قدراتنا التكنولوجية إلى هذه الآفاق غير المسبوقة، تواجه النظم الطبيعية التي تدعم الحياة على كوكبنا تهديدات وجودية متزايدة.

إن هذا السباق المحموم نحو الهيمنة الرقمية يتكشف على خلفية قاتمة؛ فلم يعد تغير المناخ، وفقدان التنوع البيولوجي، واستنزاف الموارد، والتلوث مجرد مخاطر مستقبلية، بل أصبحت حقائق راهنة تشكل حاضر ومستقبل جميع الكائنات الحية. وقد تسارعت وتيرة هذا التنافس التكنولوجي بشكل ملحوظ، فبحلول عام ٢٠٢٠، كانت أكثر من ٣٠ دولة حول العالم قد شرعت في صياغة استراتيجياتها الوطنية للذكاء الاصطناعي، مدفوعة بتصريحات مؤثرة مثل تلك التي أطلقها الرئيس الروسي فلاديمير بوتين في عام ٢٠١٧، حينما أكد أن «من يصبح قائدًا في هذا المجال سيصبح حاكم العالم»[1].

وفي هذا السياق، برزت دول عربية سباقة، حيث أطلقت دولة الإمارات العربية

(1) Roxana Radu, «Steering the governance of artificial intelligence: national strategies in perspective,» Policy and Society 40, no. 2 (June 2021): 178–193, https://doi.org/10.108014494035.2021.1929728/

المتحدة استراتيجيتها الوطنية للذكاء الاصطناعي في عام ٢٠١٧ [١]، تبعتها دول أخرى في المنطقة مثل قطر ومصر في عام ٢٠١٩ [٢][٣]. وتتجسد ضخامة هذا التوجه العالمي في حجم الاستثمارات المرصودة، والتي يُتوقع أن تقارب ٢٠٠ مليار دولار عالميًا بحلول عام ٢٠٢٥ [٤]، مع إعلان شركات كبرى عن استثمارات بمليارات الدولارات لتوسيع قدراتها في هذا المجال.

في خضم هذه التحولات البيئية العاجلة وهذا السباق التكنولوجي المتسارع، يبرز الذكاء الاصطناعي ليس فقط كإنجاز تقني أو ساحة للتنافس الجيوسياسي، بل كقوة محورية قادرة على تسريع التدهور أو دعم التعافي البيئي. هنا تكمن المفارقة الأساسية وجوهر التحدي الذي نواجهه: فالخيار ليس في التكنولوجيا ذاتها، بل في كيفية توظيف هذه القوة الهائلة بوعي ومسؤولية وأخلاقية.

ينطلق هذا الكتاب، «الذكاء الاصطناعي من أجل كوكب أخضر: تسخير التكنولوجيا لتحقيق الاستدامة البيئية»، من إيمان راسخ بأن الذكاء الاصطناعي، عند تصميمه بعناية وتطبيقه بمسؤولية، يمكن أن يصبح ركيزة أساسية في الجهود العالمية

(1) UAE Government, «UAE Strategy for Artificial Intelligence,» The Official Portal of the UAE Government, accessed August 1, 2025, https://u.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/strategies-plans-and-visions/government-services-and-digital-transformation/uae-strategy-for-artificial-intelligence

(2) Microsoft News, «Qatar is leading the world in AI; here›s how,» December 19, 2023, https://news.microsoft.com/en-xm/202319/12//qatar-is-leading-the-world-in-ai-heres-how/.

(3) OECD, «EGYPT›S NATIONAL AI STRATEGY,» STIP Compass, accessed August 1, 2025, https://stip.oecd.org/stip/interactive-dashboards/policy-initiatives/20232%Fdata%2FpolicyInitiatives%2F26476.

(4) Goldman Sachs, «AI investment forecast to approach $200 billion globally by 2025,» August 1, 2023, https://www.goldmansachs.com/insights/articles/ai-investment-forecast-to-approach-200-billion-globally-by-2025.

الهادفة إلى حماية كوكب الأرض واستعادته والحفاظ عليه للأجيال القادمة. إنه دعوة لإعادة تصور الذكاء الاصطناعي، ليس فقط كأداة لزيادة الكفاءة والربح أو لتحقيق الهيمنة الاستراتيجية، بل كجسر يربط بين البراعة البشرية وضرورة حماية الكوكب.

تكمن أهمية هذا الكتاب في أنه يأتي في لحظة تاريخية حاسمة، حيث تتشكل مسارات الذكاء الاصطناعي وتُرسَم سياساته لسنوات قادمة. ففي ظل التركيز العالمي على التنافس الاقتصادي والاستراتيجي، غالبًا ما يتم تهميش البعد البيئي أو اعتباره قضية ثانوية. لذا، يسعى هذا العمل إلى سد هذه الفجوة، وتقديم خارطة طريق عملية وواضحة لواضعي السياسات والمبتكرين وقادة الأعمال والمجتمع المدني. إنه لا يهدف فقط إلى استعراض الإمكانيات، بل إلى تحفيز حوار بنّاء وتوجيه الاستثمارات والابتكارات نحو مستقبل لا يتعارض فيه التقدم التكنولوجي مع صحة الكوكب، بل يعمل على تعزيزها بشكل فعال.

لماذا هذا الكتاب الآن؟

لم يكن تقاطع الذكاء الاصطناعي مع الاستدامة أكثر أهمية مما هو عليه اليوم. فمع وضع الحكومات أهدافًا طموحة لتحقيق الحياد الكربوني، وتحول الصناعات نحو عمليات أكثر استدامة، ومطالبة المواطنين بإجراءات مناخية حاسمة، يتزايد الإدراك بأن الأساليب التقليدية وحدها لم تعد كافية لمواجهة حجم التحديات البيئية. نحن بحاجة ماسة إلى:

- **مراقبة شاملة وفورية:** لفهم التغيرات البيئية المعقدة على نطاق كوكبي.
- **نماذج تنبؤية دقيقة:** لتوقع الكوارث الطبيعية وتأثيرات تغير المناخ قبل وقوعها.
- **أنظمة ذكية وقابلة للتكيف:** لتحسين إدارة الموارد الحيوية كالطاقة والمياه، وتطوير الزراعة المستدامة، وتصميم مدن وأنظمة نقل أكثر كفاءة واستدامة.

يوفر الذكاء الاصطناعي القدرة على تحقيق هذه الإمكانات. ولكن، بدون أطر

استراتيجية واضحة، وتوجيهات أخلاقية صارمة، ووعي جماعي بالمخاطر، قد يؤدي استخدامه أيضًا إلى تفاقم الفوارق الاجتماعية، وتعميق استنزاف الموارد، وزيادة البصمة البيئية للتكنولوجيا نفسها. لذلك، فإن فهم كيفية تسخير إمكانات الذكاء الاصطناعي وتجنب مخاطره لم يعد خيارًا، بل أصبح ضرورة حتمية لصانعي السياسات وقادة الأعمال والباحثين والمواطنين المهتمين على حد سواء.

مـاذا يقدم هذا الكتاب؟

يقدم هذا الكتاب استكشافاً شاملاً ومتوازناً لكيفية تلاقي الذكاء الاصطناعي مع تحديات وفرص الاستدامة البيئية، جامعا بين الرؤى النظرية، التحليلات التقنية، ودراسات الحالة التطبيقية. تم تنظيم فصوله لترشد القارئ ابتداءً من المفاهيم الأساسية إلى الابتكارات الرائدة، مع ربط النقاشات باستمرار بالتطبيقات الواقعية وتحديات التنفيذ.

عبر تسعة فصول، يستعرض الكتاب:

«١» **أساسيات الذكاء الاصطناعي وتطبيقاته البيئية:** استكشاف تطور تقنيات الذكاء الاصطناعي (مثل التعلم الآلي، التعلم العميق، معالجة اللغات الطبيعية) وإمكاناتها المبدئية لدعم أهداف الاستدامة، مع الاعتراف بطبيعتها المزدوجة وتحديات «الذكاء الاصطناعي الأخضر».

«٢» **الذكاء الاصطناعي وإدارة الموارد الطبيعية:** تحليل كيف يغير الذكاء الاصطناعي طرق إدارة المياه، تحسين كفاءة الطاقة، ومراقبة جودة الهواء، ودعم العمل المناخي.

«٣» **المدن الذكية والبنية التحتية المستدامة:** بحث دور الذكاء الاصطناعي في بناء مدن أكثر استدامة، وتحسين أنظمة النقل، وإدارة النفايات، وتطوير شبكات الطاقة الخضراء.

«٤» **الذكاء الاصطناعي والحفاظ على التنوع البيولوجي:** استعراض كيفية

دعم الذكاء الاصطناعي لجهود مراقبة الأنواع المهددة بالانقراض، حماية الموائل الطبيعية، وتطوير ممارسات الزراعة المستدامة.

«٥» يستعرض الديناميكيات المالية الداعمة لتقنيات الذكاء الاصطناعي الأخضر، ويحلل كيف تسهم الحكومات، والشركات الكبرى، ورأس المال الجريء في نقل الابتكار من المختبر إلى السوق. كما يناقش التحديات التي تواجه التمويل الأخضر ويقترح سبلًا لتسريع التحول نحو مستقبل تكنولوجي مستدام.

«٦» **الوعي البيئي والمشاركة المجتمعية الرقمية:** دراسة قوة الذكاء الاصطناعي في تعزيز التعليم البيئي، تمكين العلوم المواطنية، وتعبئة العمل الجماعي من أجل البيئة.

«٧» **الذكاء الاصطناعي والأمن السيبراني والمعلومات المضللة:** يناقش هذا الفصل تقاطع الذكاء الاصطناعي مع الأمن السيبراني والمعلومات المضللة، موضحًا المخاطر والتحديات التي قد تُضعف الجهود البيئية، ومشددًا على ضرورة الضمانات والاعتبارات الأخلاقية لضمان استدامة آمنة.

«٨» **الأطر الاستراتيجية للاستدامة في المنطقة العربية:** تقديم أطر عمل لدمج الذكاء الاصطناعي في جداول أعمال الاستدامة الوطنية والإقليمية، مع التركيز بشكل خاص على التحديات والفرص الفريدة في المنطقة العربية.

كما يناقش الفصل التاسع من هذا الكتاب، البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي نفسها، وهي جانب غالبًا ما يُغفل في النقاشات العامة حول دوره في تعزيز الاستدامة. فعلى الرغم من أن الذكاء الاصطناعي يُقدَّم كأداة لحل الأزمات البيئية، إلا أن إنتاجه وتشغيله – من تدريب النماذج الضخمة إلى استهلاك مراكز البيانات للطاقة والمياه – قد يخلق آثارًا بيئية غير مباشرة تتطلب مساءلة دقيقة. في هذا الفصل، ننتقل من الحديث عن كيف يساهم الذكاء الاصطناعي في مواجهة التحديات البيئية إلى سؤال جوهري: هل الذكاء الاصطناعي نفسه مستدام؟ يأخذ هذا الفصل القارئ في رحلة

تبدأ من تحليل استهلاك الطاقة وانبعاثات الكربون المرتبطة بالنماذج الكبيرة مثل ChatGPT، مرورًا بتأثير تصنيع العتاد والنفايات الإلكترونية، وصولاً إلى دراسات حالة قانونية وتجريبية، مثل مركز بيانات Google في تشيلي، وحلول مبتكرة مثل مراكز البيانات الفضائية والتعلم الفيدرالي. إن فهم هذا التناقض – بين وعود الذكاء الاصطناعي البيئية وتكاليفه البيئية المتزايدة – يُعد ضروريًا لأي رؤية متكاملة لمستقبل مستدام تقوده التكنولوجيا.

تمت كتابة كل فصل بأسلوب يوازن بين العمق التقني والوضوح، لتمكين القراء من خلفيات متنوعة – سواء كانوا خبراء في التكنولوجيا، أو متخصصين في البيئة، أو صانعي سياسات، أو رواد أعمال، أو طلابا – من فهم المحتوى والتفاعل معه بفاعلية.

دعوة إلى الابتكار الواعي والمسؤول

الذكاء الاصطناعي ليس «أخضر» أو «مستداماً» بطبيعته. إنه يعكس نوايانا وقيمنا وأولوياتنا كبشر، ويتشكل وفقاً لتصميماتنا وتطبيقاتنا. لبناء مستقبل تكون فيه التكنولوجيا في خدمة الحياة وليس مهددا لها، يجب أن نتعامل مع تطوير الذكاء الاصطناعي وتطبيقه بحكمة وإنصاف ورؤية شاملة طويلة الأمد. يدعو هذا الكتاب القارئ إلى التفكير النقدي، والعمل الجريء، والتعاون البناء. فالسؤال الحاسم ليس هل سيشكل الذكاء الاصطناعي مستقبلنا، بل أي نوع من المستقبل نختار تشكيله باستخدام هذه الأداة القوية.

مرحباً بك في رحلة استكشافية على حدود التكنولوجيا والأمل البيئي. مرحبا بك في «الذكاء الاصطناعي من أجل كوكب أخضر».

منهجيـــة الكتـــاب

يعتمد هذا الكتاب منهجية منظمة ومتدرجة لتوضيح العلاقة بين الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية، حيث يقود القارئ في رحلة تبدأ من الأساسيات

النظرية وتنتهي بالأطر الاستراتيجية والتوصيات العملية. تقوم هذه المنهجية على أربع ركائز رئيسية:

«١» **البناء التأسيسي:** يبدأ الكتاب بتعريف القارئ بأساسيات الذكاء الاصطناعي وتقنياته الجوهرية، مثل التعلم الآلي والتعلم العميق ومعالجة اللغات الطبيعية، ويربطها مباشرة بمفاهيم الاستدامة البيئية. كما يبرز الطابع المزدوج لهذه التقنيات، بين إمكاناتها في دعم البيئة ومخاطرها الكامنة في استنزاف الموارد أو زيادة البصمة الكربونية.

«٢» **التخصص القطاعي:** بعد وضع الأساس النظري، ينتقل الكتاب إلى استعراض تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجالات بيئية محددة، مثل:

- إدارة الموارد الطبيعية والعمل المناخي (الفصل الثاني).
- المدن الذكية والبنية التحتية المستدامة (الفصل الثالث).
- حفظ التنوع البيولوجي والزراعة المستدامة (الفصل الرابع).
- الوعي البيئي والمشاركة المجتمعية (الفصل السادس).

«٣» **التحليل الداعم بالواقع:** لتعميق الفهم، يتضمن الكتاب دراسات حالة وأمثلة لمبادرات عالمية مثل برنامج AI for Earth من مايكروسوفت، وتحالف Climate TRACE، وتجارب مدن رائدة مثل بيتسبرغ وبرشلونة، لإظهار الأثر العملي لهذه الحلول.

«٤»٧ **النظرة النقدية والأطر الاستراتيجية:** لا يكتفي الكتاب بعرض النجاحات، بل يناقش أيضًا التحديات الأخلاقية والمخاطر المرتبطة بالخصوصية والتحيز الخوارزمي والأمن السيبراني (الفصل السابع)، إضافة إلى البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي نفسه (الفصل التاسع). كما يقترح آليات لتمويل الذكاء الاصطناعي الأخضر (الفصل الخامس)، ويعرض أطر عمل وخرائط طريق موجهة للمنطقة العربية (الفصل الثامن).

بهذا التدرج، يجمع الكتاب بين الرؤى النظرية، والتحليلات التقنية، ودراسات الحالة التطبيقية، وصولًا إلى توصيات عملية موجهة لواضعي السياسات والمبتكرين. والغاية هي تقديم رحلة فكرية متكاملة تمكّن القارئ من إدراك الفرص والمخاطر، والمشاركة بوعي في صياغة مستقبل أكثر استدامة تقوده التكنولوجيا.

الدافع شخصي وراء هذا العمل:

ينبع اهتمامي العميق بتقاطع التكنولوجيا مع البيئة من مسيرة شخصية بدأت مبكراً. ففي عام ٢٠٠٠، خلال دراستي الجامعية في الأكاديمية العربية للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري، تعاونت مع زملائي (أحمد رشاد خليل، ومحمود أحمد خليل أبو رجيلة) لإنتاج فيديو توعوي حول مخاطر الاحتباس الحراري بإشراف الدكتور الراحل عادل أبو زهرة، مؤسس جمعية أصدقاء البيئة بالإسكندرية. هذا العمل المبكر غرس فينا وعياً بأهمية التحديات البيئية.

لاحقاً، قادني عملي التطوعي إلى تطوير موقع كلية الدراسات البيئية بجامعة أمدرمان الأهلية، بالسودان، مما قادني إلى الفوز بجائزة من قمة الأرض عام ٢٠٠٣، وهي تجربة عمّقت التزامي تجاه قضايا الاستدامة البيئية.

سعدت حقاً بدعوة مؤسسة زايد الدولية للبيئة لتقديم محاضرة حول الذكاء الاصطناعي والبيئة في الثاني والعشرين من شهر أبريل ٢٠٢٥ الموافق ليوم قمة الأرض. وفي نهاية العرض التقديمي، اقترحت على مؤسسة زايد الدولية للبيئة إقامة مؤتمر مخصص للبيئة والذكاء الاصطناعي، وقد قبلوا المقترح مشكورين. وقد ألهمتني هذه الدعوة لأكمل مسيرة الكتاب.

وخلال رحلتي المهنية، لاحظت ظاهرة تكررت بشكل لافت: السرعة المدهشة التي يتم بها جمع ثروات طائلة في مجال التكنولوجيا، دون إدراك كافٍ من أصحابها للعواقب البيئية المحتملة لهذه التقنيات. فكثيراً ما يُنظر للتكنولوجيا بوصفها وسيلة

للربح والكفاءة دون الوقوف عند تبعاتها البيئية والاجتماعية، مما يؤدي إلى تفاقم الفوارق الاجتماعية والبيئية.

إن ما يدهشني حقاً هو طبيعة العلاقة بين الإنسان والتكنولوجيا التي تكاد تصبح تفاعلية وتبادلية بشكل متزايد، بحيث تغذي الآلة سلوكياتنا الاستهلاكية والإنتاجية، بينما يتشكل الذكاء الاصطناعي بدوره وفقاً للقيم الإنسانية التي يتم تدريبه عليه. وبدون توجيه واعٍ وأخلاقي لهذه العلاقة، قد نجد أنفسنا نساهم من غير قصد في زيادة الضغوط على كوكبنا.

جاء الإلهام المباشر لكتابة هذا الكتاب من إدراك الترابط الوثيق بين أفعالنا الرقمية وصحة كوكبنا. فكما أشار الدكتور أليكس ويسنر-غروس، حتى المهام الرقمية البسيطة لها بصمة كربونية معتبرة. ومع تحول الذكاء الاصطناعي إلى محرك أساسي للابتكار، تتزايد بصمته البيئية بشكل كبير، غالباً بطرق غير مرئية. هذه المفارقة بين إمكانيات الذكاء الاصطناعي الهائلة وبين آثاره البيئية الخفية هي التي دفعتني للتعمق في كيفية استثمار هذه التقنيات بوعي أخلاقي ومسؤول، نحو مستقبل مستدام يحفظ كوكبنا للأجيال القادمة.

هذا الكتاب هو مساهمتي في إثراء هذا الحوار الضروري وتقديم رؤى عملية وتوجيهات واضحة، تهدف إلى تعزيز الوعي الجمعي وتحفيز الجهود المشتركة نحو استخدام تقني مسؤول ومستدام.

الفصل الأول

مقدمة في الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية

الفصل الأول
مقدمة في الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية

١.١ مقدمة:

تخيّل أنظمة إنذار مبكر تتنبأ بسيول الغد قبل وقوعها، ومزارعًا تقلّل الهدر المائي إلى النصف، ومدنًا تضبط استهلاكها الطاقي لحظيًّا. هذا ما يحدث عندما تلتقي قوة البيانات بخوارزميات تتعلّم من العالم حولها. لكن ثمة سؤال لازم: كيف نضمن ألّا يتحوّل الأثر البيئي للتقنية نفسها إلى جزء من المشكلة؟ هذا السؤال الجوهري: هل يمكن للذكاء الاصطناعي أن يكون مستدامًا بحد ذاته؟ سنعود إليه في الفصل الثامن عند مناقشة البصمة الكربونية للنماذج الضخمة ومراكز البيانات.

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** خريطة مفاهيم سريعة لتصميم تشريعات ومسارات تمويل لتحفيز حلول الذكاء الاصطناعي المفيدة بيئيا.
- **الأعمال:** أين توجد فرص القيمة البيئية (IORe) ونوافذ ابتكار المنتجات والخدمات الخضراء؟
- **الأكاديميا/الطلاب:** مصطلحات ومنطلقات بحثية مع فجوات واضحة للدراسة.

تطور الذكاء الاصطناعي (AI) بسرعة من تخصص أكاديمي متخصص إلى قوة تحويلية تعيد تشكيل الصناعات والمجتمعات في جميع أنحاء العالم. في جوهره، يشير الذكاء الاصطناعي إلى قدرة أنظمة الحاسوب على أداء المهام التي تتطلب عادة

ذكاءً بشرياً، مثل التعلم والاستدلال وحل المشكلات والإدراك وفهم اللغة [1]. أدى انتشار تقنيات الذكاء الاصطناعي - بما في ذلك التعلم الآلي والتعلم العميق ومعالجة اللغة الطبيعية ورؤية الحاسوب والروبوتات - إلى تعزيز كفاءة وفعالية مختلف القطاعات بشكل كبير، بدءا من الرعاية الصحية والتمويل إلى التعليم والنقل والطاقة.

في السنوات الأخيرة، اكتسبت الآثار والفرص البيئية للذكاء الاصطناعي اهتماماً عالمياً كبيراً، حيث تواجه البشرية تحديات بيئية غير مسبوقة، بما في ذلك تغير المناخ وفقدان التنوع البيولوجي وندرة المياه والتلوث. تهدد هذه الأزمات النظم البيئية والصحة العامة والأمن الغذائي والاستقرار الاقتصادي [2]. تتطلب الحاجة الملحة لمعالجة هذه التهديدات ليس فقط تدخلات السياسات التقليدية، ولكن أيضا حلولا تكنولوجية مبتكرة، وفي هذا السياق يمكن أن يقدم الذكاء الاصطناعي إمكانات مقنعة وتحويلية.

يوفر دمج الذكاء الاصطناعي في جهود الاستدامة البيئية فرصا لا مثيل لها للتأثير. من خلال الاستفادة من مجموعات البيانات البيئية الضخمة والنماذج الخوارزمية المتطورة، يمكن للذكاء الاصطناعي تعزيز قدرتنا على التنبؤ بالتغيرات البيئية، وتحسين إدارة الموارد، وتطوير استراتيجيات تكيف ذكية، وتمكين اتخاذ القرارات البيئية القائمة على الأدلة. يعد التقارب بين التقنيات الرقمية المتقدمة والإشراف البيئي أمراً بالغ الأهمية لبناء مستقبل مستدام ومنصف ومرن. يمثل الذكاء الاصطناعي الأخضر (Green AI) - تقنيات الذكاء الاصطناعي المصممة بوعي لتقليل الضرر البيئي مع زيادة التأثير الإيجابي إلى أقصى حد - مساراً واعداً نحو تحقيق التوازن بين التقدم التكنولوجي وحدود الكوكب.

(1) Stuart J. Russell and Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th ed. (Pearson Education, 2021). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2023: Synthesis Report* (Cambridge University Press, 2023).

(2) Stuart Russell and Peter Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th ed. (Boston: Pearson, 2021).

الهدف من هذا الكتاب هو استكشاف كيفية مساهمة تقنيات الذكاء الاصطناعي بشكل هادف في جهود الاستدامة العالمية والإقليمية، مع تسليط الضوء على تطبيقات محددة ودراسات حالة واقعية وأطر استراتيجية مع إيلاء اهتمام خاص لفرص وتحديات المنطقة العربية، وتقديم رؤى يمكن أن توجه صانعي السياسات والتقنيين وعلماء البيئة والجهات الفاعلة في المجتمع المدني على حد سواء. من خلال التحليل الذي يمكن ان يلهم ذوي التفكير النقدي وأولئك الذين يقومون بالمهام العملية لتسخير الذكاء الاصطناعي لصحة كوكبنا.

١.٢. أساسيات الذكاء الاصطناعي وتطوره:

يمثل الذكاء الاصطناعي (AI) فرعًا محوريًا من علوم الحاسوب يهدف إلى بناء آلات قادرة على محاكاة القدرات المعرفية للبشر، مثل التعلم، وحل المشكلات، والإدراك، واتخاذ القرارات. شهد هذا المجال تطورًا هائلاً منذ بداياته النظرية في منتصف القرن العشرين، مدفوعا بالتقدم المتسارع في القدرة الحاسوبية، وتوافر كميات هائلة من البيانات (Big Data)، وتطوير خوارزميات أكثر تعقيدا وفعالية. لم يعد الذكاء الاصطناعي مجرد مفهوم نظري، بل أصبح واقعا ملموسا يتخلل جوانب متعددة من حياتنا اليومية ويُحدث تحولات جذرية في مختلف القطاعات الصناعية والخدمية [1]. إن فهم أساسيات الذكاء الاصطناعي وتقنياته الرئيسية يُعد أمرًا ضروريًا لاستيعاب إمكاناته وتحدياته، لا سيما في سياق تطبيقاته المتنامية لمواجهة القضايا البيئية الملحة.

١.٢.١ التعلم الآلي: محرك الذكاء الاصطناعي:

يُعد التعلم الآلي (ML Machine Learning) أحد أبرز فروع الذكاء الاصطناعي وأكثرها تأثيرًا، حيث يُمكّن الأنظمة الحاسوبية من التعلم من البيانات وتحسين أدائها بمرور الوقت دون الحاجة إلى برمجة صريحة لكل مهمة. يعتمد التعلم

(1) Andreas Pichler and Falko Hartig, Machine Learning in Practice: An Introduction for Environmental Scientists (Cham: Springer, 2023).

الآلي على خوارزميات قادرة على اكتشاف الأنماط والعلاقات داخل مجموعات البيانات الضخمة واستخدام هذه المعرفة لاتخاذ قرارات أو تنبؤات مستقبلية. تنقسم تقنيات التعلم الآلي بشكل أساسي إلى ثلاثة أنواع رئيسية: التعلم المُوجّه (Supervised Learning)، حيث يتم تدريب النموذج باستخدام بيانات مُصنّفة مسبقًا؛ والتعلم غير المُوجّه (Unsupervised Learning)، الذي يهدف إلى اكتشاف الهياكل والأنماط المخفية في بيانات غير مُصنّفة؛ والتعلم المُعزّز (Reinforcement Learning)، حيث يتعلم الوكيل (Agent) كيفية اتخاذ القرارات من خلال التجربة والخطأ وتلقي المكافآت أو العقوبات بناءً على أفعاله.[1] تشكل هذه التقنيات الأساس للعديد من تطبيقات الذكاء الاصطناعي المتقدمة، بما في ذلك تلك المستخدمة في التحليل البيئي.

٢.٢.١ التعلم العميق ومعالجة اللغات الطبيعية: توسيع آفاق الذكاء الاصطناعي:

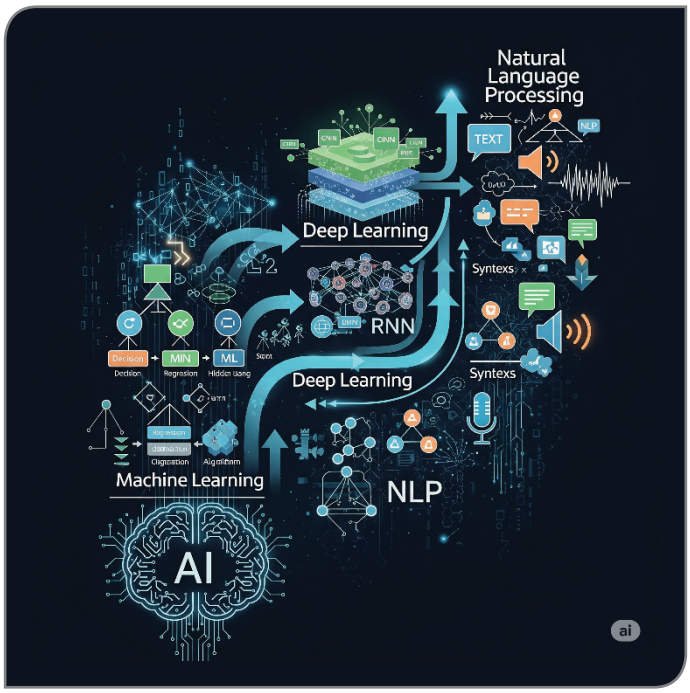
ضمن التعلم الآلي، برز التعلم العميق (Deep Learning - DL) كنهج قوي يعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية ذات الطبقات المتعددة (العميقة) لمعالجة البيانات وتمثيلها بشكل هرمي متزايد التعقيد. تتيح هذه البنية العميقة لنماذج التعلم العميق، مثل الشبكات العصبية التلافيفية (CNNs) والشبكات العصبية المتكررة (RNNs)، القدرة على تعلم الأنماط المعقدة والميزات الدقيقة تلقائيا من كميات هائلة من البيانات غير المهيكلة، مثل الصور والفيديو والصوت والنصوص، مما أدى إلى تحقيق اختراقات كبيرة في مجالات مثل التعرف على الصور والكلام[2] بالتوازي مع ذلك، تُعنى معالجة اللغات الطبيعية (Natural Language Processing - NLP) بتمكين الآلات من فهم وتفسير وتوليد اللغة البشرية بطريقة ذات معنى. تشمل تطبيقات

(1) Ihsan H. Sarker, "Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions," SN Computer Science 2, no. 3 (2021): Article 160, https://doi.org/10.1007/s4297900592--021-x.

(2) Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville, *Deep Learning* (MIT Press, 2016)

NLP الترجمة الآلية، وتحليل المشاعر، وتلخيص النصوص، والإجابة على الأسئلة، وهي تعتمد بشكل متزايد على نماذج التعلم العميق لتحقيق دقة وفهم غير مسبوقين للسياق اللغوي.[1]

الشكل (١) : أنواع الذكاء الاصطناعي المختلفة



يوضح الشكل (١) : العلاقة الهرمية والترابط بين الذكاء الاصطناعي (AI)، والتعلم الآلي (ML)، والتعلم العميق (DL)، ومعالجة اللغات الطبيعية (NLP). في القاعدة، يرمز دماغ مصمم بأسلوب مميز ومدمج به دوائر كهربائية إلى المجال الواسع للذكاء الاصطناعي. ينبثق من الذكاء الاصطناعي مسار يتفرع إلى التعلم الآلي، المصور بخوارزميات أساسية مثل أشجار القرار وعقد الشبكة العصبية. يظهر التعلم

(1) David W. Otter, Juan R. Medina, and Jugal K. Kalita, ‹A Survey of the Usages of Deep Learning for Natural Language Processing,› *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 32, no. 2 (2021): 604–624.

العميق، وهو مجموعة فرعية من التعلم الآلي، كشبكة عصبية أكثر تعقيدًا ومتعددة الطبقات مع عناصر تمثل الشبكات العصبية التلافيفية (CNNs) والشبكات العصبية المتكررة (RNNs). أخيرًا، يتم توضيح معالجة اللغات الطبيعية كتطبيق لهذه التقنيات، حيث تتضمن فقاعات نصية، وموجات صوتية، وأيقونات تتعلق بفهم اللغة وتوليدها. تشير الأسهم والخطوط المتوهجة إلى تدفق التطور والترابط القوي بين هذه المفاهيم.

١ . ٣ . التطبيقات البيئية للذكاء الاصطناعي:

تُقدم التطورات في التعلم الآلي والتعلم العميق ومعالجة اللغات الطبيعية أدوات قوية لمواجهة التحديات البيئية المعقدة. تُستخدم خوارزميات التعلم الآلي لتحليل مجموعات البيانات البيئية الضخمة، مثل بيانات الاستشعار عن بعد، وبيانات الأقمار الصناعية، وبيانات الطقس، بهدف تحسين نماذج التنبؤ بالمناخ، ورصد إزالة الغابات، وتقييم صحة النظم البيئية[١]. كما يتيح التعلم العميق، بقدرته على معالجة البيانات غير المهيكلة، تطبيقات مبتكرة في مراقبة التنوع البيولوجي من خلال التعرف التلقائي على الأنواع من الصور أو الأصوات، وتحسين إدارة الموارد الطبيعية مثل المياه والطاقة عبر التنبؤ بالطلب وتحسين كفاءة التوزيع[٢]. بالإضافة إلى ذلك، تساعد تقنيات معالجة اللغات الطبيعية في تحليل كميات هائلة من التقارير البيئية والأخبار والمقالات العلمية لاستخلاص الرؤى وتتبع الاتجاهات ودعم عملية صنع القرار المستندة إلى الأدلة في مجال السياسات البيئية.

(1) David Rolnick et al., "Tackling Climate Change with Machine Learning," ACM Computing Surveys 55, no. 2 (2022): Article 24, https://doi.org/10.11453485128/.

(2) Y. Sun and S. Wang, "Applications of Deep Learning in Smart Grid: A Survey," Renewable and Sustainable Energy Reviews 143 (2023): Article 110932, https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110932.

١.٣.١ الطبيعة المزدوجة للذكاء الاصطناعي:

قبل استكشاف إمكانات الذكاء الاصطناعي لتحقيق المنفعة للبيئة، يجب أن نعترف بطبيعته المزدوجة. فبينما يقدم الذكاء الاصطناعي أدوات قوية للاستدامة، فإنه يمثل أيضا تحديات بيئية من خلال متطلباته من الموارد. تتطلب نماذج اللغة الكبيرة وأنظمة التعلم العميق قدرة حسابية كبيرة، مما يؤدي إلى استهلاك كبير للطاقة وانبعاثات كربونية. على سبيل المثال، يمكن أن يولد تدريب نموذج ذكاء اصطناعي كبير واحد كمية من ثاني أكسيد الكربون تعادل ما تنتجه خمس سيارات على مدار حياتها[1].

تتطلب هذه المفارقة – التكنولوجيا التي تساعد البيئة وربما تضر بها في نفس الوقت – دراسة متأنية. في جميع أنحاء هذا الكتاب، سوف نستكشف كلا من وعد الذكاء الاصطناعي للحلول البيئية وضرورة تطوير أنظمة ذكاء اصطناعي أكثر كفاءة في استخدام الطاقة تتوافق مع أهداف الاستدامة. هذا المنظور المتوازن ضروري للابتكار المسؤول في مجال الذكاء الاصطناعي البيئي.

١.٣.٢ حدود البحث الناشئة: الذكاء الاصطناعي الأخضر والنمذجة البيئية

مع تزايد دور الذكاء الاصطناعي في الإدارة البيئية، يظهر بسرعة مجال متخصص يُعرف باسم الذكاء الاصطناعي الأخضر (Green AI) – لا يركز فقط على كيفية تعزيز الذكاء الاصطناعي لأهداف الاستدامة، ولكن أيضًا الآليات التي يمكن للذكاء الاصطناعي نفسه أن يصبح أكثر كفاءة في استخدام الطاقة والمنفعة البيئية.

ما هو الذكاء الاصطناعي الأخضر؟

يؤكد الذكاء الاصطناعي الأخضر على تطوير ونشر نماذج وأنظمة تعلم آلي تقلل من انبعاثات الكربون وتحسّن كفاءة استخدام الموارد، مع الالتزام بالمبادئ الأخلاقية

(1) Emma Strubell, Ananya Ganesh, and Andrew McCallum, ‹Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP,› *ACL 2019*, 3645–3650

البيئية.[1] ويسعى هذا المجال إلى التخفيف من البصمة البيئية المتزايدة للنماذج الضخمة للذكاء الاصطناعي، وفي الوقت نفسه تعظيم دور تطبيقاته في مواجهة تغير المناخ ودعم الاقتصادات الدائرية.

من بين الاتجاهات الأكثر إلحاحًا في عالم الذكاء الاصطناعي اليوم، يبرز مفهوم «الذكاء الاصطناعي الأخضر» كاستجابة واعية لتحديات الكوكب البيئية. لم يعد الهدف فقط أن نصنع نماذج ذكية، بل أن نصنعها بطريقة مسؤولة، تقلل من البصمة الكربونية وتدعم أهداف الاستدامة.

مسارات واعدة للذكاء الاصطناعي الأخضر:

في هذا السياق، ظهرت ثلاث مسارات واعدة:

«١» الهياكل النموذجية الخفيفة:

بدلاً من النماذج الضخمة التي تستهلك طاقة هائلة، يتجه الباحثون نحو تصميم نماذج أكثر كفاءة من حيث عدد المعاملات، دون التضحية بالدقة. من أبرز الأمثلة على ذلك MobileNet وEfficientNet من Google ، حيث تجمع هذه النماذج بين الأداء العالي والبساطة المعمارية.

«٢» العتاد المصمم بعناية:

بدأت الشركات في تطوير رقائق حوسبة متخصصة موفرة للطاقة، من بينها ما يُعرف بالحوسبة العصبية (neuromorphic computing) ، التي تحاكي طريقة عمل الدماغ لتوفير أداء قوي واستهلاك طاقة أقل.

(1) Roy Schwartz et al., “Green AI,” Communications of the ACM 63, no. 12 (2020): 54–63, https://doi.org/10.11453381831/.

«٣» الحوسبة الواعية بالكربون:

وهي فكرة بسيطة وذكية، متى تقوم بتدريب النموذج؟ والإجابة هي: في أوقات ذروة إنتاج الطاقة النظيفة، مثلًا عندما تكون نسبة الطاقة الشمسية أو الرياح في الشبكة مرتفعة، مما يقلل من الانبعاثات الناتجة عن العمليات الحسابية الثقيلة.

تطبيقات بارزة: الذكاء الاصطناعي في الطاقة المتجددة

أما على صعيد التطبيقات، فيُعد الذكاء الاصطناعي لأجل الطاقة المتجددة من أكثر مجالات الذكاء الأخضر نضجًا وإلهامًا. وهنا نرى:

- تحسنًا ملحوظًا في دقة التنبؤ بمخرجات الطاقة الشمسية والرياح، بنسبة تفوق ٣٠٪ مقارنة بالأساليب التقليدية.
- قدرات متقدمة لإدارة التخزين وتوزيع الطاقة ضمن الشبكات الذكية، مما يقلل الفاقد ويزيد من كفاءة الاستهلاك.
- ونماذج تعلم معزز تتكيف مع الطقس والطلب في الزمن الحقيقي، لتحسين أداء البطاريات وتقليل الحاجة للتدخل البشري.
- ليس من المبالغة القول إن الذكاء الاصطناعي الأخضر لا يغير فقط طريقة تصميم النماذج، بل يعيد تعريف علاقتنا بالتقنية والكوكب معا[1].

١.٣.٣ الذكاء الاصطناعي لإدارة المياه الذكية:

حين نتحدث عن الندرة، فإن الماء يتصدر القائمة – أكثر من ٤٠٪ من سكان العالم يعانون من نقص المياه، مما يجعل الإدارة الذكية لهذا المورد مسألة حياة. هنا يتدخل الذكاء الاصطناعي، ليس كحل سحري، بل كأداة دقيقة تستند إلى البيانات وتتعلم من البيئة المحيطة.

(1) MIT Energy Initiative, *AI for Renewable Energy Integration*, 2023, https://energy.mit.edu/research/ai-for-energy/

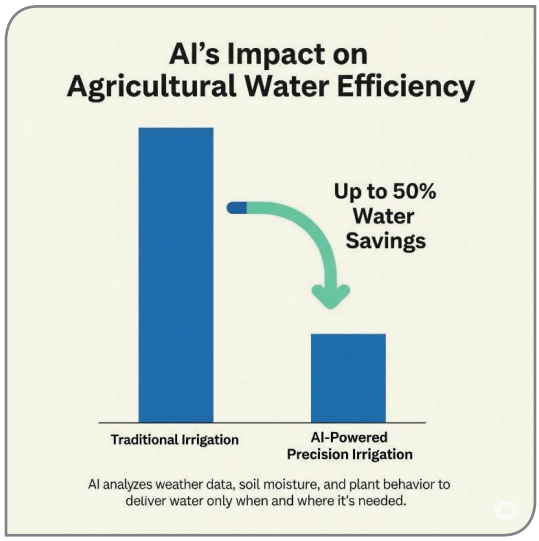
عبر تحليل بيانات الطقس، ورطوبة التربة، وسلوك النباتات، يستطيع الذكاء الاصطناعي تقديم جداول ري مخصصة، تُقلل من الفاقد بنسبة قد تصل إلى ٣٠٪، خصوصًا في الزراعة.

الزراعة الدقيقة، بدعم من الذكاء الاصطناعي، تُتيح تطبيقًا موجّهًا للري استنادًا إلى احتياج النبات الفعلي، مما يحسن كفاءة استخدام المياه في مواجهة الجفاف.

وفي المدن، تسهم خوارزميات اكتشاف الحالات الشاذة في رصد التسريبات الخفية داخل شبكات التوزيع، موفرةً ملايين الجالونات سنويًا كانت تُهدر بلا مبرر.

وقد وثق معهد الموارد العالمية حالات استخدمت فيها تقنيات الذكاء الاصطناعي لتقليل استهلاك المياه الزراعية بنسبة وصلت إلى ٥٠٪، دون المساس بجودة المحصول، بل وتحسينه أحيانًا[1].

الشكل (٢) : تأثير الذكاء الاصطناعي على كفاءة استخدام المياه في الزراعة



(1) World Resources Institute, *AI-Powered Water Management Solutions*, 2023, https://www.wri.org/research/ai-water-management

يوضح هذا الرسم البياني الشريطي بوضوح التوفير الكبير في استهلاك المياه الذي يمكن تحقيقه عبر تطبيق أنظمة الري التي تعمل بالذكاء الاصطناعي. إنه يقارن بصريًا بين الاستهلاك المرتفع للمياه في الطرق التقليدية وكفاءة الري الدقيق، مسلطًا الضوء على توفير يصل إلى ٥٠٪. يشرح التعليق التوضيحي التكنولوجيا الكامنة وراء هذا التحسين، مبينًا كيف يستخدم الذكاء الاصطناعي البيانات لجعل الزراعة أكثر استدامة.

١.٣.٤ الذكاء الاصطناعي للنمذجة البيئية:

من كان يتصور أن آلة تتعلم يمكن أن تفهم بيئةً معقدة بحجم كوكب؟ لكن هذا ما بدأ يتحقق. لقد تغيرت خريطة النمذجة البيئية جذريًا بفضل تقنيات الذكاء الاصطناعي، وخصوصًا التعلم العميق.

أصبحت النماذج قادرة على محاكاة آثار تغير المناخ، وإزالة الغابات، وتوسع المدن على النظم البيئية بدقة تتجاوز النماذج التقليدية.

بات بالإمكان إدماج بيانات فورية من الأقمار الصناعية وأجهزة الاستشعار الأرضية لإنتاج تنبؤات بيئية ديناميكية تُحدَّث باستمرار.

من خلال ما يُعرف بـ «السيناريوهات التكيفية»، تساعد هذه النماذج في تصميم استراتيجيات تستعد للمستقبل – مهما كانت تعقيداته.

وفي مقدمة هذه الابتكارات نجد ما يُعرف بـ الشبكات العصبية المستنيرة بالفيزياء (Physics-Informed Neural Networks)، التي تمزج بين المعادلات الفيزيائية الراسخة ومرونة التعلم الآلي، لتمنحنا نماذج مناخية وبيئية أكثر دقة وواقعية.

ولعل من أبرز المشاريع العالمية في هذا المجال مبادرة «الذكاء الاصطناعي من

أجل الأرض» التي أطلقتها مايكروسوفت، والتي دعمت أكثر من ٢٠٠ مشروع في أكثر من ١٠٠ دولة حول العالم، مما يعكس التوسع الحقيقي لهذه التقنيات نحو تطبيقات ملموسة ومؤثرة[١].

١.٤. مشاريع مبتكرة بارزة:

١.٤.١ برنامج الذكاء الاصطناعي من أجل الأرض من مايكروسوفت:

توسع برنامج الذكاء الاصطناعي من أجل الأرض التابع لشركة مايكروسوفت بشكل كبير منذ إطلاقه، وهو يدعم الآن أكثر من ٧٠٠ مشروع في ١٠٠ دولة[٢]. يوفر البرنامج المنح والتكنولوجيا والخبرة للباحثين والمنظمات غير الحكومية التي تطبق الذكاء الاصطناعي لمعالجة فقدان التنوع البيولوجي والتلوث وتحديات تحسين الطاقة المتجددة. تشمل النجاحات الأخيرة:

- تطوير أنظمة مراقبة صوتية آلية يمكنها تحديد أنشطة قطع الأشجار غير القانونية في الغابات المطيرة المحمية بدقة ٩٥٪.
- إنشاء خرائط غطاء أرضي عالية الدقة تعمل على تتبع تغيرات النظام البيئي بمقاييس غير مسبوقة.
- تنفيذ أدوات تخطيط الحفظ القائمة على الذكاء الاصطناعي والتي تعمل على تحسين تصميم المناطق المحمية لتحقيق أقصى قدر من الحفاظ على التنوع البيولوجي.

١.٤.٢ تحالف Climate TRACE:

في زمن تزداد فيه الحاجة إلى المعلومة الدقيقة والمساءلة البيئية، ظهر تحالف

(1) Nature Climate Change, ‹Physics-informed Machine Learning for Environmental Modeling,› 2023, https://www.nature.com/articles/s415580-01645-023-

(2) FOSS4G 2021 Buenos Aires. AI for Earth by Microsoft, 2021. https://www.foss4g.org/2021-buenos-aires.

Climate TRACE كمبادرة رائدة تستثمر الذكاء الاصطناعي في خدمة الكوكب. منذ تأسيسه عام ٢٠٢١، شرع هذا التحالف في مهمة غير مسبوقة: تتبع انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في العالم لحظةً بلحظة.

من خلال تحليل صور الأقمار الصناعية وبيانات الاستشعار عن بُعد، يراقب التحالف أكثر من ٧٠،٠٠٠ مصدر انبعاث فردي من محطات توليد الطاقة والمصانع إلى السفن والمطارات. هذه الرؤية الشفافة لا تتيح فقط التحقق من مصداقية الدول والشركات في التزاماتها المناخية، بل تُسلّط الضوء على المناطق والأطراف التي تتحمل العبء الأكبر من البصمة الكربونية.

في عالم تتشابك فيه السياسات والمصالح، يمثّل الذكاء الاصطناعي هنا أداة لموازنة المعادلة – حيث المعرفة تؤسس للمساءلة، والمساءلة تقود للتغيير [1].

١. ٤ . ٣ مبادرات نوعية إضافية في مجال الذكاء الاصطناعي المستدام:

لم تعد قضية الاستدامة ترفًا في أبحاث الذكاء الاصطناعي، بل أصبحت ضرورة علمية وأخلاقية. ولذلك، انطلقت خلال السنوات الأخيرة مبادرات نوعية تقودها منظمات بحثية ومؤسسات تقنية كبرى، تهدف إلى تقليل الأثر البيئي لهذا المجال المتسارع.

من بين أبرز هذه المبادرات:

«١» مبـادرة (AI2050):

برنامج طموح يدعمه معهد Schmidt Futures ، يُركز على دعم أبحاث الذكاء الاصطناعي التي توازن بين الأداء العالي والكفاءة البيئية. يسعى البرنامج إلى بناء نماذج أكثر خفة وذكاء، تستهلك موارد حوسبة أقل وتحقق نتائج أكثر استدامة.

(1) Climate TRACE, Annual Emissions Report 2023, https://climatetrace.org.

«٢» **مشروع** (BigScience):

مشروع تعاوني مفتوح المصدر، ضم باحثين من جميع أنحاء العالم لتطوير نماذج لغوية كبيرة بطريقة شفافة وأخلاقية، مع قياسات دقيقة للبصمة الكربونية الناتجة عن التدريب والتشغيل.

«٣» **مؤسسة البرمجيات الخضراء** (Green Software Foundation):

مبادرة عابرة للقطاعات التقنية، تهدف إلى وضع معايير وأدوات لقياس وتقليل الانبعاثات الناتجة عن البرمجيات، بما يشمل أنظمة الذكاء الاصطناعي، مما يعزز ثقافة التصميم الواعي بيئيًا في عالم البرمجيات.

هذه المبادرات تمثل خطوة مهمة نحو الذكاء الاصطناعي المسؤول - ذكاءٌ لا يكتفي بإنتاج المعرفة، بل يفكر أيضًا في تكلفة إنتاجها على الكوكب[1].

١. ٥. الذكاء الاصطناعي والاقتصاد الدائري:

في خضم الاستهلاك المتزايد للموارد، يبرز الاقتصاد الدائري كبديل يعيد تشكيل علاقتنا بالمواد، ليس فقط عبر إعادة الاستخدام، بل من خلال تصميم أنظمة تحد من الهدر. يتكامل الذكاء الاصطناعي مع هذا التوجه، ليصبح ركيزة أساسية في تفعيل مبادئ الاقتصاد الدائري.

١. ٥. ١ فرز النفايات وإعادة التدوير الذكية:

من خلال الروبوتات الذكية وأنظمة الرؤية الحاسوبية، بات من الممكن فرز النفايات تلقائيًا وبفعالية، ما أدى في بعض المنشآت إلى رفع نسب إعادة التدوير إلى أكثر من ٩٠٪. تساعد تقنيات التعلم الآلي في تحسين عمليات استخراج المواد القيّمة

(1) Green Software Foundation, "Mission & Projects," accessed July 2025, https://greensoftware.foundation

من تيارات نفايات معقدة كالبلاستيك والنفايات الإلكترونية، ما يعزز من جودة المواد المعاد تدويرها ويزيد فرص استخدامها مجددًا.

١ . ٥ . ٢ التحليلات التنبؤية وإطالة عمر المنتجات:

تتيح التحليلات التنبؤية إطالة عمر المنتجات عبر الصيانة الوقائية والتصميم الذكي الذي يقلل من الأعطال والهدر.

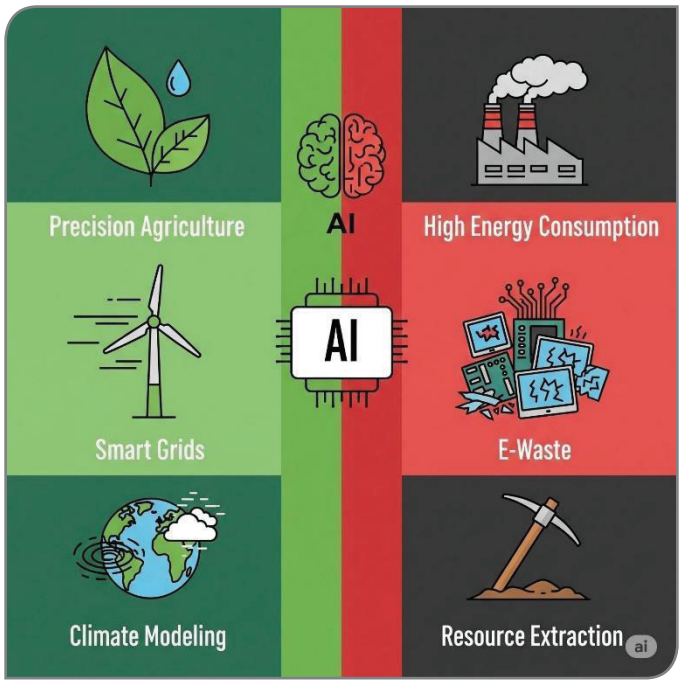
١ . ٥ . ٣ جوازات سفر المواد والتوائم الرقمية:

أما مفهومان مثل «جوازات سفر المواد» والتوائم الرقمية، فهما يجسدان رؤية دقيقة لمتابعة دورة حياة كل مكوّن مادي، من الإنتاج إلى الإعادة، مما يسهل قرارات إعادة الاستخدام والتدوير لاحقا.

وقد وثقت مؤسسة إلين ماك آرثر أثر هذه المبادرات المدعومة بالذكاء الاصطناعي في تقليل تكاليف المواد بنسبة تراوحت بين ١٠ و٢٠٪، إلى جانب خفض كميات النفايات عبر عدة قطاعات صناعية[١].

(1) Ellen MacArthur Foundation, AI and the Circular Economy: Opportunities and Challenges, 2023, https://ellenmacarthurfoundation.org.

الشكل (٣): الطبيعة المزدوجة للذكاء الاصطناعي



بناءً على مفهوم الطبيعة المزدوجة للذكاء الاصطناعي،

يمثل الشكل المفارقة العميقة للذكاء الاصطناعي. فهو يعمل بمثابة منقذ محتمل ومساهم كبير في التحديات البيئية التي يواجهها العالم في آن واحد. فمن جانب، مصور باللون الأخضر (على اليسار)، يُعد الذكاء الاصطناعي أداة قوية للخير - تعمل على تحسين إدارة مواردنا، وتعزيز النماذج المناخية، وتمكين بنية تحتية أكثر ذكاءً واستدامة. ومن الجانب الآخر، المعروض باللون الأحمر التحذيري (على اليمين)، تكمن التكلفة البيئية الخفية لهذه التكنولوجيا: الاستهلاك الهائل للطاقة لتدريب النماذج، والمشكلة المتنامية للنفايات الإلكترونية، والبصمة الكربونية الكبيرة التي تخلّفها أجهزته المعقدة ومراكز بياناته. تجسد هذه الصورة السؤال المحوري للكتاب: كيف يمكننا تسخير القوة الهائلة للذكاء الاصطناعي لشفاء كوكبنا دون التسبب في المزيد من الضرر له عن غير قصد؟

١.٦.١ الاعتبارات الأخلاقية في الذكاء الاصطناعي البيئي:

بينما تتسارع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في خدمة البيئة، يزداد إلحاح الأسئلة الأخلاقية المرتبطة بها: من تُخدم هذه الحلول؟ وهل تمثل الجميع؟ وهل تُسهم في العدالة المناخية أم تعيد إنتاج التفاوت؟

هذه الأسئلة ليست نظرية، بل ترتبط بواقع ملموس يتطلب أن تكون تطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئي واعية بالسياق، عادلة في التصميم، ومسؤولة في الأثر.

١.٦.١.١ عدالة البيانات والشمولية:

ليست كل البيئات متساوية في وفرة البيانات، كما أن هناك فجوة واضحة بين الشمال والجنوب العالمي في البنية التحتية الرقمية وقدرة جمع المعلومات. يمكن أن تُنتج نماذج الذكاء الاصطناعي المدربة على بيانات غير ممثلة بشكل كاف حلولا فعالة في بيئات غنية بالبيانات، لكنها غير مجدية أو حتى ضارة في المناطق الأقل تمثيلًا، وهي غالبا من الأكثر تضررًا بيئياً.

وفي هذا السياق، قدّم ألكسندر ويسنر-غروس نموذجًا رياضيًا بسيطًا يوضح أن انبعاثات الكربون لا تتوزع بالتساوي بين الدول، بل تخضع لعوامل اقتصادية وهيكلية تجعل بعض الدول تتحمل العبء الأكبر، بينما تعاني أخرى من آثار هذه الانبعاثات دون أن تكون مساهمة فعلية فيها[1]. هذه الفجوة تستدعي أن يكون الذكاء الاصطناعي البيئي عادلا وشاملا في تمثيل المعطيات والاهتمامات معا.

٢.٦.١.١ الشفافية وقابلية التفسير:

حين تُستخدم أنظمة الذكاء الاصطناعي في اتخاذ قرارات مصيرية، مثل

(1) Alexander D. Wissner-Gross, "Simple Model for the Distribution of Carbon Emissions among Countries," Physical Review E 79, no. 1 (2009): 016103, https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.016103.

تخصيص الموارد البيئية، أو تحديد أولويات الحفظ، أو تخطيط استراتيجيات التكيف المناخي، يجب أن تكون شفافة في منطقها، وقابلة للتفسير لكل الأطراف المعنية، بما في ذلك المجتمعات المحلية المتأثرة. فالقرار البيئي ليس فقط تقنيا، بل أيضا سياسي وأخلاقي.

١.٦.٣ الموازنة بين الحلول التقنية والاجتماعية:

الذكاء الاصطناعي أداة قوية، لكن لا يمكنه بمفرده حل أزمة بيئية عميقة الجذور، إن الحلول الناجحة يجب أن تدمج بين التقنيات الحديثة والسياسات التشاركية، وتغييرات السلوك، والتعليم البيئي، وأن تُبنى على أسس العدالة الاجتماعية والمناخية [١].

١.٦.٤ دمج معارف السكان الأصليين:

تحمل مجتمعات السكان الأصليين معارف بيئية تقليدية بُنيت عبر آلاف السنين من التفاعل المباشر مع النظم الطبيعية. هذه المعارف لا تقل أهمية عن البيانات الحديثة، ويجب أن تُدمج في تطوير نماذج الذكاء الاصطناعي البيئي، مع الاعتراف الكامل بحقوق هذه المجتمعات وصوتها في تشكيل الحلول [٢].

إن بناء ذكاء اصطناعي يخدم البيئة لا يكتمل فقط بتطوير خوارزميات فعالة، بل يتطلب أيضا الوعي بأبعاد العدالة، والتنوع، والمساءلة. تلك هي شروط التقنية الإنسانية في عصر المناخ. بعد تثبيت الأساسيات، ننتقل إلى إدارة الموارد الطبيعية وتغيّر المناخ حيث تُختبر الوعود على أرض الواقع: مياه تُدار بدقّة، وطاقة تُتوقّع بدقّة، وقرارات وقت-حقيقي تحت ضغط الندرة.

(1) UNESCO, Ethical Principles for Climate Change Policies: Ethics and Climate Change, 2022, https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380109;

(2) Climate Change AI, Tackling Climate Change with Machine Learning, https://www.climatechange.ai.

الفصل الثانـي

الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد الطبيعية وتغير المناخ

الفصل الثاني
الذكاء الاصطناعي في
إدارة الموارد الطبيعية وتغير المناخ

٢.١. مقدمة:

الماء والطاقة والهواء النظيف... ثلاثة أعمدة لحياتنا اليومية، تتقاطع عليها الأزمات. حين تتراجع النظم التقليدية، يقدّم الذكاء الاصطناعي طبقة - حسّاسة - ترى الأنماط الخفيّة: من مسارات الجفاف إلى موجات الحر البحرية، ومن تسريب شبكات المياه إلى توقيتات الري المثلى.

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** أدوات عملية للإنذار المبكر وبناء القدرة على التكيّف عبر القطاعات.
- **الأعمال:** تقليل المخاطر التشغيلية وتحسين الكفاءة في قطاعات المياه والطاقة والزراعة.
- **الأكاديميا/الطلاب:** حالات تطبيقية غنية وبيانات مفتوحة لبناء نماذج تنبؤية هجينة.
- **تشكل الموارد الطبيعية - المياه والغابات والتربة والطاقة** - أساس الحياة على الأرض. ومع ذلك، فإن الضغوط البيئية غير المسبوقة مثل تغير المناخ وإزالة الغابات وندرة المياه واستنفاد الموارد قد وضعت ضغوطًا هائلة على هذه النظم البيئية[١]، تتطلب معالجة هذه التحديات مناهج مبتكرة قائمة على البيانات تمكن من التنبؤ الأفضل وإدارة الموارد الأكثر ذكاءً وأنظمة أكثر مرونة. وفي ظل هذا الواقع المعقّد، يبرز الذكاء الاصطناعي كأداة تكنولوجية ثورية يمكن توظيفها في قراءة التغيرات البيئية والتفاعل معها بذكاء وتوقع

(١) الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (2023 - [IPCC] .

واستباق، مما يفتح آفاقًا جديدة لإدارة أكثر استدامة ومرونة للموارد. يوفر الذكاء الاصطناعي (AI) مجموعة أدوات تحويلية لهذا الغرض، من المراقبة القائمة على الأقمار الصناعية والتحليلات التنبؤية إلى أنظمة الإدارة في الوقت الفعلي، يعيد الذكاء الاصطناعي تشكيل كيفية فهم المجتمعات لمواردها الطبيعية وإدارتها والحفاظ عليها. يستكشف هذا الفصل كيفية تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد الطبيعية والتخفيف من آثار تغير المناخ، مع تسليط الضوء على دراسات الحالة الواقعية والتحديات الناشئة وتوصيات السياسات لتوسيع نطاق الذكاء الاصطناعي بشكل مستدام.

٢.٢. الذكاء الاصطناعي في مراقبة المناخ والتنبؤ به:

تُسهم مراقبة أنظمة المناخ والتنبؤ بالتغيرات البيئية في تعزيز قدرة المجتمعات على الاستجابة السريعة واتخاذ قرارات أكثر فاعلية. يعزز الذكاء الاصطناعي علم المناخ التقليدي من خلال معالجة مجموعات البيانات الضخمة – صور الأقمار الصناعية والنماذج الجوية وشبكات الاستشعار – بشكل أسرع وأكثر دقة من الطرق التقليدية. كما أن تحسين جودة الهواء يرتبط ارتباطًا وثيقًا بالحفاظ على التنوع الحيوي، وهو ما نناقشه بعمق في الفصل الرابع.

٢.٢.١ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مراقبة المناخ:

«١» تحليل صور الأقمار الصناعية:

تقوم خوارزميات التعلم الآلي، وخاصة نماذج التعلم العميق مثل الشبكات العصبية التلافيفية [١] (CNNs)، بتصنيف وتحليل صور الأقمار الصناعية من أجل:

(١) تشير الشبكات العصبية التلافيفية إلى تُعدّ الشبكات العصبية التلافيفية (Convolutional Neural Networks - CNNs) أحد أبرز نماذج التعلم العميق، وتتميز بقدرتها الفائقة على تحليل البيانات البصرية مثل الصور والفيديوهات. تقوم هذه الشبكات بمحاكاة العمليات الإدراكية في القشرة البصرية للدماغ، حيث تُنفّذ عمليات تلافيفية لاستخلاص الميزات تلقائيًا من البيانات الخام، مما يجعلها مثالية لمهام مثل التعرف على الصور والكشف عن الأنماط الدقيقة. وقد أحدثت ثورة في تطبيقات الرؤية الحاسوبية والتصنيف الآلي.

الكشف عن إزالة الغابات وتغيرات استخدام الأراضي.

يمكن لأنظمة الذكاء الاصطناعي تحديد أنشطة قطع الأشجار غير القانونية أو تتبع التوسع الزراعي في المناطق الحرجية بدقة عالية، وغالبًا ما تتجاوز قدرات التحليل اليدوي. تستخدم منصات مثل Global Forest Watch الذكاء الاصطناعي لتوفير تنبيهات شبه فورية بإزالة الغابات.

- تتبع تراجع الأنهار الجليدية وذوبان الجليد القطبي: يحلل الذكاء الاصطناعي بيانات الأقمار الصناعية الزمنية لتحديد كمية فقدان الجليد، مما يوفر بيانات حاسمة لتوقعات ارتفاع مستوى سطح البحر.

- مراقبة مخاطر حرائق الغابات وتغيرات درجة حرارة المحيطات: يمكن لنماذج الذكاء الاصطناعي التنبؤ بمناطق الحرائق عالية الخطورة بناءً على جفاف الغطاء النباتي وأنماط الطقس والتضاريس.

وبالمثل، يحلل الذكاء الاصطناعي بيانات درجة حرارة سطح البحر لتحديد موجات الحر البحرية التي تؤثر على الشعاب المرجانية ومصايد الأسماك.

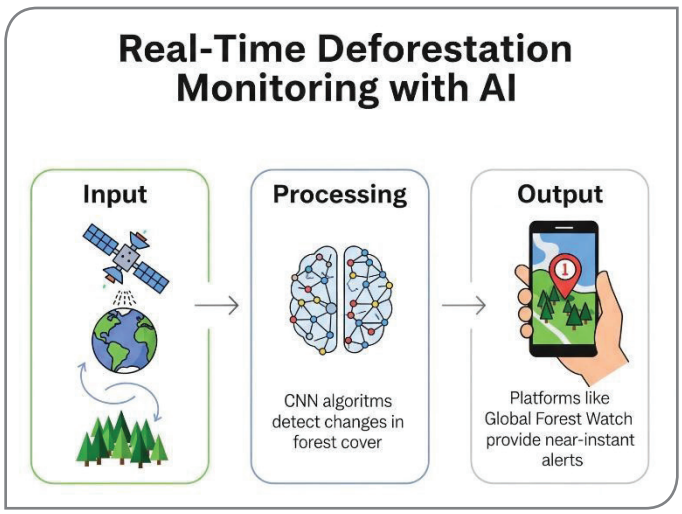
دراسة حالة: Google Earth Engine & Dynamic World

يجمع Google Earth Engine بين الذكاء الاصطناعي وبيتابايت من بيانات الأقمار الصناعية لمراقبة التغيرات البيئية العالمية. توفر مجموعة بيانات Dynamic World الخاصة به، التي تم إنشاؤها بالشراكة مع معهد الموارد العالمية، تصنيفًا شبه فوري للغطاء الأرضي بدقة ١٠ أمتار عالميًا، مما يساعد الحكومات والمنظمات غير الحكومية في تتبع تغيرات استخدام الأراضي، وتخطيط إجراءات الحفظ، ومراقبة التوسع الزراعي [١].

(1) Google and World Resources Institute. “Dynamic World: Near Real-Time Global Land Use Mapping.” Google Earth Engine, 2022. https://dynamicworld.app

التأثير: تسريع المراقبة البيئية، وتحسين قرارات إدارة الأراضي، وتعزيز الامتثال لأهداف الحفظ والمناخ العالمية.

الشكل (٤):
المراقبة الفورية لإزالة الغابات باستخدام الذكاء الاصطناعي



يبسّط الشكل (٤) المخطط الانسيابي العملية المعقدة لمراقبة إزالة الغابات باستخدام الذكاء الاصطناعي. فهو يقسم النظام إلى ثلاث مراحل واضحة: إدخال البيانات من الأقمار الصناعية، والتحليل القائم على الذكاء الاصطناعي لاكتشاف التغيرات، والإخراج الفوري للتنبيهات لأصحاب المصلحة. يسهّل هذا التصور فهم كيف تتيح التكنولوجيا استجابات سريعة وعملية للتهديدات البيئية مثل قطع الأشجار غير القانوني.

٢.٢.٢ نماذج المناخ المعززة بالذكاء الاصطناعي

لطالما عُرفت النماذج المناخية التقليدية بكونها كثيفة الحوسبة ومقيدة بالافتراضات المضمنة في تصميمها. أما النماذج الحديثة المدعومة بالذكاء الاصطناعي، وخاصة تقنيات التعلم العميق، فقد فتحت آفاقًا جديدة في هذا المجال، حيث تتيح:

- **تعزيز القدرة على التنبؤ بالظواهر الجوية المتطرفة:** بفضل التدريب على بيانات الطقس التاريخية ومحاكاة المناخ، تستطيع هذه النماذج التنبؤ بالأعاصير والجفاف والفيضانات وموجات الحر بدقة أعلى وعلى مدى زمني أطول.
- **محاكاة التفاعلات المعقدة في أنظمة الأرض:** يتيح الذكاء الاصطناعي فهم حلقات التغذية الراجعة المعقدة بين مكونات النظام المناخي، مثل التفاعل بين الهباء الجوي والسحب والإشعاع، وهي جوانب لطالما شكلت تحديًا أمام النماذج التقليدية.
- **إنتاج تنبؤات مناخية أسرع وأكثر محلية:** باستخدام تقنيات downscaling التصغير المناخي المعززة بالذكاء الاصطناعي، يمكن تحويل مخرجات النماذج العالمية إلى توقعات محلية دقيقة، تسهم مباشرة في تخطيط التكيف المجتمعي وبناء المرونة.

دراسة حالة: NVIDIA Earth-2

تسعى مبادرة Earth-2 من شركة NVIDIA إلى بناء توأم رقمي شامل للأرض، يجمع بين الذكاء الاصطناعي والحوسبة فائقة الأداء. تهدف هذه المنصة إلى تقديم محاكاة عالية الدقة لتوقع آثار تغير المناخ، واختبار استراتيجيات التخفيف والتكيف على المستويين الإقليمي والمحلي. النتيجة المتوقعة هي تنبؤات مناخية أكثر دقة وقابلية للتنفيذ لدعم تخطيط البنية التحتية، وتعزيز القدرة على الصمود، وتحسين التأهب للكوارث [1].

٣.٢.٢ المراقبة الصوتية القائمة على أجهزة الاستشعار:

إلى جانب النمذجة المناخية، يفتح الذكاء الاصطناعي آفاقًا جديدة في تحليل البيانات الصوتية والبيئية الواردة من شبكات إنترنت الأشياء (IoT)، مما يسمح بالكشف المبكر عن مؤشرات حيوية، مثل:

(1) NVIDIA. "Earth-2: A Digital Twin of the Earth." NVIDIA Blog, November 2022. https://blogs.nvidia.com/blog/202215/11//earth-2-digital-twin-climate/

- **التغيرات في تدفق المياه وجودتها:** من خلال تحليل بيانات أجهزة الاستشعار في الأنهار والمياه الجوفية، يمكن للذكاء الاصطناعي التنبؤ بفترات الجفاف أو رصد حوادث التلوث في وقت مبكر.
- **الإنذار المبكر بالمخاطر الجيولوجية:** تعالج خوارزميات الذكاء الاصطناعي بيانات الزلازل والحساسات الأرضية لتوفير تحذيرات مبكرة حول الانهيارات الأرضية أو الانفجارات البركانية والزلازل.
- **تحولات الحياة البرية وصحة النظم البيئية:** تسمح تقنيات المراقبة الصوتية، بالتكامل مع الذكاء الاصطناعي، برصد التغيرات في التنوع البيولوجي، واكتشاف الأنواع الغازية، ومتابعة صحة النظم البيئية الحساسة مثل الشعاب المرجانية من خلال أنماطها الصوتية المميزة (soundscapes) المشاهد الصوتية البيئية.

دراسة حالة: IBM PAIRS Geoscope

تُعد منصة PAIRS Geoscope من شركة IBM مثالًا رائدًا على توظيف الذكاء الاصطناعي في التحليلات البيئية واسعة النطاق. فهي تجمع كميات هائلة من البيانات الجغرافية المكانية والزمانية – من صور الأقمار الصناعية، وبيانات الطقس، إلى قراءات مستشعرات إنترنت الأشياء – وتدمجها في بيئة تحليلية موحدة. يتيح ذلك دعم تطبيقات متعددة، تمتد من الزراعة الدقيقة إلى تحسين سلاسل الإمداد العالمية، مع توفير رؤى آنية ومرنة تساعد في اتخاذ قرارات أكثر استدامة.

وبعد استعراض قدرات الذكاء الاصطناعي في مراقبة المناخ ورصد المتغيرات البيئية، يأخذنا الكتاب إلى مرحلة أكثر تقدمًا، حيث ننتقل إلى استكشاف دوره في التحليلات التنبؤية وتخصيص الموارد بذكاء بما يعزز الكفاءة والمرونة في مواجهة التحديات البيئية[1].

(1) (IBM Research, 2022)

٢.٣. التحليلات التنبؤية في تخصيص الموارد:

لا يقتصر دور الذكاء الاصطناعي على مراقبة النظم البيئية فحسب، بل يمتد إلى التنبؤ باحتياجات الموارد المستقبلية وتحسين طرق توزيعها، بما يساهم في تقليل الهدر، وزيادة الكفاءة، والوقاية من الأزمات.

٢.٣.١ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد

١) الإدارة الذكية للمياه تستهلك الزراعة ما يقرب من ٧٠٪ من عمليات سحب المياه العذبة عالميًا، مما يجعل تحسين إدارتها أولوية قصوى. تساعد أنظمة الذكاء الاصطناعي في تحقيق ذلك عبر تحليل أنماط الطقس، وبيانات مستشعرات رطوبة التربة، وصور الأقمار الصناعية، واحتياجات النباتات، لتوجيه القرارات المتعلقة بالري بدقة أكبر.

دراسة حالة: CropX والري الدقيق:

تعد[١] CropX مثالًا بارزًا على هذا التوجه، إذ توظف مستشعرات تربة مدعومة بالذكاء الاصطناعي، وتدمج بيانات الأقمار الصناعية ونماذج الطقس لتقديم نصائح ري فورية مخصصة لكل مزرعة. النتيجة: زيادة كفاءة استخدام المياه وتقليل جريان المغذيات. الأثر: وفورات مائية موثقة تتراوح بين ٢٠٪ و٤٠٪ مع تحسين غلات المحاصيل، وهو إنجاز بالغ الأهمية في مناطق تعاني من ندرة المياه مثل الشرق الأوسط وشمال إفريقيا (MENA)[٢].. إن هذه التحسينات في إدارة الموارد تمثّل الأساس الذي تبنى عليه المدن الذكية، وهو ما سنراه في الفصل الثالث عند تناول النقل المستدام وشبكات الطاقة الخضراء.

(1) CropX Technologies. (2023). Smart Irrigation Solutions. https://www.cropx.com

(2) CropX. “Case Studies: Precision Irrigation and Water Savings.” Accessed May 9, 2025. https://www.cropx.com/case-studies.

«١» التنبؤ بموارد الطاقة وإدارة الشبكة:

يجب أن توازن شبكات الطاقة الحديثة بين الطلب المتقلب وإمدادات الطاقة المتجددة المتغيرة (الشمسية والرياح). تعتبر خوارزميات الذكاء الاصطناعي حاسمة من أجل:

«٢» التنبؤ بإنتاج الطاقة المتجددة:

تتنبأ نماذج الذكاء الاصطناعي بمخرجات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بدقة عالية، مما يقلل من عدم اليقين لمشغلي الشبكات.

«٣» التنبؤ بالطلب على الطاقة:

يحلل الذكاء الاصطناعي الاستخدام التاريخي وبيانات الطقس والنشاط الاقتصادي للتنبؤ بذروات وانخفاضات الطلب.

«٤» تحسين التخزين والتوزيع:

يحدد الذكاء الاصطناعي أفضل الاستراتيجيات لشحن/تفريغ تخزين البطاريات وتوجيه تدفق الطاقة لتقليل الخسائر والحفاظ على استقرار الشبكة.

دراسة حالة: Google DeepMind وطاقة الرياح:

تتنبأ نماذج الذكاء الاصطناعي من DeepMind بإنتاج طاقة الرياح قبل ٣٦ ساعة، مما يسمح لمزارع الرياح بجدولة تسليم الطاقة بشكل أكثر فعالية. أدت هذه القدرة التنبؤية المحسنة إلى زيادة القيمة الاقتصادية لطاقة الرياح بنحو ٢٠٪ في التجارب[١].

(1) DeepMind. "Using Machine Learning to Boost the Value of Wind Energy." DeepMind Blog, February 26, 2019. https://www.deepmind.com/blog/machine-learning-can-boost-the-value-of-wind-energy

التأثيـــر: زيادة موثوقية وجدوى الطاقة المتجددة اقتصاديًا، مما يسهل الانتقال الأسرع بعيدًا عن الوقود الأحفوري.

٢.٣.٢ إدارة مخاطر الغابات والحرائق:

تجمع نماذج الذكاء الاصطناعي بين بيانات الأقمار الصناعية (مثل مؤشرات الغطاء النباتي، الحالات الشاذة الحرارية)، وتنبؤات الطقس، والتضاريس، وبيانات الحرائق التاريخية من أجل:

«١» **تحديد المناطق عالية الخطورة لحرائق الغابات:**

يوفر الذكاء الاصطناعي خرائط مخاطر ديناميكية لتوجيه جهود الوقاية ونشر الموارد.

«٢» **تحسين الحروق الموصوفة** (Prescribed Burns): الحروق الوقائية أو الحروق الموجّهة أفضل

يمكن أن يساعد الذكاء الاصطناعي في تحديد النوافذ الأكثر أمانًا وفعالية للحروق الخاضعة للرقابة لتقليل أحمال الوقود.

«٣» **دعم الاستجابة السريعة والاحتواء:**

يحلل الذكاء الاصطناعي بيانات انتشار الحرائق في الوقت الفعلي لتحسين تخصيص موارد مكافحة الحرائق.

دراسة حالة: Firemap (الولايات المتحدة الأمريكية وأستراليا)

تستخدم Firemap الذكاء الاصطناعي وصور الأقمار الصناعية (بما في ذلك VIIRS و MODIS من NASA) لتوفير الكشف عن حرائق الغابات في الوقت الفعلي وتتبعها ونمذجتها التنبؤية، ودعم رجال الإطفاء وخدمات الطوارئ[1].

(1) Firemap. "Real-Time Wildfire Detection and Prediction." Accessed May 9, 2025. https://firemap.sdsc.edu

التأثيـــر: تحسين الوعي الظرفي بالموقف، وأوقات استجابة أسرع، وتقليل محتمل للأضرار والخسائر في الأرواح المرتبطة بالحرائق.

٢. ٤. التحديات والاعتبارات الأخلاقية:

٢. ٤. ١ تحديات تطبيق الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد:

ورغم الإمكانات الهائلة التي يتيحها الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد الطبيعية ومواجهة تغيّر المناخ، إلا أن توسيع نطاق استخدامه يواجه جملة من العقبات الجوهرية، من أبرزها:

«١» توافر البيانات وجودتها:

تعتمد فعالية أنظمة الذكاء الاصطناعي على توفر كميات ضخمة من البيانات البيئية عالية الجودة وسهلة الوصول. غير أن هذا الشرط لا يتحقق دائمًا، خاصة في الدول النامية أو في مجالات بيئية يصعب فيها جمع بيانات دقيقة. (انظر الفصل الثاني لمناقشة تحديات إدارة الموارد الطبيعية والفصل الرابع حول الزراعة المستدامة).

«٢» التكلفة الحوسبية والبصمة البيئية:

يتطلب تدريب النماذج الكبيرة استهلاكًا هائلًا للطاقة، مما يؤدي إلى انبعاثات كربونية ملحوظة. ومن هنا تبرز الحاجة إلى تطوير مقاربات لـ -الذكاء الاصطناعي الأخضر» لتقليل الأثر البيئي لهذه العمليات [1].. (انظر الفصل الثامن حول البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي).

«٣» إمكانية الوصول والعدالة:

هناك خطر أن تظل أدوات الذكاء الاصطناعي المتقدمة لإدارة البيئة

(1) Strubell, Emma, Ananya Ganesh, and Andrew McCallum. “Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP.” In Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 3645–3650. 2019

متاحة فقط للدول أو المؤسسات الغنية، مما يعمّق الفجوات في القدرة على التكيف المناخي[1].

«٤» **الشفافية وقابلية التفسير:**

تعمل كثير من أنظمة الذكاء الاصطناعي كـ «صناديق سوداء» يصعب فهم منطق قراراتها الداخلية. هذا الغموض قد يضعف ثقة أصحاب المصلحة، ويجعل تبنّي الحلول الذكية أكثر بطئًا أو تحفظًا[2].

«٥» **الإفراط في الاعتماد على التكنولوجيا:**

قد تؤدي الحلول التقنية إلى إغفال الحاجة إلى تغييرات في السياسات أو السلوكيات، مما يخلق وهمًا بأن التكنولوجيا وحدها يمكن أن تحل التحديات البيئية.

٢.٤.٢ أطر أخلاقية لتطبيق الذكاء الاصطناعي البيئي:

«١» **التصميم التشاركي:** إشراك المجتمعات المحلية والسكان الأصليين وأصحاب المصلحة المتنوعين في تصميم وتنفيذ أنظمة الذكاء الاصطناعي لإدارة الموارد.

«٢» **البيانات المفتوحة والعلم المفتوح:** تعزيز تبادل مجموعات البيانات البيئية والخوارزميات والنتائج لتسريع الابتكار وضمان عدالة الوصول.

«٣» **التعاون متعدد التخصصات:** الجمع بين خبراء الذكاء الاصطناعي والعلماء البيئيين والمخططين لتطوير حلول سياقية ملائمة.

«٤» **الحوكمة المسؤولة للذكاء الاصطناعي:** وضع إرشادات واضحة للاستخدام الأخلاقي للذكاء الاصطناعي في السياقات البيئية، بما في ذلك الخصوصية والموافقة والعواقب غير المقصودة.

(1) Rolnick, David, et al. “Tackling Climate Change with Machine Learning.” ACM Computing Surveys 55, no. 2 (2022): 1–96. https://doi.org/10.11453485128/

(2) Rudin, Cynthia. “Stop Explaining Black Box Machine Learning Models for High Stakes Decisions and Use Interpretable Models Instead.” Nature Machine Intelligence 1 (2019): 206–215. https://doi.org/10.1038/s422560048--019-x

٢ . ٥ . توصيات سياسية:

لتحقيق الاستفادة القصوى من إمكانات الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد الطبيعية والعمل المناخي، هناك حاجة ملحة إلى سياسات منسقة وشاملة، تشمل ما يلي:

٢ . ٥ . ١ تعزيز البنية التحتية للبيانات البيئية:

«١» إنشاء مستودعات بيانات بيئية مفتوحة وموحدة تُسهم في تسريع الابتكار وتحسين الشفافية وتحد من إشكالية الذكاء الاصطناعي بوصفه صندوقاً أسـود [١].

«٢» دعم نشر شبكات الاستشعار في المناطق المهمشة والضعيفة التمثيل جغرافيًا.

«٣» تمويل برامج الأقمار الصناعية المخصصة للرصد البيئي طويل الأمد.

«٤» بناء القدرات وردم الفجوة الرقمية.

«٥» إطلاق برامج تدريبية متخصصة في علم بيانات البيئة والذكاء الاصطناعي.

«٦» إنشاء مراكز تميز إقليمية تُعنى بالذكاء الاصطناعي البيئي.

«٧» تقديم الدعم التقني للدول النامية لتمكينها من اعتماد وتكييف الحلول الذكية.

٢ . ٥ . ٢ تحفيز البحث والتطوير في الذكاء الاصطناعي الأخضر:

«١» تشجيع تطوير خوارزميات وهياكل حوسبة موفرة للطاقة.

«٢» فرض تقييمات بيئية شاملة على مشاريع الذكاء الاصطناعي الكبرى.

«٣» دعم البحوث التطبيقية في مجالات التكيف مع تغير المناخ والتخفيف من آثاره.

(1) Lipton, Z. C. (2018). The Mythos of Model Interpretability. Communications of the ACM, 61(10), 3643-.

٢ . ٥ . ٣ تطوير أطر تنظيمية وتشريعية فعّالة:

«١» مثل تبني إطار NIST الجديد لإدارة مخاطر الذكاء الاصطناعي [1].

«٢» وضع معايير واضحة لضمان الشفافية في تطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئي.

«٣» إنشاء آليات اعتماد للأدوات الذكية المخصصة للاستدامة البيئية.

«٤» التأكد من التزام أنظمة الذكاء الاصطناعي بالتشريعات البيئية الوطنية والدولية.

٢ . ٦ . آفـاق ناشـئة:

يفتح المستقبل آفاقًا واعدة للذكاء الاصطناعي في خدمة البيئة، من أبرزها:

«١» **التوائم الرقمية للنظم البيئية:** أنظمة محاكاة شاملة تسمح باختبار سيناريوهات الإدارة البيئية قبل تنفيذها ميدانيًا.

«٢» **المراقبة البيئية الذاتية:** شبكات ذكية من الطائرات بدون طيار، والروبوتات، والمستشعرات التي تتابع التغيرات البيئية تلقائيًا وبأقل تدخل بشري.

«٣» **نماذج بيئية هجينة مدعّمة بالذكاء الاصطناعي:** دمج المعارف الفيزيائية مع التحليلات القائمة على البيانات لتحسين دقة التنبؤات المناخية.

«٤» **التكيف المناخي المخصص:** منصات ذكية تقدّم توصيات مصمّمة خصيصًا للأفراد والمجتمعات لتعزيز قدرتهم على الصمود.

«٥» **الحوسبة الكمومية للنمذجة البيئية:** تمكّن من إجراء محاكاة عالية الدقة للأنظمة البيئية المعقدة، بما يتجاوز قدرات الحوسبة التقليدية.

(1) NIST. (2023). AI Risk Management Framework (AI RMF 1.0). U.S. Department of Commerce.

٢.٧. فـرص الاسـتفادة عربياً:

تمثل الدول العربية، ولا سيّما تلك ذات البيئات الهشة مثل السودان واليمن والأردن، مناطق ذات أولوية في تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي لتعزيز القدرة على التكيف مع التغير المناخي. تعاني هذه الدول من تحديات بيئية متعددة، أبرزها الجفاف المتكرر، شح الموارد المائية، واتساع رقعة التصحر، مما يستدعي حلولاً رقمية دقيقة وفعالة.

٢.٧.١ التنبؤ بمواسم الجفاف وإدارة الموارد المائية:

يمكن لتقنيات التعلّم الآلي تحليل بيانات الطقس التاريخية وصور الأقمار الصناعية للتنبؤ بمواسم الجفاف وتحديد المناطق المعرضة للخطر، مما يمكّن من تدخل مبكر وتخطيط أفضل للموارد[١].

٢.٧.٢ الري الذكي والزراعة الدقيقة:

كما أن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في أنظمة الري الذكي والمراقبة الحقلية يمكن أن يساعد في تقليل هدر المياه وزيادة إنتاجية المحاصيل في المناطق الزراعية المحدودة الموارد، كما هو مطبق حاليًا في مشاريع شبه تجريبية بالأردن والمغرب[٢].

٢.٧.٣ مراقبة التصحر وتغير الغطاء النباتي:

أما في مجال مراقبة التصحر، فقد طورت بعض المبادرات البحثية مثل مشروع "Arabian AI for Desertification Monitoring" نماذج تعتمد على الرؤية

(1) Amir Kharrazi, Huan Qin, and Yuanyuan Zhang, "Advancing Climate Resilience in Fragile Regions Using AI-Enabled Early Warning Systems," Environmental Research Letters 16, no. 12 (2021): 124009.

(2) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Smart Irrigation Systems in Water-Scarce Regions: Case Studies from Jordan and Morocco (Rome: FAO, 2022).

الحاسوبية لتحليل تغير الغطاء النباتي على مدى الزمن، باستخدام بيانات الأقمار الصناعية Sentinel [1]. MODIS. هذه النماذج تتيح للحكومات اتخاذ قرارات مبنية على الأدلة فيما يتعلق باستخدام الأراضي وإعادة التشجير. وبالنظر إلى اتساع الفجوة الرقمية بين الدول، تمثل أدوات الذكاء الاصطناعي منخفضة التكلفة فرصة مثالية للابتكار المحلي في هذه السياقات، خاصة عندما تقترن بتعاون إقليمي وتمويل دولـــي.

(1) United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (UNESCWA), Artificial Intelligence for Monitoring Desertification in the Arab Region (Beirut: UNESCWA, 2023).

٨.٢ الخاتمـــة

يُحدث الذكاء الاصطناعي ثورة في طرق مراقبة الموارد الطبيعية والتنبؤ بها وإدارتها في ظل أزمة المناخ المتصاعدة. بدءًا من أنظمة الإنذار المبكر التي تنقذ الأرواح إلى النماذج التنبؤية التي تحسن استخدام المياه والطاقة، يقدم الذكاء الاصطناعي نهجًا استباقيًا لحماية البيئة.

ومع ذلك، فإن تحقيق هذا الإمكان يتطلب مواجهة تحديات تقنية وأخلاقية وحوكمية كبيرة. من خلال تطوير أنظمة ذكاء اصطناعي لا تقتصر على القوة فقط، بل تتصف أيضًا بالشفافية والعدالة والمسؤولية البيئية، يمكن تسخير هذه التقنية لخدمة كوكبنا وتعزيز صموده.

إن التكامل الذكي للذكاء الاصطناعي في خطط العمل المناخي يشكّل مسارًا واعدًا نحو مستقبل مستدام – ليس كحل سحري، بل كأداة قوية ضمن استجابتنا الجماعية للتحديات البيئية.

ومع هذا التعقيد المتزايد في إدارة الموارد على نطاق الأحواض والأقاليم، يتحوّل التركيز تدريجيًا نحو المدن حيث تلتقي إدارة الموارد مع المرور والمباني والطاقة المتجدّدة.

الفصل الثالث

المدن الذكية وتطبيقات الطاقة المستدامة

الفصل الثالث
المدن الذكية وتطبيقات الطاقة المستدامة

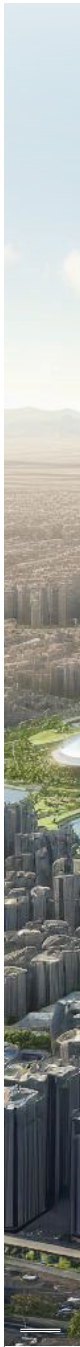
٣. ١. مقدمة:

مدننا هي أكبر مستهلك للطاقة ومسرح الحياة اليومية. بين إشارة مرور ومرآب ومبنى مكتبي، تتراكم قرارات صغيرة تصنع فارقًا ضخمًا. الذكاء الاصطناعي يحوّل هذا «الضجيج الحضري» إلى قرارات دقيقة: توقيت إشارات، تنظيف ألواح شمسية، وصيانة تنبؤية تختصر الهدر.

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** معايير لمدن قابلة للتشغيل البيني، وعدالة رقمية تحدّ من الفجوة بين الأحياء.
- **الأعمال:** أسواق حلول تنقّل، إدارة مبانٍ، وكفاءة طاقة مع نماذج ربحية واضحة.
- **الأكاديميا/الطلاب:** موضوعات بحثية حول الشبكات الذكية والتوائم الرقمية للمرافق

تشكّل المدن محورًا أساسيًا في رحلة البشرية نحو تحقيق الاستدامة، خصوصًا مع تزايد نسبة السكان الذين يعيشون في المناطق الحضرية، وتفاقم التحديات البيئية والاجتماعية التي تواجهها هذه المدن. لقد برز مفهوم «المدن الذكية» كحل مبتكر يعتمد على التقنيات المتقدمة، وفي مقدمتها الذكاء الاصطناعي، لتحسين أداء الأنظمة الحضرية الحيوية، مثل النقل والطاقة وإدارة النفايات وإمدادات المياه والسلامة العامة، بهدف خلق بيئات حضرية أكثر كفاءة واستدامة واستجابة لاحتياجات المواطنين.



٣. ٢ . البنية التحتية للمدن الذكية المدفوعة بالذكاء الاصطناعي:

تعتمد المدن الذكية بشكل أساسي على جمع البيانات ومعالجتها وتحليلها من خلال شبكات إنترنت الأشياء (IoT) وتقنيات الذكاء الاصطناعي (AI)، لإدارة البنية التحتية بطريقة أكثر ذكاءً وفعالية. تشمل هذه التطبيقات العديد من الجوانب الحياتية اليومية، بدءًا من إدارة المرور، وصولًا إلى المباني الذكية.

٣. ٢ . ١ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تطوير المدن الذكية:

«١» إدارة المـــرور الذكـيـــة:

تعتبر مشكلة الازدحامات المرورية من أكثر التحديات الحضرية تكلفة وتأثيرًا على جودة الحياة، إذ تُكلّف المدن سنويًا مليارات الدولارات نتيجة الإنتاجية المهدرة، واستهلاك الوقود الزائد، والانبعاثات البيئية الضارة. وتوفر تقنيات الذكاء الاصطناعي حلولًا ذكية ومتقدمة لمواجهة هذه التحديات عبر مجموعة من التطبيقات المهمة:

- **تحسين تدفق المرور:** تستخدم أنظمة التحكم في إشارات المرور الذكية تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات التي تجمعها مستشعرات الطرق والكاميرات في الوقت الفعلي، مما يسمح لها بضبط توقيت الإشارات بناءً على كثافة المرور الفعلية. من أبرز الأمثلة على ذلك نظام Surtrac المستخدم في مدينة بيتسبرغ بالولايات المتحدة الأمريكية، حيث يعتمد على خوارزميات ذكاء اصطناعي لا مركزية لضبط توقيت الإشارات بشكل ديناميكي. يقوم هذا النظام باتخاذ القرارات على مستوى كل تقاطع، ويتواصل مع التقاطعات المجاورة لضمان تدفق سلس ومتناغم. وقد أدى تطبيق هذا النظام إلى تقليل أوقات السفر بنسبة تصل إلى ٢٥٪، وخفض انبعاثات المركبات بنسبة ٢١٪، وتقليص أوقات التوقف بنسبة ٤٠٪ في المناطق التي طُبِّق فيها النظام [1].

(1) Stephen F. Smith, «Smart Traffic Lights,» Carnegie Mellon University, accessed May 25, 2024, https://traffic21.heinz.cmu.edu/project/surtrac/.

- **تقليل الازدحام وأوقات التوقف:** تتنبأ أنظمة الذكاء الاصطناعي بأنماط المرور استنادًا إلى البيانات التاريخية والحالية، وتقدم للسائقين والمسؤولين عن المرور توصيات لمسارات بديلة تساعد في توزيع الحركة بشكل أفضل. كما يتم استخدام تطبيقات مثل «Waze» التي تعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل أنماط التنقل في الزمن الحقيقي، وتوجيه المستخدمين إلى الطرق الأقل ازدحامًا.
- **خفض الانبعاثات الكربونية:** بتقليل أوقات التوقف والانطلاق المتكرر للمركبات، تسهم تقنيات الذكاء الاصطناعي بشكل كبير في تقليل استهلاك الوقود وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون وغيرها من الملوثات. تشير الدراسات إلى أن استخدام هذه الأنظمة يمكن أن يقلل من الانبعاثات بنسبة تصل إلى ٢٠-٢٥٪ في بعض المدن.

جـــدول (٣-١)

مؤشرات قياس استدامة النقل الذكي

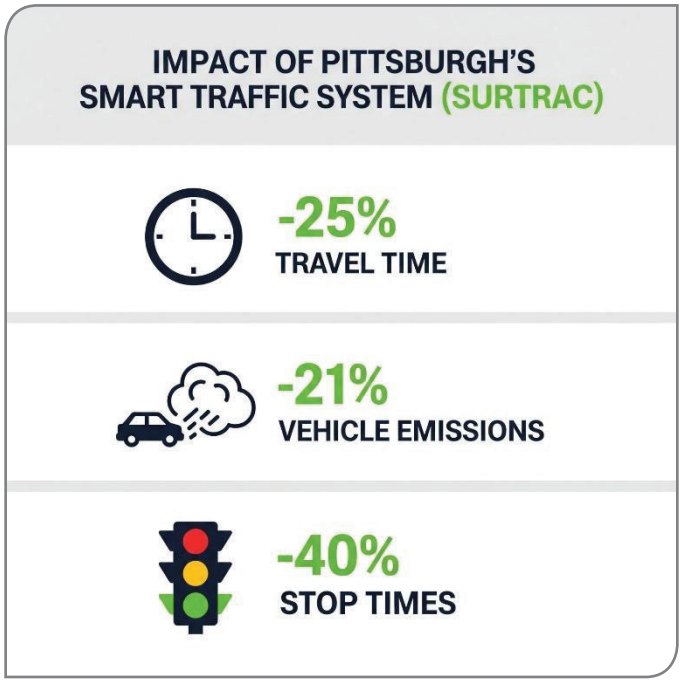
المؤشر	وحدة القياس	المدى المتوقع	ملاحظات
متوسط زمن الرحلة	دقيقة/كم	5 – 12	يعتمد على كثافة المرور
الانبعاثات لكل كيلومتر	gCO_2/km	160 – 90	تتغير حسب نوع الوقود
استهلاك الوقود	لتر/١٠٠كم	12 – 6	يمكن مقارنته مع السيارات الكهربائية
جودة الهواء (PM ٢,٥)	$\mu g/m^3$	60 – 20	يعكس الأثر المباشر على الصحة العامة

المؤشرات أعلاه تساعد صانعي القرار على تقييم أثر تقنيات النقل الذكي على الاستدامة الحضرية وجودة الحياة.

- **اتجاه ناشئ:** إدارة التنقل المتكاملة: تتجاوز أحدث أنظمة إدارة المرور مفهوم تحسين إشارات المرور فقط، بل تعمل على دمج وإدارة كافة أشكال التنقل المتاحة في المدينة (السيارات، النقل العام، الدراجات الهوائية، والمشاة) ضمن منصات موحدة. تُعد مدينتا سنغافورة وكوبنهاغن من الأمثلة الرائدة عالميًا في تطبيق هذه الأنظمة، حيث توفر هذه المنصات للمستخدمين خيارات مرنة ومتنوعة للتنقل، ما يخفف من الازدحامات ويعزز الاستدامة الحضرية. وبالرغم من أن النقل الذكي يقلل الانبعاثات، إلا أن تشغيل أنظمة الذكاء الاصطناعي بحد ذاته يولّد بصمة كربونية تحتاج إلى تقييم، وهو ما سنناقشه تفصيلاً في الفصل الثامن.

الشكل (٥)

تأثير نظام المرور الذكي في بيتسبرغ (Surtrac)



الشكل (٥) يوضح استخدام أيقونات وأرقامًا بارزة لتسليط الضوء على النتائج: أيقونة ساعة تظهر «-٢٥٪ من زمن الرحلة»، وأيقونة عادم سيارة لـ «-٢١٪ من انبعاثات المركبات»، وأيقونة إشارة مرور لـ «-٤٠٪ من أوقات التوقف».

«٢» إدارة النفايات الذكية:

تشكل إدارة النفايات تحديًا كبيرًا في المدن نظرًا لتكاليفها العالية وتأثيراتها البيئية. تسعى أنظمة الذكاء الاصطناعي لتحسين هذه العملية من خلال تقنيات متقدمة مثل استخدام مستشعرات ذكية لمراقبة مستوى امتلاء حاويات النفايات، وتحليل أنماط إنتاج النفايات، وتحسين مسارات جمعها لتقليل الوقود المستخدم والانبعاثات الناتجة. وقد نجحت مدينة برشلونة في تطبيق نظام متكامل يعتمد على إنترنت الأشياء والتوجيه الديناميكي لشاحنات النفايات، مما أدى إلى تقليل تكاليف الجمع بنسبة ١٠-١٥٪، وانخفاض في انبعاثات المركبات بنسبة ١٧٪، وتحسين معدلات إعادة التدوير [١].

هذه الحلول التقنية لن تؤتي ثمارها دون أطر استراتيجية وسياسات داعمة، وهو ما نستعرضه في الفصل السادس.

الشكل (٦) نموذج سلال ذكية لادارة النفايات

(1) Ajuntament de Barcelona, «Smart Waste Management,» accessed May 25, 2024, https://ajuntament.barcelona.cat/digital/en.

يوضح الشكل «٦» بوضوح كيف تساهم سلال النفايات الذكية في تحقيق أهداف المدن الذكية والاستدامة البيئية من خلال:

- **الإدارة الفعالة للنفايات:** تتبع مستوى الامتلاء يقلل من الحاجة لجمع النفايات غير الممتلئة، مما يوفر الوقود ويقلل الانبعاثات.
- **الطاقة المتجددة:** الاعتماد على الطاقة الشمسية والرياح لتشغيل أنظمة الاستشعار والضغط.
- **الاتصال الذكي:** دمج السلال في شبكة إنترنت الأشياء (IoT) للمدينة، مما يتيح التخطيط الفعال لجمع النفايات وتحسين المسارات.

بهذه الطريقة، لا يوضح الشكل كيف تبدو سلة النفايات الذكية فحسب، بل يشرح أيضًا وظائفها الأساسية ومساهمتها في مدينة أكثر استدامة.

العناصر الرئيسية في الشكل:

«١» سلال النفايات الذكية (Smart Bins):

- **التصميم الحديث والأنيق:** السلتان مصممتان بشكل عصري وجذاب، يتناسب مع البيئة الحضرية الذكية. لونهما الأخضر والأبيض يعكس التركيز على البيئة والاستدامة.
- **الشفافية لعرض المحتويات** (Transparent Sections): إحدى الميزات البارزة هي وجود جزء شفاف في مقدمة كل سلة.
- **السلة اليسرى:** تُظهر نفايات قابلة لإعادة التدوير مضغوطة (مثل الزجاجات البلاستيكية الزرقاء)، مما يسلط الضوء على وظيفتها في فرز وإدارة المواد القابلة لإعادة التدوير.
- **السلة اليمنى:** تُظهر نفايات عامة، مما يوضح قدرتها على التعامل مع أنواع مختلفة من النفايات.

هذه الشفافية تساعد القارئ على فهم نوع النفايات التي تتعامل معها كل سلة بشكل فوري.

«٢» مصدر الطاقة المستدامة (Sustainable Power Source):

- **الألواح الشمسية** (Solar Panel): كل سلة مزودة بلوح شمسي صغير مثبت في الأعلى. هذا يشير إلى أن السلال تعمل بالطاقة الشمسية، مما يقلل من اعتمادها على شبكة الكهرباء ويجعلها مستدامة بيئيًا.
- **توربينات الرياح المصغرة** (Miniature Wind Turbine): بجانب الألواح الشمسية، توجد توربينات رياح صغيرة. هذه الميزة تؤكد على أن السلال متعددة مصادر الطاقة المتجددة، مما يضمن عملها حتى في الظروف الجوية المختلفة.

«٣» الشاشات الرقمية ومؤشرات الحالة (Digital Displays & Status Indicators):

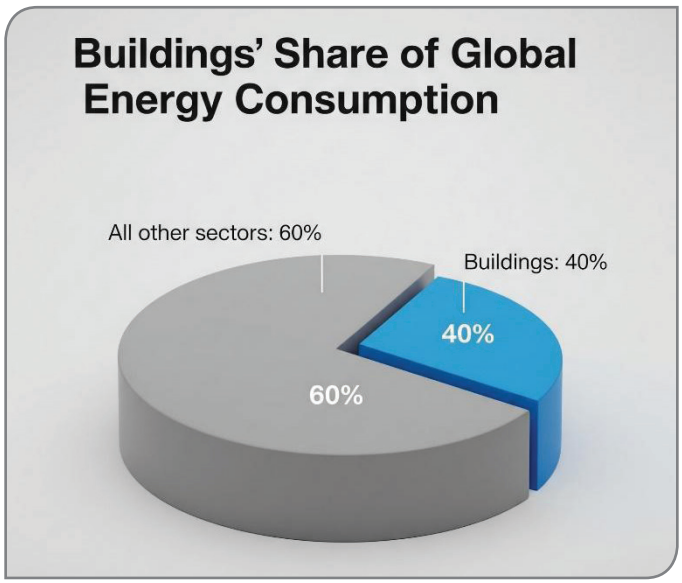
- **مستوى الامتلاء** (Fill Levels): تعرض كل سلة قراءة رقمية واضحة لمستوى امتلاء النفايات بداخلها (على سبيل المثال، ٧٥٪ و٩٠٪). هذه الميزة حاسمة في مفهوم المدن الذكية، حيث تسمح للبلديات بتتبع حالة السلال عن بُعد.
- **أيقونات الاتصال** (Wi-Fi Connectivity Icon): تظهر أيقونات واضحة لشبكة Wi-Fi ، مما يدل على قدرة السلال على الاتصال بالإنترنت وإرسال البيانات في الوقت الفعلي إلى مركز التحكم. هذه هي «الذكاء» في السلة الذكية.

«٣» إدارة المباني الذكية:

تُعتبر المباني أحد أكبر مستهلكي الطاقة في العالم، حيث تستهلك ما يقارب ٤٠٪ من إجمالي الاستهلاك العالمي. يقوم الذكاء الاصطناعي بإدارة الطاقة داخل المباني

من خلال ضبط أنظمة التكييف والتدفئة والإضاءة وفقًا لاحتياجات الإشغال وظروف البيئة الخارجية. يُعد مبنى The Edge في أمستردام مثالاً بارزًا على ذلك، حيث يستخدم المبنى شبكة من ٢٨،٠٠٠ مستشعر وذكاء اصطناعي متقدم لإدارة الطاقة، مما أدى إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى ٧٠٪ مقارنة بالمباني التقليدية. – هذا النوع من المباني الإدراكية (Cognitive Buildings) يمثل مستقبل التصميم الحضري المستدام، حيث تستطيع المباني التعلم والتكيف ذاتيًا لضمان كفاءة استهلاك الطاقة وراحة المستخدمين.

الشكل (٧): حصة المباني من استهلاك الطاقة العالمي



يوضح الشكل (٧) رسم بياني دائري حيث توجد شريحة كبيرة، تحمل علامة «المباني: ٤٠٪»، تهيمن بصريًا على الرسم للتأكيد على الأهمية الحاسمة لتقنية المباني الذكية.

٣.٣. تحسين الطاقة المتجددة من خلال الذكاء الاصطناعي:

يتطلب الانتقال إلى مصادر الطاقة المتجددة التغلب على تحديات مثل الانقطاع المتقطع، والتغير في الإنتاج، ومحدودية التخزين. يلعب الذكاء الاصطناعي دورًا محوريًا في تمكين أنظمة طاقة أنظف وأكثر موثوقية وذكاء، من خلال قدرات متقدمة للتنبؤ، والتحسين، والتحكم.

٣.٣.١ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في أنظمة الطاقة المتجددة:

«١» التنبؤ بإنتاج الطاقة الشمسية وطاقة الرياح:

تتميز مصادر الطاقة المتجددة مثل الشمس والرياح بالتقلب، ما يجعل التنبؤ الدقيق بالإنتاج أمرًا أساسيًا لدمجها في الشبكة الكهربائية. تتنبأ نماذج الذكاء الاصطناعي بإنتاج الألواح الشمسية وتوربينات الرياح اعتمادًا على:

- **أنماط الطقس:** تعالج نماذج التعلم العميق صور الأقمار الصناعية وبيانات الطقس للتنبؤ بالغيوم والرياح.
- **بيانات التوليد السابقة:** تكتشف الخوارزميات أنماط الأداء السابقة لتحسين دقة التنبؤات.
- **البيانات الحية من المستشعرات:** تعالج أجهزة الحوسبة الطرفية الظروف المحلية لتحديث التوقعات بشكل مستمر.

دراسة حالة: مشروع DeepMind لتحسين طاقة الرياح:

تساعد نماذج تعلم الآلة من DeepMind مزارع الرياح على جدولة التزامات تسليم الطاقة بناءً على توقعات دقيقة لمدة ٦٣ ساعة. والنتيجة: زيادة القيمة الاقتصادية لطاقة الرياح بنسبة ٢٠٪، وتقليل أخطاء التنبؤ بنسبة تصل إلى ٥٠٪[1].

(1) DeepMind. “Wind Energy Forecasting and Optimization.” DeepMind Blog, 2023. https://deepmind.com/blog/article/machine-learning-can-boost-the-value-of-wind-energy

- **ابتكار حديث:** الشبكات العصبية المستنيرة بالفيزياء. تدمج النماذج الهجينة بين التعلم من البيانات والمبادئ الفيزيائية لتحسين دقة التنبؤ، خاصة في حالات الطقس المتطرفة.

«٢» إدارة الشبكات الذكية:

تم تصميم الشبكات الكهربائية التقليدية لتدفق أحادي الاتجاه للطاقة. أما الشبكات الحديثة، فتتعامل مع تدفقات ثنائية الاتجاه وتنسّق موارد طاقة موزعة.

الذكاء الاصطناعي يساعد الشبكات على موازنة العرض والطلب بكفاءة من خلال:

- **التنبؤ بتقلبات الأحمال:** يتوقع الذكاء الاصطناعي أنماط الطلب عبر فترات زمنية مختلفة.
- **دمج مصادر الطاقة المتجددة** اللامركزية مثل الألواح الشمسية المنزلية.
- **اكتشاف الأعطال تلقائيًا** وإعادة تكوين الشبكة للحفاظ على الخدمة.

- **دراسة حالة: منصة Energi.AI (النرويج):**

تساعد الشركات على تقليل انبعاثاتها من خلال تحليل أنماط الاستخدام وتقديم تقارير لحظية عن الكربون.

- **النتيجة:** تعزيز مرونة الشبكة، وتحسين دمج الطاقة المتجددة، وتقليل الانبعاثات من خلال جدولة الاستهلاك في فترات انخفاض الكربون[1].
- **اتجاه ناشئ:** أسواق الطاقة التبادلية. يتيح الذكاء الاصطناعي منصات تبادل طاقة من نظير إلى نظير (٢)، حيث يمكن للمستهلكين بيع فائض الطاقة الشمسية لجيرانهم، باستخدام تقنية البلوك شين Blockchain

(1) Energi.AI. "AI-Powered Carbon Intelligence Platform." Energi.AI Reports, 2023. https://energi.ai

(تقنية سجل رقمي لامركزي وآمن، تُستخدم لتسجيل وتوثيق المعاملات بطريقة شفافة وغير قابلة للتعديل.)[1] للمعاملات والذكاء الاصطناعي للتسعير والمطابقة.

«٣» صيانة مزارع الطاقة الشمسية:

تتطلب مزارع الطاقة الشمسية صيانة دورية للحفاظ على الكفاءة. تستخدم الطائرات بدون طيار المزودة بخوارزميات التعرف البصري للمساعدة في:

- اكتشاف الألواح التالفة أو المتسخة أو المستظلة.
- قياس تراكم الأتربة لتحديد جداول التنظيف المثلى.
- الكشف عن النقاط الساخنة باستخدام التصوير الحراري.

دراسة حالة: منصة SenseHawk:

تقدم حلاً متكاملاً لمراقبة وتحليل وتشخيص مزارع الطاقة الشمسية.

- **النتيجة:** تحسين كفاءة الألواح بنسبة ٥-٧٪، وتقليل أعطال الصيانة عبر الاكتشاف المبكر [٢].
- **لمحة تقنية:** روبوتات التنظيف الذاتية للألواح الشمسية. تستخدم هذه الأنظمة الرؤية الحاسوبية لتحديد المناطق المتسخة وتنظيفها دون تدخل بشري، مما يحسن الكفاءة ويقلل استهلاك المياه!

(1) Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.

(2) SenseHawk. “AI for Solar Site Operations.” SenseHawk Solutions Overview, 2023. https://sensehawk.com

٣. ٤ . التمويل الأخضر والتصميم المستدام المدعوم بالذكاء الاصطناعي:

تعتمد التحولات الحضرية المستدامة ليس فقط على استخدام التكنولوجيا، بل على وجود منظومة تمويل ذكية ومبادئ تصميم تراعي الاستدامة والعدالة البيئية. وهنا يلعب الذكاء الاصطناعي دورًا مزدوجًا: فهو أداة لتحسين تقييم المشاريع من حيث الأثر البيئي والاقتصادي، وفي الوقت ذاته أداة تصميم ذكية قادرة على توليد حلول أكثر كفاءة.

٣. ٤ . ١ التمويل الأخضر للتنمية الحضرية المستدامة:

التمويل الأخضر هو توجيه رأس المال نحو مشاريع ذات أثر بيئي إيجابي، مثل الطاقة المتجددة، النقل النظيف، البنية التحتية المستدامة، وإعادة التدوير. وتستخدم المؤسسات المالية الذكاء الاصطناعي لتحسين آليات التمويل من خلال تقييم المخاطر المناخية وتحليل بيانات الأثر.

مبـــادرات رائـــدة:

- **البنك الدولي:** يستخدم الذكاء الاصطناعي في تحليل جدوى مشاريع الطاقة والبنية التحتية في الدول النامية.
- **صندوق المناخ الأخضر** (GCF): يموّل مشاريع في الجنوب العالمي باستخدام أدوات مدعومة بالذكاء الاصطناعي لرصد مؤشرات الأداء البيئي.
- **البنك الأوروبي لإعادة الإعمار والتنمية** (EBRD): يوظف نماذج الذكاء الاصطناعي لتقييم مدى تعرض المشاريع لمخاطر المناخ وتحديد أولويات الاستثمار [1].
- **تحليلات الاستدامة** (ESG) المدعومة بالذكاء الاصطناعي: تُستخدم تقنيات معالجة اللغة الطبيعية (NLP) وخوارزميات التعلم الآلي لتحليل

(1) Green Climate Fund, "AI and Climate Finance," accessed May 25, 2024, https://www.greenclimate.fund.

آلاف تقارير الاستدامة ومحتوى وسائل الإعلام لتصنيف الشركات وفقًا لأدائها البيئي والاجتماعي والحوكمي. وقد أسهم هذا في كشف المشاريع الزائفة «Greenwashing» وتوجيه الاستثمار الأخضر نحو المبادرات الحقيقية [1].

٢.٤.٣ التصميم المستدام المعتمد على الذكاء الاصطناعي:

«١» المباني الذكية الخضراء:

يساعد الذكاء الاصطناعي في إعادة تصور تصاميم المباني لتكون أكثر كفاءة في استخدام الموارد وأقل تأثيرًا على البيئة:

- محاكاة آلاف التصاميم لاختيار أفضل الخيارات من حيث استهلاك الطاقة والتهوية والإضاءة الطبيعية.
- أنظمة استشعار ذكية تتحكم في الإضاءة والتهوية والتدفئة حسب إشغال الغرف والظروف البيئية.
- اختيار المواد منخفضة الانبعاثات بناءً على تحليل دورة الحياة باستخدام نماذج الذكاء الاصطناعي.

دراسة حالة: مراكز البيانات الخضراء من Microsoft :

تستخدم Microsoft التوائم الرقمية (Digital Twins) لتصميم مراكز بيانات تعتمد بالكامل على الطاقة المتجددة وتُحسّن كفاءة التبريد والتشغيل.

«٢» البناء الدائري وكفاءة الموارد:

يساهم الذكاء الاصطناعي في دعم الاقتصاد الدائري في قطاع البناء من خلال:

- تحسين تخطيط استخدام المواد لتقليل الفاقد في مواقع الإنشاء.

(1) Microsoft Sustainability, "How Microsoft Designs Green Data Centers," accessed May 25, 2024, https://www.microsoft.com/sustainability.

- الصيانة التنبؤية للمباني والبنى التحتية لزيادة عمرها الافتراضي وتقليل الحاجة إلى استبدال مبكر.
- تصميم مبانٍ قابلة للتفكيك، حيث يتم تسجيل خصائص كل مادة في «جواز مواد» رقمي يتيح إعادة الاستخدام وإعادة التدوير مستقبلاً.

دراسة حالة: منصة Madaster (هولندا):

توفر قاعدة بيانات شاملة لجوازات المواد باستخدام الذكاء الاصطناعي لتتبع دورة حياة المواد، مما ساعد مشاريع البناء التجريبية على تقليل النفايات بنسبة ٣٠٪ [1].

٣. ٥. الاعتبارات الأخلاقية والتحديات:

على الرغم من الإمكانات الهائلة التي يوفرها الذكاء الاصطناعي في تطوير المدن الذكية والمستدامة، إلا أن تطبيقاته تثير جملة من التحديات الأخلاقية والاجتماعية التي تتطلب معالجة جادة ومنهجية لضمان تحقيق العدالة والاستدامة الشاملة. فمع تسارع الاعتماد على أنظمة الذكاء الاصطناعي في إدارة البنية التحتية الحضرية، تبرز أربع قضايا محورية تستدعي الانتباه:

٣. ٥. ١ خصوصية البيانات وأمنها:

تعتمد المدن الذكية على جمع وتحليل كميات ضخمة من البيانات المتعلقة بالأفراد، والمركبات، والطاقة، والمياه، وحتى الأنشطة اليومية للمواطنين. ورغم أهمية هذه البيانات في تحسين كفاءة الخدمات وتحقيق أهداف الاستدامة، إلا أن التعامل معها يثير تساؤلات حول خصوصية الأفراد وأمن المعلومات. للتصدي لهذه التحديات، من الضروري:

(1) Madaster Foundation, "Circular Material Passports," accessed May 25, 2024, https://www.madaster.com.

- استخدام تقنيات التشفير الحديثة لحماية البيانات أثناء النقل والتخزين.
- تطبيق تقنيات إخفاء الهوية (Anonymization) لضمان عدم تتبع الأفراد من خلال البيانات.
- وضع أطر حوكمة واضحة ومُلزمة لتنظيم عملية جمع البيانات، مع توضيح الجهات المسؤولة عن إدارتها.
- تبني سياسات شفافة تتيح للمواطنين معرفة أنواع البيانات التي تُجمع عنهم، وكيفية استخدامها، وحقهم في الاعتراض أو المشاركة [١].

٢.٥.٣ الفجوة الرقمية والعدالة:

تُظهر الدراسات أن مشاريع المدن الذكية تميل إلى خدمة الأحياء الغنية أو ذات النفوذ السياسي الأكبر، بينما تُهمَّش المناطق الفقيرة أو المهمّشة. هذا التوزيع غير المتكافئ قد يُفضي إلى تفاقم الفجوة الرقمية ويهدد مبدأ العدالة الحضرية. لمواجهة هذا التحدي، ينبغي أن تشمل استراتيجيات التنمية الذكية:

- توزيعًا عادلًا للبنية التحتية الرقمية، بما في ذلك أجهزة الاستشعار، وخدمات الإنترنت، والمنصات الذكية.
- ضمان الوصول المتكافئ إلى الخدمات الرقمية لجميع فئات السكان، بما يشمل ذوي الدخل المحدود وكبار السن وذوي الإعاقة.
- إشراك المجتمعات المحلية في عمليات اتخاذ القرار، لضمان أن تعكس السياسات أولويات مختلف الفئات الاجتماعية [٢].

(1) OECD, "Data Governance in Smart Cities," 2021, https://www.oecd.org/governance/smart-cities.htm.

(2) United Nations-Habitat, "People-Centered Smart Cities," 2022, https://unhabitat.org/topic/people-centered-smart-cities

٣.٥.٣ البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي:

رغم دور الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة والمواصلات، فإن تشغيل هذه الأنظمة يتطلب موارد حوسبة هائلة، ما يؤدي إلى استهلاك كبير للطاقة وانبعاثات كربونية متزايدة، خاصة في ظل استخدام مراكز بيانات تعتمد على مصادر طاقة تقليدية. للتقليل من الأثر البيئي لتقنيات الذكاء الاصطناعي في المدن، يُوصى بـ:

- تطوير نماذج ذكاء اصطناعي موفرة للطاقة وذات كفاءة حسابية عالية.
- استخدام الطاقة المتجددة في تشغيل مراكز البيانات، كالطاقة الشمسية أو طاقة الرياح.
- اعتماد مبدأ التوازن البيئي عند تخطيط أنظمة الذكاء الاصطناعي، بحيث لا تطغى المكاسب الذكية على تكاليف الاستدامة البيئية [١].

٣.٥.٤ الاعتماد التقني المفرط (Technological Lock-in):

يمثل الذكاء الاصطناعي فرصة فريدة لتسريع التحول نحو مدن أكثر استدامة وعدالة، لكن نجاح هذه الرؤية يعتمد على تبني نهج حوكمي وأخلاقي وشامل يضمن أن الفوائد تصل للجميع دون استثناء.

قد يؤدي استثمار المدن بشكل كبير في أنظمة ذكاء اصطناعي مملوكة لشركات بعينها إلى الاعتماد الكامل عليها، ما يُضعف من مرونة المدن وقدرتها على التحديث أو التبديل بين التقنيات. وللتقليل من هذا الخطر، يُنصح باستخدام البرمجيات مفتوحة المصدر وتوحيد المعايير التقنية [٢].

(1) Emma Strubell et al., "Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP," 2019, https://arxiv.org/abs/1906.02243

(2) European Commission, "Avoiding Lock-in Effects of Smart City Platforms," 2021, https://ec.europa.eu.

توصيات عملية لتفادي الاحتجاز التقني:

- تشجيع البرمجيات المفتوحة المصدر والتقنيات القابلة للتشغيل البيني (interoperability).
- تنويع الشراكات التقنية وعدم الاعتماد على مزود واحد للحلول الذكية.
- إرساء معايير وطنية للحوكمة التقنية تضمن استقلالية القرار الرقمي في المدن.

٣.٦. فرص الاستفادة عربيًا:

بالنظر إلى التحديات البيئية المتفاقمة في عدد من الدول العربية، خصوصًا تلك ذات البيئات الهشة مثل السودان واليمن والأردن، يبرز الذكاء الاصطناعي كأداة استراتيجية يمكن أن تُحدث فرقًا حاسمًا في جهود التكيّف مع التغير المناخي وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

يمكن أن تسهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في عدة مجالات بيئية محورية في هذه البلدان:

٣.٦.١ التنبؤ بالجفاف وتحسين الاستعداد الزراعي:

باستخدام بيانات الأرصاد الجوية، وصور الأقمار الصناعية، وسجلات المحاصيل، يمكن لنماذج التعلم الآلي التنبؤ بموجات الجفاف قبل أسابيع أو شهور من حدوثها. يتيح ذلك للحكومات والمزارعين الاستعداد المسبق عبر توزيع البذور المقاومة للجفاف أو تعديل توقيت الزراعة. وقد نفذت الأمم المتحدة مشروعًا تجريبيًا في السودان ضمن برنامج الأمن الغذائي المبكر استخدم هذه التقنيات لتقليل أثر الجفاف على المجتمعات الزراعية [1].

(1) UN World Food Programme, “AI for Early Warning in Sudan,” accessed May 25, 2024, https://www.wfp.org.

٣.٦.٢ تحسين إدارة الموارد المائية:

في دول مثل الأردن، التي تعاني من ندرة المياه، يمكن للذكاء الاصطناعي أن يساعد في مراقبة الاستهلاك وتحليل أنماط التسرب من الشبكات، ما يسهم في تقليل الفاقد وتحسين كفاءة التوزيع. كما يمكن للأنظمة الذكية التنبؤ بأوقات الذروة وتوجيه الاستخدام الصناعي والزراعي بما يتماشى مع قدرات التوزيع الفعلية [١].

٣.٦.٣ رصد التصحر ومراقبة الغطاء النباتي:

من خلال تحليل تسلسل زمني لصور الأقمار الصناعية باستخدام خوارزميات رؤية حاسوبية، يمكن للذكاء الاصطناعي رصد التغيرات في الغطاء النباتي، وتحديد المناطق المعرضة للتصحر أو التآكل. يتيح ذلك التخطيط المبكر، وتوجيه برامج التشجير أو الترميم البيئي نحو المناطق الأشد تدهورًا. هذه الأدوات تستخدمها منظمات مثل FAO وبرنامج UNEP في مبادرات مراقبة الأراضي الجافة [٢].

٣.٦.٤ بناء القدرات والابتكار المحلي:

مع ازدياد شراكات الابتكار المفتوح في المنطقة، كبرامج Microsoft AI for Good و Google AI for Climate ، فإن بناء قدرات محلية في مجال الذكاء الاصطناعي الأخضر يُعد أولوية ملحة. يمكن للجامعات العربية ومراكز البحث اعتماد مناهج تعليمية تُركّز على دمج علوم البيئة وعلوم الحاسوب، وتشجيع الطلاب على تطوير حلول ذكية للمشاكل المحلية. كما يمكن للسياسات الحكومية دعم حاضنات الأعمال المتخصصة في التكنولوجيا البيئية.

(1) Jordan Ministry of Water and Irrigation, “Digitalization in Water Management,” accessed May 25, 2024, https://www.mwi.gov.jo

(2) UNEP, “Desertification and AI Monitoring,” accessed May 25, 2024, https://www.unep.org

٧.٣. خاتمـــــة:

يمثل الذكاء الاصطناعي أداة فعالة في تحويل المدن إلى بيئات أكثر كفاءة واستدامة وعدالة. من تحسين أنظمة النقل والطاقة، إلى ابتكار نماذج تصميم وتمويل حضرية ذكية، تتجلى قدرة هذه التكنولوجيا على إعادة تشكيل مستقبل المدن. غير أن تعظيم هذه الفوائد يتطلب إطارًا أخلاقيًا وحوكميًا واضحًا، واستثمارات مدروسة في البنية التحتية والقدرات المحلية، مع مراعاة السياقات الاجتماعية والبيئية.

وفي السياق العربي، يبرز الذكاء الاصطناعي كفرصة نادرة لتجاوز فجوات الموارد التقليدية، شريطة أن يُستخدم ضمن سياسات قائمة على العدالة والاستقلال الرقمي، وأن يُبنى على أسس من الشفافية والمشاركة المجتمعية.

في الفصل القادم، ننتقل من البنية الحضرية إلى البنية الحيوية، لنستكشف كيف يمكن للذكاء الاصطناعي أن يُسهم في حفظ التنوع البيولوجي، وتعزيز الزراعة المستدامة، وتحقيق التوازن بين الإنتاج البيئي والغذائي في ظل ضغوط التغير المناخي وتزايد السكان. من الإسفلت والخرسانة إلى الغابات والحقول: سنرى كيف يمتدّ تأثير الذكاء الاصطناعي إلى حفظ التنوع البيولوجي والزراعة المستدامة، حيث تتداخل الحياة البرية مع أمننا الغذائي.

الفصل الرابع

الذكاء الاصطناعي في حفظ التنوع البيولوجي والزراعة المستدامة

الفصل الرابع
الذكاء الاصطناعي في حفظ التنوع البيولوجي والزراعة المستدامة

٤.١. مقدمة:

صوت غابة عند الفجر يخبرنا أكثر مما نرى. من «مشاهد صوتية» تكشف الأنواع، إلى صور أقمار صناعية تفكّ شيفرة تراجع الغطاء النباتي، يمنح الذكاء الاصطناعي الطبيعة صوتًا و«عينًا» لنحميها ونزرع بذكاء أكثر وبمياه أقل.

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** أولويات حماية تستند إلى بيانات، وبرامج دعم للزراعة الدقيقة.
- **الأعمال:** تقليل المدخلات (مياه/مبيدات) مع رفع الغلة وتحسين سلاسل التوريد.
- **الأكاديميا/الطلاب:** خوارزميات تعرّف أنواعًا من الصور/الأصوات، ونماذج توقّعية للحفظ.

يشهد العالم فقدانًا سريعًا في التنوع البيولوجي بمعدل يزيد مائة مرة عن الطبيعي، وقد أدى ذلك إلى فقدان أكثر من مليون نوع من الكائنات الحية على حافة الانقراض. وفي الوقت ذاته، تساهم الزراعة التقليدية بنحو ٤٢٪ من انبعاثات غازات الدفيئة العالمية. هذه الأرقام المقلقة تجعل استخدام أدوات متقدمة مثل الذكاء الاصطناعي ضرورة لا خيارا[1].

(1) IPBES, «Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services,» 2023.

يُقصد بالتنوع البيولوجي تعدد الأنواع الحية وتفاعلها داخل النظم البيئية، وهو ما يضمن استقرار النظم الحيوية وقدرتها على الصمود. غير أن هذا التوازن مهدد بفعل أنشطة بشرية متسارعة مثل إزالة الغابات، والتوسع العمراني، وتغير المناخ.

يشكّل التنوع البيولوجي الركيزة الأساسية للحياة على كوكب الأرض، إذ يوفّر خدمات نظم بيئية ضرورية مثل الأمن الغذائي، والمياه النظيفة، وتنظيم المناخ، والقدرة على مقاومة الأمراض. ومع ذلك، فإن الأنشطة البشرية – كإزالة الغابات، وتجزئة المواطن البيئية، والتلوث، وانتشار الأنواع الغازية، وتغير المناخ – تدفع نحو تدهور غير مسبوق في الأنواع والنظم البيئية، مما يهدد أسس رفاه الإنسان نفسه [١]. وبالمثل، تُعدّ الزراعة ضرورية لإطعام عدد السكان المتزايد عالميًا، لكنها تُعد أيضًا أحد أبرز مسببات التدهور البيئي بسبب الإفراط في استخدام الموارد، وتحويل الأراضي، والانبعاثات الغازية، والتلوث الكيميائي[٢].

لحماية التنوع البيولوجي والتحول إلى ممارسات زراعية مستدامة ومتجددة، نحتاج إلى حلول مبتكرة وقابلة للتوسع بشكل عاجل. يُعد الذكاء الاصطناعي أداة محورية في هذا التحول، إذ يوفر وسائل جديدة لمراقبة النظم البيئية، وحماية الأنواع المهددة، وتحسين الممارسات الزراعية، وتعزيز الأمن الغذائي، ودعم الحوكمة البيئية. وقدرة الذكاء الاصطناعي على معالجة مجموعات ضخمة من البيانات من مصادر متنوعة .. الأقمار الصناعية، والطائرات المسيّرة، وأجهزة الاستشعار، والكاميرات المخفية، وأجهزة الصوت، وحتى الحمض النووي البيئي (eDNA) – تتيح رؤى غير مسبوقة لفهم الأنظمة البيئية والزراعية المعقدة.

يستعرض هذا الفصل أوجه التكامل القوي بين الذكاء الاصطناعي وحفظ التنوع

(1) Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Germany: IPBES Secretariat, 2023.

(2) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *The State of the World›s Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point*. Rome: FAO, 2023.

البيولوجي والزراعة المستدامة. كما يتناول تطبيقات عملية مدعومة بدراسات حالة واقعية، إلى جانب استعراض التحديات والاعتبارات الأخلاقية والتوجهات المستقبلية لاستخدام الذكاء الاصطناعي بمسؤولية في هذه المجالات الحيوية.

٤.٢. الذكاء الاصطناعي في حماية الحياة البرية ومراقبة التنوع البيولوجي:

تتطلب جهود الحفظ الفعالة مراقبة دقيقة، وفي الوقت المناسب، قابلة للتوسع لمجموعات الأنواع، والموائل، والتهديدات. يعزز الذكاء الاصطناعي قدرتنا على جمع وتحليل بيانات التنوع البيولوجي، متجاوزًا الأساليب التقليدية التي غالبًا ما تكون كثيفة العمالة.

٤.٢.١ المراقبة البيئية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي:

يعزز الذكاء الاصطناعي مراقبة التنوع البيولوجي من خلال أتمتة تحليل مجموعات البيانات الضخمة من مصادر متعددة:

- **الكاميرات المخفية:** تحدد خوارزميات الرؤية الحاسوبية (مثل الشبكات العصبية التلافيفية CNNs) الأنواع، وتحسب الأفراد، وتحلل السلوك من ملايين الصور، مما يقلل من وقت المعالجة اليدوية بشكل كبير.
- **المجسات الصوتية:** تحلل النماذج الصوتية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي (مثل الشبكات العصبية المتكررة RNNs) المشهد الصوتي لاكتشاف الأنواع، ومراقبة صحة النظام البيئي، ورصد الضوضاء البشرية أو الأنشطة غير القانونية مثل إطلاق النار أو قطع الأشجار.
- **صور الأقمار الصناعية والطائرات دون طيار:** يحلل الذكاء الاصطناعي الصور عالية الدقة لرسم خرائط الموائل، واكتشاف تغيرات استخدام الأراضي، ومراقبة صحة الغطاء النباتي باستخدام مؤشرات مثل NDVI ، وحتى عد الحيوانات في المساحات المفتوحة [1].

(1) Tucker, C. J. «Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation.» Remote Sensing of Environment 8, no. 2 (1979): 127–150.

- **الحمض النووي البيئي** (eDNA): يساعد الذكاء الاصطناعي في تحليل التسلسلات الجينية من التربة أو المياه لاكتشاف وجود أنواع متعددة في وقت واحد، مما يتيح طريقة غير تدخّلية للمراقبة.

دراسة حالة: منصة Wildlife Insights :

طوّرتها منظمة Conservation International وشركة Google وشركاء آخرون، وتستخدم نماذج الذكاء الاصطناعي من Google لمعالجة ملايين الصور من الكاميرات المخفية حول العالم. توفّر المنصة بيانات وتحليلات موحدة للباحثين ومديري المحميات.

الأثـــر: تقليل وقت معالجة البيانات بأكثر من ٩٠٪ في العديد من المشاريع، وتمكين دراسات تعاونية واسعة النطاق، وتوفير رؤى شبه فورية حول تجمعات الحياة البرية والتهديدات[1].

٢.٢.٤ الكشف الصوتي والمراقبة:

تحلل نماذج الذكاء الاصطناعي المشهد الصوتي للكشف عن وجود الأنواع، وتقدير كثافة السكان، ومراقبة صحة النظام البيئي.

دراســة حالــة: (Rainforest Connection RFCx) :

تنشر المنظمة مجسّات صوتية تعمل بالطاقة الشمسية تُعرف باسم "Guardians" في الغابات المطيرة حول العالم. تحلل نماذج الذكاء الاصطناعي الصوت المتدفق في الوقت الحقيقي لاكتشاف أصوات قطع الأشجار (المناشير)، الصيد غير المشروع (إطلاق النار، المركبات)، وتعقب الأنواع المهددة من خلال أصواتها.

(1) Wildlife Insights. "AI-Powered Wildlife Monitoring Platform." Accessed May 9, 2025. https://www.wildlifeinsights.org

الأثر: توفير إنذارات مبكرة للأنشطة غير القانونية، ما يمكّن من استجابة أسرع من قبل الحُرّاس؛ وتوليد بيانات قيّمة حول توزيع الأنواع وسلوكها.

لمحة ابتكارية: الذكاء الاصطناعي الصوتي لصحة النظم البيئية يطور الباحثون نماذج تحلل المشهد الصوتي الكامل لتقييم صحة النظام البيئي والتنوع البيولوجي الكلي، متجاوزة التركيز على أنواع محددة.

٣.٢.٤ نماذج الحفظ التنبؤية:

تحلل نماذج التعلم الآلي البيانات التاريخية والمتغيرات البيئية للتنبؤ بالتهديدات المستقبلية وتوجيه التدخلات الوقائية، مثل:

- تقييم خطر انقراض الأنواع بناءً على اتجاهات السكان وفقدان المواطن وتوقعات تغير المناخ والبيانات الجينية.
- التنبؤ بتدهور المواطن البيئية نتيجة للتوسع الزراعي أو العمراني [1].
- الكشف المسبق عن أنشطة الصيد الجائر والاتجار غير المشروع من خلال تحليل بيانات الدوريات وتقارير الحُراس والعوامل البيئية وحتى النشاط على الإنترنت المظلم.
- تصميم شبكات مناطق محمية أو ممرات للحياة البرية باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي تأخذ في الاعتبار الميزانية والسيناريوهات المناخية المستقبلية.

دراسة حالة: شراكة SMART ونظام PAWS (مساعد الحماية للحياة البرية):

يُستخدم نظام SMART (أداة الرصد والإبلاغ المكاني) على نطاق واسع

(1) Maxwell, S. L., et al. «Conservation Priorities: Assessing the Return on Investment of Habitat Protection.» Nature 575, no. 7781 (2019): 235–238.

لإدارة المحميات. أما PAWS ، الذي طوره باحثون من جامعة جنوب كاليفورنيا، فيدمج الذكاء الاصطناعي مع بيانات SMART للتنبؤ بمناطق الخطر وتحسين مسارات الدوريات.

الأثـــر: أظهرت الاختبارات الميدانية في دول مثل أوغندا وماليزيا تحسنًا ملحوظًا في اكتشاف مؤشرات الصيد الجائر وتوزيع الجهود الميدانية مقارنة بالطرق التقليدية [١].

دراســـة حالـــة: Earth Ranger [٢]

منصة طورتها في الأصل شركة Vulcan Inc . وتديرها الآن مؤسسة Allen Institute for AI (AI2) . تدمج المنصة البيانات في الوقت الحقيقي من أجهزة الاستشعار، ودوريات الحُرّاس، وأجهزة تتبع الحيوانات، وصور الأقمار الصناعية، وتستخدم الذكاء الاصطناعي لتحليل أنماط الحركة، واكتشاف الشذوذ، والتنبؤ بالتهديدات مثل الصراع بين الإنسان والحياة البرية أو الصيد الجائر.

الأثـــر: تُستخدم في مئات المناطق المحمية حول العالم، ما أدى إلى تحسين الوعي بالميدان، وسرعة الاستجابة، وفعالية إدارة الحماية [٣].

بعد أن استعرضنا كيف يُستخدم الذكاء الاصطناعي في مراقبة التنوع البيولوجي، ننتقل الآن إلى مجال لا يقل أهمية، وهو الزراعة المستدامة، حيث تواجه تحديات مزدوجة من حيث زيادة الإنتاج وتقليل الأثر البيئي.

(1) Rainforest Connection. “AI-Powered Acoustic Monitoring for Forest Protection.” Accessed May 9, 2025. https://rfcx.org

(2) EarthRanger. “Real-Time Conservation Management Platform.” Allen Institute for AI (AI2), 2023. https://www.earthranger.com

(3) Fang, Fei, et al. “Deploying PAWS: Field Optimization of the Protection Assistant for Wildlife Security.” In Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), 2017.

٤.٣. الذكاء الاصطناعي في الزراعة المستدامة:

تواجه الزراعة تحديًا مزدوجًا يتمثل في ضرورة إنتاج المزيد من الغذاء باستخدام موارد أقل، مع تقليل الأثر البيئي. يقود الذكاء الاصطناعي هذا التحول من خلال الزراعة الدقيقة، والممارسات الذكية مناخيًا، والإدارة المستدامة للموارد. الزراعة المستدامة لا تنفصل عن إدارة الموارد الطبيعية من طاقة ومياه، وهو ما عالجناه في الفصل الثاني.

٤.٣.١ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الزراعة المستدامة:

«١» الزراعة الدقيقة وإدارة المحاصيل الذكية:

تركّز الزراعة الدقيقة على إدارة التباينات داخل الحقول لتحسين توزيع المدخلات (المياه، الأسمدة، المبيدات) وتعظيم الغلة بشكل مستدام. يُحلل الذكاء الاصطناعي العوامل التالية لتحسين الإنتاج الزراعي:

- **صحة التربة:** يفسر الذكاء الاصطناعي بيانات المستشعرات الأرضية والاستشعار عن بعد لرسم خرائط لأنواع التربة ومستويات المغذيات والرطوبة.
- **الطقس المحلي:** توفر النماذج التنبؤية للذكاء الاصطناعي توقعات مناخية دقيقة تُفيد في اتخاذ قرارات الزراعة والري والحصاد.
- **صور صحة النبات:** تُحلل الصور متعددة الأطياف من الطائرات أو الأقمار الصناعية لاكتشاف أعراض الإجهاد أو الأمراض قبل أن تظهر بصريًا.
- **أنماط الآفات والأمراض:** تتنبأ النماذج بحدوث الآفات بالاعتماد على البيانات المناخية والتاريخية، مما يسمح بتدخلات دقيقة بدلًا من استخدام المبيدات بشكل واسع.

دراسة حالة: تطبيق Plantix للزراعة الذكية

يستخدم الذكاء الاصطناعي (الرؤية الحاسوبية) لتشخيص أمراض النبات، وأضرار الآفات، ونقص المغذيات من صور يحمّلها المزارعون عبر هواتفهم الذكية. يوفّر التطبيق توصيات علاجية مخصصة، غالبًا باستخدام خيارات مستدامة [1].

الأثـــر: يُستخدم من قبل ملايين المزارعين الصغار حول العالم، مما ساعد في تقليل خسائر المحاصيل بنسبة تصل إلى ٣٠٪ في بعض الحالات، وتقليل الاستخدام غير الضروري للمبيدات.

«٢» أنظمة الري الذكية وكفاءة استخدام المياه:

تنظم أنظمة الري المدعومة بالذكاء الاصطناعي كميات المياه الموزعة بناءً على بيانات آنية، مما يقلل بشكل كبير من هدر المياه في الزراعة:

- **مستشعرات رطوبة التربة:** يدمج الذكاء الاصطناعي بيانات من المجسات لتحديد الاحتياجات الفعلية للنبات.
- **توقعات الطقس:** يأخذ بعين الاعتبار معدلات التبخر والأمطار لتعديل جداول الري تلقائيًا.
- **متطلبات النبات:** يقدّر الذكاء الاصطناعي احتياجات كل محصول بناءً على مرحلة نموه وظروف البيئة المحيطة.

دراسة حالة: منصة CropX للري الدقيق:

تدمج بيانات المستشعرات الأرضية وصور الأقمار الصناعية مع نماذج الذكاء الاصطناعي لتقديم توصيات ري دقيقة، وغالبًا ما تتحكم مباشرة في أنظمة الري.

(1) Plantix. "AI-Based Plant Disease Diagnosis App." Accessed May 9, 2025. https://plantix.net

الأثـــــر: وفرت ما بين ٣٠-٥٠٪ من استهلاك المياه في عدة محاصيل ومناطق، مع الحفاظ على الغلال أو زيادتها [1].

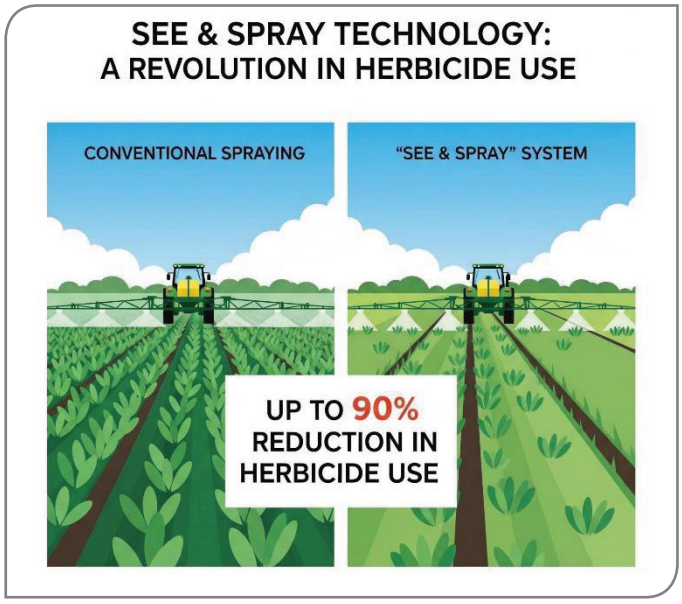
«٣» الروبوتات الزراعية المستقلة:

تنتشر الطائرات المسيّرة والروبوتات المدعومة بالذكاء الاصطناعي بشكل متزايد في المهام التي تتطلب الدقة والكفاءة:

- **إزالة الأعشاب الضارة الموجهة:** تحدد الروبوتات الأعشاب باستخدام الرؤية الحاسوبية وتزيلها ميكانيكيًا أو عبر رش موضعي دقيق.
- **الرش الدقيق:** تطبّق الطائرات أو الروبوتات المبيدات أو الأسمدة فقط في المناطق التي تحتاج إليها.
- **الحصاد الآلي:** يجري تطوير روبوتات ذكية قادرة على حصاد الفواكه والخضروات بشكل انتقائي، مما يقلل من تكلفة العمالة والهدر.

(1) CropX Technologies. “Precision Irrigation Solutions.” Accessed May 9, 2025. https://www.cropx.com

الشكل (٨):
تقنية الرؤية والرش (See & Spray):
ثورة في استخدام مبيدات الأعشاب



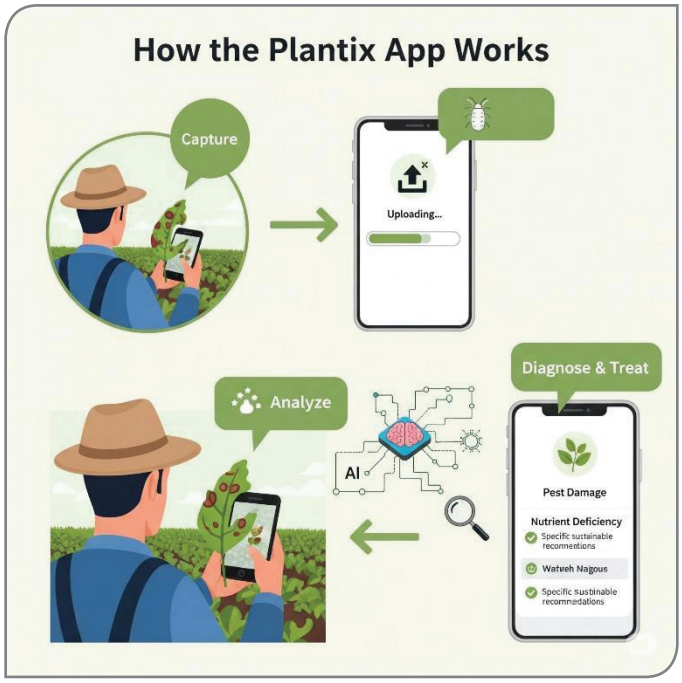
يوضح الشكل (٨) حقل يتم رشه بالطريقة التقليدية (تغطية ١٠٠٪). وبجانبه، عرض نظام «الرؤية والرش» مع الرش الموجه، مصحوبًا بالإحصائية: «تقليل يصل إلى ٩٠٪ في استخدام مبيدات الأعشاب».

دراسة حالة: Blue River Technology **(شركة تابعة لشركة** John Deere**):**

يستخدم نظام "See & Spray" الذكاء الاصطناعي والرؤية الحاسوبية للتمييز بين المحاصيل والأعشاب الضارة في الوقت الحقيقي، ويرش المبيد فقط على الأعشاب.

الأثـــر: خفض استخدام المبيدات بنسبة تصل إلى ٩٠٪ في بعض المحاصيل، مما قلل التكاليف والتأثير البيئي لاستخدام المواد الكيميائية [1].

الشكل (٩): كيف يعمل تطبيق بلانتكس



يلتقط المزارع صورة لورقة نبات بهاتفه الذكي ثم تحُمّل الصورة إلى التطبيق، حيث يستخدم الذكاء الاصطناعي الرؤية الحاسوبية لتحليلها.

يقدم التطبيق تشخيصًا («ضرر الآفات»، «نقص المغذيات») ويوصي بخيارات علاج مستدامة

(1) John Deere. "Blue River Technology: See & Spray." Accessed May 9, 2025. https://www.deere.com/en/technology-products/see-and-spray

٤.٣.٢ تعزيز الأمن الغذائي وتقليل الفاقد:

تتجاوز مساهمة الذكاء الاصطناعي حدود المزرعة لتشمل سلسلة الإمداد الغذائي كاملة، بما يسهم في تعزيز الأمن الغذائي وتقليل الهدر:

- **التنبؤ بالغلال:** توفر نماذج الذكاء الاصطناعي تنبؤات دقيقة بإنتاج المحاصيل على المستوى الإقليمي والوطني، مما يساعد الحكومات والمنظمات على الاستعداد لنقص الإمدادات وإدارة سلاسل التوريد.
- **تحسين سلاسل الإمداد:** تساعد خوارزميات الذكاء الاصطناعي في تقليل التلف وخفض تكاليف النقل من المزرعة إلى المستهلك من خلال تحسين اللوجستيات.
- **الحد من الفاقد الغذائي:** تُحلل أدوات الذكاء الاصطناعي بيانات البيع والاستهلاك للتنبؤ بالطلب بدقة، مما يقلل من فائض التخزين والهدر في قطاعي التجزئة والخدمات الغذائية.

دراسة حالة: Winnow Solutions :

توفر الشركة أنظمة ذكية للمطابخ التجارية تعتمد على الذكاء الاصطناعي وتحديد الصور تلقائيًا لتتبع الطعام المهدور. تُزود هذه البيانات الطهاة بتقارير مفصلة تساعدهم في تحسين الشراء والتحضير.

الأثر: ساعدت مئات المطابخ حول العالم على تقليل الفاقد الغذائي بنسبة ٥٠٪ أو أكثر، ما أدى إلى خفض التكاليف وتقليل البصمة البيئية للخدمات الغذائية[1].

٤.٣.٣ دور الذكاء الاصطناعي في مكافحة تغير المناخ:

يستخدم الذكاء الاصطناعي في بناء نماذج متقدمة للتنبؤ بأحوال المناخ، مما

(1) Winnow Solutions. “AI-Powered Food Waste Reduction Systems.” Accessed May 9, 2025. https://www.winnowsolutions.com

يساعد في توقع الأحداث المناخية المتطرفة وإدارة الأزمات المناخية بشكل أفضل[1]. كما أن حماية الموائل الطبيعية تسهم في جودة الهواء في المدن، وهو ما يتكامل مع ما عرضناه في الفصل الثالث حول التخطيط الحضري الذكي.

٤.٤. التحديات والاعتبارات الأخلاقية:

رغم الإمكانات الهائلة للذكاء الاصطناعي في مجالي حفظ التنوع البيولوجي والزراعة المستدامة، إلا أن تطبيقه يواجه تحديات كبيرة يجب التعامل معها بجدية:

٤.٤.١ تحديات البيانات:

- **ندرة البيانات والتحيز:** تفتقر العديد من الأنواع النادرة، والنظم البيئية النائية، أو المزارع الصغيرة في الدول النامية إلى بيانات كافية. كما قد تؤدي البيانات المتحيزة إلى أداء ضعيف للنماذج في هذه السياقات.
- **تكامل البيانات:** لا يزال الجمع بين أنواع مختلفة من البيانات (صور، صوت، مستشعرات، بيانات جينية) يشكل تحديًا تقنيًا معقدًا[2].

٤.٤.٢ تحديات التنفيذ:

- **التكلفة والوصول:** تمثل أدوات الذكاء الاصطناعي وخبراته تكلفة مرتفعة قد لا تكون في متناول صغار المزارعين أو مجموعات الحفظ المجتمعية. في أفريقيا، على سبيل المثال، تعتمد كثير من التطبيقات على بيانات تم جمعها في دول غنية، مما يقلل من فعاليتها بسبب اختلاف الظروف البيئية والاجتماعية.

(1) Rolnick et al., «Tackling Climate Change with Machine Learning,» ACM Computing Surveys 55, no. 2 (2022): 196-.

(2) Mhlanga, D., «Artificial Intelligence in Africa: Challenges and Opportunities,» AI & Society 36, no. 2 (2021): 509520-.

- **متطلبات البنية التحتية:** غالبًا ما تفتقر المناطق الريفية والمواقع الميدانية إلى اتصال إنترنت موثوق أو قدرات حوسبية كافية.
- **قابلية التوسع:** يتطلب الانتقال من مشاريع تجريبية ناجحة إلى اعتماد واسع النطاق استثمارات ضخمة وجهودًا في بناء القدرات.

٤.٤.٣ قضايا أخلاقية:

- **الخصوصية والمراقبة:** تثير تكنولوجيا الرصد (مثل الطائرات دون طيار وأجهزة الاستشعار) مخاوف بشأن خصوصية المجتمعات المحلية والمزارعين.
- **التحيز الخوارزمي:** قد تكرس أنظمة الذكاء الاصطناعي التحيزات القائمة، كتركيز جهود الحفظ على الحيوانات «الكاريزمية» أو تحسين الزراعة لأنظمة الزراعة الأحادية الواسعة فقط.
- **فقدان الوظائف:** تثير الأتمتة في الزراعة مخاوف بشأن سبل عيش العمال الزراعيين.
- **ملكية البيانات والتحكم:** من يمتلك البيانات التي تولدها أنظمة الذكاء الاصطناعي؟ ومن يستفيد منها؟ هناك مخاوف من استغلال البيانات، خاصةً في حالة المزارعين الصغار.

٤.٤.٥ الدروس المستفادة والتوجهات المستقبلية:

- **التعاون أمر جوهري:** تتطلب الحلول الفعالة شراكات بين خبراء الذكاء الاصطناعي، وعلماء البيئة، وخبراء الزراعة، والعاملين في الحفظ، والمزارعين، والمجتمعات المحلية.
- **السياق المحلي مهم:** يجب تكييف أدوات الذكاء الاصطناعي مع الظروف البيئية، والنظم الزراعية، والخصوصيات الاجتماعية المحلية.
- **التركيز على النتائج القابلة للتنفيذ:** ينبغي أن يوفر الذكاء الاصطناعي

معلومات قابلة للتطبيق تدعم اتخاذ القرار وتُسهم في تحقيق نتائج بيئية ملموسة.

- **بناء القدرات أساسي:** هناك حاجة إلى برامج تدريبية لتمكين أصحاب المصلحة المحليين من استخدام أدوات الذكاء الاصطناعي وصيانتها بفعالية.

٤.٥.١ التوجهات المستقبلية:

- **الذكاء الاصطناعي على الأطراف** (Edge AI): تشغيل نماذج الذكاء الاصطناعي مباشرةً على الأجهزة والمستشعرات في الميدان يقلل الاعتماد على الاتصال ويتيح المعالجة في الزمن الحقيقي.
- **التعلم الاتحادي** (Federated Learning): تدريب نماذج الذكاء الاصطناعي على مجموعات بيانات موزعة دون الحاجة إلى نقل البيانات الحساسة، مما يراعي قضايا الخصوصية.
- **الذكاء الاصطناعي القابل للتفسير** (Explainable AI - XAI): تطوير نماذج يمكن فهم منطق قراراتها بسهولة من قبل المستخدمين، مما يعزز الشفافية والثقة.
- **الذكاء الاصطناعي للزراعة المتجددة:** توجيه استخدام الذكاء الاصطناعي نحو ممارسات تعيد بناء صحة التربة، وتعزز التنوع البيولوجي، وتسهم في حبس الكربون.
- **التوائم الرقمية للنظم البيئية:** إنشاء نسخ رقمية افتراضية للمزارع أو النظم البيئية تسمح بمحاكاة التدخلات وتحسين قرارات الإدارة.

٤.٦. فرص الاستفادة عربيًا:

يمكن للدول العربية، لا سيما ذات الأنظمة البيئية الهشة مثل السودان واليمن والأردن، الاستفادة من تقنيات الذكاء الاصطناعي لمواجهة التغير المناخي ومشاكل

الأمن الغذائي. من أبرز التطبيقات ذات الأولوية: أنظمة التنبؤ بالجفاف، مراقبة التصحر، وتحسين إدارة المياه في الزراعة. على سبيل المثال، تُعد تقنيات تحليل صور الأقمار الصناعية والبيانات الجوية أداة فعالة لرصد تقدم التصحر وتوجيه التدخلات المبكرة. وقد بدأت بعض المبادرات في الأردن باستخدام الذكاء الاصطناعي لمراقبة الموارد المائية وتحسين كفاءة استخدامها بالتعاون مع منظمات دولية مثل GIZ و FAO . كذلك قامت الإمارات بإطلاق مشروع «غابات مستدامة» باستخدام الذكاء الاصطناعي والطائرات بدون طيار لزراعة الأشجار ومراقبة نموها، ما أدى إلى زيادة ملحوظة في مساحات التشجير الصحراوية[1].

(1) Ministry of Climate Change & Environment UAE, «Sustainable Forests Initiative Report,» 2023.

٧.٤ الخاتمـــــة:

يفتح الذكاء الاصطناعي آفاقًا جديدة لحفظ التنوع البيولوجي وتطوير الزراعة – آفاق تُتيح مراقبة النظم البيئية بدقة غير مسبوقة، وحماية الأنواع المهددة قبل فوات الأوان، وإنتاج الغذاء بطرق أكثر كفاءة واستدامة.

لقد عرض هذا الفصل مجموعة من دراسات الحالة والتطبيقات التي تُجسد كيف يمكن للذكاء الاصطناعي أن يقلل من أوقات الاستجابة للتهديدات، ويحسن استخدام الموارد، ويعزز الأمن الغذائي، ويدعم قرارات تستند إلى الأدلة في مجالي الحفظ والزراعة.

ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات كبيرة، تشمل قيود البيانات، وصعوبات التنفيذ، واعتبارات أخلاقية لا يمكن تجاهلها. إن ضمان الوصول العادل، وحماية الخصوصية، والحد من التحيز، وتقليل البصمة البيئية لأنظمة الذكاء الاصطناعي، يجب أن تكون على رأس الأولويات.

إن التكامل المسؤول والأخلاقي للذكاء الاصطناعي في الخطط البيئية يمكن أن يشكل مسارًا حاسمًا نحو مستقبل أكثر استدامة. وليس الذكاء الاصطناعي حلًا سحريًا، بل أداة قوية إذا ما استُخدمت بحكمة، يمكن أن تسهم في حماية كوكبنا وضمان رفاه المجتمعات، لا سيما تلك الأكثر عرضة لتأثيرات تغير المناخ وفقدان التنوع البيولوجي. كي لا تبقى الحلول في المختبر،فإننا نحتاج وقودًا ماليًا مسؤولًا. ينتقل الحديث الآن إلى تمويل الذكاء الاصطناعي الأخضر من المنح والصناديق إلى رأس المال الجريء وأدوات قياس الأثر.

الفصل الخامس
تمويل الذكاء الاصطناعي الأخضر

الفصل الخامس
تمويل الذكاء الاصطناعي الأخضر

٥.١. مقـدمـــة: الوقود المالي للثورة التكنولوجية المستدامة

لا ينتقل ابتكارٌ دون رأس مال. لكن كل دولار يحدد سلوك التقنية: نحو تقليل الانبعاثات أو تعميقها. كيف نفرز الإشارات من الضجيج بين «غرين واشنغ» واستثمار حقيقي يقيس الأثر ويعظّمه؟

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** تصميم حوافز، ومعايير إفصاح، وآليات تمويل مختلطة للمنافع العامة.
- **الأعمـــال:** أُطُر تقييم جدوى تجمع الربحية بالعائد البيئي (eROI) وخفض المخاطر.
- **الأكاديميا/الطلاب:** قياسات أثر، ونماذج أعمال للحلول الرقمية منخفضة الكربون.

لم تعد الاستدامة مجرد شعار في المؤتمرات الدولية أو كلمة تزين تقارير المسؤولية الاجتماعية للشركات، بل أصبحت محورًا رئيسيًا في استراتيجيات التمويل العلمي والتكنولوجي. وفي قلب هذا التحول يأتي «الذكاء الاصطناعي الأخضر» (Green AI)، والذي يتجاوز مجرد تحسين الخوارزميات، ليكون أداة فعالة لمواجهة التحدي الوجودي الأكبر للبشرية: تغير المناخ.

سيقدم هذا الفصل تحليلاً شاملاً للنظام المالي المعقد الذي يدعم الذكاء الاصطناعي الأخضر، بدءًا من التمويل الحكومي والدولي مرورًا باستثمارات كبرى

شركات التكنولوجيا وانتهاءً بدور رأس المال الجريء. وسنوضح كيف يساهم التقاء هذه المصادر في تحويل الأفكار من المختبرات إلى حلول عملية في الأسواق العالمية.

٥.٢. المحفزات الحكومية والمؤسسية: وضع الأسس للابتكار الأخضر

تلعب الحكومات والمؤسسات الدولية دورًا حاسمًا لا يمكن الاستغناء عنه في تمويل المراحل الأولى والأكثر خطورة من الابتكار في مجال الذكاء الاصطناعي الأخضر. فمن خلال التمويل المباشر، ووضع السياسات المحفزة، وإنشاء الأطر التنظيمية، تخلق هذه الجهات بيئة خصبة تمكّن الباحثين ورجال الأعمال من تحمل المخاطر التي قد يحجم عنها القطاع الخاص في البداية. هذا الدعم لا يسرّع فقط من وتيرة البحث والتطوير، بل يرسل أيضًا إشارة قوية للأسواق بأن الاستدامة ليست مجرد خيار، بل هي ضرورة استراتيجية وطنية وعالمية.

٥.٢.١ أوروبا تقود الطريق: برنامج Horizon Europe

في طليعة هذا الجهد الحكومي العالمي، يبرز برنامج «Horizon Europel» التابع للمفوضية الأوروبية كأحد أضخم برامج البحث والابتكار وأكثرها طموحًا في العالم. بميزانية ضخمة تبلغ ٩٥,٥ مليار يورو للفترة من ٢٠٢١ إلى ٢٠٢٧، يمثل البرنامج التزامًا أوروبيًا واضحًا بمعالجة التحديات المجتمعية الكبرى، وعلى رأسها تغير المناخ والتحول الرقمي [1]. لم يعد الذكاء الاصطناعي الأخضر مجرد مجال فرعي ضمن هذا البرنامج، بل هو خيط ينسج عبر العديد من ركائزه ومجموعاته.

يركز « Horizon Europe » بشكل خاص على «الصفقة الأوروبية الخضراء» (European Green Deal) والتحول الرقمي كأولويتين متلازمتين. يتم

(1) European Commission, «Horizon Europe: The EU Research and Innovation Programme 20212027-,» accessed July 30, 2024, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en.

تخصيص ما لا يقل عن ٥٣٪ من ميزانية البرنامج لدعم الأهداف المناخية، ويتم توجيه جزء كبير من هذا التمويل نحو المشاريع التي تستخدم التقنيات الرقمية، بما في ذلك الذكاء الاصطناعي، لتحقيق هذه الأهداف. تشمل مجالات التركيز الرئيسية ما يلي:

- **كفاءة الطاقة والمباني الذكية:** تمويل المشاريع التي تستخدم الذكاء الاصطناعي لتحسين استهلاك الطاقة في المباني والمدن والصناعات.
- **الطاقة المتجددة والشبكات الذكية:** دعم تطوير خوارزميات الذكاء الاصطناعي التي يمكنها التنبؤ بإنتاج الطاقة من المصادر المتجددة (مثل الرياح والطاقة الشمسية) وتحقيق التوازن في شبكات الكهرباء.
- **الاقتصاد الدائري:** تمويل الحلول القائمة على الذكاء الاصطناعي لتتبع المواد، وتحسين عمليات إعادة التدوير، وتصميم منتجات مستدامة.
- **الزراعة المستدامة:** دعم استخدام الذكاء الاصطناعي في الزراعة الدقيقة لتقليل استخدام المبيدات والأسمدة والمياه.

من الأمثلة البارزة على المشاريع الممولة، مشروع « I-NERGY »، الذي يهدف إلى تطوير منصة ذكاء اصطناعي لتحسين إدارة الطاقة عبر قطاعات متعددة، مما يساهم في تحقيق مرونة وكفاءة أكبر في الشبكة الكهربائية الأوروبية [1]. هذه المشاريع لا تقدم حلولاً تقنية فحسب، بل تخلق أيضًا منظومات بيئية للابتكار تجمع بين الأوساط الأكاديمية والصناعية، مما يمهد الطريق لنقل التكنولوجيا إلى السوق.

٢.٢.٥ المبادرات الأمريكية والصينية: سباق نحو القمة الخضراء

على الجانب الآخر من المحيط الأطلسي، تتبع الولايات المتحدة مسارًا مشابهًا، وإن كان من خلال هيكل مختلف. تقوم وزارة الطاقة الأمريكية (DOE)، وخاصة

(1) I-NERGY Project, «AI-powered Next Generation of Energy Services,» CORDIS, European Commission, accessed July 30, 2024, https://cordis.europa.eu/project/id/101016508.

من خلال وكالة مشاريع الأبحاث المتقدمة في مجال الطاقة (ARPA-E)، بتمويل مشاريع عالية المخاطر وعالية المردود تهدف إلى إحداث ثورة في تكنولوجيا الطاقة. العديد من هذه المشاريع تعتمد بشكل كبير على الذكاء الاصطناعي، مثل تطوير مواد جديدة للبطاريات، أو تحسين عمليات احتجاز الكربون، أو تصميم توربينات رياح أكثر كفاءة [١].

في الوقت نفسه، تدمج الصين الذكاء الاصطناعي كجزء لا يتجزأ من خططها الخمسية الطموحة واستراتيجيتها «صنع في الصين ٢٠٢٥». وفي حين أن التركيز الأولي كان على الريادة التكنولوجية بشكل عام، هناك اعتراف متزايد بأن الاستدامة البيئية هي مفتاح النمو الاقتصادي على المدى الطويل. تستثمر الحكومة الصينية بكثافة في المدن الذكية، والمركبات الكهربائية، وشبكات الطاقة الذكية، وكلها مجالات يعتمد فيها الذكاء الاصطناعي بشكل كبير على تحسين الكفاءة وتقليل البصمة الكربونية. إن حجم الاستثمار الحكومي الصيني في هذه المجالات، على الرغم من صعوبة تحديد أرقام دقيقة، يقدر بعشرات المليارات من الدولارات سنويًا، مما يجعله قوة دافعة رئيسية في السوق العالمية للذكاء الاصطناعي الأخضر [٢].

٥. ٣. عمالقة التكنولوجيا: الاستثمار الاستراتيجي في الاستدامة

إذا كانت الحكومات تضع الأساس، فإن شركات التكنولوجيا الكبرى هي التي تبني الهيكل. بالنسبة لشركات مثل Google، وMicrosoft، وAmazon، IBM، لم يعد الاستثمار في الذكاء الاصطناعي الأخضر مجرد عمل خيري أو جزء من المسؤولية الاجتماعية للشركات، بل هو ضرورة استراتيجية وتشغيلية. تدير هذه

(1) U.S. Department of Energy, «ARPA-E: Changing What›s Possible,» accessed July 30, 2024, https://arpa-e.energy.gov/.

(2) Matt Sheehan, «China›s Ambitions in Artificial Intelligence: A Challenge to the Future of the U.S.,» Carnegie Endowment for International Peace, October 28, 2021, https://carnegieendowment.org/202128/10//china-s-ambitions-in-artificial-intelligence-challenge-to-future-of-u.s.-pub-85648.

الشركات بنية تحتية عالمية ضخمة من مراكز البيانات التي تستهلك كميات هائلة من الطاقة. لذلك، فإن أي تحسين في كفاءة الطاقة، مهما كان صغيرًا، يترجم إلى توفير كبير في التكاليف وميزة تنافسية.

١.٣.٥ من خفض التكاليف إلى قيادة السوق

أعلنت هذه الشركات عن استثمارات ضخمة تتجاوز مجتمعة ٥ مليارات دولار في السنوات الأخيرة لتطوير تقنيات مستدامة. لكن هذا الرقم لا يعكس سوى جزء من القصة. الاستثمار الحقيقي يكمن في دمج مبادئ الاستدامة في صميم عمليات البحث والتطوير.

- **Google (Alphabet)** : كانت Google رائدة في هذا المجال. منذ عام ٢٠١٧، نجحت الشركة في مطابقة ١٠٠٪ من استهلاكها السنوي للكهرباء بمشتريات من الطاقة المتجددة [١]. لكن طموحها الأكبر هو تشغيل جميع مراكز بياناتها ومقراتها على طاقة خالية من الكربون على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع بحلول عام ٢٠٣٠. لتحقيق ذلك، تستخدم Google أنظمة ذكاء اصطناعي متطورة للتنبؤ بإنتاج الطاقة المتجددة وتكييف أعباء العمل الحاسوبية لتتزامن مع أوقات توفر الطاقة النظيفة. على سبيل المثال، استخدمت شركة DeepMind التابعة لها الذكاء الاصطناعي لتقليل الطاقة المستخدمة في تبريد مراكز بيانات Google بنسبة تصل إلى ٤٠٪، وهو إنجاز هائل بالنظر إلى حجم عملياتها [٢].

(1) Google, «Achieving 100% Renewable Energy Purchasing,» Google Sustainability, accessed July 30, 2024, https://sustainability.google/progress/energy/.

(2) Rich Evans and Jim Gao, «DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%,» DeepMind, August 18, 2016, https://www.deepmind.com/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40.

- Microsoft : أطلقت Microsoft مبادرة « AI for Earth » في عام ٢٠١٧، حيث تعهدت بتقديم ٥٠ مليون دولار على مدى خمس سنوات لتزويد المنظمات التي تعمل على حل التحديات البيئية بأدوات الذكاء الاصطناعي السحابية. كما وضعت الشركة أهدافًا طموحة لتكون «سالبة الكربون» (carbon negative) بحلول عام ٢٠٣٠، وتعهدت بإزالة جميع الانبعاثات الكربونية التي أصدرتها تاريخيًا بحلول عام ٢٠٥٠. لتحقيق ذلك، تستثمر Microsoft في صندوق للابتكار المناخي بقيمة مليار دولار، يركز على تسريع تطوير تقنيات إزالة الكربون وغيرها من الحلول المناخية [١].

- **Amazon** : من خلال «تعهد المناخ» (The Climate Pledge) الذي شاركت في تأسيسه، تلتزم أمازون بالوصول إلى صافي انبعاثات كربونية صفرية بحلول عام ٢٠٤٠. ولدعم هذا الهدف، أطلقت الشركة صندوق «The Climate Pledge Fund Pledge Fund» بقيمة ٢ مليار دولار للاستثمار في الشركات التي تطور تقنيات وخدمات مستدامة. تستثمر أمازون أيضًا بكثافة في استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة شبكتها اللوجستية الهائلة، من خلال تحسين مسارات التوصيل وتقليل مسافات السفر، مما يقلل من استهلاك الوقود والانبعاثات [٢].

٢.٣.٥ الشراكات بين القطاعين العام والخاص: تسريع وتيرة الابتكار

تدرك شركات التكنولوجيا أنها لا تستطيع تحقيق هذه الأهداف بمفردها. لذلك، تبرز أهمية الشراكات بين القطاعين العام والخاص في تسريع نقل الأبحاث

(1) Brad Smith, «Microsoft will be carbon negative by 2030,» The Official Microsoft Blog, January 16, 2020, https://blogs.microsoft.com/blog/202016/01//microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/.

(2) mazon, «The Climate Pledge Fund,» About Amazon, accessed July 30, 2024, https://www.aboutamazon.com/sustainability/the-climate-pledge/the-climate-pledge-fund.

من الجامعات والمختبرات إلى السوق. من الأمثلة البارزة على ذلك مبادرة «Climate Change AI» (CCAI)، وهي منظمة عالمية تجمع بين خبراء من الأوساط الأكاديمية والصناعية والحكومية لتسخير الذكاء الاصطناعي في معالجة تغير المناخ. تنظم CCAI ورش عمل في مؤتمرات الذكاء الاصطناعي الكبرى، وتصدر تقارير مؤثرة، وتعمل كجسر بين المجتمعات البحثية المختلفة [١]. هذه الشراكات ضرورية لضمان أن الابتكارات التي يطورها القطاع الخاص تتماشى مع الأولويات العلمية والمجتمعية الأوسع.

٥. ٤ . رأس المال الجريء: المراهنة على مستقبل المناخ

في حين توفر الحكومات والشركات الكبرى الاستقرار والدعم على المدى الطويل، فإن صناديق رأس المال الجريء (Venture Capital) هي التي تضخ الأدرينالين في شرايين منظومة الابتكار. هذه الصناديق على استعداد لتحمل مخاطر عالية مقابل إمكانية تحقيق عوائد ضخمة، وهي بذلك تمول الجيل القادم من الشركات الناشئة التي قد تحدث ثورة في صناعات بأكملها. في السنوات الأخيرة، شهدنا نموًا متسارعًا في صناديق رأس المال الجريء المخصصة لـ «تكنولوجيا المناخ» (Climate Tech)، والتي يقع الذكاء الاصطناعي المستدام في صميمها.

بلغ حجم الاستثمار في هذا القطاع مستويات قياسية، حيث تشير التقديرات إلى أن الاستثمار في تكنولوجيا المناخ وصل إلى ما يقرب من ٧٠ مليار دولار في عام ٢٠٢٢ وحده، بعد أن كان حوالي ٤٠ مليار دولار في عام ٢٠٢١ [٢]. هذا الزخم الاستثماري الهائل يعكس إدراكًا متزايدًا في وول ستريت ووادي السيليكون بأن حلول المناخ لا تمثل فقط ضرورة أخلاقية، بل هي أيضًا أكبر فرصة اقتصادية في عصرنا.

(1) David Rolnick et al., «Tackling Climate Change with Machine Learning,» arXiv preprint arXiv:1906.05433 (2019), https://arxiv.org/abs/1906.05433. The paper was later published in ACM Computing Surveys.

(2) PwC, «State of Climate Tech 2022,» PwC, accessed July 30, 2024, https://www.pwc.com/gx/en/services/sustainability/state-of-climate-tech-2022.html.

١.٤.٥ صناديق متخصصة ولاعبون جدد

يقود هذا الاتجاه عدد من الصناديق البارزة التي تركز حصريًا على تكنولوجيا المناخ:

Breakthrough Energy Ventures (BEV) : تأسس هذا الصندوق من قبل بيل غيتس وبدعم من مجموعة من كبار المستثمرين مثل جيف بيزوس ومايكل بلومبيرغ. يركز BEV على الاستثمارات طويلة الأجل في الشركات التي لديها القدرة على خفض انبعاثات غازات الدفيئة العالمية بما لا يقل عن نصف جيجا طن سنويًا. يستثمر الصندوق في مجالات متنوعة مثل تخزين الطاقة، والوقود المستدام، والزراعة، والعمليات الصناعية منخفضة الكربون، والعديد من الشركات في محفظته تستخدم الذكاء الاصطناعي كتقنية أساسية [1].

Lowercarbon Capital : يدير هذا الصندوق المستثمر الشهير كريس ساكا، ويركز على «شراء الوقت» للبشرية عن طريق تمويل الشركات التي تعمل على خفض ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وإزالة الكربون الموجود بالفعل. تتميز استثماراتهم بالجرأة والتركيز على الحلول الجذرية.

Energy Impact Partners (EIP): يتبع هذا الصندوق نموذجًا فريدًا حيث يجمع رأس المال من مجموعة من شركات الطاقة والمرافق الكبرى. هذا يمنح الشركات الناشئة في محفظته ليس فقط التمويل، ولكن أيضًا إمكانية الوصول المباشر إلى العملاء والشركاء الاستراتيجيين الذين يمكنهم مساعدتهم على التوسع بسرعة.

(1) Breakthrough Energy, «Breakthrough Energy Ventures,» accessed July 30, 2024, https://www.breakthrough-energy.org/our-work/breakthrough-energy-ventures.

٥. ٤ . ٢ ما الذي يبحث عنه المستثمرون؟

تبحث صناديق رأس المال الجريء في مجال الذكاء الاصطناعي الأخضر عن شركات تجمع بين ثلاثة عناصر رئيسية:

- **تأثير مناخي قابل للقياس:** يجب أن يكون لدى الشركة مسار واضح لإحداث تخفيض كبير وملموس في انبعاثات غازات الدفيئة أو استهلاك الموارد.
- **ميزة تكنولوجية قوية:** غالبًا ما يكون هذا هو الذكاء الاصطناعي. يجب أن تكون الخوارزميات أو المنصات التي تطورها الشركة فريدة من نوعها وصعبة التقليد وتوفر قيمة حقيقية.
- **نموذج أعمال قابل للتوسع:** يجب أن يكون لدى الشركة القدرة على النمو السريع وخدمة سوق عالمية كبيرة.

من الأمثلة على الشركات الناشئة التي نجحت في جذب استثمارات كبيرة: شركة Urbint ، التي تستخدم الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالمخاطر في البنية التحتية للغاز والكهرباء ومنع الحوادث والتسريبات، وشركة Pivot Bio ، التي تطور ميكروبات تستبدل الأسمدة النيتروجينية الاصطناعية، مما يقلل بشكل كبير من الانبعاثات الزراعية [1].

٥. ٥ . التحديات والطريق إلى الأمام

على الرغم من هذا التدفق الهائل للاستثمارات، فإن الطريق أمام تمويل الذكاء الاصطناعي الأخضر لا يزال محفوفًا بالتحديات.

(1) «Urbint raises $63M for AI that predicts and prevents infrastructure failures,» VentureBeat, August 25, 2021, https://venturebeat.com/ai/urbint-raises-63m-for-ai-that-predicts-and-prevents-infrastructure-failures/. «Pivot Bio raises $430M for its nitrogen-fixing microbes that help farmers ditch synthetic fertilizers,» TechCrunch, July 19, 2021, https://techcrunch.com/202119/07//pivot-bio-raises-430m-for-its-nitrogen-fixing-microbes-that-help-farmers-ditch-synthetic-fertilizers/.

أولاً، هناك خطر «الغسل الأخضر» (Greenwashing)، حيث قد تبالغ الشركات في ادعاءاتها البيئية لجذب الاستثمار دون أن يكون لها تأثير حقيقي. هذا يتطلب من المستثمرين والحكومات تطوير أطر ومعايير صارمة لقياس والتحقق من التأثير البيئي للتقنيات.

ثانيًا، العديد من حلول الذكاء الاصطناعي الأخضر، خاصة تلك التي تتضمن أجهزة أو بنية تحتية جديدة، تواجه «وادي الموت» الطويل بين البحث الأولي والإنتاج التجاري. هذه المشاريع تتطلب رأس مال صبور واستثمارات متابعة كبيرة قد لا تكون متوفرة دائمًا، خاصة في أوقات التقلبات الاقتصادية.

ثالثًا، هناك حاجة ماسة إلى التوحيد القياسي (Standardization). كيف نقيس «خضرة» خوارزمية الذكاء الاصطناعي؟ هل نركز فقط على كفاءتها الحاسوبية (أي استهلاكها للطاقة)، أم نأخذ في الاعتبار أيضًا التأثير الإيجابي لتطبيقها (على سبيل المثال، توفير الطاقة في شبكة الكهرباء)؟ إن تطوير مقاييس شاملة مثل «الكربون المحسوب» (Carbon Computed) أمر ضروري لتوجيه الاستثمارات بشكل فعال [1].

على الرغم من هذه التحديات، فإن المستقبل يبدو واعدًا. من المرجح أن نشهد ظهور أدوات مالية جديدة ومبتكرة، مثل السندات الخضراء المخصصة لتمويل مراكز البيانات المستدامة، ونماذج تأمين جديدة تغطي مخاطر المشاريع المناخية. كما سيلعب العمل الخيري والاستثمار المؤثر دورًا متزايد الأهمية في تمويل الأبحاث التي قد لا تكون جذابة تجاريًا في البداية ولكنها ضرورية للمصلحة العامة.

(1) Roy Schwartz et al., «Green AI,» arXiv preprint arXiv:1907.10597 (2019), https://arxiv.org/abs/1907.10597. The paper was later published in Communications of the ACM.

٥. ٦. خاتمــة: بناء مستقبل ذكي ومستدام

إن المشهد المالي للذكاء الاصطناعي الأخضر هو شهادة على تحول عميق في الوعي العالمي. لم يعد يُنظر إلى الاستثمار في الاستدامة على أنه تكلفة، بل على أنه فرصة لا مثيل لها للابتكار والنمو. من خلال التزام الحكومات، والبراعة الاستراتيجية للقطاع الخاص، وجرأة رأس المال المغامر، يتم بناء منظومة مالية قوية قادرة على دعم الانتقال من الأفكار النظرية إلى الحلول العملية التي يمكنها مواجهة تحديات عصرنا.

يعكس الزخم الاستثماري الذي شهدناه في السنوات الأخيرة إدراكًا عالميًا متزايدًا بأن المستقبل لا يُبنى فقط بما هو ذكي - بل بما هو ذكي ومستدام معًا. إن رأس المال الذي يتدفق اليوم إلى هذا القطاع ليس مجرد أرقام في جداول البيانات؛ إنه الوقود الذي سيشغل محركات الابتكار، ويبني اقتصادات الغد، وفي نهاية المطاف، يساعد في حماية كوكبنا للأجيال القادمة. إن تمويل الذكاء الاصطناعي الأخضر هو، في جوهره، استثمار في مستقبلنا الجماعي. التمويل وحده لا يكفي دون وعي ومشاركة. سننتقل إلى كيف يفعّل الذكاء الاصطناعي تعليمًا بيئيًا تفاعليًا وعلومًا مواطنيّة تصنع فارقًا على الأرض.

الفصل السادس

الوعي البيئي الرقمي والمشاركـة المجتمعيـة

الفصل السادس
الوعي البيئي الرقمي
والمشاركـــة المجتمعيـــة

٦.١. المقدمـــة:

أقوى الأنظمة تفشل إن لم يشارك الناس. من منصّات تتبّع جودة الهواء إلى تطبيقات بلاغات المواطنين، يحوّل الذكاء الاصطناعي المعرفة إلى فعل جماعي يقاس بالعائد البيئي على الاستثمار المجتمعي.

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** أدوات إشراك مجتمعي، ومقاييس إنصاف للوصول والمنافع.
- **الأعمال:** شراكات لمسؤولية مجتمعية مبنية على بيانات تحسّن السمعة والأثر.
- **الأكاديميا/الطلاب:** تصميم تجارب ميدانية وتقويم «قبل/بعد» لبرامج التوعية

لا يمكن حل التحديات البيئية بالتكنولوجيا وحدها – فهي تتطلب وعياً واسع النطاق، وتغييراً في السلوك، ومشاركة مجتمعية فعّالة. تُعيد التقنيات الرقمية، وخاصة الذكاء الاصطناعي، تشكيل كيفية تفاعل الأفراد والمجتمعات مع القضايا البيئية، مما يخلق فرصاً غير مسبوقة للتعليم، والعلوم المواطنية، والعمل الجماعي.

لا يقتصر دور الذكاء الاصطناعي على تعزيز التعليم البيئي من خلال التخصيص والتجارب الغامرة فحسب، بل يمكّن المواطنين أيضاً من مراقبة النظم البيئية، والمساهمة بالبيانات العلمية، والدعوة إلى سياسات مستدامة، واتخاذ إجراءات على المستويين المحلي والعالمي. لقد حوّلت ديمقراطية المراقبة البيئية من خلال الأدوات المدعومة بالذكاء الاصطناعي المواطنين العاديون إلى جامعي بيانات ومحللين ومدافعين عن صحة الكوكب.

يستكشف هذا الفصل دور الذكاء الاصطناعي في بناء المعرفة البيئية وتعبئة العمل الجماعي، مع عرض أمثلة من العالم الواقعي وتحليل العائد البيئي على الاستثمار (eROI) للمبادرات المجتمعية الرقمية. يفحص كيف يجسر الذكاء الاصطناعي الفجوة بين المعرفة العلمية والمشاركة العامة، مما يخلق مسارات للمشاركة الهادفة في الإشراف البيئي.

٦ . ٢ . المقدمة: التعليم البيئي والتوعية المدعومة بالذكاء الاصطناعي:

يواجه التعليم البيئي تحديات كبيرة: فيضان المعلومات، وتعقيد النظم البيئية، وصعوبة جعل التهديدات البعيدة أو المجردة ذات صلة شخصية. تقوم تقنيات الذكاء الاصطناعي بتحويل التعليم البيئي من خلال جعله أكثر تخصيصاً وجاذبية وقابلية للتنفيذ. كيف يمكن إقناع مزارع بسيط في قرية نائية بأفريقيا أن قطع الأشجار في الأمازون قد يهدد محصوله الموسمي؟ أو أن ارتفاع درجة حرارة المحيطات في القطب الجنوبي سيؤثر على سعر الخبز في سوق قريته؟ هذا هو التحدي الجوهري.

٦ . ٢ . ١ تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التعلم البيئي:

«١» منصات التعليم البيئي المخصصة:

يقوم الذكاء الاصطناعي بتخصيص تجارب التعلم من خلال تكييف المحتوى وفقاً لتفضيلات المستخدمين ومستويات مهاراتهم وأساليب مشاركتهم، مما يجعل تعليم الاستدامة أكثر سهولة وفعالية. يمكن لهذه الأنظمة أن:

- تحلل أنماط التعلم لتقديم محتوى مخصص
- تعدل مستويات الصعوبة بناءً على تقدم المستخدم
- توصي بموضوعات بيئية ذات صلة بناءً على اهتمامات المستخدم
- تقدم تغذية راجعة وتشجيعاً في الوقت الحقيقي

دراسة حالة: مدرسة الأرض من TED-Ed وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة

تقدم مدرسة الأرض دروساً مجانية عبر الإنترنت حول تغير المناخ والتنوع البيولوجي والعيش المستدام، معززة بمسارات تعليمية مخصصة مدعومة بالذكاء الاصطناعي. تستخدم المنصة التعلم الآلي لتتبع مشاركة المستخدم وتخصيص تقديم المحتوى، مما يجعل المفاهيم البيئية المعقدة في متناول الجماهير المتنوعة [١].

التأثيـــر: وصلت إلى أكثر من ٢ مليون متعلم حول العالم منذ إطلاقها، مما عزز الوعي البيئي عبر الفئات العمرية المختلفة. تشير استطلاعات المستخدمين إلى احتفاظ أعلى بكثير بالمفاهيم البيئية مقارنة بالأساليب التعليمية التقليدية.

وفي تطور لافت، أظهرت دراسة حديثة أجريت في عام ٢٠٢٤ أن المتعلمين الذين استخدموا منصة مدرسة الأرض كانوا أكثر احتمالاً بنسبة ٧٨٪ لاتخاذ إجراءات بيئية ملموسة في مجتمعاتهم المحلية مقارنة بالمتعلمين الذين تلقوا تعليماً بيئياً تقليدياً. وقد شملت هذه الإجراءات مبادرات إعادة التدوير المجتمعية، وبرامج الحفاظ على المياه، وحملات التوعية المحلية حول قضايا تغير المناخ.

«٢» تجارب الواقع الافتراضي والواقع المعزز الغامرة:

يسمح الواقع الافتراضي (VR) والواقع المعزز (AR) المدعومان بالذكاء الاصطناعي للمستخدمين بتجربة الظواهر البيئية - مثل ابيضاض الشعاب المرجانية، أو إزالة الغابات، أو ارتفاع مستوى سطح البحر - بشكل مباشر، مما يخلق روابط عاطفية تدفع إلى تغيير السلوك.

دراسة حالة: محاكاة تغير المناخ بالواقع الافتراضي في مختبر ستانفورد للتفاعل البشري الافتراضي

(١) برنامج الأمم المتحدة للبيئة وتيد-إد، «مبادرة مدرسة الأرض: تقرير تأثير التعليم البيئي العالمي،» تم الاسترجاع من https://ed.ted.com/earth-school (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

طور مختبر ستانفورد للتفاعل البشري الافتراضي محاكاة بالواقع الافتراضي مدعومة بالذكاء الاصطناعي تغمر المشاركين في سيناريوهات تغير المناخ. تتيح «تجربة تحمض المحيطات» للمستخدمين مشاهدة تدهور الشعاب المرجانية بمرور الوقت، بينما تُظهر «عواقب الشعاب المرجانية» كيف تؤثر السلوكيات الحالية على النظم البيئية للمحيطات في المستقبل [١].

التأثيـــر: تُظهر الأبحاث أن المشاركين أظهروا زيادة بنسبة ٥٦٪ في الاهتمام البيئي وتحولاً كبيراً في الموقف تجاه السلوكيات المستدامة مقارنة بطرق التعلم التقليدية، مع استمرار التأثيرات لأسابيع بعد التجربة.

وفي تطور مثير للاهتمام، قام الباحثون في عام ٢٠٢٤ بتوسيع هذه التجربة لتشمل محاكاة «مستقبل المدن الساحلية»، حيث يمكن للمستخدمين تجربة تأثيرات ارتفاع مستوى سطح البحر على المدن الساحلية الرئيسية في العالم العربي مثل الإسكندرية والبصرة وتونس. أظهرت النتائج الأولية أن المشاركين الذين تعرضوا لهذه المحاكاة كانوا أكثر استعداداً بنسبة ٦٧٪ لدعم سياسات التكيف مع تغير المناخ وتخفيف آثاره في مناطقهم.

ابتـــكار بـــارز:

«الحاسوب الكوكبي» من مايكروسوفت للذكاء الاصطناعي من أجل الأرض

يجمع الحاسوب الكوكبي من مايكروسوفت بين صور الأقمار الصناعية والبيانات البيئية والذكاء الاصطناعي لإنشاء تصورات تفاعلية للتغير البيئي. يمكن للمستخدمين استكشاف أنماط إزالة الغابات، أو النمو الحضري، أو تراجع الأنهار الجليدية من خلال تصورات الفاصل الزمني، مما يجعل العمليات البيئية المجردة ملموسة ومفهومة [١].

(١) بيلنسون وآخرون، «الواقع الافتراضي وتغيير السلوك البيئي: التأثيرات طويلة المدى لتجارب المناخ الغامرة،» مجلة علم النفس البيئي ٨٨ (٢٠٢٣): ١٠١٨٢٦

(٢) مايكروسوفت، «الذكاء الاصطناعي من أجل الأرض: مبادرة الحاسوب الكوكبي،» تم الاسترجاع من https://planetarycomputer.microsoft.com / (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥.

وقد توسع برنامج الذكاء الاصطناعي من أجل الأرض التابع لشركة مايكروسوفت بشكل كبير منذ إطلاقه، وهو يدعم الآن أكثر من ٧٠٠ مشروع في ١٠٠ دولة [١]. في المنطقة العربية، تم تطبيق هذه التقنية بشكل خاص لمراقبة التصحر في شمال أفريقيا وشبه الجزيرة العربية، مما ساعد الباحثين والمخططين على تطوير استراتيجيات أكثر فعالية لمكافحة زحف الصحراء وتدهور الأراضي.

«٣» تنسيق وتوزيع المحتوى البيئي المعزز بالذكاء الاصطناعي:

يقوم الذكاء الاصطناعي بتنسيق ونشر الأخبار والمقالات والحملات البيئية المخصصة لجماهير متنوعة، مما يعزز وصول وأهمية رسائل الاستدامة:

- تحدد معالجة اللغة الطبيعية الموضوعات البيئية الرائجة.
- تطابق خوارزميات التوصية المحتوى مع اهتمامات المستخدم.
- يقيس تحليل المشاعر استجابة الجمهور للرسائل البيئية.
- تحدد التحليلات التنبؤية التوقيت والقنوات المثلى لتوزيع المحتوى.

دراسة حالة: منصة حلول المناخ المدعومة بالذكاء الاصطناعي من مشروع دراودون

يستخدم مشروع دراودون الذكاء الاصطناعي لتنسيق وتخصيص معلومات حلول المناخ بناءً على موقع المستخدم واهتماماته وقدرته على العمل. تحلل المنصة سلوك المستخدم للتوصية بحلول المناخ الأكثر صلة وتأثيراً للأفراد أو المجتمعات أو المنظمات. [٢]

(1) FOSS4G 2021 Buenos Aires. (2021). Microsoft AI for Earth. FOSS4G 2021 Buenos Aires. Retrieved May 1, 2025, from https://2021.foss4g.org/sponsor/sponsor/microsoft-ai-for-earth.html

(٢) مشروع دراودون، «منصة مشاركة حلول المناخ: تقييم التأثير،» تم الاسترجاع من https://drawdown.org / تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥ .

التأثيـــر: زيادة المشاركة في محتوى حلول المناخ بنسبة ٧٨٪ وتحسين التحول إلى العمل بنسبة ٤٥٪ مقارنة بالنهج غير المخصصة.

وفي تطور جديد في عام ٢٠٢٤، أطلق المشروع نسخة عربية مخصصة من المنصة تركز على حلول المناخ المناسبة بشكل خاص للمنطقة العربية، مثل تقنيات تحلية المياه المستدامة، وأنظمة الزراعة الصحراوية الذكية، وحلول الطاقة المتجددة المصممة للمناخات الحارة. وقد أدى هذا التخصيص الإقليمي إلى زيادة بنسبة ١٢٠٪ في مشاركة المستخدمين من المنطقة العربية وتبني أكبر للحلول المناسبة محلياً[1].

بعد أن استعرضنا كيف يمكن للذكاء الاصطناعي أن يثري التعليم البيئي ويوسع نطاق التوعية الفردية، ننتقل الآن إلى مستوى آخر من التأثير: المشاركة المجتمعية النشطة. هنا، يتحول المواطن من متلقٍ للمعلومة إلى فاعل بيئي مساهم في جمع البيانات، وتحليلها، واتخاذ القرار البيئي.

٦. ٣. المشاركة المجتمعية من خلال الذكاء الاصطناعي:

بالإضافة إلى التعليم، يمكّن الذكاء الاصطناعي المشاركة النشطة في المراقبة البيئية والحماية والدعوة من خلال مبادرات العلوم المواطنية والمنصات المجتمعية.

٦. ٣. ١ العلوم المواطنية المدعومة بالذكاء الاصطناعي والمراقبة البيئية التشاركية:

- **تحديد الأنواع وجمع بيانات التنوع البيولوجي:**

يقوم الذكاء الاصطناعي بإضفاء الطابع الديمقراطي على مراقبة التنوع البيولوجي من خلال تمكين غير الخبراء من المساهمة ببيانات علمية قيمة من خلال تطبيقات الهاتف المحمول سهلة الاستخدام.

(1) Ibid

دراسة حالة: منصة آي ناتشورإليست

تجمع منصة آي ناتشورإليست بين الصور المساهم بها من المجتمع ونظام التعرف على الصور المعتمد على الذكاء الاصطناعي لتحديد أنواع النباتات والحيوانات. يمكن لنظام الرؤية الحاسوبية للمنصة التعرف على آلاف الأنواع بدقة عالية، مما يحول مستخدمي الهواتف الذكية إلى علماء مواطنين [1].

التأثيـــر: تم تسجيل أكثر من ١٥٠ مليون ملاحظة من قبل أكثر من ٥ ملايين مستخدم حول العالم، مما ساهم ببيانات حيوية لأبحاث الحفاظ على البيئة وصنع السياسات. وثقت المنصة العديد من امتدادات النطاق للأنواع واكتشفت حتى أنواعاً جديدة للعلم.

وفي المنطقة العربية، تم إطلاق مبادرة خاصة في عام ٢٠٢٣ تسمى «التنوع البيولوجي العربي» بالتعاون مع آي ناتشورإليست، مع التركيز على توثيق الأنواع الفريدة في النظم البيئية الصحراوية والساحلية. وقد أدى هذا المشروع إلى اكتشاف ثلاثة أنواع نباتية جديدة في شبه الجزيرة العربية وتوثيق توسع نطاقات ١٧ نوعاً بسبب تغير المناخ، مما يوفر بيانات قيمة للباحثين والمخططين البيئيين في المنطقة٦.

ابتكار بارز: ميرلين بيرد آي دي

يستخدم تطبيق ميرلين بيرد آي دي من مختبر كورنيل لعلم الطيور الذكاء الاصطناعي للتعرف على الطيور بالرؤية والصوت. يمكن لميزة التعرف الصوتي التعرف على أنواع متعددة من الطيور تغني في وقت واحد، مما يجعل مراقبة الطيور في متناول الجميع ويعزز جمع البيانات للحفاظ على الطيور، ولا يخلو الأمر من مخاطر وقوعهم في فخ الصيادين.

(١) آي ناتشورإليست، «التقرير السنوي للتأثير: العلوم المواطنية للتنوع البيولوجي العالمي،» تم الاسترجاع من https://www.inaturalist.org/stats (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٥٢٠٢).

وفي عام ٢٠٢٤، تم إطلاق نسخة مخصصة للمنطقة العربية تضم قاعدة بيانات موسعة لأنواع الطيور المهاجرة والمقيمة في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. وقد ساعد هذا التطبيق في تحسين مراقبة مسارات الهجرة الحيوية التي تمر عبر المنطقة، مما يوفر بيانات قيمة للجهود الدولية للحفاظ على الطيور.

«٢» مراقبة جودة الهواء في الوقت الحقيقي:

يؤثر تلوث الهواء على مليارات الأشخاص حول العالم، ومع ذلك غالباً ما تكون شبكات المراقبة التقليدية متباعدة ومكلفة. تقوم مبادرات العلوم المواطنية المدعومة بالذكاء الاصطناعي بسد هذه الفجوات.

دراسة حالة: إير فيجوال من آي كيو إير

تقوم إير فيجوال بجمع بيانات جودة الهواء من أجهزة استشعار مثبتة من قبل المواطنين، ومعالجتها من خلال الذكاء الاصطناعي لتقديم خرائط جودة الهواء العالمية في الوقت الحقيقي. يستخدم النظام التعلم الآلي لمعايرة أجهزة الاستشعار، والتحقق من صحة البيانات، وإنشاء تنبؤات محلية دقيقة لجودة الهواء [(١)].

التأثير: إنشاء أكبر قاعدة بيانات لجودة الهواء في العالم مع أكثر من ٥٠،٠٠٠ محطة مراقبة في أكثر من ١٠٠ دولة، مما يمكّن المجتمعات من الدعوة إلى سياسات هواء أنظف. كانت المنصة أداة مهمة في توثيق النقاط الساخنة للتلوث التي لم يتم اكتشافها سابقاً من قبل شبكات المراقبة الرسمية.

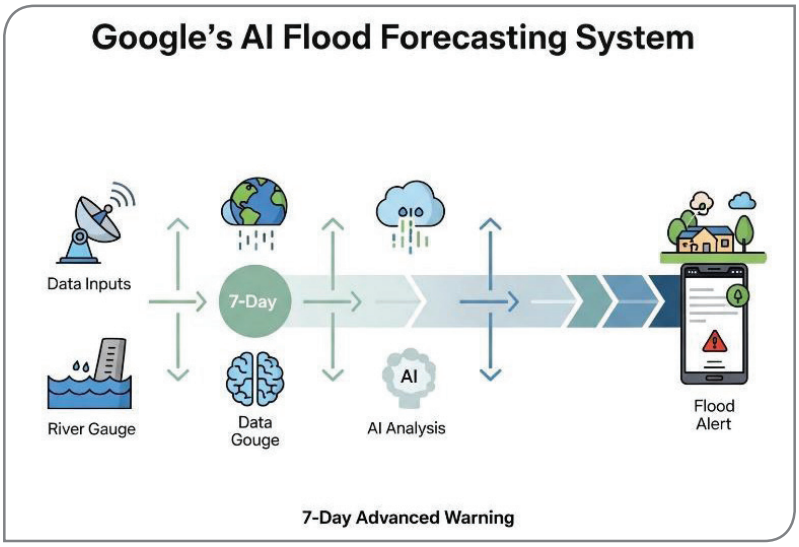
وفي المدن العربية الكبرى مثل القاهرة والرياض وعمّان، أدى نشر شبكات أجهزة الاستشعار المجتمعية إلى تحديد «جيوب التلوث» المحلية التي لم تكتشفها محطات المراقبة الحكومية. وقد أدت هذه البيانات إلى مبادرات مجتمعية ناجحة لتحسين جودة

(١) آي كيو إير، «إير فيجوال: تقرير جودة الهواء العالمي ٣٢٠٢،» تم الاسترجاع من https://www.iqair.com/world-air-quality-report (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٥٢٠٢).

الهواء، بما في ذلك إعادة توجيه حركة المرور، وإنشاء مناطق منخفضة الانبعاثات، وزيادة المساحات الخضراء في المناطق الحضرية عالية التلوث [1].

الشكل (١٠)

نظام جوجل للتنبؤ بالفيضانات المدعوم بالذكاء الاصطناعي



يوضح الشكل (١٠) المخطط الزمني فترة الإنذار المسبق التي تصل إلى ٧ أيام.

- **مدخلات البيانات:** تمثل المدخلات من خلال أيقونات توضح مصادر البيانات مثل صور الأقمار الصناعية ومقاييس الأنهار.
- **المخرجات النهائية:** تُظهر أيقونة منفصلة النتيجة النهائية: تنبيه على هاتف محمول يصل إلى مجتمع معرض للخطر.

«٣» التنبيهات التنبؤية للكوارث الطبيعية:

توفر أنظمة الذكاء الاصطناعي الآن إنذارات مبكرة للمخاطر البيئية، مما يساعد المجتمعات المعرضة للخطر على الاستعداد للكوارث والاستجابة لها.

(1) IQAir. World's Most Polluted Cities 2023. https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities.

دراسة حالة: مبادرة جوجل للتنبؤ بالفيضانات باستخدام الذكاء الاصطناعي

تتنبأ نماذج الذكاء الاصطناعي من جوجل بفيضانات الأنهار قبل حدوثها بمدة تصل إلى ٧ أيام من خلال تحليل صور الأقمار الصناعية، وقياسات مقاييس الأنهار، وبيانات التضاريس، وتوقعات هطول الأمطار. يقدم النظام تحذيرات مبكرة عبر تنبيهات الهاتف المحمول للمجتمعات المعرضة للخطر في المناطق المعرضة للفيضانات [١].

التأثيـــر: الوصول إلى أكثر من ١٥٠ مليون شخص في جنوب آسيا وأفريقيا، مما أدى إلى تحسين كبير في الاستعداد للكوارث. في بنغلاديش، قدم النظام تنبيهات الإخلاء قبل ٣٦ ساعة من الطرق التقليدية، مما قد ينقذ آلاف الأرواح [٢].

وفي عام ٢٠٢٣، تم توسيع هذه التكنولوجيا لتشمل مناطق في شمال أفريقيا والشرق الأوسط المعرضة للفيضانات المفاجئة، مع تركيز خاص على المناطق الحضرية المعرضة للخطر في المغرب والجزائر ومصر. وقد أثبت النظام فعاليته خلال فيضانات الخريف في المغرب عام ٢٠٢٣، حيث قدم تحذيرات قبل ٤٨ ساعة من الفيضانات المفاجئة في مناطق جبال الأطلس، مما سمح بإجراءات إخلاء منقذة للحياة.

٢.٣.٦ الذكاء الاصطناعي لحملات الدعوة البيئية:

تستخدم المنظمات غير الحكومية البيئية بشكل متزايد الذكاء الاصطناعي لتعزيز جهود الدعوة لأهداف متنوعة:

- تحليل اتجاهات وسائل التواصل الاجتماعي لتحديد المخاوف البيئية.
- التنبؤ بنجاح حملات الدعوة بناءً على البيانات التاريخية.
- تحسين صياغة الرسائل لمختلف الجماهير.

(١) جوجل للذكاء الاصطناعي، «مبادرات التنبؤ بالفيضانات: توسيع التغطية وتحسين الدقة،» تم الاسترجاع من https://ai.googleblog.com / (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥)

(2) Google. “AI for Flood Forecasting.” Google AI Blog, 2023. https://ai.googleblog.com.

- تعبئة المؤيدين بكفاءة من خلال التواصل المستهدف.

دراسة حالة: حملات الغابات المدعومة بالذكاء الاصطناعي من جرينبيس

تستخدم جرينبيس الذكاء الاصطناعي لتحليل صور الأقمار الصناعية وتحديد إزالة الغابات غير القانونية، وإطلاق حملات استجابة سريعة. تستخدم منصة «شاهد الغابة» التابعة للمنظمة الرؤية الحاسوبية لاكتشاف أنشطة إزالة الغابات وتنبيه المجتمعات المحلية والسلطات تلقائياً [١].

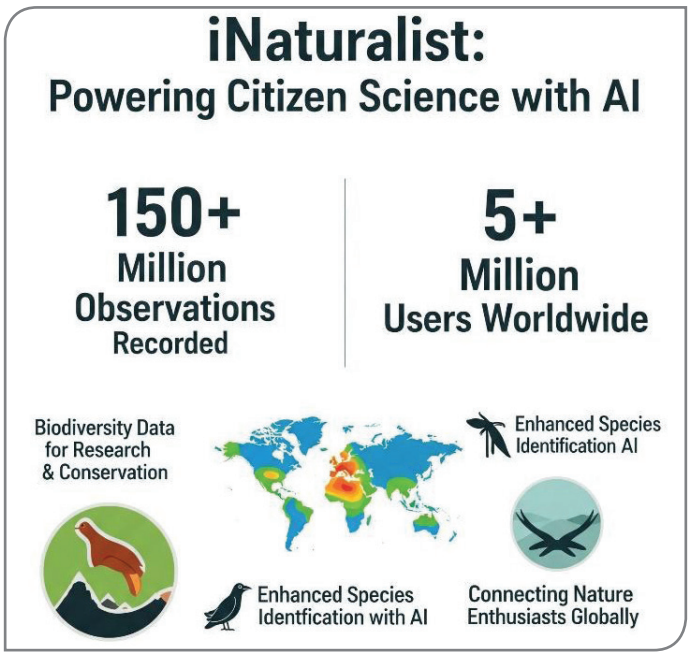
التأثيـــر: تسريع كشف الجرائم البيئية والضغط على الحكومات لاتخاذ إجراءات إنفاذ. في الأمازون، قلل النظام من وقت الاستجابة لقطع الأشجار غير القانوني بنسبة ٨٠٪، مما يتيح التدخل قبل حدوث أضرار واسعة النطاق.

وفي المنطقة العربية، تم تكييف هذه التكنولوجيا في عام ٢٠٢٤ لمراقبة الغطاء النباتي الحرج في المناطق شبه القاحلة، مع التركيز بشكل خاص على واحات النخيل والغابات المتبقية في جبال الأطلس والمناطق الساحلية في لبنان. وقد ساعد هذا النظام في الكشف عن التوسع الحضري غير المخطط له والممارسات الزراعية غير المستدامة التي تهدد هذه النظم البيئية الهشة، مما أدى إلى حملات دعوة ناجحة لحماية هذه المناطق.

(١) تقارير جرينبيس، «شاهد الغابة: المراقبة البيئية المدعومة بالذكاء الاصطناعي وحملات الاستجابة السريعة،» تم الاسترجاع من https://www.greenpeace.org/international/ (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

الشكل (١١):

iNaturalist: تمكين علم المواطن بالذكاء الاصطناعي



الشكل (١١) يسلط الضوء على نمو وتأثير iNaturalist . يعرض مقاييس رئيسية مثل «أكثر من ١٥٠ مليون ملاحظة مسجلة» و «أكثر من ٥ ملايين مستخدم حول العالم». كما يتضمن خريطة صغيرة توضح الانتشار العالمي للملاحظات.

٦. ٤ . العائد البيئي على الاستثمار (eROI) لمبادرات المجتمع المدعومة بالذكاء الاصطناعي:

لقد حسّن دمج الذكاء الاصطناعي في المبادرات المجتمعية البيئية بشكل كبير من كفاءتها ووصولها وتأثيرها. يقوم هذا القسم بتحديد هذه التحسينات كمياً من خلال التحليل المقارن.

١.٤.٦ التحليـــل المقـــارن: قبل وبعد دمج الذكاء الاصطناعي:

الجدول (٢): قبل وبعد دمج الذكاء الاصطناعي

المجال	قبل عصر الذكاء الاصطناعي	بعد عصر الذكاء الاصطناعي	التوقعات المستقبلية (٢٠٣٠)
مراقبة التنوع البيولوجي	مسوحات يدوية؛ نطاق جغرافي محدود؛ تحديد الأنواع من قبل الخبراء فقط	علوم المواطن العالمية عبر تطبيقات الذكاء الاصطناعي؛ التعرف الآلي على الأنواع؛ جمع ملايين نقاط البيانات يومياً	رسم خرائط الأنواع العالمية في الوقت الحقيقي؛ نماذج التنوع البيولوجي التنبؤية؛ تحديد أولويات الحفظ الآلي
مراقبة جودة الهواء	محطات مراقبة حكومية متباعدة فقط؛ تقارير متأخرة	خرائط جودة الهواء العالمية في الوقت الحقيقي من مصادر جماعية؛ اكتشاف التلوث المحلي الدقيق	نصائح صحية شخصية؛ التنبؤ بالتلوث؛ إنفاذ تنظيمي آلي
التنبؤ بالكوارث	تحذيرات قبل ٢٤-٤٨ ساعة من الأحداث؛ تغطية جغرافية محدودة	تنبؤات الذكاء الاصطناعي بالفيضانات قبل ٥-٧ أيام؛ أنظمة الإنذار المبكر متعددة المخاطر	أنظمة إخلاء مجتمعية تنبؤية كاملة؛ استجابة للكوارث محسنة بالذكاء الاصطناعي؛ حماية البنية التحتية الآلية
دعوة حماية الغابات	اكتشاف متأخر بأشهر للأنشطة غير القانونية؛ تحليل يدوي لصور الأقمار الصناعية	اكتشاف شبه فوري وحملات مدفوعة بالذكاء الاصطناعي؛ أنظمة تنبيه آلية	منع تنبؤي لقطع الأشجار غير القانوني؛ استعادة الغابات بتوجيه من الذكاء الاصطناعي؛ الحراجة المستدامة المتحقق منها بواسطة البلوكتشين

النتائج الرئيسية من تحليل العائد البيئي على الاستثمار:

- **تضخيم النطاق:** يضخم الذكاء الاصطناعي بشكل كبير نطاق وسرعة ودقة العمل البيئي المدفوع من المجتمع، مما يمكّن المشاركة العالمية في الجهود التي كانت محلية سابقاً.

- **ديمقراطية الخبرة:** تحول أدوات الذكاء الاصطناعي المواطنين العاديين إلى مراقبين ومدافعين بيئيين فعالين من خلال أتمتة المهام المعقدة مثل تحديد الأنواع أو اكتشاف التلوث.
- **النهج الوقائي مقابل التفاعلية:** تُظهر المشاريع البيئية المعززة بالذكاء الاصطناعي تأثيراً أعلى من خلال التحول من النهج التفاعلية إلى النهج الوقائية، ومعالجة المشكلات قبل تفاقمها.
- **فعالية التكلفة:** على الرغم من تكاليف الاستثمار الأولية، تُظهر المبادرات البيئية المعززة بالذكاء الاصطناعي تكاليف أقل بكثير لكل وحدة لجمع البيانات وتحليلها وتوليد التأثير مقارنة بالطرق التقليدية.
- **المسار المستقبلي:** ستمكّن أنظمة الذكاء الاصطناعي من الجيل التالي الحوكمة البيئية التنبؤية، مما يحول من الاستجابة للأزمات إلى منع الأزمات من خلال النمذجة والتدخل الاستباقي.

وفي المنطقة العربية، أظهرت دراسة أجريت في عام ٢٠٢٤ أن المبادرات البيئية المدعومة بالذكاء الاصطناعي حققت عائداً على الاستثمار أعلى بنسبة ٤٠٪ من المبادرات التقليدية، مع تأثير ملحوظ بشكل خاص في مجالات إدارة المياه ومكافحة التصحر. على سبيل المثال، أدت أنظمة الري الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي في المغرب إلى تقليل استهلاك المياه بنسبة ٣٠٪ مع زيادة الإنتاجية الزراعية بنسبة ٢٠٪، مما يوضح الفوائد المزدوجة للتكنولوجيا في معالجة التحديات البيئية والاقتصادية [1].

(1) United Nations ESCWA. Artificial Intelligence for Environmental Sustainability in the Arab Region. Beirut: UN ESCWA, 2024. https://www.unescwa.org/publications/ai-environment-arab-region.

٦. ٥ . الاعتبارات والتحديات الأخلاقية:

يثير دمج الذكاء الاصطناعي في المشاركة المجتمعية البيئية اعتبارات أخلاقية مهمة يجب معالجتها:

٦. ٥ . ١ الفجوة الرقمية وإمكانية الوصول:

- **التحـــدي:** يخلق الوصول غير المتكافئ إلى التكنولوجيا تفاوتات في من يمكنه المشاركة في المبادرات البيئية المعززة بالذكاء الاصطناعي.
- **نهـــج الحلول:** تطوير أدوات قادرة على العمل دون اتصال بالإنترنت، وخيارات منخفضة النطاق الترددي، ومراكز تكنولوجية مجتمعية؛ ضمان واجهات متعددة اللغات وتصميم مناسب ثقافياً.

وفي المنطقة العربية، تم إطلاق مبادرة «الوصول الرقمي الأخضر» في عام ٣٢٠٢ لمعالجة الفجوة الرقمية في المناطق الريفية والمجتمعات المهمشة. توفر المبادرة أجهزة منخفضة التكلفة، وتدريباً على المهارات الرقمية، وتطبيقات تعمل دون اتصال بالإنترنت للمراقبة البيئية، مما يضمن مشاركة أوسع في المبادرات البيئية الرقمية. وقد نجحت المبادرة في تمكين أكثر من ٥٠،٠٠٠ مواطن في المناطق الريفية من المشاركة في مبادرات العلوم المجتمعية، مما يوفر بيانات قيمة عن النظم البيئية المحلية التي كانت تفتقر سابقاً إلى المراقبة الكافية [١].

٦. ٥ . ٢ خصوصية البيانات والموافقة:

التحـــدي: يمكن أن تجمع المراقبة البيئية عن غير قصد بيانات شخصية أو مجتمعية حساسة.

(1) United Nations Development Programme (UNDP). Digital for Climate Action: Backgrounders. New York: UNDP, September 2023. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/202309-/Backgrounders.pdf.

نهـج الحلـــول: تنفيذ بروتوكولات قوية لإخفاء هوية البيانات، والحصول على موافقة مستنيرة، ومنح المجتمعات السيطرة على بياناتها البيئية.

وفي عام ٢٠٢٤، طورت مجموعة من الباحثين والمنظمات غير الحكومية في المنطقة العربية «ميثاق البيانات البيئية العربية»، وهو إطار عمل يحدد المبادئ التوجيهية لجمع البيانات البيئية واستخدامها ومشاركتها بطريقة تحترم الخصوصية والسيادة المجتمعية. تم تبني هذا الميثاق من قبل العديد من المبادرات البيئية الرقمية في المنطقة، مما يضمن أن تكون جهود جمع البيانات أخلاقية وشفافة.

٦. ٥ . ٣ التحيز الخوارزمي والتمثيل:

التحـــدي: قد تعكس أنظمة الذكاء الاصطناعي تحيزات في بيانات التدريب الخاصة بها، مما قد يؤدي إلى تمثيل ناقص لبعض النظم البيئية أو المجتمعات.

نهـج الحلـــول: تنويع مجموعات بيانات التدريب، وإشراك المجتمعات المحلية في تطوير الذكاء الاصطناعي، وتنفيذ عمليات تدقيق منتظمة للتحيز.

وفي مبادرة رائدة، قام باحثون من جامعات في مصر والأردن والمغرب في عام ٢٠٢٣ بتطوير مجموعة بيانات «التنوع البيئي العربي» لتدريب نماذج الذكاء الاصطناعي. تتضمن مجموعة البيانات هذه صوراً وبيانات من مجموعة متنوعة من النظم البيئية العربية، بما في ذلك الواحات والأراضي الرطبة الساحلية والمناطق الجبلية، مما يضمن أن تكون نماذج الذكاء الاصطناعي البيئية أكثر دقة وإنصافاً في تمثيل التنوع البيئي الكامل للمنطقة.

٦. ٥ . ٤ الموازنة بين التكنولوجيا والمعرفة التقليدية:

التحـــدي: قد يؤدي الاعتماد المفرط على الذكاء الاصطناعي إلى التقليل من قيمة المعرفة البيئية التقليدية والممارسات البيئية الأصلية.

نهـــج الحلـــول: إنشاء أنظمة هجينة تدمج الذكاء الاصطناعي مع المعرفة التقليدية؛ ضمان احتفاظ المجتمعات الأصلية بملكية بياناتها البيئية ورؤاها.

وفي مثال ملهم من المنطقة العربية، تم إطلاق مشروع «حكمة الصحراء» في عام ٤٢٠٢، والذي يجمع بين المعرفة التقليدية للبدو حول إدارة المياه والزراعة في المناطق القاحلة مع تقنيات الذكاء الاصطناعي المتقدمة. يوثق المشروع الممارسات التقليدية ويدمجها مع البيانات العلمية لإنشاء نظام دعم قرار هجين يحترم ويعزز كلا مصدري المعرفة. وقد أدى هذا النهج إلى تطوير تقنيات زراعية مستدامة تجمع بين الحكمة القديمة والابتكار الحديث، مما يوفر حلولاً أكثر ملاءمة ثقافياً وبيئياً للمنطقة.

يتطلب تحقيق أقصى عائد بيئي على الاستثمار توطين تقنيات الذكاء الاصطناعي بما يتناسب مع السياقات المحلية. في العالم العربي، يمثل هذا التوطين فرصة عظيمة للجمع بين القدرات التقنية والمعرفة البيئية المتجذرة ثقافيًا، مما يخلق حلولاً تتسم بالاستدامة والفعالية والقبول المجتمعي.

٦.٦. الخاتمـــة:

يمكّن الذكاء الاصطناعي جيلاً جديداً من المشرفين على البيئة: المواطنين والمعلمين والعلماء والنشطاء الموحدين بالبيانات، والمتصلين بالخوارزميات، والمدفوعين برؤية مشتركة لمستقبل مستدام. من خلال تخصيص التعليم، وإضفاء الطابع الديمقراطي على أدوات المراقبة، وتعزيز الدعوة، يوسع الذكاء الاصطناعي المشاركة البيئية من جهود معزولة إلى حركات جماعية عالمية.

يوضح العائد البيئي على الاستثمار من مبادرات المجتمع المعززة بالذكاء الاصطناعي أن التكنولوجيا يمكن أن تضخم بشكل كبير القدرة البشرية على الإشراف البيئي. من العلماء المواطنين الذين يوثقون التنوع البيولوجي إلى المجتمعات التي تراقب جودة الهواء أو تتلقى تحذيرات مبكرة من الكوارث، يخلق الذكاء الاصطناعي فرصاً غير مسبوقة للمشاركة في حماية البيئة.

ومع ذلك، يتطلب الطريق إلى الأمام اليقظة:

- ضمان الوصول الشامل إلى أدوات الذكاء الاصطناعي عبر الانقسامات الاجتماعية والاقتصادية.
- حماية الخصوصية والوكالة في مبادرات العلوم المواطنية
- بناء الثقة العامة من خلال الشفافية والمساءلة في أنظمة الذكاء الاصطناعي.
- احترام ودمج المعرفة البيئية التقليدية جنباً إلى جنب مع النهج التكنولوجية.

عندما يُستخدم بمسؤولية، يصبح الذكاء الاصطناعي حافزاً - ليس فقط للتقدم

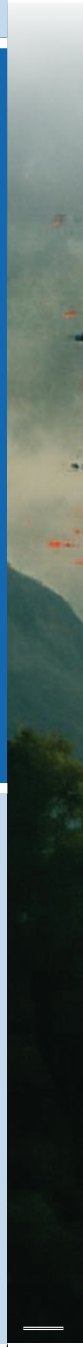
التكنولوجي، ولكن للشفاء الكوكبي من خلال العمل البشري الجماعي. يكمن مستقبل الإشراف البيئي ليس في الذكاء الاصطناعي وحده، ولكن في المزيج القوي من الذكاء الاصطناعي والحكمة البشرية، اللذين يعملان معاً نحو كوكب مستدام.

لقد أظهر هذا الفصل كيف يمكن للذكاء الاصطناعي أن يكون قوة دافعة لتعزيز الوعي البيئي والمشاركة المجتمعية، من خلال التعليم الرقمي، والعلوم المواطنية، وحملات الدعوة الذكية. غير أن الاستفادة الكاملة من هذه الإمكانيات تتطلب معالجة القضايا الأخلاقية المحيطة بإمكانية الوصول، وخصوصية البيانات، والتمثيل العادل.

وفي الوقت الذي تتسارع فيه وتيرة التحول الرقمي البيئي عالميًا، تبرز الحاجة الملحة لتطوير أطر استراتيجية محلية تضمن استدامة استخدام الذكاء الاصطناعي في السياقات العربية. من هنا، يمهد هذا الفصل الطريق لما سيتناوله الفصل الثامن، والذي يركّز على الأطر الاستراتيجية لاستدامة الذكاء الاصطناعي في المنطقة العربية، مع استعراض التحديات والفرص والسياسات المقترحة لبناء مستقبل بيئي رقمي عربي مسؤول وشامل. حيثما توجد بيانات ومنصّات، تظهر مخاطر أمنية ومعلومات مضلّلة قد تقوّض الثقة. الفصل التالي يضع «حواجز الأمان» للحفاظ على استدامة آمنة.

الفصل السابع

التحديات المتقاطعة للذكاء الاصطناعي والبيئة والأمن السيبراني



AI

الفصل السابع
التحديات المتقاطعة للذكاء الاصطناعي والبيئة والأمن السيبراني

٧. ١ . مقدمة : الحدود المتقاربة

بيانات بيئية حسّاسة، منصّات مشاركة جماهيرية، وخوارزميات تأثير... المزيج المثالي لمخاطر أمنية وسرديات مضلِّلة. كيف نبني حلولًا بيئية لا تُخترق ثقة الناس فيها؟

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** أطر حوكمة وأمن معلومات بيئية ومعايير شفافية.
- **الأعمـــال:** إدارة مخاطر وتشغيل آمن للبنى الحرجة والحملات الاتصالية.
- **الأكاديميا/الطلاب:** نماذج كشف تضليل ومقاربة «قابلة للتفسير» للقرارات الحسّاسة.

يحمل الذكاء الاصطناعي وعدًا هائلاً بمعالجة بعض التحديات البيئية الأكثر إلحاحًا التي تواجه كوكبنا، من تحسين استهلاك الطاقة وإدارة الموارد الطبيعية إلى التنبؤ بأنماط المناخ ومراقبة التنوع البيولوجي. توفر قدرته التحليلية وقدرات الأتمتة فرصًا غير مسبوقة لتعزيز مستقبل أكثر استدامة. ومع ذلك، فإن دمج الذكاء الاصطناعي في النظم البيئية يدخل طبقة جديدة من التعقيد والضعف، لا سيما عند التقاطع مع الأمن السيبراني. مع تزايد اعتمادنا على البنية التحتية الرقمية المترابطة، يزداد أيضًا احتمال قيام جهات فاعلة خبيثة باستغلال نقاط الضعف، وتعطيل الخدمات البيئية الحيوية، وتعريض سلامة البيانات الأساسية لاتخاذ قرارات مستنيرة للخطر. يتعمق هذا الفصل في المخاطر والتحديات متعددة الأوجه التي تنشأ

عن تقارب الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية والأمن السيبراني، مع التأكيد على الحاجة إلى ضمانات قوية واعتبارات أخلاقية لضمان بقاء الذكاء الاصطناعي قوة للخير في سعينا نحو كوكب أكثر اخضرارًا. إلى جانب التهديدات السيبرانية المباشرة، نستكشف أيضًا التحدي الخبيث المتمثل في المعلومات المضللة والتضليل، لا سيما كيف يمكن الاستفادة من الذكاء الاصطناعي لنشر روايات كاذبة تقوض الإجماع العلمي وتعيق العمل الجماعي بشأن القضايا البيئية. الوعي المجتمعي الرقمي هو خط الدفاع الأول ضد هذه التهديدات، وهو ما تناولناه في الفصل الخامس. كما أن هذه التحديات السيبرانية تضيف بعدًا جديدًا إلى حسابات الاستدامة، ما يعيدنا إلى الفصل التاسع حول البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي.

٧.٢. مخاطر الأمن السيبراني في تطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئية:

إن التكامل المتزايد للذكاء الاصطناعي في أنظمة الإدارة البيئية، بينما يقدم فوائد كبيرة، يقدم في الوقت نفسه مجموعة معقدة من مخاطر الأمن السيبراني. تصبح هذه الأنظمة التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي، والتي غالبًا ما يتم نشرها في قطاعات البنية التحتية الحيوية مثل الطاقة والمياه وإدارة النفايات، أهدافًا جذابة للهجمات السيبرانية نظرًا لقدرتها على إحداث اضطراب واسع النطاق والطبيعة الحساسة للبيانات التي تتعامل معها. تمتد نقاط الضعف عبر دورة حياة الذكاء الاصطناعي بأكملها، من جمع البيانات وتدريب النماذج إلى النشر والتشغيل المستمر [1].

٧.٢.١ نقاط ضعف الأنظمة البيئية التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي:

غالبًا ما تتفاعل تطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئية، بطبيعتها، مع الأنظمة المادية في العالم الحقيقي، مما يجعلها عرضة بشكل خاص للهجمات التي يمكن أن يكون لها عواقب ملموسة وضارة. على سبيل المثال، الشبكات الذكية التي تستخدم

(1) GOV.UK, "Cyber security risks to artificial intelligence," May 15, 2024. https://www.gov.uk/government/publications/research-on-the-cyber-security-of-ai/cyber-security-risks-to-artificial-intelligence.

الذكاء الاصطناعي لتحسين توزيع الطاقة، أو أنظمة إدارة المياه التي تستفيد من الذكاء الاصطناعي للكشف عن التسرب والتحكم في التدفق، تمثل نقاط فشل حرجة إذا تم اختراقها. يمكن للمهاجمين استغلال نقاط الضعف في البرامج، أو تكوينات الشبكة غير الآمنة، أو حتى التلاعب بنماذج الذكاء الاصطناعي نفسها. يزيد الترابط بين هذه الأنظمة، التي غالبًا ما تمتد عبر مناطق جغرافية واسعة وتدمج أجهزة استشعار وأجهزة إنترنت الأشياء المختلفة، من مساحة الهجوم، مما يجعل تأمينها بشكل شامل أمرًا صعبًا [١].

٢.٢.٧ التأثير على البنية التحتية البيئية الحيوية:

يمكن أن تؤدي الهجمات السيبرانية الناجحة على البنية التحتية البيئية التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي إلى نتائج كارثية. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي الاختراق في نظام المياه الذكي إلى تعطيل إمدادات المياه النظيفة، أو التلوث، أو حتى التلاعب بمستويات المياه في الخزانات، مما يؤدي إلى الفيضانات أو ندرة المياه. وبالمثل، يمكن أن تتسبب الهجمات على شبكات الطاقة المحسّنة بالذكاء الاصطناعي في انقطاع التيار الكهربائي على نطاق واسع، مما يؤثر على الخدمات الأساسية والسلامة العامة. إلى جانب الاضطرابات التشغيلية المباشرة، يمكن أن تؤدي هذه الهجمات أيضًا إلى خسائر اقتصادية كبيرة، وأضرار بيئية، وفقدان ثقة الجمهور في موثوقية التقنيات البيئية المتقدمة [٢].

(1) Palo Alto Networks, “What Are the Risks and Benefits of Artificial Intelligence (AI) in Cybersecurity?,” n.d. https://www.paloaltonetworks.com/cyberpedia/ai-risks-and-benefits-in-cybersecurity.

(2) Cybersecurity Guide, “Securing Environmental Services: Cybersecurity in Infrastructure,” June 2, 2025, https://cybersecurityguide.org/industries/environmental-protection/.

دراســـة حالـــــة: شركة أمريكان ووتر ووركس (American Water Works Company, Inc.)

في ٣ أكتوبر ٢٠٢٤، تعرضت شركة أمريكان ووتر ووركس، وهي أكبر شركة مرافق عامة للمياه والصرف الصحي المتداولة علنًا في الولايات المتحدة، لحادث أمن سيبراني جسيم. تم اكتشاف نشاط غير مصرح به ضمن أنظمة الكمبيوتر الخاصة بها، والذي تم تحديده لاحقًا على أنه هجوم سيبراني منظم. استجابت الشركة بسرعة بتفعيل بروتوكولات الاستجابة للحوادث القياسية، مستعينة بخبراء أمن سيبراني من طرف ثالث لتقييم مدى الاختراق واحتوائه. كما تم إبلاغ سلطات إنفاذ القانون على الفور، وتعاونت الشركة بشكل كامل مع التحقيقات الجارية. على الرغم من أن هذا الهجوم لم يؤثر بشكل مباشر على عمليات توصيل المياه أو جودتها، فقد واجه العملاء اضطرابات مؤقتة في خدمات الفواتير عبر الإنترنت. استجابت شركة أمريكان ووتر بإلغاء رسوم التأخير لضمان عدم تأثر العملاء ماليًا. في البداية، صرحت الشركة بعدم تأثر المعلومات الشخصية للعملاء، لكنها التزمت لاحقًا بإخطار الأفراد المتأثرين خارج مناطقها الخاضعة للتنظيم بعد مراجعة إضافية للبيانات المخترقة. بحلول ١٠ أكتوبر ٢٠٢٤، تم استعادة جميع الأنظمة المتأثرة بشكل آمن، مما يدل على كفاءة الاستجابة للحادث. من الناحية المالية، لم تتوقع الشركة تأثيرًا كبيرًا على أدائها، إلا أن وكالة موديز للتصنيف الائتماني صنفت الحدث بأنه «سلبي على الائتمان».

يعزى هذا التقييم إلى الضرر المحتمل لثقة العملاء والتدقيق التنظيمي المتزايد الذي قد تواجهه الشركة وقطاع البنية التحتية الحيوية ككل. على الرغم من أن الطبيعة الدقيقة للهجوم لم يتم الكشف عنها علنًا، إلا أن الدلائل أشارت إلى احتمال كبير لوقوع حادث برامج فدية (ransomware) [1].

(1) American Water, "American Water Provides Update on Cybersecurity Incident," October 10, 2024, https://www.amwater.com/press-release/American-Water-Provides-Update-on-Cybersecurity-Incident.

يسلط هذا الاختراق الضوء بشكل صارخ على ضعف البنية التحتية الحيوية أمام التهديدات السيبرانية المتطورة، ويشدد على الحاجة الملحة لتعزيز التدابير الأمنية والاستعداد الأفضل داخل القطاع.

٣.٢.٧ سلامة البيانات والذكاء الاصطناعي العدائي:

يأتي أحد أكثر التهديدات تعقيدًا لأنظمة الذكاء الاصطناعي البيئية من تقنيات الذكاء الاصطناعي العدائية. تهدف هذه الهجمات إلى التلاعب بالبيانات المستخدمة لتدريب أو تشغيل نماذج الذكاء الاصطناعي، أو خداع النماذج لاتخاذ تنبؤات أو قرارات غير صحيحة. على سبيل المثال، يتضمن تسميم البيانات حقن بيانات ضارة في مجموعة بيانات التدريب، مما يؤدي إلى تعلم نموذج الذكاء الاصطناعي لأنماط معيبة وإنتاج مخرجات متحيزة أو غير دقيقة. من ناحية أخرى، فإن الأمثلة العدائية هي مدخلات تم تغييرها بمهارة مصممة لخداع نموذج الذكاء الاصطناعي المنشور، مما يتسبب في تصنيف خاطئ للبيانات البيئية أو تفسير خاطئ لقراءات أجهزة الاستشعار. يمكن أن تعرض هذه الهجمات سلامة المراقبة البيئية للخطر، وتؤدي إلى تنبؤات مناخية خاطئة، أو تتسبب في اتخاذ الأنظمة الآلية قرارات تضر بالبيئة أو صحة الإنسان [1].

٣.٧. تحدي المعلومات المضللة والتضليل في الخطاب البيئي:

إلى جانب الهجمات السيبرانية المباشرة على البنية التحتية، يشكل انتشار المعلومات المضللة والتضليل تهديدًا كبيرًا، وإن كان أكثر دقة، لجهود الاستدامة البيئية. في عصر تنتشر فيه المعلومات بسرعة عبر المنصات الرقمية، أصبحت القدرة على تمييز المعلومات الواقعية المدعومة علميًا عن الروايات المضللة أمرًا صعبًا بشكل متزايد. لقد ظهر الذكاء الاصطناعي، وخاصة الذكاء الاصطناعي التوليدي، كسلاح قوي ذي

(1) Malwarebytes, “Risks of AI & Cybersecurity | Risks of Artificial Intelligence,” n.d., https://www.malwarebytes.com/cybersecurity/basics/risks-of-ai-in-cybersecurity.

حدين في هذا المشهد، قادر على مكافحة انتشار المعلومات الخاطئة وتفاقمها على حد سواء [1].

الشكل (١٢)

المخاطر السيبرانية على أنظمة الذكاء الاصطناعي البيئية

المركـــز: شبكة المياه الذكية / شبكة الطاقة المتجددة.

التهديدات (متجهة للداخل): تسميم البيانات (Data Poisoning)، الأمثلة العدائية (Adversarial Examples)، برامج الفدية (Ransomware)، واختراق الشبكة (Network Intrusion) .

(1) DeSmog, "The ABCs of AI and Environmental Misinformation," September 18, 2024, https://www.desmog.com/202418/09//the-abcs-of-ai-and-environmental-misinformation-climate-disinformation-chat-gpt/.

٧.٣.١ دور الذكاء الاصطناعي في تضخيم المعلومات المضللة:

يمكن لنماذج الذكاء الاصطناعي التوليدية، مثل نماذج اللغة الكبيرة(LLMs) وأدوات توليد الصور، إنتاج نصوص وصور وحتى مقاطع فيديو مقنعة للغاية على نطاق وسرعة غير مسبوقين. بينما تتمتع هذه القدرات بتطبيقات مفيدة، يمكن أيضًا استغلالها بشكل ضار لإنشاء ونشر حملات معلومات مضللة متطورة حول القضايا البيئية. على سبيل المثال، يمكن للذكاء الاصطناعي إنشاء مقالات إخبارية مزيفة، أو منشورات على وسائل التواصل الاجتماعي، أو مقاطع فيديو مزيفة عميقة تشوه النتائج العلمية بشأن تغير المناخ، أو تروج لحلول خاطئة، أو تشوه سمعة المبادرات البيئية المشروعة. يمكن أن يؤدي الحجم الهائل والأصالة الظاهرة للمحتوى الذي يولده الذكاء الاصطناعي إلى إرباك آليات التحقق من الحقائق التقليدية، مما يجعل من الصعب على الجمهور التمييز بين الحقيقة والخيال [1].

٧.٣.٢ تآكل المعرفة العلمية وثقة الجمهور:

يؤدي التعرض المستمر للمعلومات البيئية المضللة إلى تآكل ثقة الجمهور في المؤسسات العلمية والخبراء والمعرفة الراسخة. عندما تكتسب الروايات الكاذبة زخمًا، يمكنها استقطاب الرأي العام، وإعاقة صنع السياسات الفعالة، وتقويض العمل الجماعي اللازم لمعالجة التحديات البيئية المعقدة. تسلط ملاحظة الناشر حول «الحيوانات الخيالية التي تعصف بالمعرفة العلمية للأطفال والشباب» الضوء على جانب حاسم من هذه المشكلة: الانتشار المتعمد أو غير المتعمد للروايات غير العلمية أو الخيالية التي تحل محل الفهم الواقعي. يمكن أن يتجلى ذلك في ادعاءات علمية زائفة حول الظواهر البيئية، أو نظريات المؤامرة المتعلقة بعلوم المناخ، أو حتى محتوى مضلل ولكنه يبدو غير ضار يصرف الانتباه عن القضايا البيئية الحقيقية. يمكن لمثل هذه الروايات، خاصة

(1) Earth Day, “The Double-Edged Sword of AI and the Battle Against Climate Change Misinformation,” May 30, 2025 https://www.earthday.org/the-double-edged-sword-of-ai-and-the-battle-against-climate-change-misinformation/.

عند تضخيمها بواسطة الذكاء الاصطناعي، أن تخلق واقعًا مشوهًا، مما يجعل من الصعب تثقيف الجمهور وبناء توافق في الآراء حول الحلول القائمة على الأدلة [1].

دراسات الحالة / الأمثلة:

توضح العديد من الأمثلة تأثير المعلومات البيئية المضللة. على سبيل المثال، قامت حملات ممولة جيدًا تاريخيًا بنشر الشك حول تغير المناخ، وغالبًا ما تستخدم لغة مشحونة عاطفيًا وبيانات منتقاة بعناية. مع الذكاء الاصطناعي، يمكن أن تصبح هذه الحملات أكثر تعقيدًا وتخصيصًا ويصعب تتبعها. يمكن تصميم المحتوى الذي يولده الذكاء الاصطناعي ليناسب التركيبة السكانية المحددة، واستغلال التحيزات الموجودة وجعل المعلومات المضللة أكثر رنينًا. يمكن أن يؤدي الانتشار السريع للمزاعم الكاذبة حول تقنيات الطاقة المتجددة، أو سلامة بعض السياسات البيئية، أو شدة الأزمات البيئية إلى إعاقة التقدم بشكل مباشر وتعزيز شكوك الجمهور، مما يؤخر في النهاية الإجراءات البيئية الحاسمة [2].

٧. ٤ . الاعتبارات الأخلاقية والحوكمة في تقاطع الذكاء الاصطناعي والبيئة والأمن السيبراني:

تتطلب العلاقة المعقدة بين الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية والأمن السيبراني إطارًا قويًا من الاعتبارات الأخلاقية والحوكمة. بدون تدابير استباقية، يمكن أن تصبح التقنيات المصممة لحماية كوكبنا عن غير قصد أدوات لضررها، إما من خلال الهجمات السيبرانية الخبيثة أو تآكل الخطاب الواقعي. تتطلب معالجة هذه

(1) Scientific American, “Can AI Stop Climate Misinformation?,” June 8, 2024, https://www.sciencenews.org/article/climate-misinformation-ai-experts.

(2) Scientific American, “Can AI Stop Climate Misinformation?,” June 8, 2024, https://www.scientificamerican.com/article/can-ai-stop-climate-misinformation/.

التحديات نهجًا متعدد الأوجه يمتد عبر تطوير الذكاء الاصطناعي المسؤول، والأطر الشاملة للسياسات والتنظيم، والتعاون الدولي [١].

٧. ٤. ١ تطوير الذكاء الاصطناعي المسؤول:

في صميم التخفيف من المخاطر يكمن مبدأ تطوير الذكاء الاصطناعي المسؤول. يتضمن ذلك تضمين الاعتبارات الأخلاقية من مرحلة التصميم الأولية وحتى النشر والصيانة. بالنسبة لتطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئية، يعني هذا إعطاء الأولوية للأمن حسب التصميم، وضمان خصوصية البيانات، وتطوير نماذج قوية ضد الهجمات العدائية. تعد الشفافية وقابلية التفسير في نماذج الذكاء الاصطناعي أمرًا بالغ الأهمية أيضًا، مما يسمح لأصحاب المصلحة بفهم كيفية اتخاذ القرارات البيئية وتحديد التحيزات أو نقاط الضعف المحتملة. علاوة على ذلك، يجب على المطورين مراعاة البصمة البيئية للذكاء الاصطناعي نفسه، والسعي لتحقيق خوارزميات موفرة للطاقة وممارسات مراكز بيانات مستدامة لتجنب تفاقم المشكلات التي يهدف الذكاء الاصطناعي إلى حلها [٢].

٧. ٤. ٢ أطـــر السياسات والتنظيم:

تتطلب الحوكمة الفعالة إنشاء أطر سياسات وتنظيم واضحة وقابلة للتنفيذ. يجب على الحكومات والهيئات الدولية العمل بشكل تعاوني لإنشاء تشريعات تعالج تحديات الأمن السيبراني الفريدة التي يفرضها الذكاء الاصطناعي في البنية التحتية البيئية الحيوية. يتضمن ذلك وضع معايير لأمن أنظمة الذكاء الاصطناعي، وفرض عمليات

(1) American Century, "AI: Ethical Concerns and Sustainability Issues," accessed July 16, 2025, https://www.americancentury.com/insights/ai-risks-ethics-legal-concerns-cybersecurity-and-environment/.

(2) World Economic Forum, «How to Reduce the Environmental Impact of Your Company›s AI Use,» June 1, 2025, https://www.weforum.org/stories/202506//how-ai-use-impacts-the-environment/.

تدقيق منتظمة، ووضع بروتوكولات للاستجابة للحوادث. في الوقت نفسه، هناك حاجة إلى لوائح لمكافحة انتشار المعلومات المضللة التي يولدها الذكاء الاصطناعي، والموازنة بين حرية التعبير وضرورة حماية النزاهة العلمية والخطاب العام. يجب أن تشجع هذه الأطر الابتكار مع ضمان المساءلة وتقليل الضرر [١].

٣.٤.٧ التعـــاون الدولـــي:

تعد التحديات البيئية وتهديدات الأمن السيبراني وانتشار المعلومات المضللة مشكلات عالمية بطبيعتها تتجاوز الحدود الوطنية. وبالتالي، تتطلب الحلول الفعالة تعاونًا دوليًا قويًا. يتضمن ذلك تبادل معلومات التهديدات، وتنسيق استراتيجيات الدفاع ضد الهجمات السيبرانية على الأنظمة البيئية، وتطوير معايير مشتركة لتطوير الذكاء الاصطناعي المسؤول. يعد التعاون الدولي أمرًا حيويًا أيضًا في معالجة تدفق المعلومات المضللة عبر الحدود، وتعزيز محو الأمية الإعلامية، ودعم مبادرات التحقق من الحقائق المستقلة. من خلال العمل معًا، يمكن للدول بناء مجتمع عالمي أكثر مرونة واستنارة قادر على الاستفادة من الذكاء الاصطناعي من أجل الخير البيئي مع التخفيف من المخاطر المرتبطة به [٢].

(1) Environmental and Human Implications of Generative AI,» April 22, 2025, https://www.gao.gov/products/gao-25107172-.

(2) Science News, «Detecting Climate Misinformation with AI Requires Trained Human Experts,» April 14, 2025, https://www.sciencenews.org/article/climate-misinformation-ai-experts.

٧.٥. الخاتـــمـــة:

التنقل في المستقبل بالمرونة والنزاهة

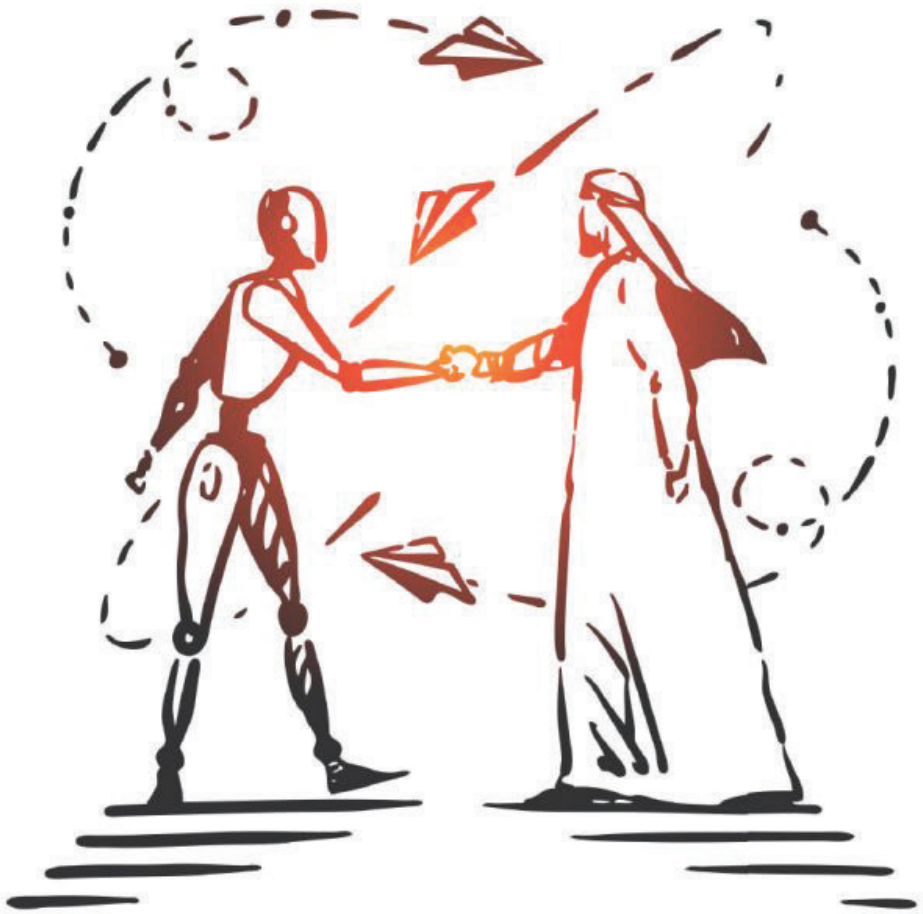
يمثل تقارب الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية والأمن السيبراني فرصًا غير مسبوقة وتحديات هائلة في آن واحد. فبينما يوفر الذكاء الاصطناعي أدوات قوية لمعالجة الأزمات البيئية، فإن دمجه في البنية التحتية البيئية الحيوية وقدرته على توليد المعلومات ونشرها يفتح أيضًا آفاقًا جديدة للمخاطر. يمكن أن تؤدي تهديدات الأمن السيبراني لأنظمة البيئة المدفوعة بالذكاء الاصطناعي إلى اضطرابات ملموسة وأضرار بيئية، بينما يمكن أن يؤدي الانتشار الخبيث للمعلومات المضللة التي يضخمها الذكاء الاصطناعي إلى تآكل الفهم العلمي وإعاقة العمل الجماعي.

يتطلب التنقل في هذا المشهد المعقد نهجًا استباقيًا ومتعدد الأوجه. فهو يستلزم التطوير والنشر المسؤول للذكاء الاصطناعي، مع تضمين اعتبارات الأمن والأخلاق منذ البداية. تعد الأطر القوية للسياسات والتنظيم ضرورية لحوكمة استخدام الذكاء الاصطناعي في السياقات البيئية الحساسة ومكافحة انتشار الروايات الكاذبة. والأهم من ذلك، أن التعاون الدولي أمر بالغ الأهمية، حيث تتجاوز هذه التحديات الحدود الوطنية وتتطلب استجابة عالمية موحدة.

من خلال تعزيز التعاون متعدد التخصصات، والاستثمار في التعليم العام، وإعطاء الأولوية للمرونة والنزاهة في تقدمنا التكنولوجي، يمكننا ضمان أن يكون الذكاء الاصطناعي حليفًا حقيقيًا في سعينا نحو مستقبل مستدام ومستنير على كوكب صحي. بعد فهم المخاطر، نرسم الخريطة: أطر واستراتيجيات عربية تجعل الذكاء الاصطناعي جزءًا من حلول الماء والطاقة والمدن – لا من مشكلاتها.

الفصل الثامن

الأطر الاستراتيجية لاستدامة الذكاء الاصطناعي في المنطقة العربية



الفصل الثامن
الأطر الاستراتيجية لاستدامة الذكاء الاصطناعي في المنطقة العربية

٨.١. المقدمة:

من ندرة المياه إلى التمدّد الحضري، تشترك بلداننا في تحديات، وتختلف في القدرات. السؤال ليس: «هل نعتمد الذكاء الاصطناعي؟» بل: «كيف نُحكم اعتماده ضمن رؤية وسياسات واستثمارات وبنية بيانات وقدرات بشرية؟».

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** منصّات بيانات، صناديق تحدّي، وحوكمة أخلاقية بمتطلبات تقييم أثر رقمي.
- **الأعمال:** فرص سوقية إقليمية وشراكات عابرة للحدود ومشتريات حكومية خضراء.
- **الأكاديميا/الطلاب:** مسارات بناء قدرات ومراكز تميّز وحالات عربية قابلة للتكرار.

تواجه المنطقة العربية تحديات بيئية فريدة ومعقدة تتطلب حلولاً مبتكرة. إن ندرة المياه، والتصحر، والتوسع الحضري السريع، ومعدلات استهلاك الطاقة المرتفعة، وزيادة التعرض لتأثيرات تغير المناخ مثل موجات الحر الشديدة وارتفاع مستوى سطح البحر، تهدد مجتمعة الاستقرار البيئي للمنطقة وازدهارها الاقتصادي ورفاهها الاجتماعي.

في الوقت نفسه، يشهد العالم العربي تحولاً تكنولوجياً سريعاً، حيث تستثمر العديد من البلدان بكثافة في الذكاء الاصطناعي كجزء من رؤاها التنموية الوطنية...

لا سيما استراتيجية الإمارات الوطنية للذكاء الاصطناعي ٢٠٣١، ورؤية المملكة العربية السعودية ٢٠٣٠، واستراتيجية قطر الوطنية للذكاء الاصطناعي. يمثل هذا التقارب بين الاحتياجات البيئية الملحة والقدرة التكنولوجية المتزايدة فرصة تاريخية لصياغة أطر استراتيجية خاصة بالمنطقة تسخر الذكاء الاصطناعي لتحقيق التنمية المستدامة والمرونة البيئية.

يقترح هذا الفصل مقاربات شاملة للاستفادة من الذكاء الاصطناعي لدفع الاستدامة البيئية في جميع أنحاء المنطقة العربية، مدعومة بأمثلة واقعية وأفضل الممارسات وخرائط طريق مستقبلية. ندرس المبادرات الحالية، ونحدد الفجوات، ونحدد الأطر الاستراتيجية التي يمكن أن توجه صانعي السياسات والتقنيين والشركات والمجتمع المدني في خلق مستقبل أكثر استدامة من خلال نشر الذكاء الاصطناعي المسؤول.

٨. ٢ . التحديات البيئية في السياق العربي:

تواجه المنطقة العربية تحديات بيئية حادة ومترابطة تهدد نظمها البيئية واقتصاداتها ورفاهية مجتمعاتها. يقدم الذكاء الاصطناعي أدوات واعدة، ولكن يجب تطبيقه في سياق فهم هذه الحقائق الإقليمية.

٨. ٢ . ١ ندرة المياه: أزمة وجودية تتطلب حلولاً ذكية:

تعد المنطقة العربية من أكثر مناطق العالم ندرة في المياه، وتواجه تحديات وجودية في الأمن المائي:

تقع ١٧ دولة من أصل ٢٢ دولة عربية تحت خط فقر المياه البالغ ١٠٠٠ متر مكعب للفرد سنوياً [١].

(١) معهد الموارد العالمية (WRI)، «أطلس مخاطر المياه أكويدكت،» تم الاسترجاع من https://www.wri.org/aqueduct (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥)

يقل متوسط توافر المياه العذبة المتجددة للفرد عن ٥٠٠ متر مكعب سنوياً، وهو أقل بكثير من عتبة ندرة المياه العالمية[١].

تعتمد بعض البلدان، مثل الكويت وقطر والإمارات العربية المتحدة، على تحلية المياه لأكثر من ٩٠٪ من إمداداتها من المياه العذبة، وهي عملية كثيفة الاستهلاك للطاقة وذات تأثير بيئي كبير. على سبيل المثال، تتطلب محطات التحلية كميات هائلة من الطاقة، غالباً ما يتم توليدها من الوقود الأحفوري، وتنتج محلولاً ملحياً مركزاً يتم تصريفه عادةً في البحر، مما يضر بالنظم البيئية البحرية.

من المتوقع أن يؤدي تغير المناخ إلى تقليل توافر المياه بنسبة إضافية تتراوح بين ١٥-٢٥٪ بحلول عام ٢٠٥٠. [٢]

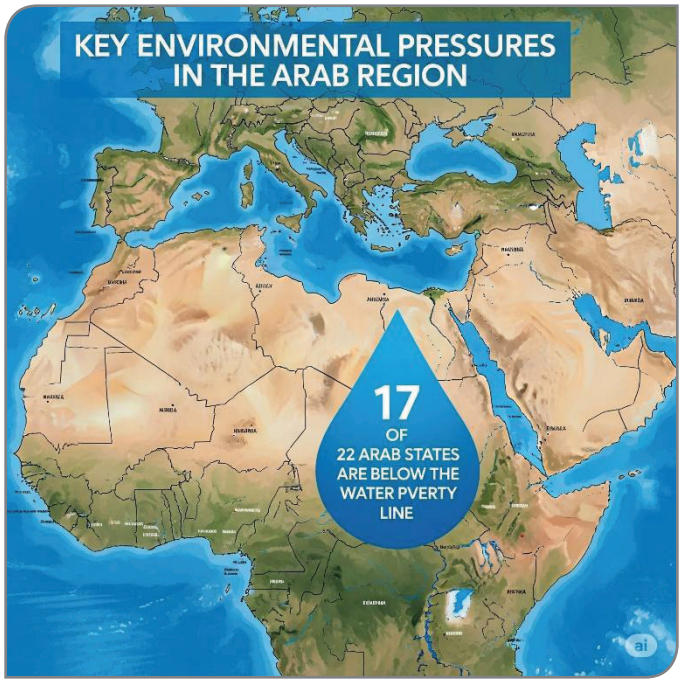
التداعيات: تتعرض الزراعة والصناعة والحياة الحضرية لخطر متزايد دون وجود أنظمة إدارة مياه أكثر ذكاءً. يمكن للذكاء الاصطناعي تحسين تخصيص المياه، واكتشاف التسربات في شبكات التوزيع المترامية الأطراف، والتنبؤ بنقص المياه، وتحسين كفاءة عمليات التحلية، وتقليل بصمتها البيئية. على سبيل المثال، يمكن لخوارزميات التعلم الآلي تحليل بيانات الاستهلاك التاريخية والظروف الجوية للتنبؤ بالطلب المستقبلي على المياه بدقة أكبر، مما يسمح بتحسين إدارة الموارد وتقليل الهدر.

---

(١) البنك الدولي، ندرة المياه في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا: التحديات والفرص، تم الاسترجاع من https://www.worldbank.org / (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

(٢) اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا (الإسكوا)، تأثيرات تغير المناخ في المنطقة العربية: تقييم واستراتيجيات التكيف، تم الاسترجاع من https://www.unescwa.org/publications/ (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

الشكل (١٣): الضغوط البيئية الرئيسية في المنطقة العربية



أيقونة قطرة ماء فوق شمال أفريقيا: «١٧ من أصل ٢٢ دولة عربية تقع تحت خط الفقر المائي».

٢.٢.٨ الانبعاثات الكربونية المرتفعة: تحدي الاقتصادات المعتمدة على الوقود الأحفوري:

بينما تساهم المنطقة بحوالي ٥٪ من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري العالمية، فإن نصيب الفرد من الانبعاثات يعد من بين الأعلى في العالم:

تمتلك قطر واحدة من أعلى معدلات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون للفرد، تقدر بـ ٢٣,٥ طن متري للشخص الواحد[١].

(١) أطلس الكربون العالمي، «انبعاثات ثاني أكسيد الكربون حسب البلد،» تم الاسترجاع من http://www.globalcarbonatlas.org / (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

تعد المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة أيضاً من بين أعلى الدول من حيث نصيب الفرد من الانبعاثات، على الرغم من المبادرات الأخيرة في مجال الطاقة النظيفة.

يؤدي التوسع الحضري السريع، وتحلية المياه كثيفة الاستهلاك للطاقة، والاعتماد الكبير على الوقود الأحفوري إلى زيادة الانبعاثات.

لا تزال اقتصادات المنطقة تعتمد بشكل كبير على صادرات الهيدروكربونات، مما يعقد جهود التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون.

المتداعيات: هناك حاجة ملحة للتحول نحو الطاقة المتجددة والتقنيات منخفضة الكربون. يمكن للذكاء الاصطناعي تحسين أنظمة الطاقة، وتعزيز تكامل مصادر الطاقة المتجددة (مثل التنبؤ الدقيق بإنتاج الطاقة الشمسية وطاقة الرياح لتحقيق الاستقرار في الشبكة)، ودعم تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه. على سبيل المثال، يمكن للذكاء الاصطناعي تحسين تشغيل محطات الطاقة الشمسية الكبيرة من خلال التنبؤ بتغطية السحب وتعديل زوايا الألواح لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة.

٣.٢.٨ التصحر وتدهور الأراضي: تهديد للأمن الغذائي والنظم البيئية:

- يؤثر التصحر على ما يقرب من ٦٨٪ من إجمالي مساحة الأراضي في المنطقة العربية.
- يؤدي فقدان الأراضي الصالحة للزراعة إلى انعدام الأمن الغذائي، والهجرة الريفية، وانهيار النظم البيئية.
- في شمال أفريقيا، يُفقد نحو مليون هكتار من الأراضي المنتجة بسبب التصحر كل عام. هذا يعادل مساحة لبنان تقريباً، مما يوضح حجم المشكلة.
- يؤدي الرعي الجائر، وممارسات الري غير الملائمة، وتغير المناخ إلى تسريع تدهور الأراضي.

- تقدر التكلفة الاقتصادية لتدهور الأراضي في المنطقة بـ ٩ مليارات دولار سنوياً [١].

التداعيات: تعد الإدارة الذكية للأراضي، والزراعة الدقيقة، وتقنيات التكيف مع المناخ أمراً بالغ الأهمية. يمكن للذكاء الاصطناعي مراقبة التغيرات في الغطاء الأرضي باستخدام صور الأقمار الصناعية، وتحسين جهود استعادة الأراضي المتدهورة (مثل تحديد المناطق ذات الأولوية للتشجير بناءً على عوامل متعددة)، ودعم الزراعة المقاومة للمناخ (مثل تطوير أصناف محاصيل تتحمل الجفاف والملوحة).

٤.٢.٨ التوسع الحضري وضغط البنية التحتية: مدن تنمو بسرعة وتواجه تحديات متزايدة:

- ينمو سكان الحضر بنسبة ٢,٥٪ سنوياً، وهو أحد أعلى معدلات التوسع الحضري على مستوى العالم [٢].
- تواجه مدن مثل القاهرة والرياض والدار البيضاء ضغوطاً هائلة على البنية التحتية، بما في ذلك زيادة تلوث الهواء، والازدحام المروري، وأزمات إدارة النفايات.
- يتزايد استهلاك الطاقة في المناطق الحضرية بشكل كبير: تمثل المدن في المنطقة العربية حوالي ٨٠٪ من استهلاك الطاقة الوطني.
- تؤوي المستوطنات غير الرسمية (السكن العشوائي) ما يصل إلى ٦٠٪ من سكان الحضر في بعض البلدان، مما يخلق تحديات في تقديم الخدمات والإدارة البيئية.

---

(١) اتفاقية الأمم المتحدة لمكافحة التصحر (UNCCD)، تدهور الأراضي في المنطقة العربية: الحالة والاتجاهات، تم الاسترجاع من https://www.unccd.int / (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

(٢) برنامج الأمم المتحدة للمستوطنات البشرية (موئل الأمم المتحدة)، «تقرير حالة المدن العربية،» تم الاسترجاع من https://unhabitat.org/ (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

- تؤدي تأثيرات الجزر الحرارية الحضرية إلى تفاقم آثار تغير المناخ في المدن عبر المنطقة، مما يجعلها أكثر سخونة من المناطق الريفية المحيطة بها ويزيد من مخاطر الإجهاد الحراري على السكان.

التداعيات: تعد مبادرات المدن الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي ضرورية لتحسين أنظمة الطاقة والنقل والنفايات مع تحسين نوعية الحياة الحضرية والاستدامة. يمكن للذكاء الاصطناعي، على سبيل المثال، تحسين تدفق حركة المرور من خلال أنظمة إشارات المرور التكيفية، وتحسين طرق جمع النفايات، وإدارة استهلاك الطاقة في المباني بشكل أكثر كفاءة.

٨. ٢ . ٥ التعرض لتغير المناخ: منطقة في خط المواجهة:

تعتبر المنطقة العربية معرضة بشدة لتأثيرات تغير المناخ:

من المتوقع أن ترتفع متوسط درجات الحرارة السنوية بمقدار ٤ درجات مئوية بحلول نهاية القرن في ظل سيناريوهات الانبعاثات العالية[١].

يهدد ارتفاع مستوى سطح البحر المناطق الساحلية المنخفضة مثل الإسكندرية (مصر)، والبصرة (العراق)، وتونس (تونس)، مما قد يؤدي إلى نزوح الملايين.

زيادة تواتر وشدة حالات الجفاف والفيضانات والعواصف الرملية والترابية (SDS) يمكن ملاحظتها بالفعل في جميع أنحاء المنطقة.

من المتوقع أن تنخفض إنتاجية المياه والمحاصيل الزراعية بنسبة تصل إلى ٣٠٪ بحلول عام ٢٠٥٠ دون اتخاذ تدابير تكيف [٢].

(١) الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)، تغير المناخ ٣٢٠٢: التقييم الإقليمي للشرق الأوسط وشمال أفريقيا، مطبعة جامعة كامبريدج (٣٢٠٢).

(٢) منظمة الأغذية والزراعة (الفاو)، حالة الأغذية والزراعة في المنطقة العربية، تم الاسترجاع من https://www.fao.org/publications/ (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

التداعيـــات: هناك حاجة إلى نماذج مناخية تنبؤية، وأنظمة إنذار مبكر ذكية للكوارث، وابتكارات زراعية مستدامة. يمكن للذكاء الاصطناعي تعزيز النمذجة المناخية الإقليمية عالية الدقة، وتحسين أنظمة الإنذار المبكر (مثل التنبؤ بالعواصف الترابية الشديدة قبل أيام)، وإدارة الموارد التكيفية (مثل تعديل تخصيص المياه بناءً على توقعات الجفاف).

يوضح الجدول أدناه ملخص للتحديات البيئية الرئيسية.

الجدول (٣) : جدول ملخص للتحديات البيئية الرئيسية

التحـــدي	الإحصائية الرئيسية	المـرجـع
ندرة المياه	١٧ من ٢٢ دولة عربية تحت خط فقر المياه	1 (2023) WRI
الانبعاثات الكربونية	قطر: ٣٢,٥ طن متري من ثاني أكسيد	Global Carbon Atlas
المرتفعة	الكربون للفرد	(2023) [4]
التصحر	٦٨٪ من الأراضي العربية متأثرة	UNCCD (2023) [5]
التوسع الحضري السريع	معدل نمو حضري ٢,٥٪	UN-Habitat (2023) [6]
التعرض لتغير المناخ	ارتفاع متوقع في درجة الحرارة بمقدار ٤ درجات مئوية بحلول عام ٢١٠٠	IPCC (2023) [7]

٣.٨. المبادرات الحالية للذكاء الاصطناعي والبيئة في المنطقة العربية:

بدأت العديد من الدول العربية في دمج الذكاء الاصطناعي في استراتيجياتها البيئية والاستدامة، وإن كان ذلك بمناهج وأولويات ومستويات تنفيذ متفاوتة.

١.٣.٨ الإمارات العربية المتحدة:

وضعت الإمارات نفسها كرائدة إقليمية في تطبيق الذكاء الاصطناعي لمواجهة التحديات البيئية:

- الاستراتيجية الوطنية للذكاء الاصطناعي ٢٠٣١ تستهدف صراحة المدن الذكية، وتحسين الطاقة المتجددة، وحماية البيئة كمجالات تطبيق رئيسية.
- مدينة مصدر في أبو ظبي تعمل كمختبر حي للاستدامة الحضرية القائمة على الذكاء الاصطناعي والتنمية المحايدة للكربون، وتتضمن شبكات ذكية، ونقل ذاتي القيادة، وإدارة ذكية للمباني.
- استراتيجية دبي للطاقة النظيفة ٢٠٥٠ تستفيد من الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالطاقة المتجددة، وإدارة الشبكات الذكية، وتحسين كفاءة الطاقة.
- جامعة محمد بن زايد للذكاء الاصطناعي (MBZUAI) أنشأت برامج بحثية مخصصة للذكاء الاصطناعي من أجل العمل المناخي والاستدامة[١].

دراسة حالة: إدارة المياه المدعومة بالذكاء الاصطناعي في دبي الذكية

نفذت بلدية دبي نظام ذكاء اصطناعي يراقب جودة المياه، ويتنبأ بأنماط الاستهلاك، ويكتشف التسربات عبر شبكة المياه في المدينة. قلل النظام من هدر المياه بنسبة ٢٠٪ وحسّن وقت الاستجابة لمشكلات جودة المياه بنسبة ٦٠٪. وقد تم توسيع هذا النظام ليشمل تحسين جداول الري في الحدائق العامة والمساحات الخضراء، مما أدى إلى توفير إضافي في استهلاك المياه بنسبة ١٥٪ في هذه المناطق.

(١) جامعة محمد بن زايد للذكاء الاصطناعي (MBZUAI)، «الذكاء الاصطناعي للعمل المناخي: تقرير بحثي،» تم الاسترجاع من https://mbzuai.ac.ae / (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

٢.٣.٨ المملكة العربية السعودية - نيوم وما بعدها:

تقوم المملكة العربية السعودية باستثمارات كبيرة في الذكاء الاصطناعي والاستدامة، لا سيما من خلال مشروعها الطموح نيوم:

- مدينة نيوم تستخدم الذكاء الاصطناعي لإعادة تأهيل الصحراء، وتعزيز الطاقة المتجددة، والبنية التحتية الذكية، وتهدف إلى أن تعمل بالطاقة المتجددة بنسبة ١٠٠٪.
- رؤية المملكة العربية السعودية ٢٠٣٠ تعزز الذكاء الاصطناعي للتحول إلى الطاقة النظيفة، والحفاظ على المياه، والتنمية الحضرية المستدامة.
- الهيئة السعودية للبيانات والذكاء الاصطناعي (SDAIA) أطلقت مبادرات لتطبيق الذكاء الاصطناعي في المراقبة البيئية وإدارة الموارد.
- جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية (KAUST) تقود الأبحاث حول تطبيقات الذكاء الاصطناعي للزراعة الصحراوية، وتحسين الطاقة الشمسية، والحفاظ على المياه[١].

دراسة حالة: الذكاء الاصطناعي للزراعة الصحراوية في كاوست

طور باحثو كاوست أنظمة ذكاء اصطناعي تحسن الري في البيئات الصحراوية من خلال تحليل رطوبة التربة، وأنماط الطقس، وبيانات صحة النبات. أدت عمليات النشر الأولية إلى تقليل استخدام المياه بنسبة تصل إلى ٥٣٪ مع الحفاظ على غلة المحاصيل أو تحسينها. علاوة على ذلك، يتم استخدام طائرات بدون طيار مزودة بكاميرات متعددة الأطياف وذكاء اصطناعي للكشف المبكر عن إجهاد النباتات والآفات، مما يسمح بالتدخل المستهدف وتقليل استخدام المبيدات.

(١) جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية (كاوست)، الذكاء الاصطناعي للزراعة الصحراوية: نتائج البحث والتطبيقات، تم الاسترجاع من https://www.kaust.edu.sa / (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

٨.٣.٣ قطر - الذكاء الاصطناعي لكفاءة الموارد:

دمجت قطر الذكاء الاصطناعي في استراتيجيتها البيئية، مع التركيز على كفاءة الموارد:

- استراتيجية قطر الوطنية للذكاء الاصطناعي تربط نشر الذكاء الاصطناعي بالأهداف البيئية، بما في ذلك إدارة المياه، ومراقبة انبعاثات الكربون، ومعايير المباني الخضراء.
- معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة (QEERI) يطبق الذكاء الاصطناعي على التنبؤ بالطاقة الشمسية، ومراقبة جودة الهواء، وإدارة المياه [١].
- معهد قطر لبحوث الحوسبة (QCRI) يطور أدوات الذكاء الاصطناعي للنمذجة المناخية وتحليل البيانات البيئية.
- تشمل المشاريع تحلية المياه المحسنة بالذكاء الاصطناعي والزراعة الذكية قيد التنفيذ، لمعالجة التحديات البيئية المحددة في قطر.

دراسة حالة: التنبؤ الشمسي المعزز بالذكاء الاصطناعي في معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة

طور معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة نظام ذكاء اصطناعي يتنبأ بإنتاج الطاقة الشمسية بدقة أكبر بنسبة ٣٠٪ من الطرق التقليدية، مما يتيح تكاملاً أفضل للطاقة الشمسية في شبكة الطاقة القطرية وتقليل الاعتماد على الغاز الطبيعي. كما يتم استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين عمليات تنظيف الألواح الشمسية، وهو أمر بالغ الأهمية في البيئات الصحراوية المتربة، مما يضمن أقصى قدر من الكفاءة.

---

(١) معهد قطر لبحوث البيئة والطاقة (QEERI)، تطبيقات الذكاء الاصطناعي لتحسين الطاقة الشمسية، تم الاسترجاع من https://www.hbku.edu.qa/en/qeeri (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

٨. ٣ . ٤ مصر - التقارب الناشئ بين الذكاء الاصطناعي والبيئة:

تدمج مصر بشكل متزايد الذكاء الاصطناعي في استراتيجياتها البيئية والتنموية:

- استراتيجية مصر للذكاء الاصطناعي ٢٠٣٠ تؤكد على التطبيقات في الزراعة، وإدارة موارد المياه، والمرونة المناخية.
- العاصمة الإدارية الجديدة تدمج الشبكات الذكية المدفوعة بالذكاء الاصطناعي، والمساحات الخضراء، والتخطيط الحضري المستدام.
- المؤسسات البحثية مثل جامعة النيل تطور تطبيقات الذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة المياه، والزراعة الدقيقة، واستصلاح الصحراء.
- المركز القومي لبحوث المياه يوظف الذكاء الاصطناعي لإدارة مياه النيل وتحسين الري.

دراسة حالة: الذكاء الاصطناعي لإدارة مياه النيل

نفذت وزارة الموارد المائية والري المصرية نظام ذكاء اصطناعي يحسن تخصيص المياه من النيل، ويتنبأ بأنماط الفيضانات والجفاف، ويراقب جودة المياه. حسّن النظام كفاءة توزيع المياه بنسبة ١٥٪ وقدم تحذيرات فيضانات مبكرة. بالإضافة إلى ذلك، يتم استخدام الذكاء الاصطناعي لتحليل صور الأقمار الصناعية لمراقبة نمو النباتات المائية الضارة مثل ورد النيل، مما يساعد في جهود المكافحة وحماية تدفق المياه.

٨. ٣ . ٥ المغرب - الريادة في الذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة:

برز المغرب كرائد في مجال الطاقة المتجددة في أفريقيا، ويدمج الذكاء الاصطناعي بشكل متزايد:

- يقود المغرب أفريقيا في مجال الطاقة المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية (محطة نور ورزازات، واحدة من أكبر المحطات في العالم).

- المبادرات الناشئة تستخدم الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بإنتاج الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وتحسين إدارة الشبكة.
- جامعة محمد السادس متعددة التخصصات التقنية (P6MU) تستثمر في الذكاء الاصطناعي للزراعة الدقيقة، والتنبؤ بالجفاف، وممارسات التعدين المستدامة[1].
- مخطط المغرب الأخضر يدمج الذكاء الاصطناعي للزراعة الذكية مناخياً والحفاظ على المياه.

دراسة حالة: الذكاء الاصطناعي لمقاومة الجفاف في جامعة محمد السادس متعددة التخصصات التقنية

طور باحثو جامعة محمد السادس متعددة التخصصات التقنية نظام ذكاء اصطناعي يتنبأ بظروف الجفاف قبل ستة أشهر بدقة ٨٠٪، مما يسمح للمزارعين بتعديل جداول الزراعة واستخدام المياه وفقاً لذلك. كما يتم تطوير نماذج ذكاء اصطناعي للتوصية بأفضل ممارسات الحفاظ على التربة والمياه للمزارعين بناءً على الظروف المحلية المتوقعة.

٨.٣.٦ الأردن - الذكاء الاصطناعي للتكيف مع المناخ:

يواجه الأردن نقصاً حاداً في المياه ويستفيد من الذكاء الاصطناعي للتكيف:

- يواجه الأردن نقصاً حاداً في المياه ويستثمر في الذكاء الاصطناعي لتعزيز كفاءة الري ومراقبة صحة طبقات المياه الجوفية.
- مركز الأردن للابتكار المناخي يدعم الشركات الناشئة في مجال الذكاء الاصطناعي التي تركز على تحديات المياه والزراعة والطاقة.

(١) جامعة محمد السادس متعددة التخصصات التقنية (٦)، أنظمة التنبؤ بالجفاف باستخدام الذكاء الاصطناعي، تم الاسترجاع من https://www.um6p.ma / (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٢٠٢٥).

- الجمعية العلمية الملكية تطور تطبيقات الذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة المياه والحفاظ عليها.
- وزارة البيئة تنفذ أنظمة قائمة على الذكاء الاصطناعي لمراقبة جودة الهواء ومكافحة التلوث.

دراسة حالة: مراقبة طبقات المياه الجوفية المدعومة بالذكاء الاصطناعي

نشرت سلطة المياه الأردنية نظام ذكاء اصطناعي يراقب مستويات المياه الجوفية، ويتنبأ بمعدلات النضوب، ويحسن الاستخراج. حسّن النظام إدارة طبقات المياه الجوفية ومدّد العمر المتوقع لموارد المياه الرئيسية. ويتم استكشاف استخدام الذكاء الاصطناعي أيضاً لتحسين كفاءة شبكات توزيع المياه وتقليل الفاقد الذي يعد مشكلة كبيرة في الأردن.

٧.٣.٨ تونس وعُمان - خطوات ناشئة:

في كل من تونس وسلطنة عُمان، تتخذ الحكومات والجامعات خطوات ناشئة لاستكشاف استخدام الذكاء الاصطناعي في تعزيز الاستدامة البيئية:

تونس: أطلقت وزارة البيئة والمجتمع المدني مشاريع لمراقبة التلوث الهوائي باستخدام الذكاء الاصطناعي بالتعاون مع شركاء أوروبيين. كما تحتضن الجامعات التونسية بحوثًا حول استخدام الذكاء الاصطناعي لتحسين استهلاك الطاقة في المباني والتخطيط الحضري المستدام [١].

عُمان: تسعى السلطنة إلى تعزيز قدراتها في الذكاء الاصطناعي ضمن رؤيتها المستقبلية «عُمان ٢٠٤٠»، وتشمل هذه الجهود مشاريع لمراقبة جودة الهواء والبحار، وتحسين إدارة النفايات، خصوصًا عبر مبادرات المديرية العامة للبيئة ومراكز الابتكار [٢].

(1) Ministry of Environment of Tunisia, “Projet de surveillance intelligente de la qualité de l’air,” Tunis: Government of Tunisia, 2024.

(2) Oman Vision 2040 Implementation Follow-up Unit. “AI and Environmental Sustainability in Oman.” Muscat: Government of Oman, 2023.

٨.٣.٨ دول عربية أخرى: جهود ناشئة ومتفاوتة

إلى جانب الدول المذكورة سابقًا، تشهد دول عربية أخرى جهودًا متفرقة لكنها واعدة في مجال الذكاء الاصطناعي البيئي:

البحرين: أطلقت الحكومة مبادرات رقمية مثل برنامج الحكومة الذكية، وتسعى لاستخدام الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة استهلاك الطاقة والمياه، لا سيما في المناطق الصناعية والسكنية [١].

الكويت: بالرغم من غياب استراتيجية وطنية شاملة، تعمل بعض الجهات الأكاديمية والهيئات البيئية على توظيف الذكاء الاصطناعي في مراقبة جودة الهواء وتحسين استهلاك الطاقة [٢].

الجزائر: تستثمر في الطاقة الشمسية، وهناك جهود أكاديمية لاستخدام الذكاء الاصطناعي في تحسين الأداء البيئي لمحطات الطاقة المتجددة [٣].

لبنان: رغم الأزمة الاقتصادية، تستمر بعض الجامعات ومراكز البحث في استخدام الذكاء الاصطناعي لرصد التلوث البحري والنفايات [٤].

العراق: بالتعاون مع منظمات دولية، بدأ استخدام الذكاء الاصطناعي في مراقبة التصحر وحرائق الغابات عبر صور الأقمار الصناعية [٥].

(1) Kingdom of Bahrain Information & eGovernment Authority. Smart Government Strategy 2021–2024. Manama: Government of Bahrain. https://www.iga.gov.bh/

(2) Kuwait Institute for Scientific Research. Environmental and Energy Efficiency Programs. Accessed June 2025. https://www.kisr.edu.kw/

(3) University of Science and Technology Houari Boumediene. “Renewable Energy and AI Integration in Algeria.” Journal of North African Environmental Studies, 2023.

(4) American University of Beirut (AUB). “AI for Marine Waste Detection.” AUB Research Highlights, 2024.

(5) United Nations Environment Programme – West Asia Office. “Iraq’s AI-driven Drought and Desertification Monitoring.” UNEP, 2023.

الجدول (٤) : نقاط القوة والفجوات المقارنة عبر الدول العربية

الفجوات / التحديات	نقاط القوة
الحاجة إلى أنظمة وطنية لتبادل البيانات البيئية للذكاء الاصطناعي، بناء القدرات التقنية	دفع حكومي قوي للمدن الذكية الخضراء، التركيز على إدارة المياه
توسيع استخدام الذكاء الاصطناعي في قطاعات التنوع البيولوجي، معالجة الفجوة الرقمية بين الريف والحضر	الريادة في الطاقة المتجددة، الذكاء الاصطناعي لتحسين الشبكة، التطبيقات الزراعية
بنية تحتية محدودة للذكاء الاصطناعي للقضايا البيئية الأوسع، قيود التمويل	التركيز على تطبيقات الذكاء الاصطناعي في المياه والزراعة، التكيف مع المناخ
توسيع نطاق الحلول على المستوى الوطني، الربط بأهداف التنوع البيولوجي، تطوير إطار السياسات	ابتكار التكنولوجيا الزراعية باستخدام الذكاء الاصطناعي، إدارة السواحل.
الحاجة إلى استراتيجية وطنية للذكاء الاصطناعي تربط الاستدامة بشكل صريح، بناء القدرات التقنية	الذكاء الاصطناعي في إدارة الكوارث والحفاظ على المياه، مراقبة الحياة البرية

يوضح الجدول (٣) نقاط القوة والفجوات المقارنة عبر الدول العربية.

٨. ٤ . الأطر الاستراتيجية وخرائط الطريق للاستدامة المدفوعة بالذكاء الاصطناعي:

نظراً للإلحاح البيئي والإمكانات التكنولوجية في جميع أنحاء العالم العربي، هناك حاجة إلى إطار منهجي على مستوى المنطقة لضمان أن يكون الذكاء الاصطناعي حافزاً للاستدامة البيئية. فيما يلي خارطة طريق عملية ومنظمة لكيفية تسخير المنطقة العربية للذكاء الاصطناعي بفعالية وإنصاف من أجل مستقبل أكثر اخضراراً:

٨. ٤ . ١ إنشاء منصات إقليمية للذكاء الاصطناعي البيئي:

الإجراء: إنشاء منصات رقمية مشتركة عبر الدول العربية من أجل:

- تجميع البيانات البيئية (المناخ، التنوع البيولوجي، المياه، جودة الهواء).
- مشاركة نماذج الذكاء الاصطناعي (أدوات مفتوحة المصدر للتطبيقات البيئية).
- دمج العلوم المواطنية (ربط المجتمعات المحلية بجمع البيانات).

مثـــال: يمكن لـ «مرصد الذكاء الاصطناعي البيئي العربي الشامل» أن يعمل مثل مبادرة كوبرنيكوس الأوروبية ولكن يتم تكييفه مع النظم البيئية العربية، مع وحدات متخصصة للبيئات الصحراوية والمناطق الساحلية والمناطق الحضرية. يمكن أن يوفر هذا المرصد بيانات موحدة ونماذج تحليلية للباحثين وصانعي السياسات في جميع أنحاء المنطقة.

التأثيـــــر:

- يقلل من ازدواجية الجهود عبر البلدان.
- يعزز جمع البيانات وتحليلها بشكل موحد.
- يعزز المرونة البيئية الجماعية من خلال المعرفة المشتركة.
- يخلق وفورات الحجم في تطوير الذكاء الاصطناعي.

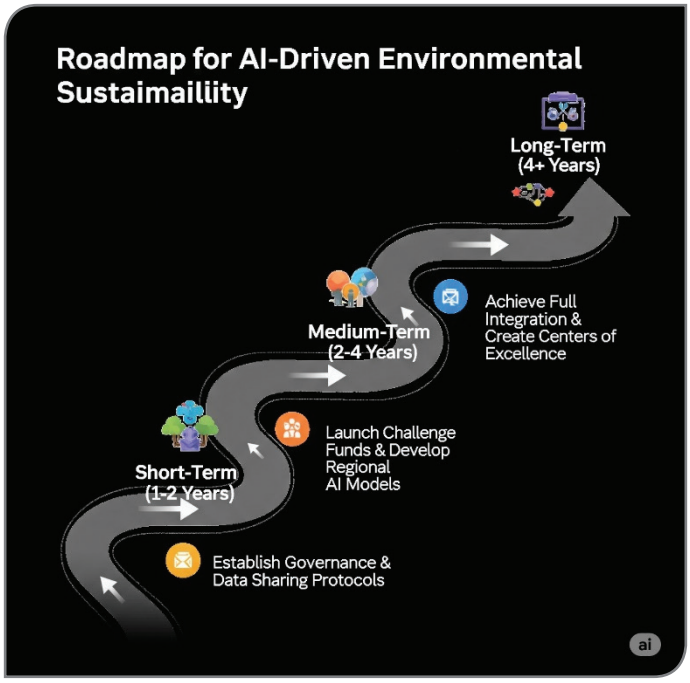
الجدول الزمني للتنفيذ:

- المدى القصير (١-٢ سنوات): إنشاء هيكل حوكمة وبروتوكولات أولية لتبادل البيانات.
- المدى المتوسط (٢-٤ سنوات): تطوير نماذج ذكاء اصطناعي متخصصة للتحديات البيئية الإقليمية.

- المدى الطويل (٤+ سنوات): التكامل الكامل مع أنظمة المراقبة البيئية العالمية.

الشكل (١٤):

خريطة طريق للاستدامة البيئية المدفوعة بالذكاء الاصطناعي



- المدى القصير (١-٢ سنة): وضع بروتوكولات الحوكمة ومشاركة البيانات.
- المدى المتوسط (٢-٤ سنوات): إطلاق صناديق التحدي وتطوير نماذج ذكاء اصطناعي إقليمية.
- المدى الطويل (أكثر من ٤ سنوات): تحقيق التكامل الكامل وإنشاء مراكز التميز.

٢.٤.٨ إطلاق صناديق تحدي الذكاء الاصطناعي من أجل الاستدامة:

الإجـــراء: تقوم الحكومات والمؤسسات الخيرية والقطاع الخاص بتجميع الموارد لتمويل الشركات الناشئة والباحثين والمنظمات غير الحكومية التي تستخدم الذكاء الاصطناعي من أجل:

- الزراعة الذكية والأمن الغذائي (مثل تحسين استخدام المياه والأسمدة، والتنبؤ بغلة المحاصيل).
- الحفاظ على التنوع البيولوجي واستعادة النظم البيئية (مثل مراقبة الأنواع المهددة بالانقراض، وتحديد المناطق ذات الأولوية للاستعادة).
- الاستدامة الحضرية والمرونة المناخية (مثل إدارة النفايات الذكية، وتحسين كفاءة الطاقة في المباني).

مثـــال: استلهاماً من مبادرة «AI Everything» في الإمارات، يمكن للصناديق الإقليمية العربية تحفيز مشاريع الذكاء الاصطناعي البيئية المبتكرة من خلال المنح والتمويل المبدئي ودعم التوسع، مع إيلاء اهتمام خاص للحلول التي تعالج ندرة المياه والتصحر. يمكن تنظيم مسابقات سنوية لتسليط الضوء على أفضل الابتكارات.

التـــأثيـــــر:

- يطلق العنان للنظم البيئية للابتكار المحلي.
- يشجع مشاركة الشباب في قطاعات التكنولوجيا الخضراء.
- ينوع تطبيقات الذكاء الاصطناعي خارج مراكز التكنولوجيا الكبرى.
- يخلق وظائف خضراء وفرصاً اقتصادية.

الجدول الزمني للتنفيذ:

- **المدى القصير:** إنشاء هيكل الصندوق وتحديد المجالات ذات الأولوية.
- **المدى المتوسط:** دعم الدفعة الأولى من المشاريع وتقييم النتائج.
- **المدى الطويل:** إنشاء نظام بيئي للابتكار مستدام ذاتياً بمشاركة القطاع الخاص.

٣.٤.٨ بناء شراكات عابرة للحدود في مجال الذكاء الاصطناعي والبيئة:

- **الإجراء:** إضفاء الطابع الرسمي على الشراكات بين:
- **الجامعات** (مثل كاوست، جامعة محمد بن زايد للذكاء الاصطناعي، جامعة محمد السادس متعددة التخصصات التقنية).
- **مراكز البحوث.**
- **وزارات البيئة.**
- **المنظمات الدولية** (مثل برنامج الأمم المتحدة للبيئة، اليونسكو).

الهـــدف: إجراء أبحاث مشتركة في مجال الذكاء الاصطناعي حول التحديات البيئية المشتركة مثل التصحر وندرة المياه وتآكل السواحل، مع التركيز على الحلول التي يمكن نشرها عبر بلدان متعددة. يمكن أن تشمل هذه الشراكات تبادل الباحثين والطلاب، وتطوير برامج دراسات عليا مشتركة.

التأثيـــر:

- يجمع بين الخبرة الأكاديمية واحتياجات السياسات الواقعية.
- تبادل أفضل الممارسات والدروس المستفادة عبر النظم البيئية المختلفة.
- يقوي التعاون العلمي الإقليمي.
- يجذب التمويل والخبرة الدولية.

الجدول الزمني للتنفيذ:

- **المدى القصير:** إنشاء أطر شراكة رسمية وتحديد أولويات الأبحاث
- **المدى المتوسط:** إطلاق مشاريع بحثية مشتركة وتجارب تنفيذية
- **المدى الطويل:** إنشاء مراكز امتياز إقليمية دائمة للذكاء الاصطناعي البيئي

٨. ٤ . ٤ تطوير سياسات ذكاء اصطناعي أخلاقية وشاملة للبيئة:

- **الإجراء:** تصميم أطر تنظيمية تضمن:
- **الشفافية في خوارزميات الذكاء الاصطناعي** المستخدمة في القرارات البيئية.
- **الشمولية**، وخاصة إشراك المجتمعات المهمشة في حوكمة البيانات.
- **الاستخدام الأخلاقي للذكاء الاصطناعي** الذي يحترم التنوع البيولوجي والمعرفة الأصلية والنظم البيئية الطبيعية.
- **النشر المسؤول** الذي يقلل من البصمة البيئية للذكاء الاصطناعي نفسه.

مثـــال: تكييف توصية اليونسكو بشأن أخلاقيات الذكاء الاصطناعي (٢٠٢١)[١] في مبادئ توجيهية وطنية وإقليمية خاصة بالتطبيقات البيئية، مع إيلاء اهتمام خاص لحقوق المياه، واستخدام الأراضي، والعدالة المناخية. يمكن إنشاء لجان أخلاقية وطنية لمراجعة مشاريع الذكاء الاصطناعي البيئية الكبرى.

التأثيـــر:

- يبني ثقة الجمهور في جهود الاستدامة المدفوعة بالذكاء الاصطناعي.
- يمنع الأضرار البيئية أو الاجتماعية غير المقصودة من الأنظمة سيئة التصميم.

(١) اليونسكو، توصية بشأن أخلاقيات الذكاء الاصطناعي، تم الاسترجاع من https://en.unesco.org/artificial-intelligence/ethics (تم الوصول إليه في ٩ مايو ٥٢٠٢).

- يضمن توزيع فوائد الذكاء الاصطناعي بشكل منصف.
- يوائم التطور التكنولوجي مع القيم الثقافية والاجتماعية.

الجدول الزمني للتنفيذ:

- **المدى القصير:** تطوير مبادئ توجيهية أخلاقية أولية وأطر سياسات.
- **المدى المتوسط:** تنفيذ آليات تنظيمية وهيئات رقابية.
- **المدى الطويل:** إنشاء عمليات تقييم وتحسين مستمرة.

٨. ٤ . ٥ إنشاء برامج محو الأمية في الذكاء الاصطناعي الأخضر:

الإجراء: تطوير مبادرات تعليمية تجمع بين الوعي البيئي ومحو الأمية في الذكاء الاصطناعي:

- مناهج مدرسية تدمج علوم البيئة ومفاهيم الذكاء الاصطناعي.
- برامج جامعية في علوم البيانات البيئية.
- تدريب مهني للمديرين البيئيين في تطبيقات الذكاء الاصطناعي.
- ورش عمل مجتمعية حول العلوم المواطنية وأدوات الذكاء الاصطناعي.

مثـــال: يمكن لمبادرة «المهارات الرقمية الخضراء» توفير التدريب عبر المستويات التعليمية، من تطبيقات جمع البيانات البيئية الأساسية للمدارس إلى النمذجة المتقدمة للذكاء الاصطناعي للمهنيين. يمكن تطوير دورات تدريبية عبر الإنترنت متاحة للجميع (MOOCs) باللغة العربية.

التأثيـــــر:

- يبني القدرات البشرية لتنفيذ حلول الذكاء الاصطناعي البيئية.
- يسد الفجوة بين الخبرة التقنية والبيئية.

- يخلق مسارات للشباب في وظائف التكنولوجيا الخضراء.
- يمكّن المجتمعات من المشاركة في المراقبة البيئية.

الجدول الزمني للتنفيذ:

- **المدى القصير:** تطوير المناهج والمواد التدريبية.
- **المدى المتوسط:** تنفيذ البرامج في المؤسسات التعليمية والبيئات المهنية.
- **المدى الطويل:** إنشاء مسارات تعلم مستمرة وبرامج درجات علمية متخصصة.

٨.٥. التحديات والمخاطر الاستراتيجية في نشر الذكاء الاصطناعي: منظور متعدد الأبعاد

بينما يوفر الذكاء الاصطناعي إمكانات هائلة للاستدامة البيئية في المنطقة العربية، يواجه نشره تحديات ومخاطر كبيرة يجب معالجتها من خلال التخطيط والحوكمة المدروسة.

٨.٥.١ التحديات التقنية:

- **ندرة البيانات وجودتها:** تفتقر العديد من المعايير البيئية في المنطقة العربية إلى بيانات تاريخية كافية لتدريب الذكاء الاصطناعي بفعالية. تعاني المناطق النائية، على وجه الخصوص، من فجوات في المراقبة.
- **متطلبات البنية التحتية:** يعد الاتصال الموثوق به وموارد الحوسبة وإمدادات الطاقة من المتطلبات الأساسية لنشر الذكاء الاصطناعي غير أنها لا تزال غير متساوية عبر المنطقة.
- **تكامل الأنظمة:** يتطلب ربط أنظمة الذكاء الاصطناعي بالبنية التحتية الحالية للإدارة البيئية تكييفاً وتوحيداً تقنياً كبيراً.

- **تكييف النماذج:** قد يكون أداء نماذج الذكاء الاصطناعي المطورة في سياقات أخرى ضعيفاً في الظروف البيئية الفريدة للمنطقة العربية، مما يستلزم تطويرًا متخصصًا.

٨.٥.٢ الحواجـــز الاقتصادية:

- **التكاليف الأولية المرتفعة:** يتطلب تنفيذ أنظمة الذكاء الاصطناعي استثماراً أولياً كبيراً في الأجهزة والبرامج والخبرة والبنية التحتية.
- **عدم اليقين بشأن العائد على الاستثمار:** قد تستغرق الفوائد الاقتصادية للذكاء الاصطناعي البيئي سنوات لتتحقق، مما يخلق تحديات تمويلية.
- **الأولويات المتنافسة:** قد يتم توجيه الموارد المحدودة إلى احتياجات اقتصادية أكثر إلحاحاً بدلاً من الاستدامة البيئية طويلة الأجل.
- **تكاليف الصيانة والتحديث:** يتطلب ضمان بقاء أنظمة الذكاء الاصطناعي فعالة استثماراً مستمراً في التحديثات والتدريب والصيانة.

٨.٥.٣ الآثـــار الاجتماعية:

- **الفجوة الرقمية:** قد يعني الوصول غير المتكافئ إلى التكنولوجيا أن الفوائد البيئية المدفوعة بالذكاء الاصطناعي تصل بشكل أساسي إلى المجتمعات الحضرية والغنية.
- **مخاوف فقدان الوظائف:** قد تؤدي الأتمتة في قطاعات مثل الزراعة وإدارة المياه إلى نزوح العمال دون تخطيط انتقالي مناسب.
- **الثقة والقبول:** قد يحد الشك العام في الذكاء الاصطناعي من تبني التقنيات البيئية المفيدة.
- **الاعتبارات الثقافية:** يجب أن تحترم أنظمة الذكاء الاصطناعي المعرفة المحلية والتقاليد والممارسات المتعلقة بالإدارة البيئية.

٨. ٥ . ٤ المخاوف الأخلاقية:

- **خصوصية البيانات:** يمكن أن تجمع المراقبة البيئية عن غير قصد معلومات حساسة عن الأفراد والمجتمعات.
- **التحيز الخوارزمي:** قد تديم أنظمة الذكاء الاصطناعي التحيزات القائمة في صنع القرار البيئي أو تخصيص الموارد.
- **قضايا الشفافية:** قد تتخذ أنظمة الذكاء الاصطناعي «الصندوق الأسود» قرارات بيئية لا يستطيع أصحاب المصلحة فهمها أو الطعن فيها.
- **فجوات المساءلة:** لا يزال تحديد المسؤولية عندما تسبب التدخلات البيئية المدفوعة بالذكاء الاصطناعي ضرراً أمراً صعباً.

٨. ٥ . ٥ المخاطر الصحية (بمعنى أوسع):

- **الاعتماد المفرط على التكنولوجيا:** قد يقلل الاعتماد المفرط على الذكاء الاصطناعي من القدرة البشرية على الإدارة البيئية إذا فشلت الأنظمة.
- **التأثيرات النفسية:** قد تقلل الوساطة التكنولوجية المستمرة للعلاقات بين الإنسان والطبيعة من المشاركة المباشرة مع البيئات الطبيعية.
- **التعرض للمحتوى الضار:** قد تعرض أنظمة الذكاء الاصطناعي المستخدمين عن غير قصد لمعلومات مضللة حول القضايا البيئية.

٨. ٦ . الابتكارات الناشئة في الذكاء الاصطناعي من أجل مستقبل مستدام:

على الرغم من التحديات، تظهر العديد من ابتكارات الذكاء الاصطناعي الواعدة التي يمكن أن تحول الاستدامة البيئية في المنطقة العربية:

٨.٦.١ نماذج تحسين الذكاء الاصطناعي الأخضر:

أنظمة ذكاء اصطناعي مصممة خصيصاً لتقليل بصمتها البيئية من خلال:

- خوارزميات موفرة للطاقة.
- معماريات حوسبة محسنة.
- الحوسبة الطرفية لتقليل نقل البيانات.
- مراكز بيانات تعمل بالطاقة المتجددة.

مثال إقليمي: أبحاث جامعة محمد بن زايد للذكاء الاصطناعي حول نماذج الذكاء الاصطناعي الموفرة للطاقة لمراقبة البيئة الصحراوية التي يمكن تشغيلها على أجهزة طرفية تعمل بالطاقة الشمسية.

٨.٦.٢ احتجاز الكربون والحلول المناخية المدعومة بالذكاء الاصطناعي:

تطبيقات ذكاء اصطناعي متقدمة للتخفيف من آثار تغير المناخ:

- تحسين تقنيات الالتقاط المباشر للهواء.
- تعزيز مصارف الكربون الطبيعية من خلال الاستعادة الدقيقة (مثل تحديد أفضل المواقع والأنواع لإعادة التحريج).
- تصميم بنية تحتية مقاومة للمناخ.
- نمذجة حلقات التغذية الراجعة المناخية لتخطيط التدخل.

مثال إقليمي: نظام الذكاء الاصطناعي في كاوست لتحسين استعادة غابات المانجروف على طول ساحل البحر الأحمر، مما يزيد من إمكانات عزل الكربون.

٨.٦.٣ الوقاية التنبؤية من الكوارث:

- **أنظمة الذكاء الاصطناعي التي تتجاوز الإنذار المبكر إلى الوقاية:**
- التنبؤ بتأثير المناخ المحلي الفائق الدقة.
- تقييم ضعف البنية التحتية.
- أنظمة التدخل الآلي (مثل حواجز الفيضانات الذكية).
- تخطيط الإخلاء المحسن.

مثال إقليمي: نظام التنبؤ بالأعاصير المدفوع بالذكاء الاصطناعي في عمان والذي يتكامل مع تدابير حماية البنية التحتية الآلية.

٨.٦.٤ استعادة النظم البيئية بمساعدة الذكاء الاصطناعي:

- **أدوات الذكاء الاصطناعي التي تدعم تجديد النظم البيئية على نطاق واسع:**
- زراعة البذور بواسطة الطائرات بدون طيار المحسنة بالذكاء الاصطناعي.
- أنظمة الري الآلية لمشاريع الاستعادة.
- تصميم ممرات الحياة البرية باستخدام نمذجة الذكاء الاصطناعي.
- إدارة الأنواع الغازية من خلال التحليلات التنبؤية.

مثال إقليمي: نظام الذكاء الاصطناعي في الأردن لتحسين جهود إعادة تخضير الصحراء، وتحليل ظروف التربة، وأنماط الطقس، وتوافق أنواع النباتات.

٨.٦.٥ أنظمة الذكاء الاصطناعي المستوحاة من الأحياء:

مناهج الذكاء الاصطناعي التي تحاكي النظم الطبيعية:

- ذكاء السرب للمراقبة البيئية الموزعة.

- الخوارزميات التطورية لإدارة الموارد التكيفية.
- مناهج المحاكاة الحيوية للحفاظ على المياه.
- الشبكات العصبية المستوحاة من العلاقات البيئية.

مثال إقليمي: تطوير قطر لأنظمة ذكاء اصطناعي مستوحاة من استراتيجيات الحفاظ على المياه لدى الكائنات الصحراوية، وتطبيقها على إدارة المياه الحضرية.

٨.٦.٦ التعلم الموحد للبيانات البيئية:

مناهج الذكاء الاصطناعي التي تحافظ على الخصوصية وتمكن التعاون:

- التعلم الموزع عبر المنظمات دون مركزية البيانات الحساسة.
- المراقبة البيئية العابرة للحدود دون مشكلات سيادة البيانات.
- المراقبة البيئية المجتمعية مع التحكم المحلي في البيانات.
- دمج المعرفة البيئية التقليدية مع البيانات العلمية.

مثال إقليمي: مبادرة في شمال أفريقيا تستخدم التعلم الموحد لمراقبة موارد المياه العابرة للحدود مع احترام سيادة البيانات الوطنية.

٨.٧. ضمان أن يخدم الذكاء الاصطناعي الاستدامة، لا ضدها:

لكي يعزز الذكاء الاصطناعي الاستدامة البيئية حقاً في المنطقة العربية، يجب أن توجه عدة مبادئ تطويره ونشره:

٨.٧.١ تصميم أنظمة ذكاء اصطناعي موفرة للطاقة:

- إعطاء الأولوية للنماذج خفيفة الوزن المناسبة للنشر الطرفي.
- تطوير أجهزة متخصصة للتطبيقات البيئية.

- استخدام الطاقة المتجددة لتدريب واستدلال الذكاء الاصطناعي.
- تنفيذ ممارسات الحوسبة المدركة للطاقة.

أفضل ممارسة: المبادئ التوجيهية لدولة الإمارات العربية المتحدة بشأن الذكاء الاصطناعي الموفر للطاقة في التطبيقات الحكومية، والتي تتطلب قياس استهلاك الطاقة لجميع النماذج المنشورة.

٨.٧.٢ توجيه الذكاء الاصطناعي نحو حلول الاستدامة:

- تحديد أولويات بيئية واضحة لتمويل أبحاث الذكاء الاصطناعي.
- إنشاء حوافز لتطبيقات الذكاء الاصطناعي التي تركز على الاستدامة.
- تطوير مقاييس لقياس التأثير البيئي للذكاء الاصطناعي.
- دمج معايير الاستدامة في مشتريات الذكاء الاصطناعي.

أفضل ممارسة: اشتراط المملكة العربية السعودية أن تعالج ٤٠٪ من مشاريع الذكاء الاصطناعي الحكومية تحديات الاستدامة البيئية.

٨.٧.٣ ترسيخ مبادئ الذكاء الاصطناعي المسؤول:

- ضمان الشفافية في خوارزميات صنع القرار البيئي.
- تنفيذ تقييمات الإنصاف لأنظمة تخصيص الموارد.
- توفير ذكاء اصطناعي قابل للتفسير للتطبيقات البيئية.
- الحفاظ على الإشراف البشري على النظم البيئية الحيوية.

أفضل ممارسة: المبادئ التوجيهية الأخلاقية للمغرب بشأن الذكاء الاصطناعي في إدارة موارد المياه، والتي تتطلب خوارزميات قابلة للتفسير ومشاورات مجتمعية.

٨.٧.٤ تعزيز الأطر التنظيمية:

- تطوير معايير لتطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئية.
- إنشاء أنظمة اعتماد للذكاء الاصطناعي المستدام.
- إنشاء آليات رقابة للأنظمة عالية التأثير.
- مواءمة اللوائح عبر المنطقة.

أفضل ممارسة: مسودة إطار جامعة الدول العربية لحوكمة الذكاء الاصطناعي البيئي، والتي توفر تشريعات نموذجية للدول الأعضاء.

٨.٧.٥ تعزيز التعاون بين القطاعات:

- تعزيز الشراكات بين علماء البيئة وباحثي الذكاء الاصطناعي.
- إشراك المجتمعات في تصميم ونشر أنظمة الذكاء الاصطناعي.
- إنشاء منصات لتبادل المعرفة عبر القطاعات.
- تطوير برامج تدريبية متعددة التخصصات.

أفضل ممارسة: مركز الذكاء الاصطناعي البيئي في الأردن، الذي يجمع بين الوكالات الحكومية والجامعات والقطاع الخاص ومنظمات المجتمع المدني.

٨.٧.٦ بناء الوعي والتدريب على الذكاء الاصطناعي المستدام:

- دمج تعليم الذكاء الاصطناعي مع البيئة
- تطوير برامج تدريب مهني متخصصة
- إنشاء حملات توعية عامة حول تطبيقات الذكاء الاصطناعي البيئية
- دعم مبادرات التعلم المجتمعية

أفضل ممارسة: برنامج «المشرفون البيئيون الرقميون» في تونس، الذي يدرب الشباب على علوم البيئة وتطبيقات الذكاء الاصطناعي.

٨.٧.٧ رسالة إلى صنّاع القرار:

من أجل أن يتحول الذكاء الاصطناعي إلى أداة فاعلة في خدمة البيئة، لا بد أن يتوفر له حاضنة سياسية وتشريعية واقتصادية، تنطلق من خصوصيات العالم العربي. المطلوب اليوم ليس فقط نقل التقنية، بل تطوير حلول محلية تعبر عن واقعنا، وتستجيب لاحتياجاتنا، وتنبع من بيئتنا.

٨.٨. الخاتمـــة:

تقف المنطقة العربية عند منعطف حرج حيث تتلاقى التحديات البيئية والفرص التكنولوجية. من خلال تطوير أطر استراتيجية للاستدامة المدفوعة بالذكاء الاصطناعي، يمكن لدول المنطقة تحويل التهديدات البيئية إلى فرص للابتكار والمرونة والتنمية المستدامة. لا يتطلب المسار إلى الأمام الاستثمار التكنولوجي فحسب، بل يتطلب أيضاً حوكمة مدروسة ومشاركة شاملة وتعاوناً إقليمياً. لا يمكن للذكاء الاصطناعي وحده حل التحديات البيئية المعقدة التي تواجه العالم العربي، ولكن عند نشره بحكمة – مع الاهتمام بالأخلاقيات والإنصاف والسلامة البيئية – يمكن أن يصبح أداة قوية للتحول الإيجابي.

من خلال البناء على المبادرات القائمة، ومعالجة التحديات الاستراتيجية، وتبني الابتكارات الناشئة، يمكن للمنطقة العربية أن تكون رائدة في نموذج للاستدامة البيئية المدعومة بالذكاء الاصطناعي يحترم حدود الكوكب واحتياجات الإنسان. تقدم الأطر الموضحة في هذا الفصل خارطة طريق لهذه الرحلة – رحلة تتطلب الالتزام والتعاون ورؤية مشتركة لمستقبل مستدام مدعوم بالتكنولوجيا المسؤولة.

مع تقدمنا في فهم إمكانات الذكاء الاصطناعي في دعم الاستدامة البيئية، من الضروري النظر في التحديات المتقاطعة التي قد تنشأ على تقاطع الذكاء الاصطناعي مع البيئة والأمن السيبراني. كيف يمكننا حماية أنظمة الذكاء الاصطناعي البيئية من التهديدات الرقمية؟ ما هي المخاطر التي تواجه البنية التحتية الذكية في حال تعرضها للاختراق؟ وما هي المبادئ اللازمة لضمان أمان واستدامة تلك الأنظمة؟ سنجيب عن هذه التساؤلات في الفصل التاسع، حيث نناقش التحديات المتقاطعة للذكاء الاصطناعي والبيئة والأمن السيبراني. قبل أن نحتفل بالتحوّل، ننظر في المرآة: ما تكلفة الذكاء الاصطناعي نفسه؟ سنقيس البصمة الكربونية والمائية والعتادية ونستعرض حلول التخفيف.

الفصل التاسع

البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي

الفصل التاسع
البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي

٩.١. المقدمة

الذكاء الاصطناعي يعِد بكوكبٍ أنظف، لكنه يستهلك كهرباء وماء وعتادًا بكثافة. المفارقة حاضرة: كيف نضمن أن تكون «عوائد» الذكاء الاصطناعي البيئية أكبر من تكلفته على البيئة؟ وبذلك نعود إلى السؤال الذي طرحناه في المقدمة: هل يمكن للذكاء الاصطناعي أن يكون مستدامًا حقًا، أم أنه مجرد أداة تحمل في داخلها مفارقة بيئية عميقة؟

لماذا يهمّك هذا الفصل؟

- **صانع السياسات:** معايير إفصاح، وتوقيت تدريب واعٍ بالكربون، وربط بالطاقة المتجدّدة.
- **الأعمال:** كفاءة حوسبية ونماذج مصغّرة وخطط تبريد/تشغيل تقلّل الانبعاثات.
- **الأكاديميا/الطلاب:** منهجيات قياس دورة حياة ونماذج مقارنة بين سيناريوهات التشغيل

يُعد الذكاء الاصطناعي من أبرز الابتكارات التكنولوجية في عصرنا، واعدًا بتحولات جذرية في شتى مناحي الحياة، من الرعاية الصحية والتعليم إلى الصناعة والنقل[1]. ومع ازدياد قدراته وتطبيقاته، تشتد حدة النقاش حول أثره البيئي، لا سيما فيما يتعلق ببصمته الكربونية. فعلى الرغم من النظر إلى الذكاء الاصطناعي كأداة

(1) Lucilla Piccari, «The Bright and Dark Side of Artificial Intelligence,» Forbes, May 30, 2023.

قوية لمواجهة التحديات البيئية، إلا أنه يستهلك كميات هائلة من الطاقة، مما يثير تساؤلات جادة حول استدامته البيئية [١]. يهدف هذا الفصل إلى استكشاف شامل لبصمة الذكاء الاصطناعي الكربونية، مسلطًا الضوء على استهلاكه للطاقة، وأثر مراكز البيانات، ودورة حياة الأجهزة، والتحديات القانونية، والحلول المبتكرة الساعية إلى تحقيق توازن بين التقدم التكنولوجي والمسؤولية البيئية.

٩. ٢ . استهلاك الذكاء الاصطناعي للطاقة وانبعاثات الكربون:

أدى النمو السريع للذكاء الاصطناعي، ولاسيما النماذج اللغوية الكبيرة (LLMs) والتعلم العميق، إلى زيادة غير مسبوقة في الطلب على الطاقة [٢]. ويرجع هذا الارتفاع إلى متطلبات الحوسبة المكثفة لتدريب هذه النماذج وتشغيلها، مما يشكل ضغطًا كبيرًا على شبكات الكهرباء ويزيد من انبعاثات الكربون المرتبطة بإنتاج الكهرباء. [٣]

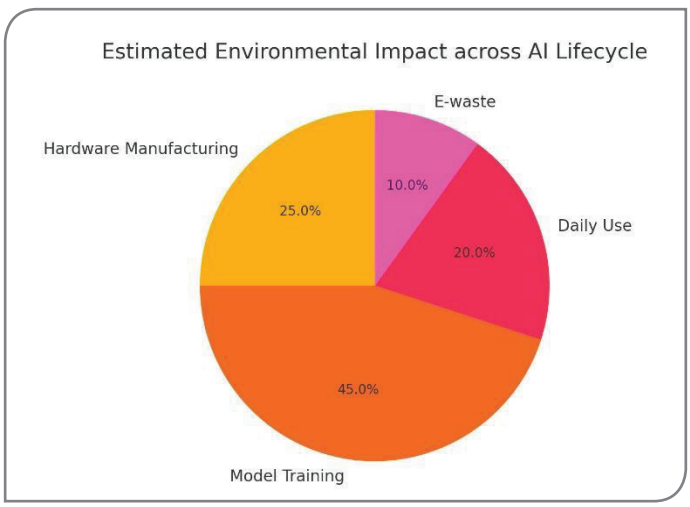
(1) Kate Saenko, «The Environmental Impact of AI,» Boston University, January 25, 2023.

(2) Karen Hao, «The computing power needed to train AI is now rising seven times faster than ever before,» MIT Technology Review, November 11, 2019.

(3) George Kamiya, «The AI revolution is consuming more and more energy. How can we limit its climate impact?» International Energy Agency (IEA), May 15, 2024.

الشكل (١٥)

رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib.
دورة حياة الذكاء الاصطناعي وتأثير كل مرحلة على البصمة البيئية.



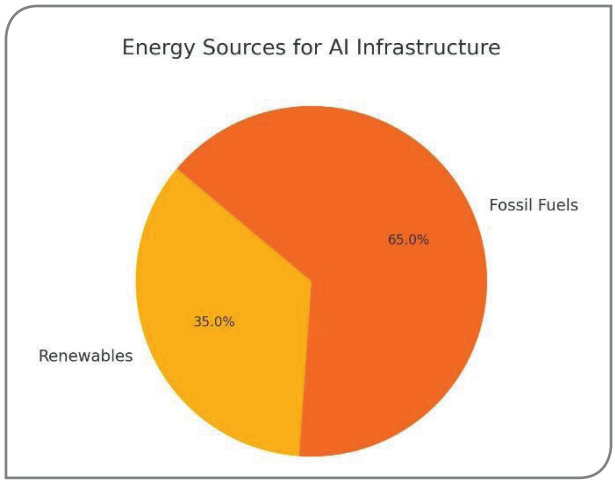
١٠٢٠٩ التحديات العامة في استهلاك الطاقة:

تُعد معضلة الكلفة مقابل الاستدامة من التحديات المركزية في مجال الذكاء الاصطناعي. فالنماذج الضخمة مثل ChatGPT تتطلب طاقة هائلة للتدريب والتشغيل.[١] ولا يشكل هذا الاستهلاك العالي عبئًا اقتصاديًا فحسب، بل يثير أيضًا مخاوف بيئية كبيرة، خاصةً إذا كانت مصادر الطاقة المستخدمة تعتمد الى حد كبير على الوقود الأحفوري[٢]. إن التوفيق بين الابتكار التكنولوجي وتقليل الأثر البيئي أصبح ضرورة ملحة تتطلب حلولاً مبتكرة وسياسات مستدامة.

(1) The Cost vs. Sustainability Dilemma: Large Models like ChatGPT Consume Enormous Energy, RW Digital, accessed July 17, 2025.

(2) Sasha Luccioni, «The mounting human and environmental costs of generative AI,» Hugging Face, accessed July 17, 2025.

الشكل (١٦): رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib. النسبة الحالية الإفتراضية لاستخدام الطاقة المتجددة مقابل الأحفورية



٢.٢.٩ مقارنات استهلاك الطاقة ChatGPT مقابل بحث Google :

لإدراك حجم استهلاك الذكاء الاصطناعي للطاقة، يمكن الرجوع إلى أمثلة محددة. يُقدّر أن استهلاك ChatGPT السنوي من الطاقة يبلغ نحو ٨,٢٢٦ جيجاواط ساعة [١]. تعادل هذه الكمية الطاقة اللازمة لشحن أكثر من ١٣,٣ مليون سيارة كهربائية، أو لتوفير الطاقة لنحو ٦٠٠،٢١ منزل أمريكي لمدة عام كامل [٢]. وعند مقارنة استهلاك الطاقة لكل عملية استعلام، فإن استعلامًا واحدًا باستخدام الذكاء الاصطناعي (مثل ChatGPT) يستهلك نحو ٩,٢ واط-ساعة، أي ما يعادل عشرة أضعاف ما يستهلكه بحث Google العادي، والذي يستهلك نحو ٣,٠ واط-

(1) ChatGPT›s annual energy consumption estimated at 226.8 GWh, Balkan Green Energy News, April 23, 2024.

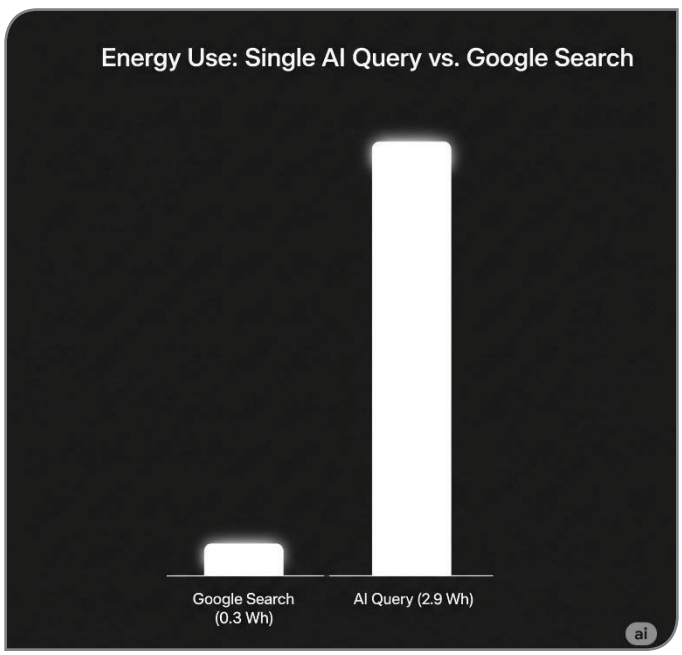
(2) Alex de Vries, «The growing energy footprint of artificial intelligence,» Joule 8, no. 10 (2024): 21912194-.

ساعة فقط [١]. تسلط هذه المقارنات الضوء على الفارق الكبير في متطلبات الطاقة بين التطبيقات التقليدية وتلك المبنية على نماذج الذكاء الاصطناعي الضخمة والمعقدة. وإذا كانت حصة كبيرة من هذه الطاقة تأتي من مصادر أحفورية، فقد تصل انبعاثات الكربون الناتجة إلى مئات الآلاف من أطنان ثاني أكسيد الكربون سنويًا، بناءً على متوسط كثافة الكربون في إنتاج الكهرباء عالميًا [٢].

الشكل (١٧):

رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib .

استهلاك الطاقة: استعلام واحد للذكاء الاصطناعي مقابل بحث جوجل



(1) Zachariah Blanchard, «A single AI query uses 10 times more electricity than a Google search. Here›s what that means for the environment,» Newscentermaine.com, February 1, 2024.

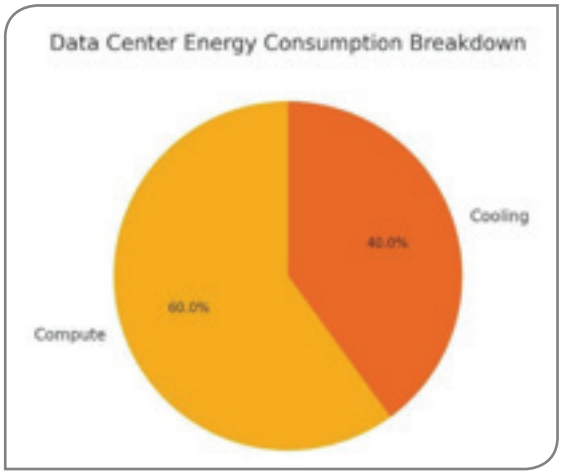
(2) U.S. Environmental Protection Agency, «Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References,» accessed July 17, 2025.

الشكل (١٦) يوضح شريطا صغيرا يمثل «بحث جوجل (٠,٣ واط/ساعة)» بجانب شريط أطول بحوالي عشرة أضعاف يمثل «استعلام الذكاء الاصطناعي (٩,٢ واط/ساعة)». يهدف التباين البصري إلى أن يكون فعالاً للغاية في إظهار الفرق.

٣.٢.٩ مراكز البيانات المخصصة للذكاء الاصطناعي:

تُعد مراكز البيانات العمود الفقري لتشغيل الذكاء الاصطناعي، وهي حاليًا من أكثر الكيانات استهلاكًا للطاقة. ويُقدّر أن استهلاك مراكز البيانات المخصصة للذكاء الاصطناعي يعادل استهلاك ١٠٠،٠٠٠ منزل [١]. ومع التوسع المستمر في تطوير ونشر تطبيقات الذكاء الاصطناعي، من المتوقع أن ترتفع هذه الأرقام بشكل كبير. وتُشير التقديرات إلى أن أكبر المراكز الجاري بناؤها قد تستهلك ما يعادل ٢٠ ضعف هذا الرقم، مما يؤكد الحاجة الملحة لتبني ممارسات أكثر استدامة في تصميم وتشغيل هذه المراكز [٢].

الشكل (١٨): رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib . نسبة الطاقة المستهلكة في مراكز البيانات بين الحوسبة والتبريد



(1) Ben Geman, «AI›s growing energy problem,» Axios, May 1, 2024.

(2) Ibid

يبين الشكل (١٨) أن التبريد يمثل حوالي ٤٠٪ من استهلاك الطاقة في مراكز البيانات، مما يبرز الحاجة لتقنيات تبريد أكثر كفاءة.

٩. ٣. الأثر البيئي لدورة حياة الذكاء الاصطناعي:

يتجاوز الأثر البيئي للذكاء الاصطناعي مجرد استهلاك الطاقة أثناء التشغيل، إذ تمتد تأثيراته إلى دورة حياته الكاملة، بدءًا من تصنيع الأجهزة وصولاً إلى التخلص منها [١]. ويتطلب فهم هذا الأثر تقييمًا دقيقًا لكل مرحلة لتحديد النقاط التي يمكن عندها الحد من التأثير السلبي.

٩. ٣. ١ تصنيع الأجهزة:

تبدأ البصمة البيئية للذكاء الاصطناعي قبل تشغيل أي نظام، في مرحلة تصنيع الأجهزة. فإنتاج الشرائح الدقيقة ووحدات معالجة الرسوميات (GPU) والخوادم المتخصصة المستخدمة في أنظمة الذكاء الاصطناعي يتطلب عمليات تعدين مكثفة لاستخراج المعادن الأرضية النادرة والمواد الخام الأخرى [٢]. وغالبًا ما ترتبط هذه العمليات بتدمير المواطن الطبيعية، وتلوث المياه والتربة، واستهلاك كبير للطاقة. كما تسهم سلاسل التوريد العالمية المعقدة في زيادة انبعاثات الكربون الناتجة عن النقل واللوجستيات [٣].

٩. ٣. ٢ مراكز البيانات (الكهرباء واستهلاك المياه):

كما أُشير سابقًا، تُعد مراكز البيانات من أكبر مستهلكي الطاقة في العالم. فهي لا تستهلك كميات ضخمة من الكهرباء فقط لتشغيل الخوادم، بل تحتاج أيضًا إلى أنظمة

(1) Anne Pasek, «The AI-Lifecycle: A New Framework for Understanding the Environmental Costs of AI,» AI & Society 38, (2023): 1443–1458.

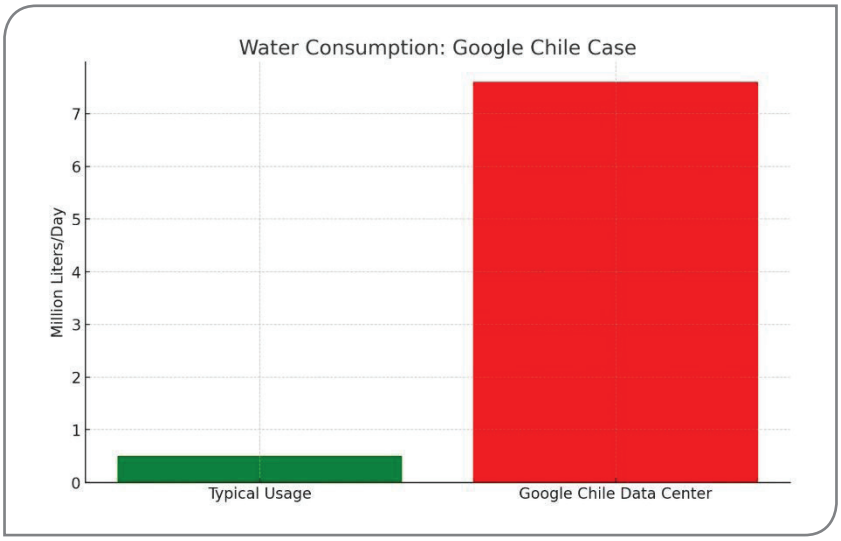
(2) Kate Crawford and Vladan Joler, «Anatomy of an AI System,» Anatomy of an AI, 2018, https://anatomyof.ai.

(3) Ibid

تبريد مكثفة للحفاظ على درجات حرارة مثالية للمعدات [١]. وتعتمد هذه الأنظمة غالبًا على المياه، مما يضع ضغطًا إضافيًا على الموارد المائية العذبة، خصوصًا في المناطق التي تعاني شحاً في المياه [٢].

وقد أدت المخاوف بشأن استهلاك المياه إلى إيقاف أو مراجعة خطط بناء بعض مراكز البيانات، كما حدث مع مركز بيانات Google في تشيلي [٣].

الشكل (١٩): رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib . مقارنة استهلاك المياه في حالة مركز البيانات التابع لشركة جوجل في تشيلي



(1) Nicola Jones, «How to Stop Data Centers From Gobbling Up the World's Water,» Yale Environment 360, December 14, 2023.

(2) Ibid

(3) "Google halts data centre plans in Chile, following environmental concerns", Investment Monitor, September 18, 2024.

يوضح الشكل (١٩) مقارنة لاستهلاك المياه اليومي بين نظام نموذجي ومركز بيانات Google المقترح في تشيلي، والذي كان سيتطلب ٦,٧ مليون لتر يوميًا.

الملخص المنهجي - حالة مركز بيانات Google تشيلي

- **السؤال البحثي:** كيف يساهم الموقع الجغرافي لمراكز البيانات في تخفيض البصمة الكربونية لاستهلاك الطاقة والمياه؟
- **المنهج/الخوارزمية المستخدمة:** تحليل مقارن لجدولة الحمل اعتمادًا على مصادر الطاقة المتجددة.
- **نوع البيانات ومصدرها:** تقارير تشغيل Google 2018–2022 + بيانات الطاقة المتجددة الوطنية.
- فترة الرصد: ٥ سنوات.
- **القيود والافتراضات:** البيانات مقتصرة على موقع واحد، ولا تعكس جميع المواقع الجغرافية.
- **تحليل الحساسية وعدم اليقين:** حساسية عالية لتغير مزيج الطاقة الوطني؛ هامش عدم يقين ± ١٥ ٪.
- **قابلية التعميم:** قابلة للتطبيق على مناطق ذات وفرة في الطاقات المتجددة، لكنها محدودة في البيئات المعتمدة على الوقود الأحفوري.

٩.٣.٣ تدريب النماذج:

يُعد تدريب نماذج الذكاء الاصطناعي، خصوصًا الكبيرة والمعقدة مثل GPT-3، من أكثر المراحل استهلاكًا للطاقة. ويتطلب ذلك فترات طويلة من الحسابات المكثفة، مما يؤدي إلى انبعاثات كربونية عالية. فعلى سبيل المثال، قُدّرت انبعاثات الكربون

الناتجة عن تدريب نموذج GPT-3 بأنها تعادل الانبعاثات الكاملة لعدة سيارات طوال عمرها الافتراضي [١].

٩.٣.٤ الاستخدام المستمر:

حتى بعد مرحلة التدريب، يواصل الذكاء الاصطناعي استهلاك الطاقة في الاستخدام اليومي. فكل استعلام أو عملية بحث تعتمد على نموذج لغوي تستهلك قدرًا معينًا من الكهرباء [٢]. ومع تزايد الاعتماد على تطبيقات الذكاء الاصطناعي في حياتنا اليومية، يزداد الاستهلاك التراكمي للطاقة، مما يسهم في زيادة البصمة الكربونية.

٩.٣.٥ النفايات الإلكترونية:

تشكل النفايات الإلكترونية (E-waste) جانبًا بالغ الأهمية في الأثر البيئي لدورة حياة الذكاء الاصطناعي. فمع تطور التكنولوجيا بشكل سريع، تصبح معدات الخوادم وغيرها من الأجهزة قديمة في وقت قصير، مما يؤدي إلى تراكم كميات ضخمة من النفايات الإلكترونية [٣]. وغالبًا ما تحتوي هذه النفايات على مواد سامة مثل الرصاص والزئبق والكادميوم، والتي قد تتسرب إلى البيئة مسببة تلوثًا خطيرًا إذا لم يتم التخلص منها بشكل صحيح [٤].

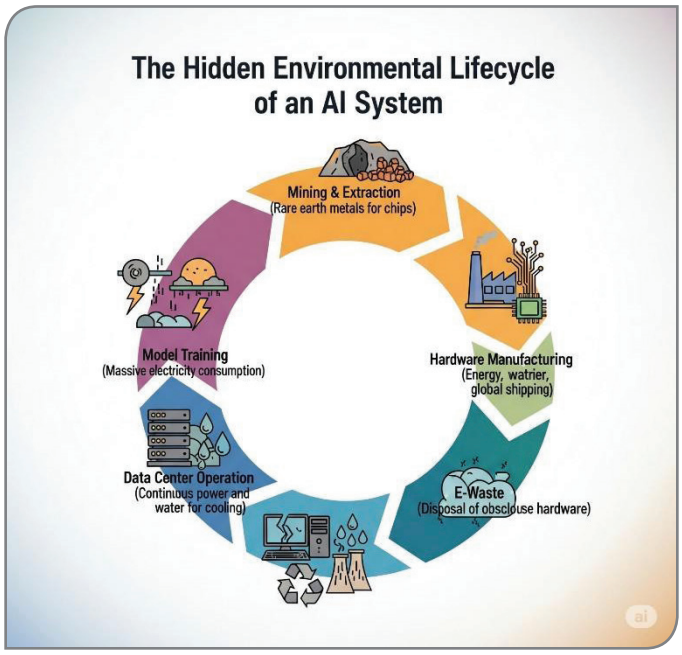
(1) Emma Strubell, Ananya Ganesh, and Andrew McCallum, «Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP,» Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, (2019): 3645–3650.

(2) Blanchard, «A single AI query uses 10 times more electricity,» Newscentermaine.com.

(3) «What is E-waste?» United Nations Environment Programme (UNEP), accessed July 17, 2025.

(4) Josh Lepawsky, «The changing geography of global trade in electronic waste: an analysis of UN Comtrade data,» The Environmental Investigation Agency, (2015).

الشكل (٢٠):
رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib
دورة الحياة البيئية الخفية لأنظمة الذكاء الاصطناعي.



يوضح التوزيع التقديري للأثر البيئي خلال دورة حياة أنظمة الذكاء الاصطناعي، من تصنيع الأجهزة وحتى النفايات الإلكترونية.

٩. ٤. الأحكام القضائية والتحديات البيئية لمراكز البيانات:

مع تزايد الطلب على مراكز البيانات لتلبية احتياجات الذكاء الاصطناعي والخدمات الرقمية المتوسعة، ظهرت تحديات بيئية كبيرة، خاصة فيما يتعلق باستهلاك الطاقة والمياه. وفي بعض الحالات، أدت هذه التحديات إلى تدخلات قضائية وقانونية، مما يسلط الضوء على أهمية الموازنة بين التوسع التكنولوجي والمسؤولية البيئية.

دراسة حالة: تشيلي ومراكز بيانات Google

تشكل حالة مركز بيانات Google في تشيلي مثالاً بارزًا للتحديات البيئية التي تواجه مشاريع البنية التحتية الرقمية الكبرى. ففي ٢٦ سبتمبر ٢٠٢٤، أيدت المحكمة البيئية الثانية في تشيلي جزئيًا دعوى قضائية، وأمرت مصلحة تقييم البيئة (SEA) بمراجعة تصريح البناء الخاص بمركز بيانات Google في منطقة سيريلوس بالعاصمة سانتياغو [١]. جاء هذا القرار بعد تصاعد القلق من مجموعات محلية بشأن الضغط الذي قد يسببه نظام تبريد المركز على الموارد المائية الشحيحة في المنطقة، خاصة في ظل الجفاف المستمر. وفي ٧٢ فبراير ٢٠٢٤، ألغت المحكمة البيئية في تشيلي جزئيًا تصريحًا سابقًا لبناء المركز الذي تبلغ تكلفته ٢٠٠ مليون دولار، وألزمت الشركة الأمريكية بمراجعة طلبها [٢]. وقد أشار الحكم إلى اعتماد المركز المقترح على ٦,٧ مليون لتر من المياه يوميًا لأغراض التبريد، وهو رقم غير مستدام. وفي ١٨ سبتمبر ٢٠٢٤، أعلنت Google إيقاف خططها الأولية لبناء المركز في سانتياغو، وأكدت أنها ستعيد تصميم المشروع بالكامل لتلبية المتطلبات البيئية [٣]. تعكس هذه الحادثة الدور المتنامي للرقابة القضائية والوعي البيئي في رسم مستقبل البنية التحتية الرقمية.

(1) «Municipality of Cerrillos (Google Data Center) v/ Evaluation Commission of the Metropolitan Region,» Climate Case Chart, Sabin Center for Climate Change Law, last updated September 26, 2024, https://climatecasechart.com/non-us-case/municipality-of-cerrillos-google-data-center-v-evaluation-commission-of-the-metropolitan-region/.

(2) «Chile partially pulls Google data center permit, seeks tougher environmental review,» Reuters, February 27, 2024, https://www.reuters.com/world/americas/chile-partially-pulls-google-data-center-permit-seeks-tougher-environmental-202427-02-/.

(3) «Google hits reset on Chile data centre project amid environmental concerns,» Capacity Media, September 19, 2024, https://www.capacitymedia.com/article/2ds66hgd626c4pwsg82rk/news/article-google-chile-data-centre.

حالات أخرى وتداعياتها:

لم تكن تشيلي الدولة الوحيدة التي شهدت تحديات قانونية وبيئية تتعلق بمراكز البيانات. ففي الولايات المتحدة، رُفعت دعوى قضائية في ديسمبر ٢٠٢٤ ضد مدينة في كاليفورنيا للمطالبة بإعادة تقييم الأضرار البيئية الناتجة عن مركز بيانات مقترح، بحجة أن المدينة انتهكت قانون جودة البيئة في كاليفورنيا عند الموافقة على المشروع [١]. كما ظهرت مخاوف متزايدة في ولايات أخرى مثل إلينوي بشأن الضغط الذي تسببه مراكز البيانات على شبكات الطاقة المحلية [٢]. تشير هذه الحالات إلى أن مراكز البيانات، رغم أهميتها في التقدم التكنولوجي، يجب أن تمتثل للقوانين البيئية المتعلقة بالانبعاثات والكفاءة في استخدام الطاقة والموارد [٣]. وتُبرز هذه التداعيات الحاجة إلى أطر تنظيمية قوية تضمن ألا يأتي توسع البنية التحتية الرقمية على حساب الاستدامة البيئية، وتشجع على اعتماد تقنيات وممارسات أكثر خضرة في تصميم وتشغيل مراكز البيانات.

٩. ٥. حلول مبتكرة لتقليل البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي:

مع تزايد الوعي ببصمة الذكاء الاصطناعي الكربونية، تسارعت وتيرة البحث والتطوير لإيجاد حلول مبتكرة تهدف إلى الحد من هذا الأثر البيئي. تتنوع هذه الحلول

(1) «Lawsuit Pushes California City to Reevaluate Data Center›s Environmental Harms,» Center for Biological Diversity, December 2, 2024, https://biologicaldiversity.org/w/news/press-releases/lawsuit-pushes-california-city-to-reevaluate-data-centers-environmental-harms-202402-12-/.

(2) «Lawmakers seek ways to prevent data centers from straining Illinois power grids,» Capitol News Illinois, April 9, 2025, https://capitolnewsillinois.com/news/lawmakers-seek-ways-to-prevent-data-centers-from-straining-illinois-power-grids/.

(3) «Key Legal Issues of Data Center Development,» Perkins Coie, April 30, 2025, https://perkinscoie.com/insights/article/key-legal-issues-data-center-development.

ما بين إعادة التفكير الجذري في مواقع مراكز البيانات، وتحسين كفاءة الأجهزة والبرمجيات.

٩. ٥ . ١ مراكز البيانات في الفضاء: المفهوم والفوائد

يُعد نقل مراكز البيانات إلى الفضاء الخارجي أحد أكثر الحلول طموحًا وابتكارًا لمعالجة مشاكل استهلاك الطاقة والتبريد على الأرض. وتقوم الفكرة على الاستفادة من الظروف الفريدة في الفضاء، مثل وفرة الطاقة الشمسية وإمكانية التبريد السلبي في الفراغ، لتقليل الأثر البيئي لمراكز البيانات بشكل كبير [١].

تشمل الفوائد الرئيسية لمراكز البيانات الفضائية ما يلي:

- **الطاقة النظيفة والمتجددة:** يمكن لمراكز البيانات في الفضاء الوصول إلى الطاقة الشمسية بشكل دائم دون انقطاع، نظرًا لعدم وجود غلاف جوي أو دورات ليل ونهار كما في الأرض، مما يوفر مصدرًا طاقيًا نظيفًا وثابتًا.
- **التبريد الطبيعي:** تُعد أنظمة التبريد من أكثر الجوانب استهلاكًا للطاقة في مراكز البيانات الأرضية، إذ قد تشكل ما يصل إلى ٤٠٪ من إجمالي استهلاك الطاقة. أما في الفضاء، فيمكن استخدام الفراغ المحيط لتبديد الحرارة بشكل طبيعي وفعال، مما يقلل الحاجة إلى أنظمة تبريد معقدة ومكلفة [٢].
- **تقليل استخدام المياه والأراضي:** لا تحتاج مراكز البيانات الفضائية إلى كميات هائلة من المياه كما هو الحال في نظيراتها الأرضية، ولا تحتل مساحات شاسعة من الأراضي، مما يخفف الضغط على النظم البيئية الأرضية.

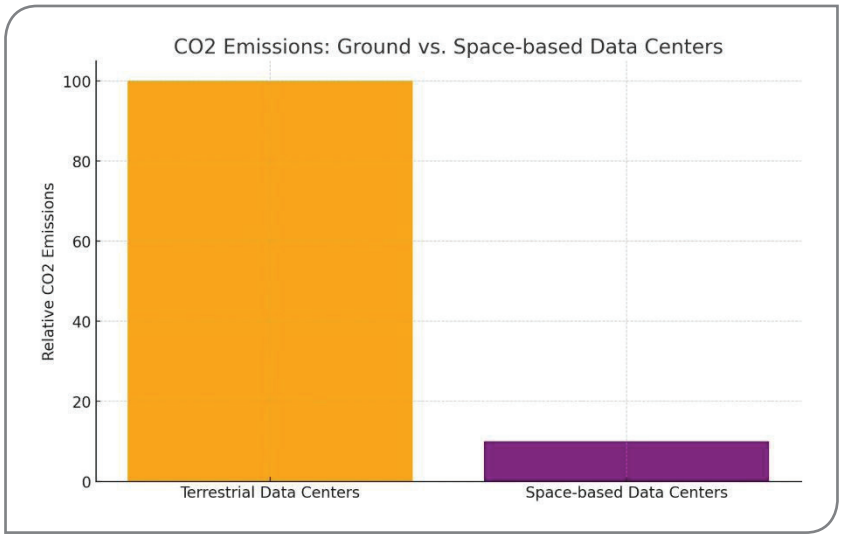
(1) «Are data centers in space the future of cloud storage?» IBM Think, November 18, 2024, https://www.ibm.com/think/news/data-centers-.

(2) Ibid

انبعاثات كربونية أقل: تشير الدراسات إلى أن مراكز البيانات في المدار الأرضي المنخفض (LEO) يمكن أن تنتج انبعاثات كربونية أقل بعشر مرات على الأقل، حتى بعد احتساب انبعاثات إطلاق الصواريخ [١].

ورغم أن هذا المفهوم لا يزال في مراحله الأولية، ويواجه تحديات هندسية واقتصادية ولوجستية كبيرة، إلا أنه يمثل توجهًا واعدًا نحو مستقبل رقمي أكثر استدامة [٢].

الشكل (٢١) :
رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib.
الأثر الكربوني المنخفض المتوقع لمراكز البيانات الفضائية مقارنة بالأرضية



(1) Dale Arney, «Sustainable and Scalable Cloud Computing in Space,» NASA Technical Reports Server, May 11, 2023.

(2) Diana Goovaerts, «Real estate firms race to put data centers on the moon, build space support,» CNBC, July 15, 2025, https://www.cnbc.com/202515/07//real-estate-firms-race-to-put-data-centers-on-the-moon-build-space-support.html.

يوضح الشكل (٢١) رسم بياني شريطي يوضح الفروقات في الانبعاثات الكربونية بين مراكز البيانات الأرضية وتلك المقترحة في الفضاء، مشيرًا إلى إمكانية خفض الانبعاثات بشكل كبير عند الانتقال للفضاء.

٢.٥.٩ تقنيات التبريد المتقدمة والطاقة المتجددة:

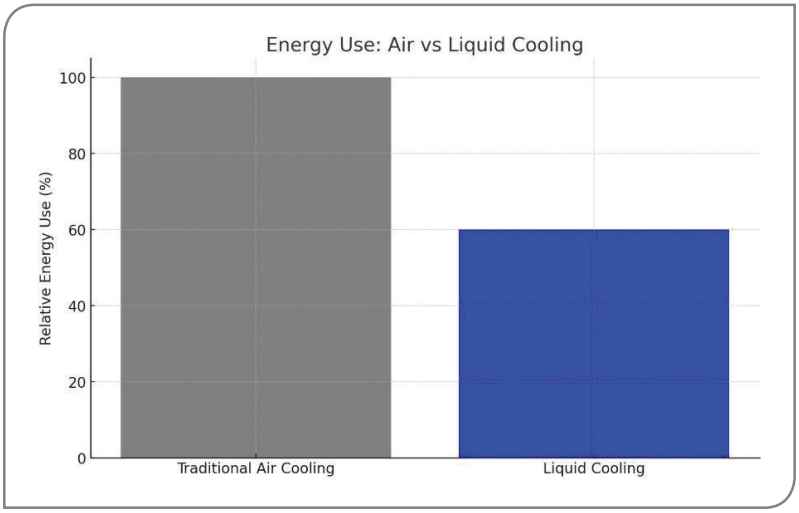
بالنسبة لمراكز البيانات الأرضية، تتركز الجهود على تحسين كفاءة الطاقة من خلال اعتماد تقنيات تبريد متقدمة واستخدام مصادر الطاقة المتجددة:

- **التبريد بالسائل:** بدلاً من تبريد الهواء في غرف الخوادم بأكملها، تعتمد هذه التقنية على سوائل خاصة لتبريد المكونات مباشرة، مما يوفر كفاءة أعلى ويقلل من استهلاك الطاقة [١].
- **التبريد التبخيري:** تعتمد هذه التقنية على تبريد الهواء باستخدام الماء، وتُعد أكثر كفاءة من أنظمة التبريد التقليدية، لا سيما في المناطق الجافة.
- **الاعتماد على الطاقة المتجددة:** تسعى العديد من شركات التكنولوجيا الكبرى إلى تشغيل مراكز بياناتها بالكامل باستخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل الشمس والرياح، سواء عبر إنشاء مزارع طاقة خاصة بها أو شراء شهادات طاقة متجددة [٢].

(1) «Liquid Cooling,» U.S. Department of Energy, accessed July 17, 2025.

(2) «Tracking the renewable energy and carbon-free energy progress of Apple, Google, and Microsoft,» The Verge, May 1, 2024.

الشكل (٢٢):
رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib.
مقارنة مرئية توضح كيف أن التبريد بالسائل أكثر كفاءة
في استهلاك الطاقة من التبريد بالهواء



رسم بياني يقارن بين استهلاك الطاقة النسبي في أنظمة التبريد التقليدية بالهواء وأنظمة التبريد بالسائل، مبينًا مدى الكفاءة العالية للتبريد بالسائل.

٣.٥.٩ تطوير خوارزميات ذكاء اصطناعي أكثر كفاءة:

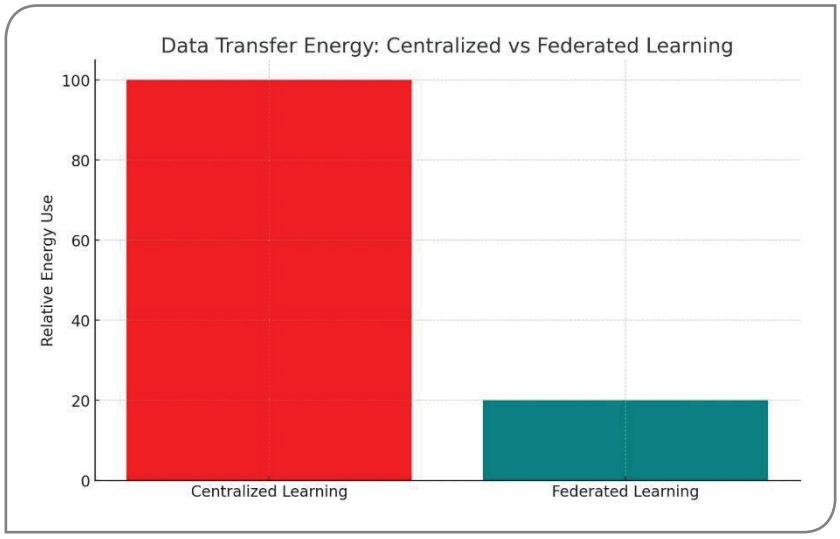
لا يقتصر تقليل البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي على الأجهزة والبنية التحتية، بل يمتد أيضًا إلى تحسين كفاءة الخوارزميات ذاتها. ويعمل الباحثون حاليًا على تطوير:

- **نماذج أصغر وأكثر كفاءة:** بدلاً من بناء نماذج ضخمة تتطلب بيانات وطاقة ضخمة لتدريبها، يجري التوجه نحو تطوير نماذج أصغر تؤدي أداءً مشابهًا أو قريبًا، مما يقلل كثيرًا من متطلبات الحوسبة [1].

(1) Neil C. Thompson et al., «The Computational Limits of Deep Learning,» arXiv, (2020), arXiv:2007.05558.

- **التعلم الموفر للطاقة:** يركز هذا المجال على تصميم خوارزميات ذكاء اصطناعي تأخذ استهلاك الطاقة في الحسبان كمعيار للتحسين، إلى جانب الدقة والأداء. ويشمل ذلك تقنيات مثل تقليم الشبكات العصبية والتكميم [١].
- **التعلم الفيدرالي:** تسمح هذه التقنية بتدريب النماذج على بيانات محفوظة على الأجهزة الطرفية (مثل الهواتف الذكية) بدلاً من إرسالها إلى مراكز البيانات المركزية، مما يقلل من الحاجة لنقل ومعالجة البيانات، ويخفض استهلاك الطاقة [٢].

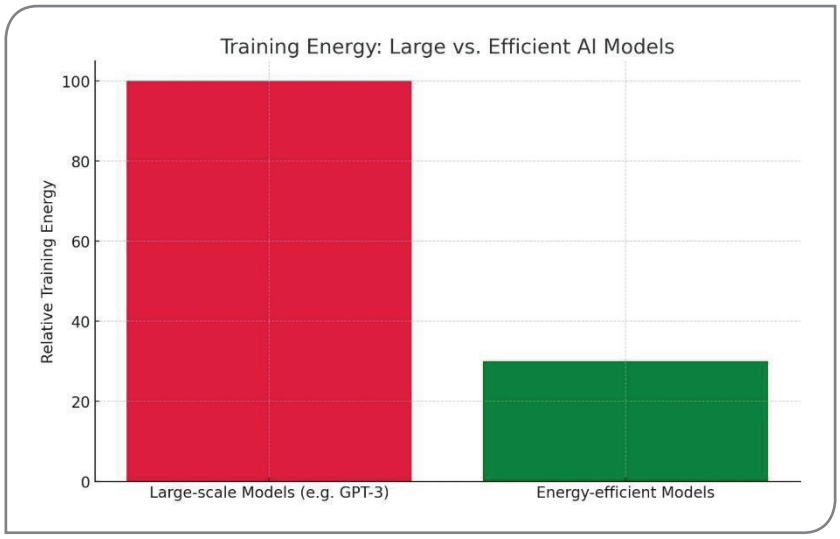
الشكل (٢٣):
رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib.
يُبرز الكفاءة العالية للتعلم الفيدرالي من حيث تقليل استهلاك الطاقة المرتبط بنقل البيانات



(1) Y. LeCun, J. S. Denker, and S. A. Solla, «Optimal Brain Damage,» Advances in Neural Information Processing Systems 2, (1990): 598605-.

(2) Brendan McMahan et al., «Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data,» Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), (2017).

الشكل (٢٤):
رسم من إعداد المؤلف، تم إنتاجه باستخدام مكتبة Matplotlib.
يُوضح كيف أن النماذج المصغّرة أو المحسّنة تستهلك
طاقة تدريب أقل بكثير مقارنة بالنماذج الضخمة مثل GPT-3



مقارنة بصرية يوضحها الشكل (٢٤) للطاقة المطلوبة لتدريب نماذج ضخمة مثل GPT-3 مقابل نماذج محسّنة موفرة للطاقة تحقق أداءً مشابهًا باستهلاك أقل بكثير.

٩. ٦. التحديات الأخلاقية والاجتماعية:

لا تقتصر البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي على الجوانب التقنية والبيئية فحسب، بل تمتد أيضًا إلى أبعاد أخلاقية واجتماعية تتعلق بالعدالة البيئية والمسؤولية المجتمعية.

- **العدالة البيئية:**

يمكن أن تؤثر مراكز البيانات التي تستهلك كميات كبيرة من الطاقة والمياه

سلبًا على المجتمعات المحلية، ولا سيما في المناطق النامية التي قد تفتقر إلى بنية تحتية مناسبة. وقد يؤدي ذلك إلى تفاقم مشكلات مثل ندرة المياه أو زيادة تلوث الهواء في تلك المناطق [1]. إن هذه التأثيرات تعزز أهمية تضمين الاعتبارات البيئية في قرارات نشر البنى التحتية الرقمية، مع حماية حقوق المجتمعات المحلية.

- **المسؤولية المشتركة:**

تطرح البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي تساؤلات حول من يتحمل المسؤولية الأساسية عنها. هل هي الشركات المطورة التي تصمم وتُدرّب النماذج الكبيرة؟ أم المستخدمون الذين يشغّلون هذه التطبيقات؟ أم الحكومات والهيئات التنظيمية التي تشرف على البنية التحتية للطاقة والموارد؟ يتطلب التعامل مع هذه التحديات مقاربة شاملة تشمل كافة الأطراف المعنية، وتُعزز التعاون بين القطاعين العام والخاص والمجتمع المدني.

- **رفع الوعي العام:**

من الضروري زيادة الوعي العام بالأثر البيئي للذكاء الاصطناعي. يمكن أن يسهم هذا الوعي في تحفيز سلوكيات مستدامة بين المستخدمين والمطورين على حد سواء، كما يمكن أن يعزز الطلب على حلول ذكاء اصطناعي أكثر كفاءة وصديقة للبيئة.

٩. ٧. التحديات والفرص المستقبلية:

يُعد النظر إلى المستقبل واستشراف الاتجاهات والتحديات والفرص في تقليل البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي أمرًا بالغ الأهمية لضمان استدامة هذه التكنولوجيا.

(1) Thejustnet.org, «Environmental Justice and the Cloud,» The Just Net Coalition, accessed July 17, 2025.

- **مواصلة البحث والتطوير:**

هناك حاجة ملحة لمواصلة البحث والتطوير في المواد والأجهزة الأكثر كفاءة في استهلاك الطاقة، بالإضافة إلى تصميم خوارزميات ذكاء اصطناعي «خضراء» تهدف منذ البداية إلى تقليل بصمتها البيئية.

- **التعاون الدولي:**

تتجاوز تحديات البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي حدود الدول، ما يستدعي تعاونًا دوليًا بين الحكومات والشركات والمؤسسات الأكاديمية لمواجهة هذه التحديات العالمية، وتبادل أفضل الممارسات والتقنيات.

- **السياسات والتشريعات:**

تلعب السياسات الحكومية دورًا محوريًا في تحفيز الابتكار المستدام وفرض معايير بيئية على قطاع الذكاء الاصطناعي. يمكن أن تشمل هذه السياسات الحوافز للاستثمار في الطاقة المتجددة لمراكز البيانات، أو فرض معايير إلزامية لكفاءة الأجهزة والبرمجيات [1].

- **الاقتصاد الدائري**

يمكن تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري على الأجهزة المستخدمة في الذكاء الاصطناعي لتقليل النفايات الإلكترونية وإطالة عمر المنتجات. ويشمل ذلك تصميم الأجهزة بطريقة تسهّل إصلاحها وإعادة استخدامها وتدويرها، بالإضافة إلى بناء سلاسل توريد مستدامة.

(1) Yang, L., Wang, L. & Ren, S. «How do environmental regulations promote corporate green innovation? A study based on the synergistic effect of internal and external factors.» PLoS ONE 18, no. 9 (2023): e0291083. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291083.

٨.٩. خاتمة

فجر جديد يشرق فيه الذكاء على كوكبنا

سبحان القائل: ﴿ وَيَسْـَٔلُونَكَ عَنِ ٱلرُّوحِۖ قُلِ ٱلرُّوحُ مِنْ أَمْرِ رَبِّى وَمَآ أُوتِيتُم مِّنَ ٱلْعِلْمِ إِلَّا قَلِيلًا ﴿٨٥﴾ ﴾ (الإسراء: ٨٥).

إن في هذه الإشارات العميقة تذكيرًا بحدود الجهد البشري وقصور المعرفة الإنسانية مهما بلغت. فما هذا الكتاب إلا محاولة متواضعة تدور في فلك تلك الحقيقة الكبرى: أن العلم الذي بين أيدينا إنما هو قطرة من بحر، وأن سعينا مهما اجتهدنا سيبقى ناقصًا، يحتاج إلى استكمال ونقد وتطوير.

ينطلق هذا العمل من إدراك أن الذكاء الاصطناعي، رغم كونه منجزًا تكنولوجيًا مذهلًا، ليس إلا أداة بيد الإنسان؛ أداة يمكن أن توظَّف لبناء مستقبل أكثر استدامة، أو أن تتحول « إن أسيء استخدامها » إلى عبء إضافي على كوكب يعاني أصلًا من ضغوط متزايدة. ومن هذا المنطلق، يأتي هذا الكتاب لا ليقدّم القول الفصل في العلاقة بين الذكاء الاصطناعي والبيئة، بل ليشارك في الحوار العالمي الدائر حولها، مساهمًا ببعض الرؤى، والأمثلة، والتأملات التي قد تفيد الباحث، وصانع القرار، والممارس، وكل مهتم بمصير الأرض التي نحيا عليها.

حين نطوي الصفحة الأخيرة من هذا الكتاب، لا نغلق بابًا، بل نفتحه على مصراعيه لفجر جديد. فجر تتلاقى فيه عبقرية الإنسان مع قدرات الآلة، وتُضاء فيه دروب الاستدامة بأشعة الذكاء الاصطناعي. لقد أخذناكم في رحلة عبر فصول متنوعة، من مراقبة الغابات إلى تخطيط المدن الذكية، ومن إدارة المياه والطاقة إلى صون التنوع البيولوجي. رأينا كيف أن هذه التكنولوجيا، التي خرجت من مختبرات البشر، يمكن أن تصبح حليفًا قويًا لكوكبنا إذا ما وُجّهت بعقل وأخلاق ومسؤولية.

إن الخوارزميات لم تعد مجرد أدوات للحساب، بل نوافذ نطل بها على المستقبل. تنبئنا بالجفاف قبل أن يحل، وتكشف التسريبات قبل أن تُهدر، وترشد المزارعين إلى الريّ الحكيم. والهواتف الذكية التي بين أيدينا لم تعد مجرد وسائل ترفيه، بل يمكن أن تصبح أعينًا تحرس الجمال الطبيعي وتحميه من الفقد والفساد.

لكن الدرس الأهم لا يكمن في التقنية ذاتها، بل في الغاية التي نسخّرها من أجلها. إن الذكاء الاصطناعي مرآة لوعينا الجمعي، وإذا أحسنا تصميمه وتوجيهه، سيعكس لنا عالماً أفضل، أكثر عدلاً وإنصافًا. أما إذا تُرك دون حوكمة رشيدة أو وعي أخلاقي، فقد يفاقم التفاوتات ويزيد من بصمتنا البيئية.

نحن أمام مفترق طرق. الخيار ليس بين التقدم وبين البيئة، بل بين تقدم يخدم الحياة، أو تقدّم يهدرها. ويتطلب ذلك منا شراكات عالمية، وجهودًا تشاركية، وإرادة صلبة لسد الفجوات الرقمية وضمان شمول الجميع، خاصة في مناطقنا العربية، في جني ثمار الثورة التقنية.

لذا، فلننظر إلى المستقبل لا كقدر مفروض، بل كفرصة لصياغته بأنفسنا. الأمل لا يكمن في أن تحل التكنولوجيا جميع مشاكلنا، بل في أننا كبشر نملك الخيار والقدرة على توجيهها نحو الخير العام. إن «الذكاء الاصطناعي من أجل كوكب أخضر» ليس مجرد عنوان لكتاب، بل دعوة مفتوحة لكل مبدع، وصانع قرار، وطالب علم، ومواطن، ليكون جزءًا من هذا التحول التاريخي.

إنه فجر عصر جديد. عصر يعمل فيه الذكاء البشري والاصطناعي معًا، لا في تنافس، بل في تناغم من أجل هدف واحد: كوكب واحد... مستقبل مشترك. نختم بابتكار واعٍ ومسؤول: خارطة تنفيذ تربط التقنية بالعدالة والحوكمة والبيئة. من هنا تبدأ النسخة «الأكثر نضجًا» من الذكاء الاصطناعي من أجل كوكب أخضر.

فهرس
مرجعية الصور والأشكال

فهـــرس
مرجعية الصور والأشكال

١- صـــورة الغـــلاف:

Dafaalla ، Anour . الذكاء الاصطناعي لكوكب أخضر: تسخير التكنولوجيا لتحقيق الاستدامة البيئية (صورة الغلاف). صورة رقمية مُولَّدة بالذكاء الاصطناعي، يوليو ٢٠٢٥. تم إنشاؤها باستخدام DALL·E. https://chat.openai.com . مُوجّه الأوامر المستخدم: «عمل فني رقمي مستقبلي يُظهر أرضًا خضراء متوهجة مع نبتة صغيرة تنبت من أفريقيا، مما يرمز إلى الاستدامة البيئية. شخصية بشرية مصنوعة من دوائر الذكاء الاصطناعي أو خطوط الشبكات العصبية تحمل أو تحتضن الكوكب برفق. يجب أن ينقل المشهد الانسجام بين الذكاء الاصطناعي والطبيعة. نظيف، عالي الدقة، ومناسب لغلاف كتاب بعنوان «الذكاء الاصطناعي لكوكب أخضر». مع التركيز على الأمل والتكنولوجيا والاستدامة».

الشكل (١) Dafaalla, Anour. صورتين واقعيتين لسلال نفايات ذكية، مصممة خصيصًا لتوضيح ميزاتها وعملها ضمن سياق المدن الذكية والاستدامة البيئية. تهدف الصورة إلى تقديم فهم واضح للقارئ حول كيفية عمل هذه التقنيات. تم إنشاؤها باستخدام Gemini 2.5 Flash Image (Nano Banana) سبتمبر ٢٠٢٥.

النص المستخدم في التوليد:

«صورة توضيحية واقعية ونظيفة تركز على سلتين ذكيتين للنفايات في بيئة حديقة حضرية أو رصيف مدينة. يجب أن تكون كل سلة مُعلّمة بوضوح بتسميات باللغة الإنجليزية تشير إلى ميزاتها الذكية. يجب أن تُظهر إحدى السلال قسمًا شفافًا يكشف

عن نفايات قابلة لإعادة التدوير مضغوطة (مثل الزجاجات البلاستيكية)، والأخرى تُظهر نفايات عامة. يجب أن تحتوي كلتا السلتين على لوح شمسي صغير وتوربين رياح مصغر في الأعلى، مما يشير إلى قدرات التغذية الذاتية بالطاقة. عرض قراءات رقمية على السلال تُظهر مستويات الامتلاء (على سبيل المثال، ٧٥٪ ممتلئة، ٩٠٪ ممتلئة) مع أيقونات واضحة لاتصال Wi-Fi . يجب أن تكون الخلفية عبارة عن أفق مدينة حديثة مموهة بلطف، مع إبقاء التركيز بالكامل على السلال».

الشكل (١) Dafaalla, Anour . رسم بياني انسيابي يوضح العلاقة بين الذكاء الاصطناعي ومعالجة اللغة الطبيعية. صورة رقمية مولدة بالذكاء الاصطناعي، أغسطس ٢٠٢٥. تم إنشاؤها باستخدام Gemini.

النص المستخدم في التوليد:

«رسم بياني انسيابي بأسلوب معلوماتي مستقبلي مفصل يوضح العلاقة بين الذكاء الاصطناعي (AI)، التعلم الآلي (ML)، التعلم العميق، ومعالجة اللغة الطبيعية (NLP). يجب أن يُظهر التصميم الذكاء الاصطناعي في الأسفل، يتفرع إلى التعلم الآلي، ثم إلى التعلم العميق باستخدام الشبكات العصبية التكرارية (RNN)، وأخيرًا إلى مهام معالجة اللغة مثل النصوص، الصوت، وتحليل المشاعر. يتضمن أسهمًا، طبقات شبكات عصبية، مسارات تدفق البيانات، وأيقونات تقنية مثل فقاعات الدردشة، الميكروفونات، موجات الصوت، ورموز اللغة. استخدم ألوانًا نيونية متوهجة (الأزرق، الأخضر، البرتقالي) على خلفية داكنة. بدقة عالية، وأسلوب احترافي وتعليمي.»

الشكل (٢) Dafaalla, Anour . تأثير الذكاء الاصطناعي على كفاءة استخدام المياه في الزراعة. August 1, 2025. Google›s Gemini image generation tool, prompt : «رسم بياني شريطي نظيف وعصري بعنوان «تأثير الذكاء الاصطناعي على كفاءة استخدام المياه في الزراعة». يقارن الرسم بين شريطين عموديين على خلفية فاتحة. الشريط الأول، على اليسار، هو شريط أزرق

طويل ومصمت يحمل علامة «الري التقليدي» عند قاعدته. الشريط الثاني، على اليمين، هو أيضًا أزرق مصمت، ولكن يبلغ نصف ارتفاع الأول فقط، ويحمل علامة «الري الدقيق المدعوم بالذكاء الاصطناعي» عند قاعدته. علامة نصية بارزة، مع سهم، تشير إلى فارق الارتفاع، وتنص على «توفير في المياه يصل إلى ٥٠٪». أسفل الرسم، يوجد تعليق بخط واضح ومقروء: «يحلل الذكاء الاصطناعي بيانات الطقس ورطوبة التربة وسلوك النباتات لتوصيل المياه فقط في الوقت والمكان المطلوبين». النمط هو رسم توضيحي متجه مسطح بدون تدرجات أو ظلال.»

الشكل (٣) Dafaalla, Anour. وجهان للذكاء الاصطناعي من أجل الكوكب August 1, 2025. Google›s Gemini image generation tool prompt: «An infographic illustration of the dual nature of AI for the environment, with Arabic text. In the center, a stylized brain/chip icon labeled الذكاء الاصطناعي. The left side is green, with icons representing positive impacts: a leaf for «الزراعة الدقيقة», a wind turbine for «الشبكات الذكية», and a globe with weather patterns for «نمذجة المناخ». The right side is red/grey, with icons for negative impacts: a factory emitting smoke for استهلاك طاقة مرتفع, a pile of discarded electronics for النفايات الإلكترونية, and a mining pickaxe for استخراج الموارد. The style should be clean, modern, and easy to understand, like a vector illustration.»

الشكل (٤) Dafaalla, Anour . المراقبة الفورية لإزالة الغابات باستخدام الذكاء الاصطناعي. August 1, 2025. Google›s Gemini image generation tool, prompt: «مخطط انسيابي نظيف وعصري بعنوان «المراقبة الفورية لإزالة الغابات باستخدام الذكاء

الاصطناعي». يوضح المخطط عملية من ثلاث خطوات من اليسار إلى اليمين، متصلة بأسهم بسيطة. الخطوة ١، المسماة «الإدخال»، تتميز برمز متجه بسيط لقمر صناعي يدور حول الأرض ويمسح غابة أدناه. الخطوة ٢، المسماة «المعالجة»، تعرض رمزًا لدماغ ذكاء اصطناعي أو شبكة عصبية تقوم بتحليل بيانات القمر الصناعي. يوجد تسمية فرعية تقول: «خوارزميات CNN تكتشف التغييرات في الغطاء الحرجي». الخطوة ٣، المسماة «الإخراج»، تعرض رمز متجه لهاتف ذكي. على شاشة الهاتف، توجد خريطة مع دبوس تنبيه أحمر فوق منطقة غابة. يوجد تسمية فرعية تقول: «منصات مثل Global Forest Watch توفر تنبيهات شبه فورية». يستخدم المخطط بأكمله تصميمًا نظيفًا ومسطحًا مع لوحة ألوان محدودة وخطوط واضحة».

الشكل (٥) Dafaalla, Anour . تأثير نظام المرور الذكي في بيتسبرغ (Surtrac). August 1, 2025 Google›s Gemini image generation tool, prompt: «إنفوجرافيك بعنوان «تأثير نظام المرور الذكي في بيتسبرغ (Surtrac)». يجب أن يعرض ثلاث إحصائيات رئيسية، كل منها مع أيقونة غامقة. أولاً، أيقونة ساعة بجانب النص «-٢٥٪ من زمن الرحلة». ثانيًا، أيقونة سحابة عادم سيارة بجانب النص «-٢١٪ من انبعاثات المركبات». ثالثًا، أيقونة إشارة مرور بجانب النص «-٤٠٪ من أوقات التوقف». يجب أن يكون النمط نظيفًا وعصريًا، ويستخدم خطوطًا وأيقونات غامقة وسهلة القراءة».

الشكل (٦): Dafaalla, Anour . حصة المباني من استهلاك الطاقة العالمي. ١ أغسطس ٢٠٢٥. أداة إنشاء الصور Gemini من Google ، الموجه: «رسم بياني دائري بعنوان «حصة المباني من استهلاك الطاقة العالمي». يجب أن يحتوي الرسم على شريحتين. شريحة واحدة، تشغل ٤٠٪ من الرسم، يجب أن تكون ملونة باللون الأزرق البارز وأن تحمل علامة واضحة «المباني: ٤٠٪». الشريحة الأخرى، التي تشكل الـ ٦٠٪ المتبقية، يجب أن تكون بلون رمادي محايد وأن تحمل علامة «جميع القطاعات الأخرى: ٦٠٪». يجب أن تكون العلامات نصية، وليست رموز ألوان. يجب أن يكون النمط نظيفًا وعصريًا وثلاثي الأبعاد».

الشكل (٧) : Dafaalla, Anour . تقنية «الرؤية والرش»: ثورة في استخدام مبيدات الأعشاب. رسم معلوماتي تعليمي مولد بالذكاء الاصطناعي، أغسطس ٥٢٠٢. تم إنشاؤه باستخدام DALL·E .

النص المستخدم في التوليد Prompt :

«رسم معلوماتي تعليمي يقارن بين الرش التقليدي لمبيدات الأعشاب ونظام «الرؤية والرش» المعتمد على الذكاء الاصطناعي في الزراعة الدقيقة. تنقسم الصورة إلى قسمين: الجانب الأيسر يُظهر الرش التقليدي على كامل الحقل الزراعي، بينما يُظهر الجانب الأيمن الرش الانتقائي في الأماكن التي توجد بها أعشاب ضارة فقط. يتضمن كلا القسمين جرارًا يتحرك وسط صفوف من المحاصيل الخضراء تحت سماء زرقاء. يتم التركيز بصريًا على الفرق في تغطية المبيدات. تتضمن الصورة عنوانًا بارزًا في الأعلى: «تقنية الرؤية والرش: ثورة في استخدام مبيدات الأعشاب»، ولافتة مركزية كبيرة تقول: «تخفيض بنسبة تصل إلى ٩٠٪ في استخدام مبيدات الأعشاب» مع إبراز الرقم ٩٠٪ باللون الأحمر. النمط نظيف واحترافي ومناسب للتعليم البيئي والزراعي.

الشكل (٨) : Dafaalla, Anour كيف يعمل تطبيق بلانتيكس. رسم معلوماتي تعليمي مولَّد بالذكاء الاصطناعي، أغسطس ٥٢٠٢. تم إنشاؤه باستخدام Gemini .

النص المستخدم في التوليد :

«رسم معلوماتي تعليمي يوضح كيف يعمل تطبيق Plantix في الزراعة الذكية. يتضمن صورًا توضيحية لمزارع يلتقط صورة لورقة نبات متضررة باستخدام هاتف ذكي، ثم يقوم برفع الصورة، يليها تحليل الورقة باستخدام الذكاء الاصطناعي وتقنيات تعلم الآلة، ثم يعرض التطبيق التشخيص (مثل أضرار الآفات أو نقص العناصر الغذائية). يجب أن يتضمن الرسم خطوات واضحة معنونة: «التقاط الصورة»، «التحليل»،

و«التشخيص والعلاج»، مع أيقونات مثل الحشرات، والشبكات العصبية، وعلامات التحقق. التصميم يجب أن يكون نظيفًا، ودودًا، واحترافيًا، بخلفية فاتحة ومشهد زراعي.

الشكل (٩): Dafaalla, Anour نظام جوجل للتنبؤ بالفيضانات باستخدام الذكاء الاصطناعي. رسم معلوماتي تعليمي مولَّد بالذكاء الاصطناعي، أغسطس ٢٠٢٥. تم إنشاؤه باستخدام Gemini .

النص المستخدم في التوليد:

«رسم معلوماتي تعليمي يوضح كيف يعمل نظام التنبؤ بالفيضانات باستخدام الذكاء الاصطناعي من Google . يتضمن الرسم تدفق البيانات من مصادر مثل مقاييس الأنهار، وتوقعات الطقس، وبيانات الأقمار الصناعية إلى نموذج تنبؤ لمدة ٧ أيام. يشمل أيقونات مثل الأمطار، الأنهار، أطباق الأقمار الصناعية، والهواتف الذكية. يُظهر تحليل الذكاء الاصطناعي للبيانات وإصدار تنبيه بالفيضانات. يُعرض التسلسل من اليسار إلى اليمين مع تسميات مثل «مدخلات البيانات»، «نموذج ٧ أيام»، «تحليل الذكاء الاصطناعي»، و«تنبيه بالفيضانات». يُفضل تصميم نظيف وبسيط مناسب للتوعية العامة ومواجهة الكوارث.

الشكل (١٠): Dafaalla, Anour تطبيق iNaturalist : تمكين العلم المواطني بالذكاء الاصطناعي. رسم معلوماتي تعليمي مولَّد بالذكاء الاصطناعي، أغسطس ٥٢٠٢. تم إنشاؤه باستخدام Gemini .

النص المستخدم في التوليد:

«رسم معلوماتي تعليمي يعرض كيف يستخدم تطبيق iNaturalist الذكاء الاصطناعي لدعم العلم المواطني. يتضمن الإحصائيات مثل: «أكثر من ١٥٠ مليون ملاحظة مسجلة» و«أكثر من ٥ ملايين مستخدم حول العالم». يتضمن عناصر مرئية

مثل خريطة العالم، وأيقونات للطيور والحشرات والطبيعة، مع إبراز فوائد مثل: «بيانات التنوع البيولوجي للبحث والحفظ»، «تحسين التعرف على الأنواع باستخدام الذكاء الاصطناعي»، و«ربط عشاق الطبيعة حول العالم». التصميم نظيف، احترافي، وجذاب، مناسب للتوعية البيئية.

الشكل (١١): Dafaalla, Anour . المخاطر السيبرانية التي تهدد أنظمة الذكاء الاصطناعي البيئي. رسم تخطيطي مفاهيمي مولد بالذكاء الاصطناعي، أغسطس ٢٠٢٥. تم إنشاؤه باستخدام Gemini .

النص المستخدم في التوليد:

«رسم تخطيطي مفاهيمي يوضح المخاطر السيبرانية التي تهدد أنظمة الذكاء الاصطناعي في البنية التحتية البيئية. في المركز، دائرة معنونة بـ«شبكة المياه الذكية / شبكة الطاقة المتجددة»، وتتصل بخطوط إلى أربع دوائر خارجية معنونة بـ«تلويث البيانات»، «أمثلة هجومية (Adversarial Examples) »، «الفدية الإلكترونية (Ransomware) »، و«التسلل إلى الشبكات». استخدم ألوانًا مختلفة لكل نوع من المخاطر. يجب أن يكون التصميم نظيفًا واحترافيًا ومناسبًا للتقارير الأكاديمية أو السياسات حول أمان الذكاء الاصطناعي في تطبيقات الاستدامة

الشكل (١٢): Dafaalla, Anour . الضغوط البيئية الرئيسية في المنطقة العربية. خريطة معلوماتية موضوعية مولدة بالذكاء الاصطناعي، أغسطس ٢٠٢٥. تم إنشاؤها باستخدام Gemini.

النص المستخدم في التوليد:

«رسم معلوماتي موضوعي على شكل خريطة يُظهر الضغوط البيئية الرئيسية في المنطقة العربية، مع التركيز على ندرة المياه. تتضمن الخريطة المنطقة الجغرافية لشمال إفريقيا والشرق الأوسط، مع إبراز الحدود السياسية وتسميات لأهم الدول

والمسطحات المائية. يتوسط الخريطة رمز قطرة ماء كبيرة تحتوي على النص: «١٧ من أصل ٢٢ دولة عربية تحت خط فقر المياه». يجب أن يكون التصميم تعليميًا، قائمًا على البيانات، وبارزًا بصريًا، مع لمسة احترافية وتركيز إقليمي.»

الشكل (١٣) : Dafaalla, Anour . صورة رقمية مولدة بالذكاء الاصطناعي، أغسطس ٢٠٢٥، تم إنشاؤها باستخدام Gemini، الموجه المستخدم: «رسم بياني لخريطة طريق بعنوان «خريطة طريق للاستدامة البيئية المدفوعة بالذكاء الاصطناعي». يجب أن يوضح الرسم البياني مسارًا بصريًا مع معالم رئيسية مقسمة إلى ثلاث مراحل: «المدى القصير (١-٢ سنة)» مع «إنشاء بروتوكولات الحوكمة ومشاركة البيانات»، «المدى المتوسط (٢-٤ سنوات)» مع «إطلاق صناديق التحدي وتطوير نماذج الذكاء الاصطناعي الإقليمية»، وشالمدى الطويل (أكثر من ٤ سنوات)» مع «تحقيق التكامل الكامل وإنشاء مراكز التميز».

ملحق رقم (١) : نماذج وأدوات لتقييم الأثر البيئي للتقنيات الرقمية والذكاء الاصطناعي

تتزايد الحاجة إلى أدوات ونماذج دقيقة لتقييم الأثر البيئي للتقنيات الرقمية، وخاصة الذكاء الاصطناعي، مع تزايد استهلاكها للطاقة والموارد. يهدف هذا القسم إلى تقديم قائمة شاملة بالنماذج والمعادلات والأدوات والبرامج والمواقع الإلكترونية التي يمكن استخدامها لهذا الغرض، مع الإشارة إلى مراجعها بصيغة شيكاغو.

١. النمـاذج والمعـادلات :

تُستخدم النماذج والمعادلات لتقدير البصمة الكربونية واستهلاك الموارد للتقنيات الرقمية. تعتمد هذه النماذج غالبًا على مبادئ تقييم دورة الحياة (Life Cycle Assessment - LCA) لتحليل الأثر البيئي من مرحلة التصنيع إلى التخلص.

نماذج تقييم دورة الحياة (LCA) المخصصة للذكاء الاصطناعي:

التعريف: تُعد نماذج LCA منهجية لتقييم الأثر البيئي الشامل لمنتج أو خدمة على مدار دورة حياتها. يتم تكييف هذه النماذج لتقييم الأثر البيئي لتطبيقات الذكاء الاصطناعي، مع الأخذ في الاعتبار استهلاك الطاقة لتدريب النماذج وتشغيلها، وتصنيع الأجهزة، والتخلص من النفايات الإلكترونية [١] [٢] [٣].

المعادلات الأساسية: تتضمن معادلات LCA حسابات للانبعاثات الكربونية (CO2e) ، واستهلاك الطاقة (KWh)، واستهلاك المياه (لتر)، بناءً على بيانات المدخلات والمخرجات لكل مرحلة من دورة الحياة. على سبيل المثال، يمكن تقدير انبعاثات الكربون الناتجة عن استهلاك الطاقة باستخدام المعادلة: الانبعاثات (كجم CO2e) = استهلاك الطاقة (كيلوواط ساعة) × عامل الانبعاثات (كجم CO2e /كيلوواط ساعة) حيث يختلف عامل الانبعاثات باختلاف مصدر الطاقة (كهرباء من الفحم، طاقة شمسية، إلخ).

نماذج تقدير البصمة الكربونية للخدمات الرقمية:

التعريف: تركز هذه النماذج على تقدير البصمة الكربونية الناتجة عن استخدام الخدمات الرقمية مثل تصفح الويب، بث الفيديو، واستخدام التطبيقات.

(1) Ligozat, Anne-Laure, Jean-Marc Lefèvre, and Antoine Bugeau. «Unraveling the hidden environmental impacts of AI solutions for environment life cycle assessment of AI solutions.» Sustainability 14, no. 9 (2022): 5172. https://www.mdpi.com/20715172/9/14/1050-.

(2) de Jesus, J. O., and K. Oliveira-Esquerre. «Integration of artificial intelligence and life cycle assessment methods.» IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1196, no. 1 (2021): 012028. https://iopscience.iop.org/article/10.1088899-1757/X/1196012028/1//meta.

(3) «Measuring and mitigating the carbon footprint of digital content.» La Pope, April 8, 2024. https://lapope.com/202408/04//measuring-and-mitigating-the-carbon-footprint-of-digital-content/.

تأخذ في الاعتبار استهلاك الطاقة للخوادم، وشبكات النقل، والأجهزة الطرفية للمستخدم[١].

المعادلات الأساسية: تعتمد على تقدير استهلاك الطاقة لكل وحدة بيانات منقولة أو معالجة، ثم تحويلها إلى انبعاثات كربونية. على سبيل المثال، تقدير انبعاثات الكربون لكل صفحة ويب يتم تحميلها[٢].

٢. الأدوات والبرامج

تُقدم العديد من الأدوات والبرامج المساعدة في حساب وتقدير الأثر البيئي للتقنيات الرقمية والذكاء الاصطناعي.

أدوات حساب البصمة الكربونية للذكاء الاصطناعي:

Microsoft Sustainability Calculator: أداة لتقدير انبعاثات الكربون الناتجة عن استخدام خدمات Microsoft السحابية، بما في ذلك خدمات الذكاء الاصطناعي[٣].

ML CO2 Impact Calculator: أداة لتقدير انبعاثات الكربون الناتجة عن تدريب نماذج التعلم الآلي[٤].

(1) «How Does Tech Create a Carbon Footprint?» Ecolytics, January 29, 2024. https://www.ecolytics.io/blog/tech-carbon-footprint

(2) Sustainable AI: 3 tools to measure the environmental impact of ML solutions.» Medium, July 7, 2023. https://medium.com/@audaciatech/sustainable-ai-3-tools-to-measure-the-environmental-impact-of-ml-solutions-1762c88626cc

(3) «Carbon Footprint Calculator.» carbonfootprint.com, تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx

(4) «Carbon Footprint Calculator I US EPA.» EPA, تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://www.epa.gov/ghgemissions/carbon-footprint-calculator

CodeCarbon : مكتبة Python مفتوحة المصدر تساعد المطورين على تتبع وتقدير انبعاثات الكربون الناتجة عن تدريب نماذج التعلم الآلي الخاصة بهم[١].

المـــراجـــع:

«Sustainable AI: 3 tools to measure the environmental impact of ML solutions.» Medium, July 7, 2023.[2].

أدوات إدارة البيئة الشاملة المدعومة بالذكاء الاصطناعي:

Envirosuite : أداة شاملة لإدارة البيئة تستخدم الذكاء الاصطناعي لتعزيز المراقبة في الوقت الفعلي والتحليلات التنبؤية، مما يساعد الشركات على تتبع وإدارة تأثيرها البيئي[٣].

IBM Environmental Intelligence Suite : مجموعة من الأدوات المدعومة بالذكاء الاصطناعي توفر رؤى حول المخاطر البيئية وتساعد في تحسين الاستدامة[٤].

Google Earth Engine : منصة حوسبة سحابية لتحليل البيانات الجغرافية المكانية على نطاق واسع، يمكن استخدامها لتقييم التغيرات البيئية وتأثير الأنشطة البشرية[٥].

(1) «Ecological Footprint Calculator.» Global Footprint Network, تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://www.footprintcalculator.org/.

(2) «How to Measure and Reduce your Website›s Digital Footprint.» Compare Your Footprint, November 1, 2024. https://www.compareyourfootprint.com/how-to-measure-and-reduce-your-websites-digital-footprint/.

(3) «Digital Beacon.» Digital Beacon, تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://digitalbeacon.co/.

(4) «GCC Carbon Calculator.» Gallery Climate Coalition, تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://measure.galleryclimatecoalition.org/.

(5) Google Cloud. «Measuring the environmental impact of AI inference.» August 21, 2025. https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/measuring-the-environmental-impact-of-ai-inference/

٣. مـواقـع الإنترنـت

توفر العديد من المواقع الإلكترونية حاسبات للبصمة الكربونية، وموارد تعليمية، ومنهجيات لتقييم الأثر البيئي للتقنيات الرقمية.

حاسبات البصمة الكربونية العامة:

carbonfootprint.com : يوفر حاسبة شاملة للبصمة الكربونية للأفراد والشركات، تشمل المباني والسيارات والرحلات الجوية[١].

EPA Carbon Footprint Calculator : حاسبة من وكالة حماية البيئة الأمريكية لتقدير البصمة الكربونية في مجالات الطاقة المنزلية، النقل، والنفايات[٢].

Ecological Footprint Calculator: أداة لتقدير عدد الكواكب التي تحتاجها لدعم نمط حياتك بناءً على استهلاكك للموارد[٣].

حاسبات البصمة الكربونية الرقمية:

WebsiteCarbon.com : أداة لتقدير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل مشاهدة صفحة ويب[٤].

---

(1) AI Multiple. «4 Steps of Carbon Footprint Calculation.» تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://research.aimultiple.com/carbon-footprint-calculation/

(2) Makersite. «Using AI for cradle-to-grave product lifecycle analysis (LCA).» تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://makersite.io/insights/using-ai-for-cradle-to-grave-product-lifecycle-analysis-lca/

(3) ScienceDirect. «Life Cycle Assessment of Artificial Intelligence Applications.» تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827125003749.

(4) Elgaronline. «Artificial intelligence solutions for environmental and social impact assessments.» 2022. https://www.elgaronline.com/edcollchap/book/9781800379633/book-part-978180037963315-.xml.

Digital Beacon: أداة لحساب الأثر البيئي لصفحة الويب وتقديم توصيات لتحسينها[1].

GCC Carbon Calculator : أداة مجانية عبر الإنترنت لتقدير انبعاثات غازات الاحتباس الحراري للمنظمات والمشاريع الفنية[2].

(1) Springer. «Education for sustainability: calculation of the digital carbon footprint.» تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://link.springer.com/chapter/10.100732_2-26876-031-3-978/

(2) NTNU Open. «Calculating the Carbon Footprint of Digital Services: Toward User Awareness.» تاريخ الوصول 17 يوليو 2025. https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/112503097912/

ملحق ٢ : المنهجية والمؤشرات

١. إطار الملخص المنهجي لدراسات الحالة

لتعزيز القيمة العلمية وتوحيد طريقة عرض الأمثلة، يُستخدم هذا القالب الموجز في نهاية كل دراسة حالة:

- الملخص المنهجي
- السؤال البحثي: ...
- المنهج/الخوارزمية المستخدمة: ...
- نوع البيانات ومصدرها: ...
- فترة الرصد: ...
- القيود والافتراضات: ...
- تحليل الحساسية وعدم اليقين: ...
- قابلية التعميم: ..
- هذا القالب يسمح للقارئ بفهم منهجية كل دراسة حالة بوضوح، ويمكّن الباحثين وصنّاع القرار من تقييم جودة الأدلة وحدود تطبيقها.

٢. المؤشرات القياسية المقترحة حسب القطاع

القطاع	المؤشرات الأساسية المقترحة	وحدة القياس / المدى المتوقع	ملاحظات
النقل	متوسط زمن الرحلة – الانبعاثات لكل كم – استهلاك الوقود	دقيقة/كم – gCO_2/km – لتر/١٠٠كم	تربط مباشرة بجودة الهواء
الطاقة	خطأ التنبؤ بإنتاج الطاقة – نسبة الطاقة المتجددة بالشبكة	% MAPE – % من الحمل الكلي	أساسي لدمج الرياح والشمس
المياه	نسبة الفاقد – استهلاك الطاقة للتحلية – تكرار الأعطال	% – kWh/m^3 – عدد/سنة	يعكس كفاءة التشغيل
الغابات/ التنوع	معدل فقدان الغطاء النباتي – مؤشر تنوع الأنواع – الإنذارات المبكرة للحرائق	٪/سنة – مؤشر شانون – عدد/سنة	يعتمد على صور أقمار صناعية
المدن الذكية	استهلاك الكهرباء للفرد – إعادة تدوير النفايات – جودة الهواء (MP ٢,٥)	kWh /فرد – ٪ – $\mu g/m^3$	يصلح للمقارنة بين مدن مختلفة
البيئة الرقمية	البصمة الكربونية للنماذج – استهلاك المياه لمراكز البيانات	كغ CO_2e /تدريب – لتر	يرتبط مباشرة بالفصل الثامن

سلسلة
كتاب عالم البيئة

سلسلة
كتاب عالم البيئة

سلسلة عالم البيئة هي سلسلة كتب علمية ثقافية ربع سنوية تصدر عن مؤسسة زايد الدولية للبيئة – دبي – دولة الإمارات العربية المتحدة.

طبيعة السلسلة: كتابة المتخصصين لغير المتخصصين

الأهـــداف:

تهدف هذه السلسلة إلى توفير المعلومة العلمية حول قضايا البيئة التى تهم المجتمع بأسلوب بسيط وسلس يساهم فى نشر الثقافة والتوعية البيئية ويساعد فى إتخاذ القرارات التى تتسق مع أسس التنمية المستدامة.

الفئات المستهدفة:

تستهدف السلسلة متخذ القرار لمساعدته على اتخاذ القرارات الصديقة للبيئة والإعلامي والمعلم والمثقف العربي لمساعدتهم على نشر الوعي البيئي ومتابعة ما يهم الجمهور من ممارسات تؤثر سلبا أو إيجابا على البيئة. كما تستهدف الطلاب والباحثين الذين يودون الحصول على معلومات ومؤشرات.

إدارة السلسلة:

رئيس التحرير/ المدير العام

الأستاذ الدكتور/ محمد أحمد بن فهد

رئيس اللجنة العليا لمؤسسة زايد الدولية للبيئة

مدير التحرير

المهندس/ حمدان خليفة الشاعر – عضو اللجنة العليا

المحرر

د. عيسى محمد عبد اللطيف

كبير المستشارين بمؤسسة زايد الدولية للبيئة

قواعد النشر: (منشورة في آخر صفحات كل كتاب)

ترحب سلسلة عالم البيئة بإقتراحات التأليف أو الترجمة فى المجالات المحددة أدناه وفقا للشروط التالية:

1. تكون الأولوية للقضايا المُلحّة بالمنطقة العربية والأفكار القابلة للتطبيق
2. أن يكون الحجم فى حدود 200 – 300 صفحة من القطع المتوسط.
3. ألا يكون قد تم نشر الكتاب كاملاً أو فى أجزاء من قبل.
4. ألا يكون هناك نسْخ لنصوص من كتاب أو بحث آخر بإستثناء ما يشار إليه كإقتباس مع تسجيل كل المراجع التى استخدمت فى التأليف.
5. فى حالة الترجمة يُشار إلى صفحات الكتاب الأصلى المقابلة للنص المترجم وترفق نسخة باللغة الأصلية للكتاب المُترجم مع موافقة المؤلف.
6. الهيئة الإستشارية غير ملزمة بقبول كل الإقتراحات التى تقدم لها.
7. يكون نشر الكتاب المعين حسب الأولويات التى تحددها الهيئة الإستشارية وهيئة التحرير.
8. لا تُرد المسودات والكتب الأجنبية فى حالة الإعتذار عن نشرها.
9. أن ترسل أولا مذكرة بالفكرة العامة للكتاب وموضوعاته وأهميته على الإستمارة المرفقة لإقتراح كتاب للنشر مصحوبة بالسيرة الذاتية للمؤلف.
10. يرسل الكتاب إلى محكّمين متخصصين فى موضوعه لإبداء الرأى حول صلاحيته للنشر دون معرفتهم بإسم المؤلف. ويستحق المحكم مبلغ 3000 درهم اماراتي أو ما يعادلها تحول إلى حسابه بعد استلام كل التقارير واصدار الكتاب .

11. في حالة إجازته من المحكمين والموافقة عليه من هيئة التحرير، يستحق المؤلف مبلغ 15,000 درهم اماراتي أو ما يعادلها يتم تحويلها للمؤلف بعد إكمال كل التعديلات المطلوبة وارسال نسخة عبر البريد الإلكتروني وبعد إصدار الكتاب

12. في حالة قبول الترجمة والتعاقد يستحق المترجم مبلغ 10,000 درهم اماراتي أو ما يعادلها يتم تحويلها له بعد إكمال كل التعديلات المطلوبة وارسال نسخة عبر البريد الإلكتروني وبعد إصدار الكتاب

13. المترجم مسؤول عن حق الملكية الفكرية بالنسبة للمؤلف.

14. مؤسسة زايد الدولية للبيئة غير مسؤولة عن محتويات الكتاب والفكرة المنشورة تعبر عن رأى الكاتب.

15. لا يحق للمؤلف أو المترجم إعادة الطبع إلا بموافقة مكتوبة من مؤسسة زايد الدولية للبيئة التى تحتفظ بحقوق النشر.

16. أن يقوم المؤلف أو المترجم بتعبئة وتوقيع إستمارة المشاركة المرفقة أدناه

مجالات السلسلة:

تدور مجالات السلسلة في فلك الإطار الشامل لصون البيئة والموارد الطبيعية وفقا لأسس التنمية المستدامة التى تحقق التوازن بين التنمية الإقتصادية والتنمية الإجتماعية وحماية البيئة.

إستمارة إقتراح كتاب للنشر

تهدى جائزة زايد الدولية للبيئة تحياتها لكل العلماء والخبراء والباحثين العرب فى مجالات البيئة والتنمية المختلفة وتدعوهم للمشاركة فى هذه السلسلة بالتأليف والترجمة مساهمة منهم فى توجيه التنمية فى بلادنا العربية نحو الإستدامة وحفظ حقوق الأجيال القادمة فى بيئة سليمة معافاة.

ولمن يرغب في المشاركة الرجاء الاطلاع على قواعد النشر أعلاه وتعبئة القسيمة أدناه وإرسالها بالبريد الإلكترونى إلى:

هيئة تحرير سلسلة عالم البيئة

مؤسسة زايد الدولية للبيئة

ص.ب. 28399 دبى – الإمارات العربية المتحدة

هاتف: 3326666 04 (971+)

البريد الإلكترونى: cta@zayedprize.org.ae

الإســـــــــم: .....

الدرجة العلمية: .....

الوظيفـــــــــة: .....

العنـــــــــوان: .....

.....

.....

الهاتف: ..... الفاكس: .....

البريد الإلكترونى: .....

عنوان الكتـــاب: .....

نبذة مختصرة عن أهمية الكتاب ومحتواه:

.....

.....

.....

.....

.....

إقـــــرار:

- **أقر أنا الموقع أدناه** بأني قد اطلعت على قواعد النشر فى سلسلة عالم البيئة وأوافق على حفظ حقوق النشر وإعادة الطبع لمؤسسة زايد الدولية للبيئة حسب الشروط الموضحة فى آخر كل كتاب من السلسلة.

التوقيع: .....

التاريخ: .....

الرجاء التكرم بإرفاق:

- السيرة الذاتية للمؤلف،
- وقائمة المحتويات (أبواب وفصول)