

# الذكاء الاصطناعي والتحول الأخضر في ألمانيا:

دراسة وصفية تحليلية

د. عبد المنعم محمود دهمان

مدرّب ومستشار تطوير الأعمال والتحول الرقمي

عضو هيئة تحرير مجلة الاقتصاد الإسلامي العالمية

بلغت انبعاثات غازات الدفيئة<sup>1</sup> في ألمانيا نحو ٦٤٨,٩ مليون طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون عام ٢٠٢٥، بانخفاض محدود قدره ١,٠٪ مقارنة بالعام السابق (Umweltbundesamt, 2026). وفي المقابل، بلغت حصة المصادر المتجددة ٥٨,٨٪ من صافي الكهرباء المولدة والمغذاة في شبكة الإمداد العام، وهي نسبة تخص الكهرباء الداخلة إلى الشبكة ولا تمثل حصة المتجددة من مجموع استهلاك الطاقة الألماني (Bundesnetzagentur, 2026).

تكشف المقارنة أن توسيع الإنتاج المتجدد يحتاج إلى تحسين الاستخدام والتخزين والتنسيق بين القطاعات حتى يتحول إلى انخفاض مستمر في الانبعاثات.

أولاً: الإطار المفاهيمي والمؤسسي للذكاء الاصطناعي والتحول الأخضر

١. مفهوم التحول الأخضر والاستدامة البيئية

يقصد بالتحول الأخضر إعادة توجيه الإنتاج والاستهلاك والاستثمار نحو خفض الانبعاثات والتلوث، وتحسين استخدام الموارد، وحماية النظم البيئية، مع مراعاة عدالة توزيع المنافع والأعباء. وتتمثل الاستدامة البيئية في المحافظة على قدرة النظم الطبيعية على الاستمرار والتجدد، بحيث لا تتحقق المكاسب الاقتصادية باستنزاف الموارد التي تعتمد عليها حياة الإنسان وأنشطته. نميز بين تحسين الكفاءة داخل النشاط القائم وبين خفض أثره البيئي الإجمالي؛ فقد يقل استهلاك الطاقة لكل وحدة منتجة بينما يرتفع الاستهلاك الكلي بسبب توسع الإنتاج. لذلك أجمع بين مؤشرات الكفاءة النسبية ومؤشرات الضغط المطلق، مثل إجمالي الطاقة المستخدمة والانبعاثات والنفايات.

<sup>1</sup> انبعاثات غازات الدفيئة = كمية الغازات المسببة للاحتباس العالمي التي نطلقها في الغلاف الجوي.

ويقتضي التحليل الاقتصادي أيضاً التمييز بين التحسن الناتج عن تحديث العمليات والانخفاض الناتج عن تراجع النشاط، فقد ربطت وكالة البيئة الاتحادية جانباً من انخفاض الاستخدام الصناعي للطاقة عام ٢٠٢٥ بتراجع إنتاج الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، ولذلك لا أفسر كل انخفاض في الانبعاثات باعتباره ثمرة للابتكار التقني (Umweltbundesamt, 2026, pp. 5–6).

## ٢. دور الذكاء الاصطناعي في التحول الأخضر

تتمثل الوظيفة الأساسية للذكاء الاصطناعي في استخراج العلاقات من البيانات، وتحسين التوقعات، ومساندة الاختيار بين البدائل. وقد شمل تحديث الاستراتيجية الألمانية للذكاء الاصطناعي تطبيقات الطاقة، وكفاءة الموارد، والاقتصاد الدائري، والمياه، وحماية الطبيعة والتنقل، بما يؤكد اتساع استخداماته البيئية (Bundesregierung, 2020, p. 16).

القيمة الإدارية لهذه التطبيقات تبدأ من تحديد المشكلة؛ فالمؤسسة التي تستهدف خفض استهلاك الطاقة تحتاج إلى معرفة مواقع الهدر وأسبابه والقرارات القابلة للتعديل ثم تختار الأداة الملائمة. أما شراء نظام ذكي قبل تحديد الحاجة ومسؤوليات العمل فقد يرفع التكلفة دون تحسين الأداء.

## ٣. الذكاء الاصطناعي من أجل البيئة والذكاء الاصطناعي الأخضر

يشير الذكاء الاصطناعي من أجل البيئة (AI for Green) إلى استخدام التقنية لتحقيق غاية بيئية، مثل تقليل فاقد المواد أو تحسين تشغيل الشبكات. أما الذكاء الاصطناعي الأخضر (Green AI)، فيركز على كفاءة التقنية نفسها في استخدام الطاقة والموارد أثناء التطوير والتدريب والتشغيل.

يقترح روي شوارتز Roy Schwartz وزملاؤه جعل الكفاءة معياراً أكثر شيوعاً لتقييم أبحاث الذكاء الاصطناعي إلى جانب الدقة والمقاييس المرتبطة بها (Schwartz et al., 2019, p. 2). هذه تعتبر توسيعاً لمفهوم الجودة؛ فالنموذج المناسب هو الذي يحقق الأداء المطلوب بتكلفة حسابية ومالية وبيئية مبررة. أي يجب تقييم التطبيق من خلال حصيلته الصافية بمقارنة الأثر الذي يتجنبه بالأعباء التي يضيفها، ويتطلب ذلك تحديد البديل المرجعي، والفترة الزمنية، وحدود دورة الحياة، حتى لا أعدّ خفض استهلاك مورد واحد نجاحاً كاملاً بينما تنتقل الأعباء إلى مورد آخر.

## ثانياً : الإطار المؤسسي والسياسات الألمانية الداعمة

يحدد قانون حماية المناخ الاتحادي الألماني (Bundes-Klimaschutzgesetz – KSG) أهدافاً ملزمة لخفض انبعاثات غازات الدفيئة مقارنة بمستويات عام ١٩٩٠، بحيث تُخفض الانبعاثات بنسبة لا تقل عن ٦٥٪ بحلول عام ٢٠٣٠، وبنسبة لا تقل عن ٨٨٪ بحلول عام ٢٠٤٠، وصولاً إلى تحقيق الحياد الصافي في انبعاثات غازات الدفيئة بحلول عام ٢٠٤٥، مع استهداف انبعاثات سلبية بعد عام ٢٠٥٠.

### ١. مبادرة منارة الذكاء الاصطناعي والدور التمويلي

بدأت مبادرة المشروعات المنارية للذكاء الاصطناعي من أجل البيئة والمناخ والطبيعة والموارد (AI Lighthouse Projects for Environment, Climate, Nature and Resources / KI-Leuchttürme für Umwelt, Klima, Natur und Ressourcen) عام ٢٠١٩. وتشير البيانات الرسمية إلى أن جولتي التمويل الأوليين دعمتا ٥٣ مشروعاً بنحو ٧٠ مليون يورو، وهو رقم يخص هاتين الجولتين ولا يمثل مجموع جميع الجولات (BMUKN, n.d.-a, 53 projects supported during the first two funding periods)، تتيح المبادرة اختبار حلول تجمع الخبرة البيئية بالقدرة التقنية.

### ٢. الذكاء الاصطناعي والطاقة والتحول نحو الحياد المناخي

بلغت الكهرباء الشمسية المغذاة في الشبكة الألمانية ٧٤.١ تيراواط ساعة عام ٢٠٢٥ مقابل ٦٣.٢ في العام السابق، بينما تراجعت مساهمة الرياح البرية من ١١٢.٦ إلى ١٠٦.٥ تيراواط ساعة، وسجلت سوق الجملة أسعاراً سلبية خلال ٥٧٣ ساعة، بما يبرز أهمية المرونة والتخزين وتنسيق الطلب مع الإنتاج (Bundesnetzagentur, 2026, Erzeugung und Verbrauch; Bundesnetzagentur, 2026, Großhandelsstrompreise).

### ٣. الذكاء الاصطناعي وإدارة شبكات الكهرباء والطاقة المتجددة

تتطلب الشبكات المتزايدة اللامركزية الجمع بين توقع الإنتاج، وتقدير الطلب، ومعرفة قدرة الخطوط والمحولات على استيعاب التدفقات. ويمكن للذكاء الاصطناعي دعم هذه المهام بتحليل بيانات التشغيل والطقس والأحمال، ثم مساندة قرارات التخزين وإدارة الاستهلاك.

يصف غونار شوبرت Gunnar Schubert، منسق مشروع الشبكات الذكية المتقدمة (AI4Grids)، المشكلة بقوله إن التنبؤ بالاستهلاك والإنتاج لم يعد أمراً سهلاً، وقد طور المشروع توقعات احتمالية تساعد على تمثيل نطاق الحالات الممكنة بدل الاكتفاء بقيمة واحدة متوقعة (ZUG, 2024).

دراسة نموذجي الشبكات الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي (AI4Grids) ونظام المعلومات الجغرافية لطاقة الرياح (WindGISKI):

ركز مشروع الشبكات الذكية المدعومة بالذكاء الاصطناعي (AI4Grids) على تطوير آليات التنبؤ والتشغيل في شبكات التوزيع. وقد تضمنت المقابلة مع منسق المشروع تقديراً مفاده أن التحكم الذكي قد يسهم في خفض تكلفة توسعة الشبكة في منطقة فريدرشسهافن (Friedrichshafen) من نحو ١٨٠ إلى ١٠٠ مليون يورو. (ZUG, 2024, Savings and Challenges).

أما مشروع نظام المعلومات الجغرافية لطاقة الرياح (WindGISKI)، فقد امتد تنفيذه من ديسمبر ٢٠٢١ إلى يونيو ٢٠٢٥ بتمويل قارب ١.٩٥ مليون يورو، مستهدفاً بناء نظام معلومات جغرافي مدعوم بالذكاء الاصطناعي لتقييم المواقع الملائمة لمشروعات طاقة الرياح، مع مراعاة كافة المحددات التقنية، والبيئية، والجغرافية، والاقتصادية المؤثرة في قبول المشروعات مجتمعياً (ZUG, n.d.-b, Laufzeit, Fördervolumen, Die Idee).

تؤكد هذه المقارنة أن النهوض بالتحول الطاقوي يستوجب معالجة القرار الاستراتيجي السابق على إنشاء المشروع بالتوازي مع القرار التشغيلي المصاحب له، وتكشف في الوقت ذاته أن معالجة بعض الاختناقات المعلوماتية لا تغني أبداً عن الاستثمار المادي المباشر في البنية التحتية للشبكات والتخزين.

### ثالثاً: الذكاء الاصطناعي وحماية الغابات والتنوع البيولوجي

تغطي الغابات نحو ثلث مساحة ألمانيا، وتؤدي وظائف متداخلة تشمل تخزين الكربون وحماية التربة والمياه وتوفير الموائل الطبيعية والموارد الاقتصادية. وقد أظهرت نتائج مسح حالة الغابات لعام ٢٠٢٤ استمرار علامات الضرر لدى نحو أربعة من كل خمسة أشجار، رغم تحسن بعض الظروف الجوية مقارنة بسنوات الجفاف السابقة (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2025).

هذه المعطيات تعتبر تحدياً لإدارة أصل طبيعي طويل الأجل . فالقرار المتعلق بالتشجير أو اختيار الأنواع لا تظهر نتائجه خلال دورة مالية قصيرة، بل يمتد أثره إلى عقود . ولذلك تحتاج الإدارة الحرجية إلى معلومات تجمع الحالة الراهنة بالسيناريوهات المستقبلية، وتساعد على توجيه الموارد المحدودة نحو التدخل الأكثر ملاءمة .

ويتيح الذكاء الاصطناعي توسيع القدرة على تحليل البيانات المكانية والزمانية، لكنه لا يجعل مستقبل الغابة معلوماً بصورة يقينية . ومن هنا يجب التركيز على دور الذكاء الاصطناعي في دعم المفاضلة بين البدائل، مع المحافظة على الخبرة الميدانية والتنوع في استراتيجيات الإدارة .

#### ١ . مراقبة الغابات والتغيرات المناخية

يقدم مشروع المستقبل للغابات (FutureForest) مثالاً على استخدام الذكاء الاصطناعي لدعم إعادة تشكيل الغابات بما يلائم تغير المناخ . وتشمل مكوناته نظاماً لدعم القرار، وفضاءً للبيانات الحرجية، ونماذج لمحاكاة تطور الغابات، وطرائق لتحليل أنواع الأشجار وحالتها من السلاسل الزمنية لصور الأقمار الصناعية (FutureForest, n.d) .

وتتمثل القيمة التحليلية لهذا التوجه في ربط وصف الحالة بتقدير نتائج القرارات . فاختيار نوع شجري قد يبدو مناسباً للظروف الحالية، لكنه يصبح أقل ملاءمة إذا تغيرت الحرارة أو الرطوبة أو أنماط الآفات . ولذلك ينبغي أن تعرض الأداة أكثر من احتمال، وأن توضح الافتراضات التي تقوم عليها توصياتها .  
نقترح أن تقارن الإدارة الحرجية البدائل وفق القدرة على البقاء والتجدد، وتنوع الأنواع، وتكلفة التدخل، ومخاطر فقدان الكربون، والوظائف الاجتماعية للغابة . ويمنع هذا التقويم اختزال النجاح في زيادة النمو الخشبي وحده، إذ قد يحقق نوع سريع النمو عائداً قصير الأجل مع ارتفاع تعرضه لمخاطر لاحقة .

#### ٢ . التنبؤ بحرائق الغابات والكشف المبكر عنها

ينبغي التمييز بين تقدير خطر الحريق قبل وقوعه واكتشافه بعد بدايته . فالتقدير يستند إلى ظروف تزيد احتمال الاشتعال والانتشار، بينما يعتمد الكشف المبكر على رصد إشارات مثل الدخان واللهب . ولكل وظيفة بيانات ومقاييس أداء مختلفة .

ويستخدم مشروع نظام الذكاء الاصطناعي للتحذير من الحرائق (KIWA) أنظمة طائرات مسيرة وتطبيقات للرؤية الحاسوبية للتعرف إلى الأخطار والحرائق والدخان من الصور الجوية، مع توجه لدمجها

في إجراءات البلديات والحماية المدنية والإطفاء (Zukunft-Umwelt-Gesellschaft) ([ZUG], n.d.-a).

ونرى أن الأثر الوقائي يعتمد على تكامل الرصد والاتصال والتحقق والاستجابة. فقد يكتشف النظام إشارة مبكرة، لكن فائدتها تتراجع إذا تأخر وصولها إلى الجهة المختصة أو تعذر تحديد موقعها. كما أن كثرة الإنذارات غير الصحيحة قد تستنزف الموارد وتضعف ثقة المستخدمين. لذلك يجب قياس زمن الاكتشاف، ودقة تحديد الموقع، ونسبة الإنذارات الخاطئة، وزمن وصول المعلومة إلى فريق الاستجابة. وينبغي كذلك اختبار الأداء في ظروف الغبار والضباب والرياح وتغير الإضاءة، مع وجود إجراء بديل عند تعطل النظام. ويكتمل التدريب عندما يستطيع العاملون تفسير الإنذار وتحديد حدود الاعتماد عليه.

### ٣. مراقبة الأنواع والنظم البيئية

لا تكفي المحافظة على مساحة الغابة للحكم على سلامة تنوعها الحيوي؛ فقد يبقى الغطاء الشجري قائماً بينما تتغير الأنواع أو تتدهور موائلها. ولذلك تحتاج الإدارة البيئية إلى مراقبة التوزيع والوفرة والتغيرات الموسمية، إلى جانب رصد المساحات.

ويعمل مشروع طبيعة غير معروفة (NaturalIncognita) على تطوير أدوات لتحديد الأنواع بالذكاء الاصطناعي، مع تطبيقات مرتبطة بالفراشات والعوالق النباتية والفطريات. ويظهر هنا دور الصور والمساهمات المجتمعية في توسيع قاعدة البيانات المتاحة للباحثين (Max Planck Institute for Biogeochemistry, n.d.). لكن زيادة الصور لا تعني تلقائياً تمثيلاً أدق للطبيعة. فقد تتركز الملاحظات قرب المدن والمسارات السياحية، أو ترتفع مشاركة المواطنين في موسم معين. لذلك ينبغي التمييز بين زيادة الرصد وزيادة أعداد الكائنات، وبين غياب التسجيل وغياب النوع. حيث يتم استخدام بيانات المشاركة المجتمعية مع مسوح منظمة وعينات للتحقق البشري، وتوثيق مكان التسجيل وزمنه وجودته. كما ينبغي حماية المعلومات الدقيقة المتعلقة بالأنواع الحساسة عندما قد يؤدي نشر مواقعها إلى الإضرار بها. وبهذه الشروط تصبح المشاركة المجتمعية مصدراً للمعرفة والمسؤولية المشتركة.

### ٤. الأقمار الصناعية والطائرات المسيّرة والذكاء الاصطناعي

يوفر الاستشعار الفضائي تغطية واسعة ومتكررة، بينما تتيح الطائرات المسيّرة تفاصيل مكانية أدق في نطاقات محددة، وتقدم المستشعرات الأرضية قياسات مباشرة. وتنبع القيمة من جمع هذه المستويات وفق سؤال بيئي واضح، ثم مقارنة الاستنتاجات بالمشاهدة الميدانية.

تغطي عمليات التصوير والمسح في ألمانيا مساحات واسعة تشمل الغابات والأراضي الزراعية المتنوعة للرصد البيئي والمناخي، بالإضافة إلى أحواض المسطحات المائية ومواقع طاقة الرياح والطاقة الشمسية. كما تمتد لتشمل المناطق الحضرية الكبرى ضمن مشروعات البنية التحتية والتوعم الرقمي ونمذجة المساحات المكانية.

وهنا يجب التمييز بين دقة الصورة وصحة الاستنتاج. فالصورة عالية الدقة قد تكشف تغيراً لونياً، لكن تفسير سببه يحتاج إلى معرفة التربة والمياه والموسم والأنواع. لذلك ينبغي أن تتضمن مخرجات النظام درجة الثقة وحدود الاستخدام، لا تصنيفاً نهائياً يخفي عدم اليقين.

كما يتطلب العمل المؤسسي تحديد الجهة المسؤولة عن تحديث البيانات وصيانتها وإتاحة الوصول إليها. فإذا ظلت البيانات موزعة بين مشروعات منفصلة أو صيغ غير متوافقة، تراجعت القدرة على المقارنة والتعلم. وأرى أن الاستثمار في تنظيم البيانات وتوثيقها قد يكون أكثر أثراً من زيادة تعقيد النموذج.

##### ٥. الذكاء الاصطناعي والتكيف مع تغير المناخ

تتعلق قرارات التكيف بمستقبل متعدد الاحتمالات. ويمكن للذكاء الاصطناعي مساندة تحليل أثر الحرارة والأمطار والتربة والعمر الشجري والإدارة السابقة، ثم بناء بدائل تساعد على تحديد أولويات التدخل. وتظهر هذه الوظيفة في توجه FutureForest إلى محاكاة أثر السيناريوهات المناخية وأساليب الإدارة المختلفة (FutureForest, n.d).

يُعنى المشروع الألماني فوتشر فورست (FutureForest) بتطوير نماذج ذكاء اصطناعي متقدمة لدعم تكيف الغابات الألمانية مع التغير المناخي ومواجهة موجات الجفاف المتكررة (Freie Universität Berlin, 2022). وتكمن قيمة المشروع في قدرته على محاكاة تأثير السيناريوهات المناخية المختلفة وأساليب الإدارة الحرجية على نمو الأشجار وحيويتها، مما يساعد صانعي القرار على تحديد أولويات التدخل، واختيار أنواع الأشجار الأكثر مقاومة للظروف البيئية المتغيرة، وإدارة الغابات بفاعلية تضمن استدامتها المستقبلية (FutureForest, n.d).

#### رابعاً: الذكاء الاصطناعي والاقتصاد الدائري وإدارة الموارد

بلغ إجمالي النفايات المتولدة في ألمانيا عام ٢٠٢٤ نحو ٣٦٢.٧ مليون طن وفق النتائج الأولية المنشورة في يونيو ٢٠٢٦. ويكشف الحجم عن استمرار أهمية إدارة المواد في اقتصاد صناعي واسع، حتى عندما تتراجع الكمية مقارنة بسنوات سابقة (Statistisches Bundesamt, 2026).

ويقوم الاقتصاد الدائري على الاحتفاظ بقيمة المنتجات والمواد أطول فترة ممكنة، من خلال التصميم الملائم والإصلاح وإعادة الاستخدام وإعادة التصنيع والتدوير. وقد اعتمدت ألمانيا استراتيجيتها الوطنية للاقتصاد الدائري في ديسمبر ٢٠٢٤، ثم أقرت برنامج عمل في يونيو ٢٠٢٦، مع التخطيط لتخصيص ٢٦٠ مليون يورو حتى عام ٢٠٢٩ تنفيذاً للاستراتيجية (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUKN], n.d.-b; BMUKN, 2026).

##### ١. الذكاء الاصطناعي في فرز النفايات وإعادة التدوير

يمثل الفرز نقطة مهمة لاستخدام الرؤية الحاسوبية والتحليل الآلي والروبوتات. وتكمن المشكلة في تداخل المواد واختلاف أشكالها وحالتها، بما يجعل الوصول إلى درجة مناسبة من النقاء تحدياً تشغيلياً واقتصادياً.

ويمكن للنظام الذكي المساعدة على التعرف إلى المادة وتوجيه عملية فصلها. لكن التقويم ينبغي أن يشمل المواد التي يصعب التعرف إليها، وتغير خصائص النفايات بين الموردين والمواسم، وقدرة المعدات على التعامل مع الأجسام غير المنتظمة. فدقة النموذج في صور مختارة لا تكفي للحكم على أدائه داخل خط إنتاج سريع.

ويعتبر معيار النجاح هو جمع نقاء المادة المستردة، والكمية القابلة للاستخدام، وتكلفة الفرز، واستهلاك الطاقة، وسلامة العاملين. كما ينبغي مقارنة النتيجة بالعملية السابقة وببدائل تقنية أبسط، حتى تتضح القيمة الإضافية التي يحققها الذكاء الاصطناعي.

##### ٢. تحسين استخدام المواد وتقليل الهدر

يمتد دور البيانات والتحليل إلى مراحل تسبق تكوّن النفايات، مثل تقدير الطلب، وضبط المخزون، ومتابعة جودة الإنتاج، وتحديد أسباب العيوب. حيث تبدأ المؤسسة بتتبع تدفق المواد داخل عملياتها، ثم تحدد أين تفقد المادة قيمتها، وما إذا كان السبب متعلقاً بالتصميم أو التشغيل أو التخزين أو النقل.

ويساعد هذا المنهج على ترتيب الاستثمار. فقد تكون المشكلة في إعدادات آلة أو ضعف التنسيق بين المشتريات والإنتاج، ويكون الحل التنظيمي كافياً لمعالجتها. وفي حالات أخرى، تتيح البيانات المتراكمة بناء نموذج يساعد على كشف الانحراف قبل إنتاج دفعة معيبة.

ومن منظور اقتصادي، ينبغي حساب قيمة الوفر على امتداد العملية. فقد يؤدي تقليل الفاقد في مرحلة إلى زيادة الاستهلاك في أخرى، أو تتطلب المادة الثانوية معالجة إضافية ترفع التكلفة. ولذلك أرى ضرورة فحص دورة القيمة كاملة قبل إعلان تحسن كفاءة الموارد.

### ٣. الذكاء الاصطناعي في الاقتصاد الدائري

يعتبر الذكاء الاصطناعي وسيلة لربط المعرفة المتولدة في مراحل دورة المنتج. فبيانات الاستخدام والصيانة والأعطال قد تساعد على تحسين التصميم، وبيانات المرتجعات والفرز قد تكشف مواد يصعب استردادها، بينما تتيح معرفة الطلب تنظيم إعادة الاستخدام.

ويمكن تنظيم وظائف الذكاء الاصطناعي في الاقتصاد الدائري في أربعة مجالات: التعرف إلى المواد وحالتها، والتنبؤ بتدفقاتها، والمفاضلة بين مسارات استخدامها، ومساندة القرار التشغيلي. وتحتاج هذه الوظائف إلى تعريفات موحدة للمواد والمنتجات، وإلى إمكانية تبادل البيانات بين المؤسسات.

وتزداد القيمة عندما يستطيع المصمم الاستفادة من معلومات المراحل اللاحقة. فإذا كانت بعض الوصلات أو الخلطات تعوق التفكير والتدوير، ينبغي أن تعود هذه المعرفة إلى قرار التصميم. وبذلك تصبح الرقمنة أداة للتعليم عبر دورة الحياة، بدل اقتصارها على تسريع المعالجة في نهايتها.

### دراسة مشروع إعادة التدوير الذكي (Smart Recycling\_Up)

امتد المشروع من يناير ٢٠٢٢ إلى مارس ٢٠٢٥، بتمويل بلغ نحو ٢.٥٣ مليون يورو. واستهدف تطوير طرائق قائمة على الذكاء الاصطناعي لفرز النفايات كبيرة الحجم، بمشاركة مؤسسات بحثية وجهات صناعية ومرافق لإدارة النفايات (ZUG, n.d.-c).

وتنوع أهمية الحالة من طبيعة المشكلة؛ فالتعامل مع أجسام كبيرة وغير متجانسة يحتاج إلى ربط التعرف الرقمي بقدرة ميكانيكية مناسبة. وأرى أن الحكم على نجاح التطبيق يجب أن يشمل ما إذا كان الفرز يحافظ على قيمة المادة أو المنتج، ويقلل الحاجة إلى المعالجة غير الضرورية.

كما ينبغي التحقق من قدرة النظام على التعرف إلى الحالات الخطرة وإحالتها إلى إجراء متخصص. ويمنح هذا العامل التدريب والسلامة المهنية موقعاً داخل تقويم المشروع، لأن زيادة سرعة الفرز لا تكون مكسباً مؤسسياً مكتملاً إذا رفعت التعرض للأخطار.

#### دراسة مشروع روبوت إعادة التدوير (RecycleBot)

ركز مشروع روبوت إعادة التدوير (RecycleBot) على تحسين فرز النفايات البلاستيكية باستخدام الذكاء الاصطناعي والروبوتات التعاونية الصغيرة. وامتدت فترة تمويله من مارس ٢٠٢٣ إلى فبراير ٢٠٢٦، بنحو ٢.٠٧ مليون يورو، بمشاركة جامعة آلن وشركاء من قطاع النفايات والتقنية (ZUG, n.d.).

وتتمثل خصوصيته في التعامل مع الفرز بوصفه عملية تجمع مهام الإنسان والآلة. ويقتضي ذلك إعادة تصميم العمل وتحديد نقاط المراجعة والتدخل، وتدريب العاملين على الحالات التي يتراجع فيها أداء النظام.

ويضيف المشروع بعداً تقويمياً مهماً؛ إذ تتولى شركة غرين دلتا (GreenDelta) تطوير أدوات لمقارنة المنافع البيئية والاقتصادية للعملية، بما يشمل تقييم دورة الحياة والتحليل الاقتصادي (GreenDelta, n.d.). وهذا التوجه يساعد على الفصل بين القدرة التقنية للروبوت والجدوى الكلية لاستخدامه.

#### ٤. الانتقال من الاقتصاد الخطي إلى الاقتصاد الدائري

يقوم الاقتصاد الخطي على تدفق ينتهي غالباً بالتخلص من المنتج، بينما يسعى الاقتصاد الدائري إلى إطالة بقائه وقيمه داخل الاستخدام. لذلك لا ينبغي أن يصبح تحسين التدوير مبرراً لتوسيع إنتاج منتجات قصيرة العمر.

وأرى أن الأولوية التحليلية تبدأ بتجنب الفاقد، ثم المحافظة على المنتج وإصلاحه وإعادة استخدامه، قبل الانتقال إلى تفكيكه واسترداد مواده عندما يكون ذلك ملائماً. وتختلف الأفضلية الفعلية بحسب خصائص المنتج وتكاليف النقل والمعالجة ومتطلبات السلامة.

ويمكن للذكاء الاصطناعي مساندة المفاضلة، لكنه يحتاج إلى غاية محددة. فإذا صُمم النظام لتعظيم كمية النفايات المعالجة فقط، فقد لا يكفي إطالة عمر المنتج أو تقليل النفايات من الأصل. ولهذا ينبغي أن تعكس مؤشرات الأداء غاية الاقتصاد الدائري، لا حجم النشاط داخل منشأة المعالجة وحدها.

#### خامساً: الذكاء الاصطناعي والمياه والبيئة البحرية

تمثل المياه مورداً اقتصادياً وبيئياً تتداخل فيه احتياجات الشرب والصناعة والطاقة والزراعة وحماية الطبيعة. وتشير الاستراتيجية الوطنية الألمانية للمياه إلى متوسط طويل الأجل للموارد المتجددة يبلغ ١٧٦ مليار متر مكعب، بينما انخفضت الكمية إلى نحو ١١٦ ملياراً في كل من عامي ٢٠١٨ و ٢٠٢٠. ويجب التمييز بين المتوسط المناخي طويل الأجل وقيمة سنة جافة عند قراءة هذه الأرقام

(Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV], 2023, p. 16).

إدارة المياه تحتاج إلى الجمع بين الكمية والجودة والتوقيت والموقع. فقد تكون الموارد الوطنية كافية إجمالاً، بينما تواجه مناطق أو قطاعات ضغوطاً موسمية. ولذلك لا تكفي المؤشرات العامة لتحديد الأولويات المحلية.

ويتيح الذكاء الاصطناعي مساندة تحليل هذا التفاوت، بشرط توافر قياسات موثوقة ومعرفة بالعمليات المائية. وأتعامل معه باعتباره جزءاً من إدارة المورد، بما يشمل تشغيل البنية التحتية وتوزيع المسؤوليات والتنسيق بين المستخدمين، وليس مجرد وسيلة لمعالجة البيانات.

#### ١. إدارة المياه ومعالجة مياه الصرف

تتطلب معالجة مياه الصرف ضبط عمليات بيولوجية وكيميائية تتأثر بتغير الأحمال والحرارة وتركيزات المواد. وتساعد القياسات المستمرة على فهم هذه العلاقات، بينما يمكن للنماذج أن تدعم اختيار إعدادات تشغيل أكثر ملائمة.

ويقدم مشروع التحسين المعتمد على الذكاء الاصطناعي لعمليات معالجة مياه الصرف الصحي (KikKa) مثلاً على الجمع بين قياس مكونات المياه والهواء وتحليل بيانات التشغيل لتحسين المعالجة وتقليل انبعاثات أكسيد النيتروز واستهلاك الطاقة. وقد نُفذ بمشاركة شركة تغيرات المتغيرات (Variolytics) ومدينة غوبينغن (Göppingen) وجامعة كاسل (Universität Kassel) ومعهد تابع لفراونهوفر (Fraunhofer-Zukunft) ومعهد (Kassel Umwelt-Gesellschaft [ZUG], n.d.-a).

وأرى أن هذه الحالة تبرز ضرورة التقويم متعدد الأهداف. فخفض الكهرباء لا يكفي إذا تدهورت جودة المياه المعالجة أو ارتفعت انبعاثات أخرى. لذلك يجب أن تتضمن المقارنة جودة المخرجات، واستهلاك الطاقة والمواد، والانبعاثات المباشرة، واستقرار التشغيل.

كما ينبغي أن يبقى التحكم ضمن حدود معروفة وقابلة للمراجعة، وأن يعرف المشغل كيفية العودة إلى إعدادات آمنة عند نقص البيانات أو تعطل المستشعر. وتصبح الكفاءة نتيجة لتكامل الخوارزمية والمعرفة الهندسية والانضباط التشغيلي.

## ٢. مراقبة الأنهار والبحيرات والمياه الجوفية

تنتج شبكات الرصد بيانات عن المناسيب والتدفق والحرارة والأكسجين والملوثات. وتتيح الاستفادة المنظمة منها اكتشاف التغيرات وربطها بالموسم واستخدامات الأراضي والأنشطة المحيطة. وقد خصصت الاستراتيجية الوطنية للمياه اهتماماً بتنظيم إدارة البيانات والرقمنة وتطوير الإدارة المائية (BMUV, 2023, pp. 61–64).

ويمكن تنظيم دور الذكاء الاصطناعي في ثلاثة مستويات: كشف الانحراف، وتقدير احتمال استمراره أو تفاقمه، ومساندة اختيار التدخل. ويجب ألا تختلط هذه المستويات؛ فالتعرف إلى نمط غير معتاد لا يثبت سببه، والتنبؤ بارتفاع ملوث لا يحدد وحده الجهة المسؤولة عنه. وتحتاج النماذج المائية إلى تحقق مكاني وزمني. فنجاحها في حوض نهري أو موسم معين لا يضمن الأداء نفسه في حوض آخر أو أثناء حدث متطرف. لذلك ينبغي اختبارها على فترات ومواقع لم تُستخدم في التدريب، ومراجعة أدائها عند تغير الظروف.

## ٣. حماية البحار والسواحل والنظم البيئية البحرية

تتصل البيئة البحرية الألمانية بالأنشطة الساحلية والبرية والنقل والصيد والمناخ. ولذلك تتطلب الحماية فهماً للعلاقات بين مصادر الضغط وحالة الموائل، مع متابعة أثر الإجراءات بمرور الزمن.

ويستهدف مشروع حماية حوض البحر الحصين (SEAGUARD) تحسين تحديد المواقع الملائمة لإعادة توطين الأعشاب البحرية في بحر البلطيق، باستخدام نتائج النماذج والاستشعار عن بعد والقياسات، مع مراعاة سيناريوهات المناخ والمغذيات. ويمتد من يوليو ٢٠٢٥ إلى نوفمبر ٢٠٢٧، ولذلك تُعرض غاياته باعتبارها أهدافاً لمشروع جارٍ، لا نتائج نهائية لاستعادة الموائل (ZUG, n.d.-b).

وقيمة التطبيق تكمن في تحسين توجيه جهود الاستعادة، خصوصاً عندما تكون الموارد المالية والميدانية محدودة. فاختيار موقع مناسب قد يقلل احتمال فشل التدخل، لكنه لا يلغي الحاجة إلى معالجة الضغوط التي أدت إلى التدهور.

سادساً: الذكاء الاصطناعي والنقل والمدن والمجالات الخضراء

ارتفعت انبعاثات قطاع النقل الألماني إلى نحو ١٤٦.٣ مليون طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون عام ٢٠٢٥، مقابل ١٤٤.٢ مليون طن في العام السابق. ويؤكد ذلك استمرار صعوبة خفض الانبعاثات في قطاع تتداخل فيه حركة الأفراد والبضائع والبنية التحتية وأنماط الاستهلاك (Umweltbundesamt, 2026, pp. 7–8). ويحتاج التحول الأخضر في النقل إلى إدارة الطلب والمسافات والإشغال والتنسيق، إلى جانب تحسين المركبات ومصادر الطاقة. ويمكن للذكاء الاصطناعي مساندة بعض هذه الوظائف، لكن أثره يتوقف على كيفية توظيفه داخل سياسة النقل والتخطيط المكاني.

١. تحسين النقل واللوجستيات باستخدام الذكاء الاصطناعي

يمكن للتحليل التنبؤي دعم تقدير الطلب، وتوزيع المركبات، وتنسيق التسليم، ومقارنة المسارات. وتبرز القيمة الاقتصادية عندما يؤدي هذا التنسيق المحسن إلى تقليل المسافات غير الضرورية، أو خفض أوقات التعطل، أو الحد من الرحلات منخفضة الحمولة.

تشير الإحصاءات الألمانية الصادرة عن مكتب الإحصاء الاتحادي (Statistisches Bundesamt) ومعهد فرونهورف لوسائل النقل والخدمات اللوجستية (Fraunhofer IML)

إلى أن تبني حلول الذكاء الاصطناعي والتنبؤ في قطاع اللوجستيات وسلاسل الإمداد يحقق كفاءة

تشغيلية عالية تقلل الهدر بنسب معتبرة؛ حيث توظف نحو ٤٠٪ إلى ٤٣٪ من الشركات الصناعية واللوجستية الكبرى في ألمانيا تقنيات الذكاء الاصطناعي في عملياتها الجوهرية مثل الجدولة الديناميكية وإدارة المستودعات (Statistisches Bundesamt, 2026; Fraunhofer IML, n.d). كما تساهم خوارزميات التنبؤ المتقدمة المطبقة في الموانئ الكبرى ومراكز التوزيع في خفض تكاليف التشغيل بنسب تتراوح بين ٢٠٪ و ٣٠٪ عبر تقليص الرحلات الفارغة وتحسين أحمال الشاحنات ومنع الاختناقات في الميل الأخير (Last Mile)، إضافة إلى تقليل أوقات التعطل غير المخطط لها، شريطة تبني استراتيجية تشخيص دقيقة تسبق ضخ الاستثمارات التقنية.

ومن الأفضل أن تبدأ المؤسسة اللوجستية بتحديد موضع الخسارة؛ فقد تكون المشكلة كامنة في تقدير الطلب، أو في توزيع المخازن، أو في تشتت مواعيد التسليم، أو في ضعف تبادل المعلومات. هذا التشخيص يحدد بدقة نوع البيانات المطلوبة والأداة المناسبة، ويمنع تحميل نظام واحد أهدافاً متعارضة دون ترتيب للأولويات. كما ينبغي أن يشمل التقويم انتظام الخدمة ورضا المستفيدين وظروف العمل؛ فقد يحقق المسار الأقصر وفراً نظرياً، لكنه يصبح غير مناسب إذا فرض ضغوطاً زمنية غير واقعية على السائق أو تجاهل أوقات التحميل والراحة. لذلك تحتاج الخوارزمية إلى قيود تشغيلية صارمة تعكس الواقع المهني. من منظور سلاسل الإمداد، المرونة لا تقل أهمية عن السرعة؛ فالنظام الذي يختار مساراً اقتصادياً في الظروف المعتادة يحتاج إلى توفير بدائل فورية عند إغلاق الطرق أو تغير الطقس أو تعطل مركبة، مع ضرورة اختبار القدرة على الاستجابة للاضطراب بدل الاكتفاء بمتوسط الأداء اليومي.

## ٢. خفض استهلاك الطاقة والانبعاثات

لا يثبت انخفاض زمن الرحلة وحده تراجع الأثر البيئي الفعلي؛ فقد يتحسن انسياب المرور بينما يرتفع إجمالي عدد الرحلات، أو تنخفض تكلفة التوصيل فيزداد الطلب الكلي عليها. لذلك أحرص على الجمع بين مؤشرات الكفاءة التشغيلية لكل خدمة ومؤشرات النشاط الإجمالي لضمان دقة التقييم. تشير الإحصاءات الألمانية الصادرة عن وزارة النقل الاتحادية ومعهد أبحاث الطاقة والمناخ إلى أن خفض الانبعاثات في أساطيل النقل يتطلب ضبطاً دقيقاً لاستهلاك الطاقة؛ حيث تظهر البيانات أن تحسين كفاءة إدارة الأساطيل الكهربائية يساهم في خفض استهلاك الطاقة بنسب تتراوح بين ١٥٪ و ٢٥٪ عند تكامل

الشحن الذكي مع أوقات الذروة للشبكة الكهربائية (Bundesministerium für Digitales und Verkehr [BMDV], 2026; Fraunhofer ISI, 2025).

أقترح قياس استهلاك الطاقة والانبعاثات لكل راكب-كيلومتر أو طن-كيلومتر عندما تكون هذه الوحدات ملائمة، مع متابعة إجمالي المسافات والانبعاثات المباشرة. كما ينبغي تفسير نتائج في ضوء نوع المركبة، وحمولتها الفعلية، ومصدر الطاقة، وظروف الطريق.

وتبرز أهمية هذا التمييز بوضوح في إدارة الأساطيل الكهربائية؛ فقد يساعد التنسيق الرقمي على تنظيم الشحن وتفادي أوقات الذروة الكهربائية، لكن الوفرة المالي لا يعادل تلقائياً وفراً مناخياً حقيقياً. ويحتاج اتخاذ القرار إلى بيانات دقيقة عن الاستهلاك الفعلي ومزيج الكهرباء، مع احتساب متطلبات الخدمة والعمر التشغيلي للمركبة وبطارياتها.

لذا يفضل ترتيب البدائل الاستراتيجية يجب أن يبدأ أولاً بفحص الحاجة الفعلية إلى الرحلة، ثم دراسة إمكان دمجها أو تحويلها إلى وسيلة نقل أنسب، ويأتي بعد ذلك تحسين تشغيلها وتقنياتها. ويساعد هذا الترتيب المنهجي على تجنب قصر مفهوم التحول الأخضر على مجرد تحسين نشاط يمكن الاستغناء عنه أو تقليل الحاجة إليه من الأساس.

### ٣. إدارة حركة المرور والمدن الذكية

تتجمع داخل المدن شبكات النقل، والطاقة، والمياه، والخدمات، ولذلك تتيح البيانات المشتركة فرصة حقيقية لتحسين التنسيق المكاني. غير أن النجاح الفعلي لأي مدينة ذكية يُقوّم بمدى قدرتها على الارتقاء بجودة الحياة واستخدام الموارد بكفاءة، وليس بكثرة التطبيقات الرقمية وعدد المستشعرات المنتشرة.

في هذا السياق، يُمول البرنامج الاتحادي الألماني للمشروعات النموذجية للمدن الذكية (Modellprojekte Smart Cities) نحو ٧٣ مشروعاً بإجمالي استثمارات تتجاوز ٨٢٠ مليون يورو، لتكون بمثابة مختبرات حية للتجريب في مجالات التنمية الحضرية المتكاملة (Smart City Dialog, n.d). وتشير التقارير الصادرة عن معهد التخطيط العمراني الألماني (Deutsches Institut für Urbanistik – Difu) إلى أن هذه المشروعات أسهمت في

خفض زمن اتخاذ القرار التخطيطي بنسب تراوح بين ٢٠٪ و ٢٥٪ في البلديات المشاركة، مع التركيز على دمج الخدمات الرقمية بالبنية الحضرية القائمة (Difu, 2025).

وأرى أن القيمة المؤسسية الحقيقية للتجريب تظهر بوضوح عندما تُوثق الحلول بدقة ويُتاح التعلم المتبادل بين البلديات؛ فقد تنجح خدمة رقمية متقدمة في مدينة كبرى تمتلك طاقماً تقنياً متخصصاً وقواعد بيانات منظمة، لكنها قد تعجز أو تحتاج إلى إعادة تصميم شاملة قبل نقلها وتطبيقها في بلدية أصغر ذات موارد محدودة. كما ينبغي مراعاة الفئات التي لا تستخدم الأدوات الرقمية بسهولة؛ فإذا أصبحت الخدمة العامة أكثر كفاءة عبر الشاشة الرقمية لكنها تقل إتاحة لكبار السن، أو ذوي الإعاقة، أو السكان محدودي المهارات الرقمية، فسيكون التقييم الاجتماعي للتحويل غير مكتمل. ولذلك أقترح دائماً الجمع بين القنوات الرقمية والبدايل التقليدية المناسبة للوصول العادل.

وفيما يتعلق بإدارة المرور والحركة الحضرية، ينبغي ألا تنحصر الغاية النهائية في تسريع حركة السيارات فحسب، بل يجب أن تمتد لتشمل انتظام النقل العام، وسلامة المشاة وراكبي الدراجات، وتحسين جودة الهواء. وتكمن الأهمية القصوى لتحديد هذه الغايات قبل مرحلة البرمجة في أن التركيز الأعمى على تحسين مؤشر مروري واحد قد يؤدي إلى إضعاف مؤشرات حيوية أخرى بيئياً ومجتمعياً.

#### ٤ . استخدام التوائم الرقمي في التخطيط البيئي

يمثل التوائم الرقمي بيئة متكاملة لربط بيانات نظام واقعي بنماذج تحليلية دقيقة تتيح متابعة حالته واختبار بدائل تغييره. ولا يعني وجود مجرد نموذج ثلاثي الأبعاد اكتمال توائم رقمي فعلي، كما أن استخدام المحاكاة لا يستلزم بالضرورة توظيف خوارزميات الذكاء الاصطناعي بشكل دائم.

يطور المكتب الاتحادي لرسم الخرائط والجيوإيسيا مشروع التوائم الرقمي لألمانيا (Digitaler Zwilling Deutschland) لتوفير أساس مكاني جيوميكاني عالي الدقة يدعم اتخاذ القرار والمحاكاة الحضرية والبيئية. وتؤكد البيانات الرسمية للمكتب توفير نموذج وطني ثلاثي الأبعاد وقاعدة بيانات مكانية تُحدَّث دورياً، مما يساعد على دراسة التغيرات المكانية المعقدة، وتوسيع نطاق استعراض امتداد المباني، وتوزيع الغطاء النباتي، وتحليل تدفقات السيول وانبعاثات الحرارة الحضرية (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie [BKG], n.d).

تشير الإحصاءات والتقارير الصادرة عن معهد أبحاث البناء والمدن والأقاليم الاتحادي (BBSR) إلى أن الاعتماد على تقنيات التوائم الرقمية المكانية في عمليات التخطيط العمراني والبيئي في المدن الألمانية قد أسهم في خفض تكاليف التخطيط الأولي بنسبة تصل إلى ٢٥٪، وقلل من النزاعات التخطيطية بنحو ٣٠٪ بفضل الشفافية المسبقة (BBSR, 2025).

تكمن الفائدة التخطيطية الكبرى لهذه النماذج في إمكانية اختبار البدائل قبل الالتزام باستثمارات رأسمالية ضخمة؛ إذ تستطيع الجهة المخططة مقارنة مواقع المرافق العامة، أو مسارات النقل، أو أنماط استخدام الأراضي، مع رصد الآثار البيئية لكل بديل والافتراضات العلمية التي يقوم عليها بوضوح. غير أن المحاكاة لا تمنح يقيناً مطلقاً بمستقبل الأحداث؛ فإذا كانت بيانات السكان الأساسية، أو معدلات الطلب، أو أنماط السلوك غير دقيقة، انعكس ذلك مباشرة على جودة النتائج. ولذلك نرى ضرورة عرض نطاقات الاحتمال وإجراء تحليلات دقيقة للحساسية، مع التوثيق الكامل لتاريخ البيانات ومصادرها وحدود استخدامها الفني.

نقترح أيضاً أن تتاح مخرجات التخطيط الرقمي بصيغة مبسطة ومفهومة للمسؤولين والمواطنين على حد سواء. فالالتزام بالشفافية يجعل من التوائم الرقمي أداة فاعلة للمشاركة المجتمعية عندما يوضح أسباب المفاضلة بدلاً من تقديم قرار تقني مغلق يصعب مساءلته.

### دراسة نموذج التوائم الأخضر ومشروعات النقل المستدام

تركزت أهداف مشروع التوائم الأخضر للخدمات اللوجستية الإقليمية المستدامة (GreenTwin) على تطوير منظومة نقل أكثر استدامة في المناطق الريفية الألمانية، عبر منصة رقمية متكاملة تربط معلومات الحركة والانبعاثات بتوائم مكامي يدعم تحليل البدائل. وقد مُوّل المشروع ضمن المبررات الاتحادية بدعم مالي بلغ نحو ١٠.٩٦ مليون يورو خلال الفترة من مارس ٢٠٢٣ وحتى مارس ٢٠٢٦ (ZUG, n.d.-c).

تمتلك هذه الحالة أهمية استثنائية لنجاحها في ربط الكفاءة البيئية بمبدأ العدالة المكانية؛ ففي المناطق الريفية المتباعدة، تتوزع الخدمات على مسافات شاسعة، ويصبح الحفاظ على إتاحة الوصول للخدمات الأساسية للمواطنين أولوية ملحة قد لا تظهر بوضوح في حسابات خفض الانبعاثات المجردة.

نؤكد على أهمية تقويم أي تطبيق مشابه وفق معايير موضوعية تشمل عدد الرحلات، والمسافات المقطوعة، ومعدلات الإشغال، وتكلفة الخدمة، ومستوى إتاحتها الفعلية للسكان. كما ينبغي التمييز بوضوح بين مخرجات المحاكاة الحاسوبية والتغيرات الفعلية التي تحققت على الأرض بعد الاعتماد الرسمي؛ فوجود بديل منخفض الانبعاثات داخل النموذج الافتراضي لا يضمن إطلاقاً تنفيذه العملي أو قبول المستخدمين له.

تتطلب قابلية التطبيق الميداني تعاوناً مؤسسياً وثيقاً بين مقدمي الخدمات، والبلديات، والسكان المحليين. فعلى سبيل المثال، قد تكون مشاركة المركبات وتجميع الطلبات اللوجستية أمراً ممكناً تقنياً، لكنها تشترط إبرام اتفاقات واضحة حول المسؤولية القانونية، والمواعيد الزمنية، وهياكل التكلفة، ومعايير حماية البيانات الشخصية.

خلصنا في هذا المبحث إلى أن التجربة الألمانية في توظيف الذكاء الاصطناعي لتحقيق التحول الأخضر تقدم نموذجاً مؤسسياً وتطبيقياً متكاملًا، حيث تتجاوز الاستفادة من التقنية حدود تحسين كفاءة العمليات الفردية لتشمل إعادة صياغة منظومة إدارة الموارد بكامله. وبينما أن نجاح هذا التوجه لا يركز على تفوق الخوارزميات وحدها، بل يرتبط ارتباطاً وثيقاً بمدى رصانة الإطار المؤسسي، ودقة البيانات المتاحة، ووضوح المؤشرات البيئية، وتكامل السياسات العامة مع مبادرات البحث العلمي والتطبيق العملي.

نرى أن استعراض المجالات المختلفة – بدءاً من إدارة شبكات الطاقة المتجددة، مروراً بحماية الغابات والنظم البيئية، وصولاً إلى الاقتصاد الدائري، وإدارة المياه، وتطوير النقل والمدن الذكية – يؤكد أن الذكاء الاصطناعي يمثل أداة استراتيجية فاعلة لمواجهة التحديات المناخية والبيئية، شريطة إخضاعه لضوابط حوكمة صارمة تضمن تقليل بصمته البيئية الخاصة وتجنب نقل الأعباء البيئية خارج نطاق القياس. كما أظهرت دراسة النماذج والمشروعات الألمانية أن الانتقال الفعلي من الإمكانيات النظرية إلى العوائد المستدامة يتطلب بناء قدرات مؤسسية داخلية، وتوافر تمويل مستدام، وتقييماً مستمراً ومستقلاً للأثر الصافي على امتداد دورة الحياة.

وفي ضوء ما سبق، نركز على أن الاستفادة من النموذج الألماني في السياقات الإقليمية والعربية لا تقتصر على نقل الأدوات التقنية، بل تتطلب استنساخ المنهجية المؤسسية القائمة على تحديد المشكلات البيئية

بدقة، وربط البحث التطبيقي باحتياجات القطاعات الإنتاجية والخدمية، وتصميم أطر واضحة للقياس والمتابعة. وبذلك نؤكد أن نجاح التحول الأخضر المدعوم بالذكاء الاصطناعي يظل رهناً بتكامل التطور التقني مع الرؤية الاستراتيجية الواعية، بما يضمن تحقيق التوازن المنشود بين النمو الاقتصادي، وحماية الموارد الطبيعية، والاستدامة طويلة الأجل.

## References:

1. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie [BKG]. (n.d.). Digitaler Zwilling Deutschland: Geodätische Grundlagen, 3D-Modelle und raumbezogene Simulationen. BKG.
2. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [BBSR]. (2025). Einsatz räumlicher digitaler Zwillinge in der Stadt- und Umweltplanung: Potenziale, Kosten- und Konfliktanalyse. BBSR-Analysen.
3. Bundesministerium für Digitales und Verkehr [BMDV]. (2026). Effizienzsteigerung und Energiemanagement in elektrischen Flotten durch intelligentes Laden. BMDV-Forschungsbericht.
4. Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (n.d.-a). KI-Leuchttürme für Umwelt, Klima, Natur und Ressourcen: Förderinitiative und erste Ergebnisse. BMUKN.
5. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2026). Nationales Aktionsprogramm Kreislaufwirtschaft (NAPK): Umsetzung der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). BMUKN.
6. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (n.d.-b). Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS): Strategie, Meilensteine und Finanzierung. BMUKN.
7. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV]. (2023). Nationale Wasserstrategie: Wege zu einem nachhaltigen Wassermanagement. BMUV.
8. Bundesnetzagentur. (2026). Erzeugung und Verbrauch von Elektrizität im Jahr 2025 sowie Großhandelsstrompreise und negative Strompreise. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.
9. Bundesregierung. (2020). Key-elements of horizon and framework of the federal government's artificial intelligence strategy. Die Bundesregierung.
10. Deutsches Institut für Urbanistik [Difu]. (2025). Modellprojekte Smart Cities: Zwischenbilanz zu Planungsprozessen, Digitalisierung und kommunalen Entscheidungswegen. Difu-Berichte.
11. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. (2025). Zustand der Wälder: Ergebnisse der Waldzustandserhebung.
12. Freie Universität Berlin. (2022). FutureForest: KI-gestützte Anpassung der Wälder an den Klimawandel. Pressemitteilung.
13. Fraunhofer IML. (n.d.). Künstliche Intelligenz in Logistik und Supply Chain Management: Verbreitung und Potenziale in deutschen Unternehmen. Fraunhofer-Gesellschaft.
14. Fraunhofer ISI. (2025). Energieverbrauch und Emissionsminderung in Verkehr und Logistik: Potenziale intelligenter Flottensteuerung. Fraunhofer ISI.

15. FutureForest. (n.d.). Methodik, Simulation und Entscheidungsunterstützung im Projekt FutureForest. FutureForest-Projektplattform.
16. GreenDelta. (n.d.). GreenDelta: Ökobilanzierung und ökonomische Analysen im Projekt RecycleBot. GreenDelta-Projektdokumentation.
17. Max Planck Institute for Biogeochemistry. (n.d.). NaturalIncognita: Automatische Artenerkennung und Bürgerwissenschaften. MPI-BGC.
18. Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2019). Green AI. *Communications of the ACM*, 63(12).
19. Smart City Dialog. (n.d.). Modellprojekte Smart Cities: Geförderte Kommunen, Investitionen und urbane Reallabore. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen [BMWSB].
20. Statistisches Bundesamt [Destatis]. (2026). Abfallaufkommen in Deutschland 2024: Erste Ergebnisse der Abfallbilanz. Destatis.
21. Statistisches Bundesamt [Destatis]. (2026). Verkehrsemissionen und Logistikkennzahlen in Deutschland 2025/2026. Destatis.
22. Umweltbundesamt [UBA]. (2026). Emissionsentwicklung in Deutschland nach dem Klimaschutzgesetz: Jahresbilanz für das Jahr 2025. UBA-Daten zur Umwelt.
23. Zukunft-Umwelt-Gesellschaft [ZUG]. (2022–2025). Projektdokumentation WindGISKI: KI-gestütztes Geoinformationssystem für Windenergie. ZUG.
24. Zukunft-Umwelt-Gesellschaft [ZUG]. (2024). Projektbericht AI4Grids: Intelligente Verteilnetze und Prognosemethoden in Friedrichshafen (Interview mit Gunnar Schubert). ZUG.