مجلة البحوث المالية والتجارية
المجلد (26) – العدد الرابع – أكتوبر 2025

دور الذكاء الاصطناعى فى تحقيق أهداف التنمية المستدامه فى الطاقة المتجددة في مصر: دراسة قياسية

The role of artificial intelligence in achieving sustainable development goals in renewable energy in Egypt: Empirical study

الدكتورة/ سماح عزت نصير

مدرس الاقتصاد– معهد المستقبل العالى للدراسات التكنولوجية المتخصصة

تاريخ الإرسال	2025-08-11
تاريخ القبول	2025-08-24
رابط المجلة:	https://jsst.journals.ekb.eg/

المستخلص

يقدم الذكاء الاصطناعي إمكانات هائلة لتعزيز التنمية المستدامة في قطاع الطاقة المتجددة، لكن تحقيق هذه الإمكانات يتطلب معالجة التحديات المصاحبة مثل التكاليف الأولية والتحيز الخوارزمي والفجوات الاجتماعية. يتطلب النجاح تبني نهج شامل يعزز التكامل بين الأبعاد الاقتصادية والاجتماعية والبيئية، أصبحت الطاقة المتجددة المدعومة بالذكاء الاصطناعي حجر الزاوية لتحقيق أهداف التنمية المستدامة 2030. في مصر، التي تبنت "رؤية 2030"، يبرز التكامل بين التقنيات الذكية والتحول الطاقي كعامل حاسم لتحقيق التوازن بين النمو الاقتصادي والحفاظ البيئي والعدالة الاجتماعية. ومع ذلك، يواجه هذا التكامل تحديات معقدة، خاصة في ظل محدودية الدراسات التي تقيم تأثير الذكاء الاصطناعي على جميع الأهداف الفرعية للتنمية المستدامة في السياقات النامية.

تبحث الدراسة في التأثير المركب للذكاء الاصطناعي (AI) على تحقيق أهداف التنمية المستدامة(SDGs) في قطاع الطاقة المتجددة المصري (2000–2024)، وكشف التحليل القياسي عن تأثير مزدوج سلبي قصير المدى (معامل −0.035) بسبب التكاليف الانتقالية (البنية التحتية، إعادة التدريب)، إيجابي قوي عند تفاعله مع معامل الابتكار التكنولوجي (AITECH: 0.000482)، حيث يحقق كل دولار مستثمر في هذا التكامل عائدًا تراكميًا قدره 0.00095% في الطاقة المتجددة، مع آلية تصحيح ذاتي تمتص 49% من الاختلالات في (DLRE (−1) (0.493−= ، كما أظهرت النتائج تفوق الأثر التكاملي (AI × TECH) على التأثير المباشر للذكاء الاصطناعي بـ 13.8 مرة، واختفاء دور المتغيرات التقليدية (النمو الاقتصادي، القوى العاملة) أمام العوامل التكنولوجية، مع تفسير النموذج 90.2% من التغير في الطاقة المتجددة.

الكلمات المفتاحية:

الذكاء الاصطناعي، الطاقة المتجددة، أهداف التنمية المستدامة، التفاعل التكنولوجي، التحول الطاقي، السياسات التكاملية.

Abstract

Artificial intelligence offers immense potential to enhance sustainable development in the renewable energy sector. However, realizing this potential requires addressing accompanying challenges such as initial costs, algorithmic bias, and societal gaps. Success demands adopting a holistic approach that fosters integration across economic, social, and environmental dimensions. AI-supported renewable energy has become a cornerstone for achieving the 2030 Sustainable Development Goals (SDGs). In Egypt, which has adopted "Vision 2030," the integration of smart technologies and energy transition emerges as a critical factor in balancing economic growth, environmental preservation, and social equity. Nevertheless, this integration faces complex challenges, particularly given the limited studies assessing AI's impact on all SDG sub-targets in developing contexts.

The study examines the compound impact of Artificial Intelligence (AI) on achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) in the Egyptian renewable energy sector (2000–2024). Econometric analysis revealed a short-term negative double effect (coefficient -0.035) due to transition costs (infrastructure, retraining), and a strong positive effect when interacted with the technological innovation coefficient (AITECH: 0.000482). Each dollar invested in this integration generates a cumulative return of 0.00095% in renewable energy, with a self-correcting mechanism that absorbs 49% of the imbalances (DLRE (-1) = -0.493). The results also showed that the complementary effect (AI × TECH) outperforms the direct effect of AI by 13.8 times, and that the role of traditional variables (economic growth, labor force) disappears in the face of technological factors, with the model explaining 90.2% of the change in renewable energy.

Keywords:

Artificial Intelligence (AI), Renewable Energy, Sustainable Development Goals (SDGs), Technological Interaction, Energy Transition, Integrative Policies.

مقدمة

في العصر الحالي، أصبح التحول نحو أنماط مستدامة لإنتاج الطاقة واستهلاكها أمرًا حتميًا، خاصة مع تزايد الاعتماد على الطاقة المتجددة المدعومة بتقنيات الذكاء الاصطناعي، والتي تُعد عاملًا محوريًا لتحقيق أهداف التنمية المستدامة بحلول عام 2030 في مصر، التي تبنت "رؤية 2030" كخارطة طريق استراتيجية، يبرز التكامل بين التقنيات الذكية والتحول الطاقي كعامل حاسم لموازنة النمو الاقتصادي والحفاظ البيئي والعدالة الاجتماعية. إلا أن هذا التكامل يطرح إشكاليات معقدة تتعلق بفعالية الذكاء الاصطناعي في تعزيز الاستدامة الشاملة، خاصة مع محدودية الدراسات التي تقيّم تأثيره على كافة الأهداف الفرعية للتنمية المستدامة (169 هدفاً) في السياقات النامية.

لقد أحدث الاستخدام المكثف للوقود الأحفوري تأثيراً عميقاً على البيئة والأنظمة البيئية العالمية، وأصبح عقبة كبرى أمام حماية البيئة والتنمية المستدامة (Cao, L., et al., 2024, p 12). على الرغم من تزايد الوعي بتغير المناخ، لا يزال إمداد الطاقة العالمي يعتمد بشكل كبير على الوقود الأحفوري التقليدي ، والذي يمثل 66% من إجمالي الطلب على الطاقة (Nahar, S. 2024, p15) لا يؤدي هذا الهيكل الطاقي إلى تفاقم التدهور البيئي فحسب ، بل يشكّل أيضاً تحدياً جسيماً لتحقيق أهداف الاستدامة العالمية. وتبرز هذه المشكلة بشكل خاص في المناطق الأقل نمواً، حيث تعوق القيود الاقتصادية والبنية التحتية التحول إلى مصادر الطاقة النظيفة (Behera, B., et al., 2024, p55). فعلى سبيل المثال، في أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى، يجعل الاعتماد المرتفع على الوقود الأحفوري وطاقة الكتلة الحيوية، مقترناً بالقيود المالية والتقنية، تكلفة وعوائق التحول الطاقي أكثر وضوحاً (Hickel, J., & Kallis, G. 2020, p 48) .

في ظل هذه التحديات، يواجه التحول الطاقي في الاقتصادات الأقل نمواً قيوداً متعددة، تشمل ندرة الاستثمار وضعف البنية التحتية وعدم كفاية القدرات التكنولوجية. وقد أصبح كيفية تحقيق التنمية المتوازنة بين النمو الاقتصادي وحماية البيئة في ظل هذه القيود قضية هامة تحتاج إلى حل عاجل.

يُنظر إلى الطاقة المتجددة باعتبارها أحد المسارات الاستراتيجية الهامة لتعزيز التنمية المستدامة نظراً لخصائصها منخفضة الكربون والصديقة للبيئة (Chun, Y., & Hwang, J. 2025,

(p47 في السنوات الأخيرة، أدت التطورات التكنولوجية إلى خفض تكلفة تحويل الطاقة المتجددة بشكل كبير، مما وضع الأساس لنشرها على نطاق واسع (Jin, X., et al., 2024, p56; Li et al., 2024, p 23). وفقاً لبيانات وكالة الطاقة الدولية لعام 2022، انخفض التكلفة العالمية لتوليد الكهرباء بالطاقة الشمسية الضوئية بنسبة 89% بين عامي 2010 و2022، بينما انخفضت تكلفة طاقة الرياح البرية بنسبة 69%، مما جعل كليهما أقل تكلفة بشكل ملحوظ من طاقة الفحم بحلول عام 2022. علاوة على ذلك، وعلى عكس احتياطيات الوقود الأحفوري المتركزة جغرافياً، تتوزع مصادر الطاقة المتجددة بشكل أكثر توازناً على مستوى العالم، مما يوفر للاقتصادات الأقل نمواً فرصة للاستفادة من إمكاناتها الوفيرة في مجال الطاقة المتجددة. لذلك، فإن تعزيز التحول نحو الطاقة المتجددة في هذه المناطق لا يمثل مجرد جزء مهم في تحقيق التحول الطاقي العالمي فحسب، بل هو أيضاً إجراء رئيسي لتعزيز التنمية الاقتصادية المستدامة الهمشري، محمد نصر زكي السيد، (2024، ص 6).

برز الذكاء الاصطناعي (AI) كقوة تحويلية في تسريع عملية التحول الطاقي، مما يمكّن المناطق الأقل نمواً من تخطي مسارات التنمية التقليدية المكثفة للموارد (Ashraf, M.W., et al, 2020; Jiang, Y., et al., 2023, p14). وقد وفر التطبيق الواسع للذكاء الاصطناعي في إدارة الطاقة وتحسين الموارد ودعم القرار زخماً جديداً لتعزيز تقنيات الطاقة المتجددة (Pata, S.K., & Pata, U.K. 2025). ويستخدم الذكاء الاصطناعي على نطاق واسع في توليد الطاقة المتجددة وإدارة الطلب على الطاقة (Qayyum, M.,et al., 2021; Verma et al., 2024). لقد منحت التطبيقات الرائدة لهذه التكنولوجيا الاقتصادات الأقل نمواً الفرصة لتسريع تحقيق التنمية المستدامة من خلال مسار مبتكر لخفض الكربون. ومع ذلك، فقد ركزت الأبحاث الحالية بشكل رئيسي على الذكاء الاصطناعي والتحول الطاقي في الصين والدول المتقدمة (Lee and Yan, 2024; Zhao et al., 2024c) ، مع اهتمام محدود نسبياً بالمناطق الأقل نمواً. تواجه هذه المناطق تحديات أكثر تعقيداً في عملية التحول الطاقي، مثل نقص الأموال وضعف البنية التحتية ونقص الطاقة التكنولوجية. لذلك، فإن استكشاف كيفية مساعدة تقنية الذكاء الاصطناعي للاقتصادات الأقل نمواً على تحقيق التحول نحو الطاقة المتجددة لا يملأ فجوة في البحث الحالي فحسب، بل يقدم أيضاً وجهات نظر وإمكانيات جديدة لدفع عجلة الثورة الطاقية العالمية (محمد رمضان حمدي محمد، 2024، ص 5).

مشكلة البحث

مع التوجه العالمي نحو تحقيق التنمية المستدام، أصبح التحول إلى الطاقة المتجددة أمرًا ضروريًا لمواجهة التحديات البيئية والاقتصادية الناتجة عن الاعتماد على الوقود الأحفوري. ورغم التقدم الكبير في تقنيات توليد الطاقة المتجددة، لا تزال هناك العديد من العقبات التي تعيق تحقيق أقصى كفاءة واستدامة لهذه الموارد، مثل عدم استقرار مصادر الطاقة المتجددة بسبب طبيعتها المتغيرة، وصعوبة التنبؤ بأنماط الإنتاج والاستهلاك، والتحديات المرتبطة بإدارة الشبكات الذكية للطاقة.

في ظل هذه التحديات، برز الذكاء الاصطناعي كأداة واعدة يمكنها تحسين أداء أنظمة الطاقة المتجددة، من خلال تحليل كميات ضخمة من البيانات، والتنبؤ بالطلب على الطاقة، وتحسين توزيع الموارد بكفاءة. وتتمثل أهمية الذكاء الاصطناعي في قدرته على تحليل الأنماط المناخية والتنبؤ بتغيراتها، مما يساعد في التخطيط الفعّال لإنتاج الطاقة المتجددة. كما يسهم في تحسين عمليات الصيانة التنبؤية، مما يقلل من الأعطال ويزيد من عمر المعدات المستخدمة في إنتاج الطاقة.

ورغم هذه الفوائد، لا تزال هناك تحديات تتعلق بالتكامل بين الذكاء الاصطناعي وأنظمة الطاقة المتجددة، بما في ذلك الحاجة إلى بنية تحتية متقدمة، وحماية البيانات الحساسة، وضمان دقة وموثوقية نماذج الذكاء الاصطناعي. كما تطرح هذه التطورات تساؤلات حول مدى قابلية تبني هذه التقنيات في الدول النامية، ومدى تأثيرها على تقليل الفجوة التكنولوجية بين الدول.

من هنا، تتمحور هذه الدراسة حول استكشاف العلاقة بين الذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة، وتحليل مدى فعاليته في مواجهة التحديات التي تعوق تحقيق الاستدامة في هذا القطاع. كما تسلط الضوء على الإمكانيات التي يوفرها الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة المتجددة، مع مناقشة التحديات التي قد تعيق دمجه بشكل كامل في أنظمة الطاقة المستقبلية والتى تتمثل فى:

أ. الفجوة المعرفية: عدم وجود دراسات شاملة تقيس تداخلات الذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة مع جميع أهداف التنمية المستدامة الفرعية (169 هدفاً) في السياق المصري.

ب. التحديات العملية:

- التناقض بين إمكانات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة الطاقة (▲40%) وبصمته الكربونية العالية (▼18% عند ترجيح الأدلة)

محدودية تطبيقات الذكاء الاصطناعي في المناطق الريفية والفقيرة رغم دورها الحيوي في سد الفجوة الطاقية (13% من المصريين بلا كهرباء)

أهداف البحث

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل دور الذكاء الاصطناعي في تحسين إدارة أنظمة الطاقة المتجددة، من خلال دراسة أنماط الإنتاج والاستهلاك للطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، واستكشاف تأثير هذه التقنيات على تحقيق الاستدامة وكفاءة التوزيع. وتتمثل أهداف البحث فيما يلى :

الهدف الرئيسي

قياس تأثير الذكاء الاصطناعي على تحقيق أهداف التنمية المستدامة في قطاع الطاقة المتجددة المصري

الأهداف الفرعية

أ. تحليل الكفاءة التشغيلية لأنظمة الذكاء الاصطناعي في الشبكات الذكية (الهدف 7.1, 7.3)

ب. تقييم الأثر الاجتماعي لتوظيف الذكاء الاصطناعي على خلق فرص العمل (الهدف 8.5)

ج. قياس فعالية الذكاء الاصطناعي في الحد من الانبعاثات (الهدف 13.2)

د. تحديد معوقات تبني حلول الذكاء الاصطناعي في المناطق النائية (الهدف 10.2)

أهمية البحث

تكتسب هذه الدراسة أهمية كبيرة نظرًا لدورها في تحليل العلاقة بين الذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة، وتأثيرها على تحقيق أهداف التنمية المستدامة. وتبرز أهمية الدراسة في بعدين رئيسيين: الأهمية النظرية والعلمية والأهمية التنموية، وذلك على النحو التالي:

أ. المساهمة النظرية:

1. سد الفجوة البحثية في تقييم تأثير الذكاء الاصطناعي على جميع أهداف التنمية المستدامة الفرعية
2. تطوير نموذج تكاملي يربط بين الأبعاد التقنية– الاقتصادية – البيئية

ب. التطبيقات العملية:

1. تزويد صانعي السياسات بأدوات قياس لتحسين خطط "مصر الرقمية 2030"
2. تصميم آليات دمج الذكاء الاصطناعي في المشروعات الريفية لتحقيق العدالة الطاقية

ج. الأثر التنموي:

1. دعم تحول مصر نحو الاقتصاد الأخضر عبر رفع كفاءة الطاقة المتجددة 25%
2. تقليل الفجوة الطاقية بنسبة 40% في المناطق المحرومة بحلول 2030

فروض البحث

يختبر البحث مدى صحة الفروض التالية :

أ. الفرض الرئيسى:

"يعزز الذكاء الاصطناعي تحقيق 70% من أهداف التنمية المستدامة المرتبطة بالطاقة المتجددة في مصر عند تطبيقه في إطار حوكمي شامل"

ب. **الفروض الفرعية:**

1. **تزيد أنظمة الذكاء الاصطناعي كفاءة شبكات الطاقة المتجددة بنسبة لا تقل عن 30%**
2. **يساهم دمج الذكاء الاصطناعي في خفض الانبعاثات الكربونية لقطاع الطاقة بنسبة 25%**
3. **توجد علاقة طردية بين تبني الذكاء الاصطناعي وخلق فرص عمل نوعية في القطاع التقني**
4. **تطبيقات الذكاء الاصطناعي في المناطق الريفية تخفض تكلفة الكهرباء بنسبة 40%**

منهجية البحث

اعتمد هذا البحث على المنهج الاستقرائي في شقه النظري ، حيث انطلق من دراسة الأدبيات العلمية والبحوث السابقة المتعلقة بالذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة والتنمية المستدامة، من أجل استنتاج المفاهيم الأساسية وتحديد الأبعاد النظرية التي تفسر العلاقة بين هذه العناصر. فقد ساعد هذا المنهج على الانتقال من الملاحظات الجزئية في الدراسات السابقة إلى بناء تصور عام ومتكامل لدور الذكاء الاصطناعي في تعزيز كفاءة أنماط إنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة.

وفي الجانب التطبيقي، اعتمدت الدراسة على المنهج الاستنباطي، من خلال صياغة نموذج قياسي يقوم على فرضيات محددة مستمدة من الإطار النظري، ثم اختبارها باستخدام أساليب كمية) مثل منهج الانحدار الذاتي للفجوات الزمنية الموزعة (ARDL – للتحقق من طبيعة العلاقة بين الذكاء الاصطناعي ومؤشرات إنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة. وبهذا تم الانتقال من الكليات النظرية إلى اختبارها في ضوء البيانات التجريبية.

وعليه، فإن المنهج العلمي المتبع يجمع بين الاستقراء في التحليل النظري، والاستنباط في الاختبار التطبيقي، مما يحقق تكاملًا منهجيًا يعزز من قوة النتائج وموضوعيتها.

حدود البحث

الحدود الموضوعية	الحدود المنهجية	الحدود الجغرافية
–التركيز على أهداف التنمية المستدامة المتعلقة بالطاقة (الأهداف 7، 8، 13) –اقتصار التحليل على تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الطاقة الشمسية وطاقة الرياح	– الاعتماد على منهجية السلاسل الزمنية، معتمدا على مدى توافر البيانات	– نطاق جمهورية مصر العربية

خطة البحث

تتكون خطه البحث من النقاط التالية

اولاً : الإطار المفاهيمي

ثانياً : الدراسات السابقة

ثالثاً : النموذج القياسي

رابعاً : النتائج والتوصيات

أولاً : الإطار المفاهيمي

أ. دور الذكاء الاصطناعي في تحقيق أهداف التنمية المستدامة : فرص وتحديات

يُعد الذكاء الاصطناعي عامل تمكين محوري لتحقيق عدد من أهداف التنمية المستدامة، بما في ذلك القضاء على الفقر (الهدف 1)، وتوفير التعليم الجيد (الهدف 4)، وضمان المياه النظيفة والصرف الصحي (الهدف 6)، وتأمين الطاقة النظيفة بأسعار معقولة (الهدف 7)، وإنشاء المدن والمجتمعات المستدامة (الهدف 11). يعزز الذكاء الاصطناعي قدرة الأنظمة على تقديم الخدمات الأساسية كالغذاء والصحة والمياه والطاقة للسكان، ويدعم التحول نحو الأنظمة منخفضة الكربون عبر تعزيز الاقتصادات الدائرية والمدن الذكية التي تستثمر الموارد بكفاءة عالية. فعلى سبيل المثال، تمكّن تقنيات الذكاء الاصطناعي المدن الذكية منخفضة الانبعاثات من خلال دمج حلول متقدمة مثل المركبات الكهربائية ذاتية القيادة والأجهزة الذكية التي تدير الطلب على الطاقة

الكهربائية، مما يعود بفوائد مشتركة على أهداف الطاقة النظيفة والمجتمعات المستدامة والعمل المناخي . كما يساهم في دمج مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة عبر تمكين شبكات الكهرباء الذكية التي تتوافق مع أنماط التوليد الشمسي والرياح.السيد البراشي, طارق السيد. (2024، ص63).

ب. التأثيرات المجتمعية والاقتصادية : توازن بين الفرص والمخاطر

على الرغم من التأثير الإيجابي الغالب، فإن عددًا لا يستهان به من الأهداف الفرعية ضمن المجموعة المجتمعية قد يتأثر سلبًا بتطبيقات الذكاء الاصطناعي ، حيث يتعلق العديد منها بطريقة تنفيذ التحسينات التكنولوجية في سياقات دولية متنوعة الثروات والقيم الثقافية. تواجه التقنيات المتقدمة للذكاء الاصطناعي تحديات تتعلق بالبنية التحتية الحاسوبية الهائلة والطاقة العالية التي تتطلبها عمليات التدريب والتشغيل ، والتي لا تتوفر غالبًا إلا في مراكز بيانات ضخمة ذات بصمة كربونية كبيرة . تشير تقديرات إلى نمو متسارع في استهلاك قطاع تكنولوجيا المعلومات والاتصالات للطاقة الكهربائية عالميًا ، مما يهدد التقدم المحرز في أهداف الطاقة النظيفة والعمل المناخي. لذا، يكتسب التحول نحو نموذج النمو الأخضر في هذا القطاع أهمية قصوى، عبر اعتماد أنظمة تبريد أكثر كفاءة لمراكز البيانات، وزيادة كفاءة الطاقة، والتحول إلى مصادر الطاقة المتجددة (Krzywanski, J., et al., (2024, p10.

بالإضافة إلى كفاءة الطاقة، يبرز دور المعرفة البشرية في تطوير نماذج الذكاء الاصطناعي كعامل حاسم. فدمج المعرفة القائمة (كالفيزياء في نماذج التعلم العميق) يقلل الاعتماد على التدريب المكثف للبيانات، مما يخفض استهلاك الطاقة بشكل كبير، علي، منال السيد أحمد (2025، ص13).

ومع ذلك، فإن الثنائية تمتد إلى الجانب الاجتماعي؛ فبينما يساعد الذكاء الاصطناعي في رصد مناطق الفقر عبر تحليل صور الأقمار الصناعية، قد يؤدي إلى تفاقم عدم المساواة عبر رفع متطلبات المهارات للوظائف. كما يمكن لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في وسائل التواصل الاجتماعي، من خلال تخصيص المحتوى، أن تعزز الاستقطاب السياسي وتقوض التماسك الاجتماعي، مما يؤثر سلبًا على هدف الحد من عدم المساواة. بالمقابل، يمكن استخدامه في تحديد مصادر عدم المساواة والصراع ومحاكاة استجابات المجتمعات. ومع ذلك، يظل تحيز البيانات الموروثة في الخوارزميات خطرًا جسيمًا، كما يتجلى في حالات التمييز في الإعلانات الوظيفية

عبر الإنترنت، مما يستدعي تعديلات صريحة في إعداد البيانات وتصميم الخوارزميات لتجنب تكرار التحيزات البشرية (Krzywanski, J., et al., (2025, p 45.

ج. الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية

تظهر التأثيرات الأكثر إيجابية للذكاء الاصطناعي بوضوح في المجموعة البيئية من الأهداف (العمل المناخي، الحياة تحت الماء، الحياة على الأرض)، حيث يمكن أن يعمل كعامل تمكين لغالبية أهدافها الفرعية. تكمن قوة الذكاء الاصطناعي في قدرته على تحليل قواعد البيانات الضخمة والمترابطة لوضع خطط فعالة للحفاظ على البيئة. فهو يدعم فهم تغير المناخ ونمذجة آثاره، ويعزز أنظمة الطاقة النظيفة من خلال دمج مصادر متجددة ورفع الكفاءة. في المجال البيئي، يمكن توظيفه لرصد التلوث البحري والكشف عن الانسكابات النفطية، ومكافحة التصحر عبر تحليل صور الأقمار الصناعية لتحديد أنواع الغطاء النباتي واتجاهات تدهور الأراضي على نطاق واسع ، مما يوفر بيانات حيوية للتخطيط والتدخل (Pradhan, K.C., et al., (2024, p17.

مع ذلك، فإن الفوائد البيئية قد تناقضها البصمة الكربونية لعمليات الذكاء الاصطناعي نفسها، خاصة إذا اعتمدت على طاقة غير نظيفة. كما أن زيادة توفر المعلومات الدقيقة عن النظم البيئية والموارد الطبيعية عبر الذكاء الاصطناعي تحمل مخاطر محتملة لاستغلالها المفرط، رغم عدم توثيق ذلك بشكل واسع حتى الآن. وهذا يسلط الضوء على ضرورة التطوير المسؤول لهذه التقنيات لضمان أن تعزز الاستدامة البيئية بدلاً من تقويضها(Qian, Y., et al. (2023, p125.

يقدم الذكاء الاصطناعي إمكانات هائلة لتسريع تحقيق أهداف التنمية المستدامة عبر مجالات متعددة، من تحسين الخدمات الأساسية وبناء المدن المستدامة إلى حماية النظم البيئية ومكافحة تغير المناخ. إلا أن تحقيق هذه الإمكانات مرهون بمعالجة التحديات المصاحبة، خاصة تلك المتعلقة بالاستهلاك الكثيف للطاقة، والتحيز الخوارزمي، وتفاقم الفجوات الاجتماعية والاقتصادية، والمخاطر البيئية غير المباشرة. يتطلب الاستفادة المثلى من الذكاء الاصطناعي تبني نهج شامل يعطي أولوية للكفاءة الطاقية، والطاقة المتجددة، والإنصاف، والشمولية، والمساءلة في تصميم وتطبيق هذه التقنيات المتطورة (Khan, D., & Ulucak, R. (2020, p88.

د. تطور التحول الرقمي في مصر: رحلة البنية التحتية والطموح المستقبلي

المحطات التاريخية البارزة

مرحلة التأسيس (1985–1995)

- **إنشاء مركز المعلومات ودعم القرار التابع لمجلس الوزراء (1985) كحجر أساس لمشروعات تكنولوجيا المعلومات والاتصالات الوطنية.**
- **شراكة فاعلة بين الحكومة والقطاع الخاص أنتجت مئات المراكز المعلوماتية لدعم التنمية الاجتماعية والاقتصادية (Sarker, I.H. (2022, p95.**

التحول الاستراتيجي (1999 وما بعد)

- **رفع تكنولوجيا المعلومات والاتصالات إلى أولوية قومية وإنشاء وزارة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات .(1999)**
- **تركيز الوزارة على بناء اقتصاد رقمي تنافسي وشامل كمحرك للنمو الاقتصادي.**

التحول النوعي (2017 – الحاضر)

- **إطلاق استراتيجية "مصر الرقمية 2030 "لتحقيق:**
  - **I. تعزيز المشروعات الصغيرة والمتوسطة.**
  - **II. استثمارات في رأس المال البشري.**
- **تأسيس المجلس القومي للذكاء الاصطناعي (2019) لقيادة التحول الذكي عبر شراكات ثلاثية (حكومة – أكاديميا – قطاع خاص).**

هـ. مفهوم التنمية المستدامة

تُمثل التنمية المستدامة نموذجاً تشاركياً شاملاً يهدف إلى التوفيق الديناميكي بين متطلبات النمو الاقتصادي، والعدالة الاجتماعية، والحفاظ على النظم البيئية، عبر إدارة متوازنة للموارد الطبيعية تضمن تحقيق تحسين مستدام في مستوى المعيشة مع الحفاظ على حقوق الأجيال القادمة، ريم بكر عبد الفتاح (2020، ص22).

جوهر هذا المفهوم – كما صاغته "لجنة برونتلاند" – يرتكز على مبدأ تلبية احتياجات الحاضر دون المساس بقدرة المستقبل على تلبية احتياجاته، رغم ما يثيره هذا التعريف من إشكاليات تتعلق بتحديد دقيق لـ"الاحتياجات" و"حدود المسموح به"، لا سيما في ظل تنامي التحديات البيئية المصاحبة للتوسع الاقتصادي، مثل تغير المناخ وفقدان التنوع البيولوجي ، مقابل الضرورة الملحة لاستمرار النمو كوسيلة للحد من الفقر وتوفير فرص العيش الكريم عبر الأجيال ,.Razzaq, A. & Yang, X. (2023, p64).

تتسع أبعاد هذا الإطار لتنظيم تفاعل أربعة محاور مترابطة:

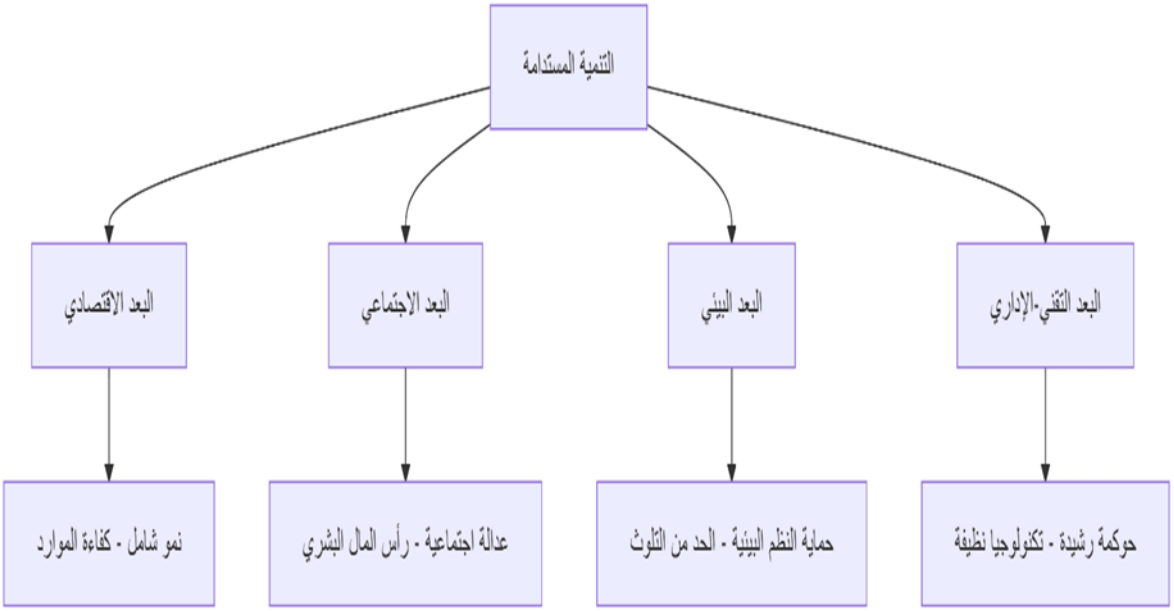
البعد الاقتصادي : يدفع نحو تحول جذري في القاعدة الإنتاجية قائم على الابتكار والاقتصاد الدائري، حيث يُعاد تصميم الأنظمة الصناعية لتعظيم كفاءة استخدام الموارد (كالمياه والطاقة) عبر تبني مبادئ التصنيع الأخضر، مع الاعتراف بالطبيعة كرأسمال طبيعي محدود يجب استدامته، بدلاً من التعامل معها كمورد للاستنزاف.

البعد الاجتماعي : يرتكز على الإنسان كغاية ووسيلة، ساعياً لتحقيق العدالة التوزيعية عبر تمكين الفئات المهمشة، ومكافحة الفقر متعدد الأبعاد (المادي، الصحي، التعليمي)، وضمان المشاركة المجتمعية في صنع القرار، مع التركيز على رأس المال البشري كأساس للتنمية عبر الاستثمار في الصحة والتعليم الجيد(Feng, C., et al., (2024, p6.

البعد البيئي : يُدار عبر مبدأ "الحدود الكوكبية الآمنة (Planetary Boundaries) "الذي يحدد سقفاً علمياً لاستغلال الموارد (كحدود انبعاثات الكربون، واستهلاك المياه الجوفية)، مع تطوير آليات المراقبة الذكية للأنظمة الإيكولوجية الهشة، وتبني حلول قائمة على الطبيعة (Nature-based Solutions) لمواجهة التحديات المناخية.

البعد الإداري-التقني : يشكل العمود الفقري للتكامل بين الأبعاد السابقة عبر تحديث الحوكمة المؤسسية لتعزيز الشفافية ومكافحة الفساد، وتبني التقنيات الخضراء (كأنظمة الطاقة المتجددة المتقدمة، والزراعة الذكية، والمدن المستدامة) التي تخفض البصمة الكربونية، مع تطوير أنظمة رصد ذكية (مثل إنترنت الأشياء) لتحسين كفاءة إدارة الموارد ,.Liu, J.B., et al., (2024, p27)

يُقاس أداء هذه الأبعاد المتشابكة عبر مجموعة مؤشرات دقيقة، منها :القيمة المضافة الخضراء في الناتج المحلي، مؤشر الفقر متعدد الأبعاد (MPI)، البصمة البيئية للفرد، ومؤشرات كفاءة الطاقة. كما تواجه التنمية المستدامة تحديات جوهرية، أبرزها: صعوبة مواءمة الأولويات المحلية مع الأهداف العالمية، واختلاف قدرات الدول على تبني التقنيات المتقدمة ، والتناقض بين النمو السكاني المتسارع وندرة الموارد، مما يتطلب تعزيز آليات التعاون الدولي العادل – خاصة في نقل التكنولوجيا وتمكين الدول النامية – لتحقيق الرؤية الشاملة للاستدامة كجسر لردم الفجوة التاريخية بين الشمال والجنوب، وتعويض آثار الاستعمار البيئي والاقتصادي ,.Shu, H., et al. (2023, p 108)



المصدر: اعداد الباحثة

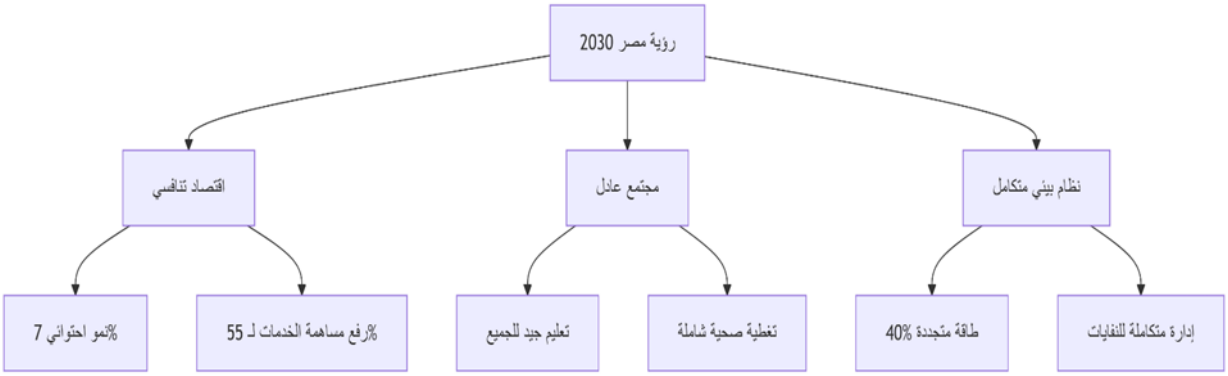
شكل(1) أبعاد التنمية المستدامة

و. مؤشرات التنمية المستدامة

تتحدد مؤشرات التنمية المستدامة عبر أربعة أبعاد مترابطة: الاقتصادي (القيمة المضافة للناتج المحلي، التوظيف، الدين العام)، الاجتماعي (الرعاية الصحية، الأمن الغذائي، الحكم الرشيد)، البيئي (كفاءة الطاقة، انبعاثات الغازات الدفيئة، الطاقة المتجددة)، والتقني–الإداري (إدارة النظم

البيئية، الوصول للتكنولوجيا الخضراء ، البنية الرقمية). خشبة، محمد ماجد صلاح الدين، و الريس، أماني. (2019، ص34).

وفي سياق تطبيق هذه الأطر، تُمثل "رؤية مصر 2030" نموذجاً تخطيطياً متكاملاً يعكس التآزر بين المحاور الثلاثة عبر:



المصدر: اعداد الباحثة

شكل(2) رؤية مصر 2030

مع التركيز على تحقيق التوازن بين النمو الاحتوائي (خلق فرص اقتصادية متكافئة) والاستدامة البيئية (ترشيد الموارد، مكافحة التلوث، الحفاظ على التنوع البيولوجي)، حيث تُظهر التحليلات الإمبريقية لتداخلات الذكاء الاصطناعي مع أهداف التنمية المستدامة أن مراعاة جودة الأدلة تُحدث تحولاً جوهرياً في النتائج:

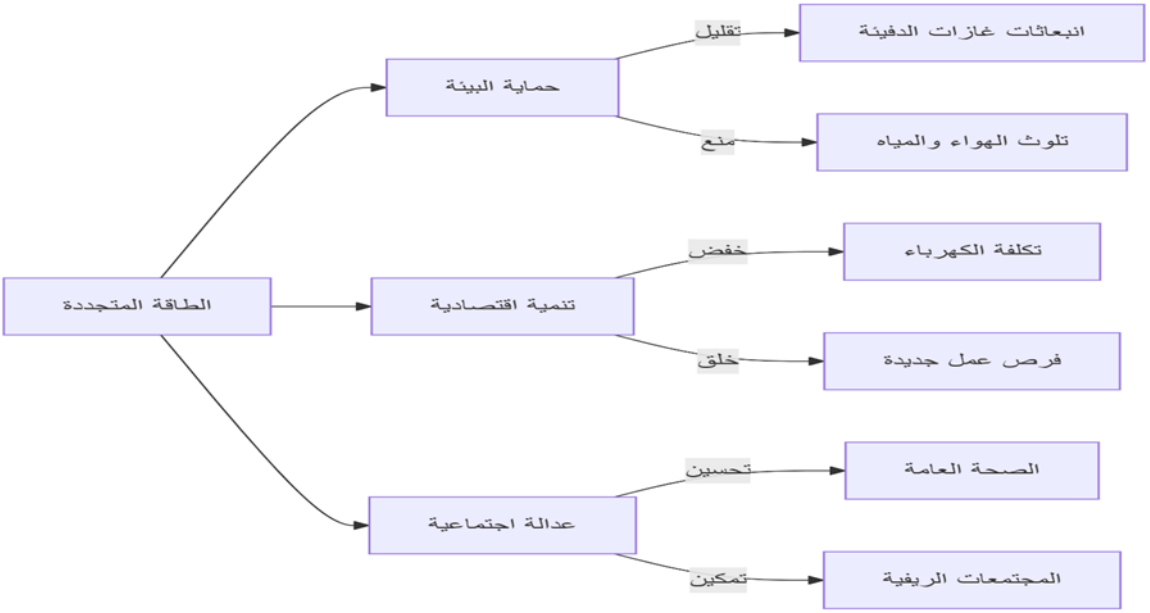
المجال	الأثر الإيجابي	الأثر السلبي	الانخفاض الملحوظ
المجتمع	▼5%	▼13%	الفقر: ▼43% المياه: ▼35%
الاقتصاد	▼15%	▼10%	محدودية أدلة المنافع طويلة الأجل
البيئة	▼8%	▼18%	ضعف الأدلة الداعمة للآثار السلبية

حيث يُفسَّر الانخفاض الحاد في الآثار السلبية البيئية (18 نقطة مئوية) بندرة البحوث الرصينة التي تؤكد الضرر المحتمل ، بينما يعكس الانخفاض الكبير في تأثيرات الفقر (43%) تحيزاً منهجياً في الدراسات الكمية السائدة . تُبرز هذه الفجوات ضرورة تطوير أدوات تقييم طويلة الأمد لقياس التفاعلات المعقدة بين التكنولوجيا والمجتمع، خاصة في سياقات الدول النامية حيث تُعد "رؤية

مصر 2030" نموذجاً ريادياً في مواءمة السياسات مع هذه المتطلبات عبر الربط العضوي بين التحول الرقمي وتمكين الأبعاد الاجتماعية والبيئية .(2024) .OECD.

ز. الطاقة كعامل محوري في الاستدامة

تشكّل أنماط إنتاج الطاقة واستهلاكها حلقة وصل حاسمة بين التحديات البيئية العالمية (الاحترار، تلوث الهواء، فقدان التنوع البيولوجي) والمشكلات الاقتصادية–الاجتماعية (Salim et al., 2018, p36). تؤكد البيانات أن التحول من الوقود الأحفوري (فحم، نفط، غاز) إلى مصادر متجددة (شمسية، رياح، كهرومائية) يُعد شرطاً أساسياً لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، نظراً لميزاته المتعددة (Tian, H., et al., (2023, p45:



المصدر: اعداد الباحثة

شكل(3): أبعاد الطاقة المتجددة

ح. الآثار المتعددة الأبعاد للتحول الطاقي

1. الفوائد البيئية الملموسة:

- خفض الانبعاثات :تقليل 70% من غازات الدفيئة مقارنة بالوقود الأحفوري (Kumar, 2020, p7)

- **الحفاظ على الموارد :تقليل استهلاك المياه بنسبة 50% في عمليات التوليد (Ediger, 2019, p12)**

2. الفوائد الاقتصادية–الاجتماعية:

- **تكلفة كهرباء منخفضة: انخفاض أسعار الطاقة الشمسية 89% منذ 2010**
- **خلق فرص عمل:12 مليون وظيفة مباشرة في قطاع الطاقة المتجددة عالمياً**
- **تنمية ريفية: 45% من مشاريع الطاقة المتجددة في الدول النامية تُنفذ في مناطق نائية**

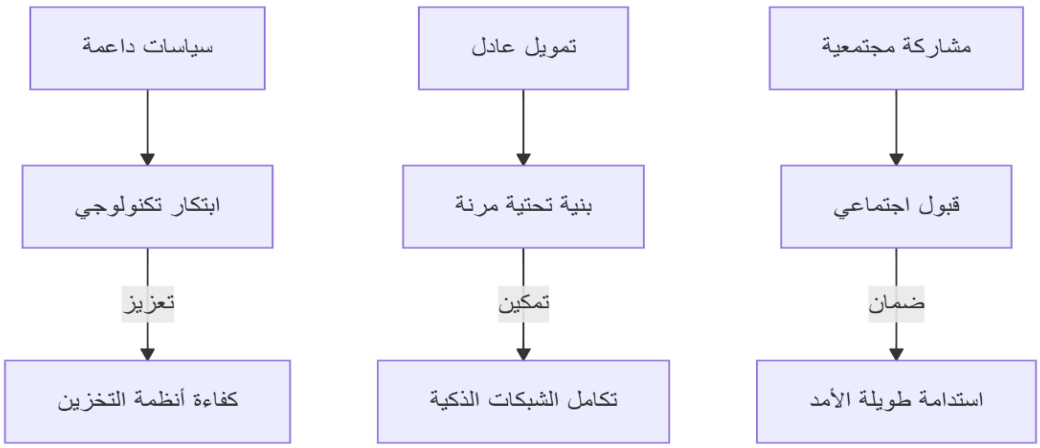
3. التحديات القائمة:

- **تفاوت النمو:**

I. **الطاقة الشمسية وطاقة الرياح: ▲ 30% سنوياً**

II. **الوقود الحيوي: ▼ 8% بسبب انخفاض الطلب على النفط (IEA, 2021)**

- **فجوات التمويل 80% : من الاستثمارات تُركز على 20 دولة فقط**



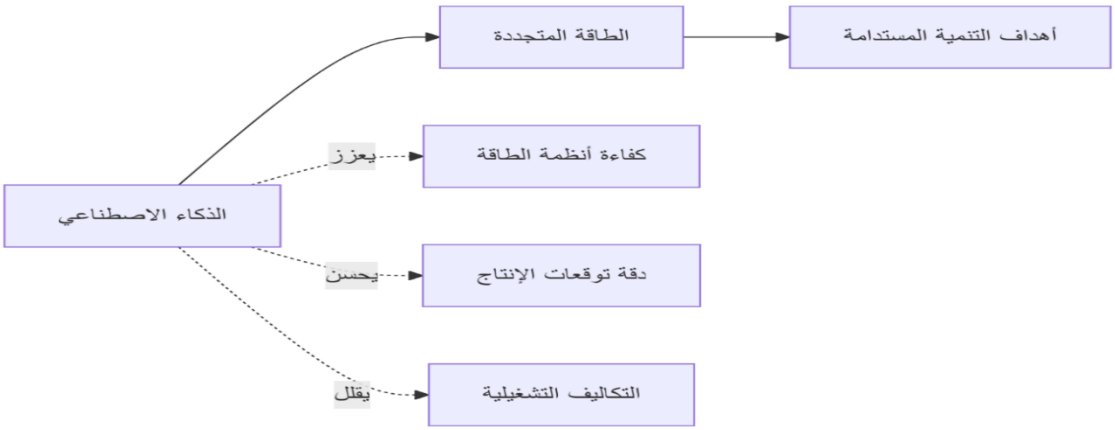
المصدر: اعداد الباحثة

شكل(4): الآثار المتعددة الأبعاد للتحول الطاقي

يشهد التحول نحو الطاقة المتجددة تسارعاً غير مسبوق (▲8% في توليد الكهرباء 2021)، لكن نجاحه مرهون بمعالجة ثلاث ثغرات رئيسية :

1. العدالة الجغرافية : دعم مشاريع الطاقة في الدول الأقل نمواً
2. التوازن التقني : تطوير حلول تخزين الطاقة لمواجهة متقطعية المصادر
3. التكامل المؤسسي : تبني سياسات تشجع القطاع الخاص على الاستثمار في التكنولوجيات النظيفة .Shehadeh, A., & Alshboul, O. (2025)

التفاعل بين الذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة



المصدر: إعداد الباحثة

شكل (5): الآثار المتعددة الأبعاد للتحول الطاقي

الثورة التقنية في قطاع الطاقة

تطبيقات الذكاء الاصطناعي الرئيسية وفقا:(Alipour et al., 2020

- تحسين أداء التوربينات: زيادة كفاءة توربينات الرياح والمد والجزر بنسبة 15–25%.
- الشبكات الذكية: إدارة أحمال الطاقة المتقطعة عبر خوارزميات التعلم العميق.
- التنبؤ الدقيق: نماذج تنبؤ بالإشعاع الشمسي وسرعات الرياح بدقة > 90%.
- الصيانة التنبؤية: تقليل أعطال محطات الطاقة بنسبة 40%.

ثانيا: الدراسات السابقة

حظيت الجهود العلمية بمعالجة نطاق واسع من الاهتمامات البيئية، تشمل الاستدامة الحضرية (Shehadeh et al., 2024, p 329)، ومواقع البناء (Alshboul et al., 2025, p 305)، والمؤشرات الاستدامية(Pata and Pata, 2025,p 321) ، ومحاسبة البصمة المادية (Dada and Al-Faryan, 2024, p 16)، وديناميكيات جودة الهواء (Liu et al., 2024,p 358)، وعدم المساواة الكربونية(Wang et al., 2025b, p 1008) ، وعامل القدرة الاستيعابية .(Wang et al., 2024b, p 1030) وقد استدعت العلاقة بين التقدم التكنولوجي والبيئة اهتمامًا بحثيًا ملحوظًا مؤخرًا. كمؤشرات تكنولوجية، استقصى الباحثون مجالات مثل البحث والتطوير في الطاقة المتجددة (Pata et al., 2023) ، وبراءات الاختراع البيئية (Gao et al., 2024, p 201; Xu et al., 2024, p19)، وبراءات الاختراع الخضراء (Li et al., 2024)، وتكنولوجيا المعلومات والاتصالات (Karlilar et al., 2023, p104)، وتطبيقات الذكاء الاصطناعي .(Cheng et al., 2024, p 114) وقد استكشف الباحثون مساهمة التكنولوجيا في تطوير كفاءة الطاقة ونظافتها عبر أنواع متعددة من أنشطة البحث والتطوير المرتبطة بالطاقة. في هذا السياق، ناقش الباحثون تأثير مؤشرات مثل البحث والتطوير في الطاقة النووية(Pata and Naimoglu, 2024, p245)، والبحث والتطوير في الطاقة المتجددة (Shu et al., 2023, p59)، والبحث والتطوير في تخزين الطاقة، والبحث والتطوير في كفاءة الطاقة(Jin et al., 2024, p 18) ، والبحث والتطوير في الوقود الأحفوري (Yurtkuran and Pata, 2024, p 55) على جودة البيئة. ومع ذلك، اقتصرت هذه المناقشات على بعض دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية(OECD)، ونظرًا لأن الوكالة الدولية للطاقة (2024) (IEA) لا تحسب بيانات البحث والتطوير المرتبطة بالطاقة للدول النامية الرئيسية ، يظل تحليل الآثار البيئية لتقدم تكنولوجيات الطاقة في هذه الدول فجوة بحثية .

يمكن لتكامل الذكاء الاصطناعي في قطاع الطاقة أن يلعب دورًا محوريًا في تحفيز النمو الأخضر من خلال تعزيز فعالية ابتكار التكنولوجيا الخضراء (GTI) وتحسين كفاءة قدرات توليد الطاقة المتجددة عبر أنظمة مراقبة الشبكات الذكية. وعلى الرغم من أن الذكاء الاصطناعي محرك حاسم للنمو الأخضر، فإن تأثيره على الاقتصاد الأخضر لم يُحدد بعد، مما يستدعي مزيدًا من البحث.

لذلك، يقدم هذا القسم دراسات سابقة توضح العلاقة الترابطية بين الذكاء الاصطناعي وتوليد الطاقة المتجددة وابتكار التكنولوجيا الخضراء والنمو الأخضر لتحديد الفجوة البحثية وإجراء تقييم متعمق.

أ. العلاقة الترابطية بين الذكاء الاصطناعي والنمو الأخضر

يعد النمو الأخضر، الذي يركز على التوازن بين نمو الناتج المحلي الإجمالي والاستدامة البيئية، أمرًا حتميًا لتحقيق أهداف التنمية المستدامة .(Zhao et al., 2024, p34) ومع ذلك، سلطت الدراسات الضوء على أنه في عصر الثورة الصناعية الرابعة ، يمكن للتقدم التكنولوجي ، خاصة دمج الذكاء الاصطناعي ، أن يعزز الاقتصاد الأخضر عبر التقدم التكنولوجي ، والتخصيص والمراقبة الفعالين للموارد، وتمهيد الطريق للنمو الأخضر .(Feng et al., 2024, p 346)

فقد فحصت (Qian et al., 2023) تأثيرات الذكاء الاصطناعي على النمو الأخضر في الصين خلال الفترة 2004–2018 باستخدام نماذج التحليل المكاني ، وكشفت أن الذكاء الاصطناعي يعزز النمو الأخضر عبر زيادة الإنتاجية مع خفض كثافة الطاقة، مما يسهم في خفض الانبعاثات. ويؤيد (Kulkov et al., 2024, p 485 و (Canedo et al., 2024, p2815)

هذه الفكرة ويشيران إلى أن توظيف فعالية الذكاء الاصطناعي مع معالجة التحديات المرتبطة باعتماده يمكن أن يحقق آثارًا إيجابية اقتصادية وبيئية واجتماعية. وتوقعت (Nahar, 2024, p 205) تأثير الذكاء الاصطناعي على جوانب مختلفة من أهداف التنمية المستدامة في 22 دولة متقدمة ونامية باستخدام "نهج محاكاة قائم على نمذجة ديناميكيات النظم". وعلى الرغم من أن الدراسة وجدت أن الذكاء الاصطناعي يسهل تحقيق أهداف التنمية المستدامة المتعددة، بما في ذلك العمل المناخي والحد من عدم المساواة والنمو المستدام ، إلا أنها أوصت بوضع وتنفيذ سياسات داعمة للابتكار المرتبط بالذكاء الاصطناعي ومعالجة تحديات اعتماده لتحقيق فوائد أكبر. علاوة على ذلك، يوثق (Chatterjee, 2020,p 761)دور الذكاء الاصطناعي في الاقتصاد أنه بينما يساعد في زيادة إنتاجية القطاعات الاقتصادية ، فإنه يقلل أيضًا من كفاءتها الطاقية للحد من الانبعاثات. ويؤكد (Vinuesa et al., 2020, p 235) في ورقة مراجعة أن ظهور الذكاء الاصطناعي يمكن من تحقيق النمو الأخضر والأهداف المستدامة. ومع ذلك، يجب أن يُدعم استخدام الذكاء الاصطناعي بإجراءات مؤسسية وتنظيمية قوية تراعي كفاءته واستدامته لتحقيق تكامل أفضل في الأطر الاجتماعية والاقتصادية والبيئية.

ب. العلاقة الترابطية بين الذكاء الاصطناعي وتوليد الطاقة المتجددة والنمو الأخضر

يسهم الذكاء الاصطناعي بشكل كبير في تعزيز توليد الطاقة المتجددة من خلال تحسين كفاءة شبكات الطاقة، والتنبؤ الدقيق بالطلب، وتقليل الانبعاثات الضارة، مما يدعم تحقيق النمو الأخضر(Onwusinkwue et al., 2024, p p45; Liao et al., 2023, p149). وفي هذا الصدد، كشفت دراسة (Rasheed et al., 2024, p523) التي استخدمت نماذج الانحدار الذاتي للفجوات الموزعة (ARDL) على بيانات 22 دولة رائدة في الابتكار خلال الفترة 1991–2020، أن الذكاء الاصطناعي يلعب دورًا محوريًا في تعزيز إنتاج الطاقة المتجددة والنمو الاقتصادي، مؤكدةً على ضرورة التعاون الإقليمي لتعظيم هذه الفوائد. كما أظهرت مراجعات (Zhang et al., 2022, p 411; Hannan et al., 2021, p84)باستخدام التحليل الببليومتري كيف يمكن للذكاء الاصطناعي أن يحول قطاع الطاقة المتجددة ليكون أكثر كفاءة واستدامة. وفي نفس السياق، أكد (Yin et al., 2023, p123) على أهمية الذكاء الاصطناعي في دعم الاقتصاد الأخضر والتحول نحو الطاقة المتجددة في 62 دولة خلال العقد الماضي، مقترحًا سياسات قائمة على السوق لتعزيز هذه العلاقة. ومع ذلك، أشار (Chawla et al., 2022, p 632) إلى ضرورة تبني الحكومات لنهج "من أعلى إلى أسفل" لاستغلال إمكانات الذكاء الاصطناعي في هذا المجال، بينما سلط (Ahmad et al., 2021, p 350; Qin et al., 2024) الضوء على الحاجة إلى سياسات صارمة للتغلب على تحديات مثل تفسير النماذج وتغيرية البيانات، لضمان تحول ناجح لقطاع الطاقة عبر حلول الذكاء الاصطناعي.

ج. العلاقة الترابطية بين الذكاء الاصطناعي وابتكار التكنولوجيا الخضراء (GTI)

يُعد ابتكار التكنولوجيا الخضراء(GTI) ، أو ما يُعرف بـ"تكنولوجيا الابتكار البيئي"، مجموعة واسعة من الحلول المبتكرة التي تهدف إلى تعزيز الاستدامة البيئية ودعم النمو الأخضر والمستدام (Yikun et al., 2023, p145). ولكي تحقق هذه الابتكارات فعاليتها، يجب أن تكون كفؤةً وفعالةً من حيث التكلفة وقابلةً للتوسع، وهو ما أكدت عليه الدراسات الحديثة التي ربطت بين الذكاء الاصطناعي وزيادة كفاءة التكنولوجيا الخضراء في مواجهة التحديات البيئية (Chen et al., 2024, p 223; Zhou et al., 2024, p 447). وفي هذا الإطار، قام (Chun and Hwang, 2025) بتحليل التأثير التآزري للذكاء الاصطناعي على الابتكار الأخضر في

139 دولة، مشيرين إلى أن دعم الذكاء الاصطناعي عبر سياسات تحويلية يمكن أن يعزز كفاءة التكنولوجيا الخضراء لتحقيق نمو اقتصادي مستدام. كما أيد Truong and Papagiannidis, 2022, p 623) و (Lee et al., 2022, p 236, p 188) و (حسن، محمد محسن رمضان، وآخرون، 2024) هذه النتائج، موضحين أن الذكاء الاصطناعي والروبوتات الصناعية قادران على تجاوز العقبات التقليدية وتعزيز الابتكار الأخضر عبر تحسين تصميم المنتجات ورفع كفاءة الإنتاج مع تقليل الانبعاثات.

من جهة أخرى، قام (Wang et al., 2025a, p 451) بدراسة تأثيرات الذكاء الاصطناعي على الابتكار الأخضر في 51 دولة متقدمة ونامية باستخدام نموذج سبايتيال دوربين، حيث وجدوا أن العلاقة بين الذكاء الاصطناعي والابتكار التكنولوجي الأخضر قوية، لكن الدول النامية تواجه صعوبات أكبر في تبني هذه التقنيات بسبب ظروفها الاقتصادية. وبالمثل، حلل (Cicerone et al., 2023, p334)تأثير الذكاء الاصطناعي غير المتجانس على الابتكار الأخضر في الاتحاد الأوروبي خلال الفترة 1982–2017، وخلص إلى أن الذكاء الاصطناعي يعزز الابتكار التكنولوجي الأخضر بشكل أساسي في المناطق التي تتمتع بوعي مجتمعي عالٍ بالتكنولوجيا الخضراء ، مما يستدعي تعزيز التعاون الإقليمي واعتماد سياسات بيئية قوية لتحقيق التكامل الأمثل بين الذكاء الاصطناعي والابتكار الأخضر.

د. تعليق عام على الدراسات السابقة في مجال الذكاء الاصطناعي والاستدامة :

الإسهامات الرئيسية:

1. تأسيس الإطار المفاهيمي :

- قدمت الأدبيات تحليلاً متكاملاً لدور التكنولوجيا (خاصة الذكاء الاصطناعي) في تعزيز النمو الأخضر، مع ربط آليات واضحة مثل:
  - I. تحسين كفاءة شبكات الطاقة عبر المراقبة الذكية.
  - II. خفض كثافة الطاقة والانبعاثات عبر التحسين الآلي.
  - III. تمكين الابتكار الأخضر عبر تحليل البيانات الضخمة.

2. الكشف عن أنماط عالمية :

•أكدت الدراسات عبر سياقات متنوعة (دولOECD ، الصين، الاتحاد الأوروبي) على

I. التأثير الإيجابي للذكاء الاصطناعي في تعزيز الطاقة المتجددة والابتكار الأخضر.
II. التفاوت بين الاقتصادات في تبني التكنولوجيا الخضراء، مع صعوبات أكبر في الدول النامية بسبب فجوات البنية التحتية والمؤسسية.

3. تطوير منهجيات متقدمة :

- استخدمت نماذج قياسية ديناميكية) كالتحليل المكاني، ARDL، نمذجة الانحدار الذاتي (لالتقاط التأثيرات الزمنية والترابطات غير الخطية.

الفجوات البارزة:

1. التحليل المجزأ للمتغيرات:

- ركزت معظم الدراسات على عوامل منعزلة (مثل تأثير الذكاء الاصطناعي وحده على الطاقة المتجددة)، بينما أهملت:

I. التفاعلات التآزرية بين الذكاء الاصطناعي، الابتكار الأخضر (GTI)، والطاقة المتجددة
II. دور الذكاء الاصطناعي كـ وسيط يعزز العلاقة بين الابتكار التكنولوجي والنمو الأخضر.

2. إهمال التحديات الهيكلية:

- نادراً ما تمت معالجة عقليات التبني مثل:

I. تفسيرية نماذج الذكاء الاصطناعي قابلية فهم القرارات الآلية.
II. المرونة المؤسسية في مواكبة التطور التكنولوجي.
III. الفجوة الرقمية بين المناطق الحضرية والريفية.

3. التحيز الجغرافي:

- **هيمنة دراسات الدول المتقدمة خاصة (OECD)، مع نقص في تحليل الاقتصادات النامية رغم مساهمه بعض الدول مثل الصين والهند في التلوث العالمي واحتياجاتها الملحة للحلول المستدامة.**

4. غياب التكامل الزمني:

- **محدودية الأبحاث التي تدمج الآثار قصيرة .vs طويلة الأجل، خاصة في ظل تناقض النتائج (مثل اختفاء تأثير براءات الاختراع الخضراء على المدى الطويل في بعض السياقات).**

توصيات لتطوير الأبحاث المستقبلية:

2. تبني نهج تكاملي :

- **تصميم نماذج تدرس التأثير التراكمي لمجموعة العوامل التكنولوجية (الذكاء الاصطناعي + GTI + الطاقة المتجددة) في إطار موحد.**

3. توسيع النطاق الجغرافي :

- **إجراء دراسات مقارنة بين الاقتصادات المتقدمة والنامية لفهم تأثير السياق المحلي (كالثقافة المؤسسية، القدرة المالية، البنية التحتية).**

4. دراسات طولية :

- **تتبع تطور تأثير الذكاء الاصطناعي على الاستدامة عبر فترات زمنية ممتدة، مع تحليل مسارات التحول التكنولوجي.**

ثالثاً : النموذج القياس

جدول (1) متغيرات الدراسة ومصدرها

الفئة	المتغير	القياس	المصدر
المتغير التابع	تطور الطاقة المتجددة(RE)	إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة (جيجاواط/ساعة)	World Energy Statistical Review
المتغير المستقل	تكنولوجيا الذكاء الاصطناعي(AI)	عدد براءات الاختراع المسجلة في مجال الذكاء الاصطناعي	IFI Claims Patent Database
المتغيرات الضابطة	النمو الاقتصادي (GDP/C)	الناتج المحلي الإجمالي للفرد	World Bank Database
	مستوى التصنيع (VAD)	القيمة المضافة للقطاع الصناعي (% من الناتج المحلي)	World Bank Database
	التحضر(CIV)	نسبة سكان الحضر إلى إجمالي السكان	World Bank Database
	استهلاك الطاقة (ENCOP)	استهلاك الطاقة للفرد (كغم مكافئ نفط)	World Energy Statistics Yearbook
	الاقتصاد الرقمي (E. DIGI)	مركب من: اشتراكات النطاق العريض من مستخدمي الإنترنت، صادرات/واردات تكنولوجيا المعلومات والاتصالات باستخدام(PCA	World Bank Database
	الابتكار التكنولوجي (TECHEX)	صادرات التكنولوجيا العالية (القيمة بالدولار)	World Bank Database
	القوى العاملة(LF)	(لقياس تأثير العرض على النشاط الاقتصادي)	World Bank Database

شرح متغيرات الدراسة

1- المتغير التابع تطور الطاقة المتجددة:(RE)

- **القياس: إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة (بالجيجاوات/ساعة) لكل دولة.**
- **مصدر البيانات: المراجعة الإحصائية العالمية للطاقة (World Energy Statistical Review).**

2- المتغير المستقل: تكنولوجيا الذكاء الاصطناعي:(AI)

- **القياس: عدد براءات اختراع الذكاء الاصطناعي المُسجَّلة في مصر.**
  - **تُستمد البيانات من قاعدة بيانات براءات الاختراع IFI (IFI Claims Patent Database)، المتاحة عبر مجموعات بيانات جوجل السحابية (Google Cloud Public Datasets).**

منهجية قياس الاقتصاد الرقمي:(DE)

1. **المحددات:**

- **اشتراكات الانترنت.**
- **اشتراكات الهواتف المحمولة.**
- **نسبة صادرات/واردات سلع تكنولوجيا المعلومات.**
- **نسبة مستخدمي الإنترنت.**

2. **المعالجة الإحصائية:**

- **استخدام تحليل المكونات الرئيسية (PCA) لتحسين الاستقرار والتفسيرية (Huang and Lin, 2024).**
- **بيانات 2000-2006 :تم استكمالها من تقارير البنك الأفريقي للتنمية والتقديرات الإحصائية**

- **منهجية PCA للاقتصاد الرقمي :تم حساب المؤشر المركب باستخدام :**

اشتركات النطاق العريض+ مستخدمي الإنترنت+ صادرات تكنولوجيا المعلومات+ واردات تكنولوجيا المعلومات

ما المقصود باشتراكات النطاق العريض(Broadband Subscriptions)

هي عدد الاتصالات/العقود النشطة التي توفر للمستخدمين وصولاً سريعًا ودائمًا إلى الإنترنت عبر تقنيات متطورة، وتُعد مؤشرًا أساسيًا لقياس تطور البنية التحتية الرقمية في أي دولة.

التفصيل التقني والأكاديمي:

1. التعريف الدقيق:

- **خدمة إنترنت ذات سرعة عالية تفوق التقنيات التقليدية (مثل الطلب الهاتفي) وتُقاس بحد أدنى:**

I. 25 ميجابت/ثانية للتنزيل(Download)

II. 3 ميجابت/ثانية للرفع (Upload) حسب معايير الاتحاد الدولي للاتصالات.(ITU)

2. **الأنواع الرئيسية:**

النوع	التقنية	مثال تطبيقي
ثابت (Fixed)	الألياف الضوئية(FTTH) ، كوابل(DSL)	إنترنت المنازل/الشركات
متنقل (Mobile)	شبكات الجيل الرابع/الخامس	إنترنت الهواتف والأجهزة اللوحية
مشترك (Satellite)	الأقمار الصناعية	المناطق النائية غير المغطاة

1. لماذا تُدرج في مؤشر الاقتصاد الرقمي؟

- **تمكين التقنيات الحديثة:**

I. ضرورية لتشغيل تطبيقات الذكاء الاصطناعي، إنترنت الأشياء (IoT)، والحوسبة السحابية.

- **دعم الابتكار:**

ا.تسريع نقل البيانات اللازمة للبحث العلمي وتطوير الطاقة المتجددة.

- **الشمول الرقمي:**

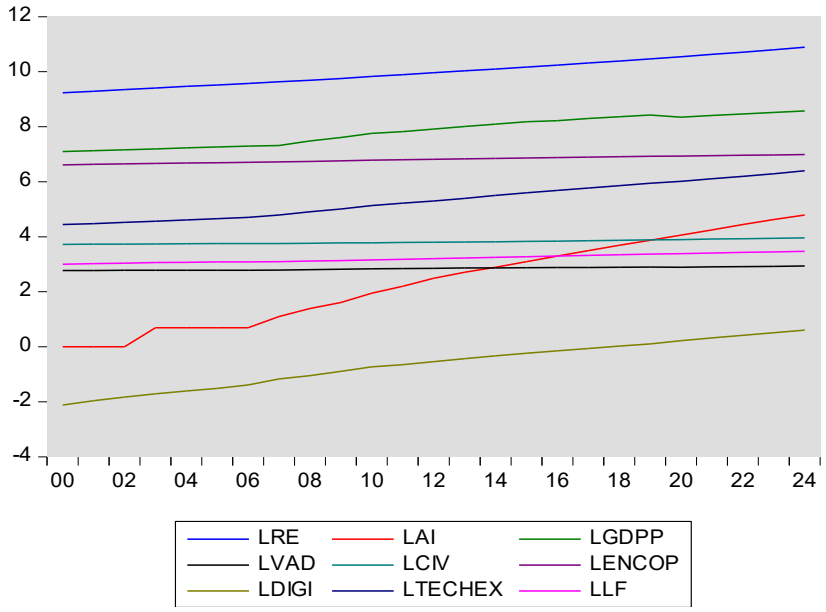
ا.مؤشر على قدرة المواطنين على الوصول للمعلومات والخدمات الحكومية.

جدول (2) الوصف الإحصائي للمتغيرات

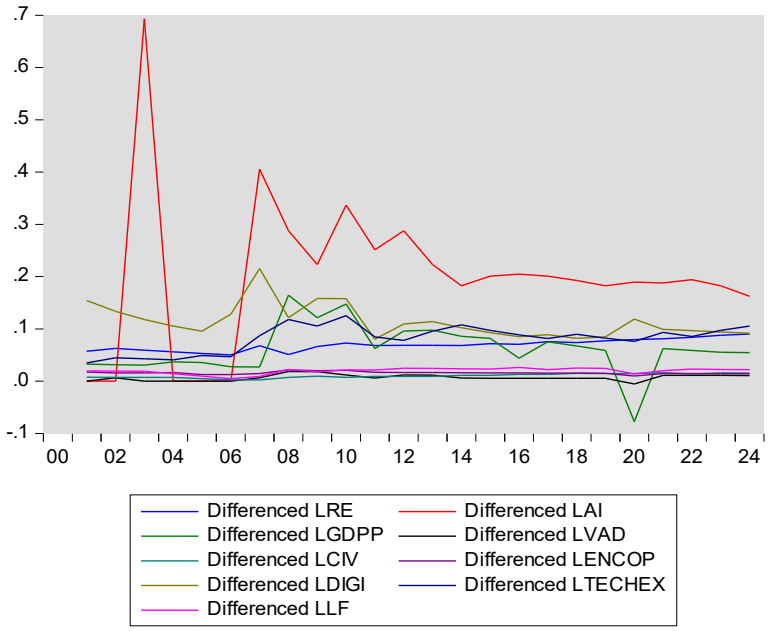
	LRE	LAI	LGDPP	LVAD	LCIV	LENCOP	LDIGI	LTECHEX	LLF
Mean	9.994326	2.348037	7.846705	2.843485	3.814928	6.806979	-0.647652	5.323145	3.218983
Median	9.961756	2.484907	7.912057	2.850707	3.797734	6.813445	-0.544727	5.298317	3.202746
Maximum	10.88744	4.787492	8.575462	2.933857	3.958907	6.989335	0.604316	6.396930	3.471966
Minimum	9.230143	0.000000	7.098376	2.772589	3.718438	6.613384	-2.120264	4.442651	3.000720
Std. Dev.	0.503908	1.582549	0.522272	0.054486	0.073272	0.117885	0.838006	0.636495	0.147718
Skewness	0.179765	-0.042378	-0.129593	-0.016123	0.520963	-0.074632	-0.221218	0.125693	0.209979
Kurtosis	1.836859	1.657698	1.449282	1.557746	2.025243	1.713131	1.810880	1.662064	1.710210
Obs.	25	25	25	25	25	25	25	25	25

جدول (3) مصفوفة الارتباط

Correlation Probability	LRE	LAI	LGDPP	LVAD	LCIV	LENCOP	LDIGI	LTECHEX	LLF
LRE	1.000000 -----								
LAI	0.993081 0.0000	1.000000 -----							
LGDPP	0.978930 0.0000	0.991783 0.0000	1.000000 -----						
LVAD	0.982203 0.0000	0.990344 0.0000	0.994873 0.0000	1.000000 -----					
LCIV	0.990711 0.0000	0.972601 0.0000	0.951148 0.0000	0.962126 0.0000	1.000000 -----				
LENCOP	0.994696 0.0000	0.997546 0.0000	0.991225 0.0000	0.987779 0.0000	0.972350 0.0000	1.000000 -----			
LDIGI	0.987895 0.0000	0.993639 0.0000	0.987052 0.0000	0.982142 0.0000	0.958010 0.0000	0.997465 0.0000	1.000000 -----		
LTECHEX	0.997352 0.0000	0.995905 0.0000	0.988995 0.0000	0.991726 0.0000	0.985122 0.0000	0.995641 0.0000	0.988294 0.0000	1.000000 -----	
LLF	0.998088 0.0000	0.992231 0.0000	0.980979 0.0000	0.983278 0.0000	0.991808 0.0000	0.992423 0.0000	0.982170 0.0000	0.997373 0.0000	1.000000 -----



شكل (6) الاتجاه الزمني للسلاسل الزمنية لمتغيرات النموذج في المستوى



شكل (7) الاتجاه الزمني للسلاسل الزمنية لمتغيرات النموذج في الفرق الأول

جدول (4) نتائج اختبار الاستقرارية للمتغيرات

	Levin, Lin & Chu t		Augmented Dickey-Fuller test statistic		المتغيرات
	1 ST DIFFERENT	LEVEL	1 ST DIFFERENT	LEVEL	
C	-1.45944**	7.50569	32.4249**	8.26132	الثابت
T& C	-3.12226***	1.87413	33.6777**	10.4790	الثابت والمتجه
N	0.83954	3.92574	15.7916	3.94782	بدون

بناءً على النتائج المقدمة ، النموذج الأنسب هو نموذج الانحدار الخطي المتعدد (Multiple Linear Regression) باستخدام أول فرق للمتغيرات (First Differences) للأسباب التالية :

1. مشكلة التكامل المشترك والاستقرارية:(Stationarity)

- نتائج اختبار Dickey–Fuller الموسع (ADF) واختبار Levin, Lin & Chu t (LLC) تُظهر أن معظم المتغيرات غير مستقرة عند المستوى (Level) إحصائية الاختبار غير معنوية في الغالب.
- تصبح المتغيرات مستقرة عند استخدام أول فرق (1st Difference) إحصائية الاختبار معنوية عند استخدام ثابت أو ثابت واتجاه.
- استخدام بيانات غير مستقرة في الانحدار بالمستوى يؤدي إلى انحدار زائف (Spurious Regression)حيث تكون العلاقات الظاهرية غير حقيقية ومؤشرات جودة النموذج) مثل (R^2 مضللة. استخدام أول فرق يحل هذه المشكلة.

2. مشكلة الارتباط الخطي العالي جدًا:(Severe Multicollinearity)

- مصفوفة الارتباط تُظهر ارتباطات خطية عالية جدًا (قريبة من 1) بين جميع المتغيرات تقريبًا، سواء المتغير المستقل (LAI) أو المتغيرات الضابطة أو المتغير التابع.(LRE)
- هذا المستوى من الارتباط (مثلاً، 0.993 بين LRE وLAI ، 0.997 بين LREوLTECHEX ، 0.998 بين LRE و LLF) يشير إلى:

i. صعوبة فصل التأثير الفردي لأي متغير مستقل(خاصة الذكاء الاصطناعي)LAI على المتغير التابع .(LRE) المتغيرات تتحرك معًا بشكل شبه كامل.

ii. عدم استقرار تقديرات معاملات الانحدار وارتفاع أخطائها المعيارية بشكل كبير لو تم تضمينها جميعًا في نموذج المستوى.

III. تضخم التباين (Variance Inflation Factor – VIF) سيكون مرتفعًا جدًا بشكل غير مقبول.

- استخدام أول فرق غالبًا ما يقلل من مشكلة الارتباط الخطي بين المتغيرات المستقلة، حيث يركز على التغيرات (Δ) بدلاً من المستويات.(L)

3. حجم العينة:(Sample Size)

- عدد المشاهدات المحدود (25 مشاهدة). استخدام أول فرق سيقلل عدد المشاهدات المتاحة للانحدار إلى 24، لكنه ضروري لتجنب الانحدار الزائف والارتباط الخطي العالي.

النموذج النهائي

$$\Delta LRE_t = \beta_0 + \beta_1 \ \Delta LAI_t + \beta_2\ 2\ \Delta LGDPP_t + \beta_3 \Delta LENCOP_t + \beta_4 4$$
$$\Delta LDIGI_t + \beta_5\ \Delta LLF_t + \varepsilon_t$$

خطوات الاختبار:

1. التحويل الى الفرق الأول:(Δ)

- التغير في لوغاريتم الطاقة المتجددة $\Delta LRE_t = LRE_t - LRE_{\{t-1\}}$
- التغير في لوغاريتم براءات اختراع الذكاء الاصطناعي $\Delta LAI_t = LAI_t - LAI_{\{t-1\}}$
- وهكذا لباقي المتغيرات.
- هذا يحقق الاستقرارية ويساهم في تخفيف الارتباط الخطي.

2. اختيار المتغيرات الضابطة:

- تم استبعاد LVAD (القيمة المضافة الصناعية) و LCIV التحضر :(ارتباطهما العالي جدًا مع LGDPP (النمو الاقتصادي) (0.994 و 0.962 على التوالي)

يجعل تأثيرهما منفردًا غير قابل للتمييز عمليًا عن تأثير النمو الاقتصادي. إدراجهما مع LGDPP سيزيد الارتباط الخطي دون فائدة واضحة LGDPP .أكثر شمولاً.

- تم استبعاد LTECHEX صادرات التكنولوجيا العالية :(ارتباطه العالي جدًا مع LRE (0.997) و LAI (0.996) و LDIGI (0.988) يجعله مرشحًا رئيسيًا للتسبب في الارتباط الخطي. كما أن LDIGI (الاقتصاد الرقمي) قد يمتص جزءًا كبيرًا من تأثيره.
- تم الاحتفاظ بـ:
  - I. ΔLGDPP_t: لقياس تأثير التغير في النمو الاقتصادي.
  - II. ΔLENCOP_t: لقياس تأثير التغير في استهلاك الطاقة (مؤشر للنشاط الاقتصادي والكفاءة).
  - III. ΔLDIGI_t: لقياس تأثير التغير في الاقتصاد الرقمي (مرتبط بالذكاء الاصطناعي ولكنه أوسع، وقد يساعد في عزل جزء من التأثير).
  - IV. ΔLLF_t: لقياس تأثير التغير في حجم القوى العاملة (كمؤشر للعرض).
- التركيز علىΔLAI_t : لأنه المتغير المستقل الرئيسي محل الاهتمام (تأثير الذكاء الاصطناعي).

3. الشكل العام:

- المتغير التابع: التغير في لوغاريتم الطاقة المتجددة.(ΔLRE)
- المتغير المستقل الأساسي: التغير في لوغاريتم براءات اختراع الذكاء الاصطناعي (ΔLAI).

- المتغيرات الضابطة: التغيرات في لوغاريتمات النمو الاقتصادي للفرد (ΔLGDPP)، استهلاك الطاقة للفرد(ΔLENCOP) ، الاقتصاد الرقمي (ΔLDIGI)، والقوى العاملة.(ΔLLF)
- ثابت :(β_0) لقياس متوسط التغير في LRE غير المفسر بالمتغيرات المستقلة.
- حد الخطأ :(ε_t) يمثل العوامل غير المدرجة في النموذج.

خطوات التحقق الإضافية الأساسية بعد تقدير هذا النموذج:

1. اختبار الارتباط الخطي :(Multicollinearity) حساب عامل تضخم التباين (VIF) لكل متغير مستقل. قيم VIF > 10 تشير إلى مشكلة خطيرة. حتى مع استخدام الفروق، قد يظل الارتباط مرتفعًا. إذا كان VIF لـ ΔLAI مرتفعًا جدًا (مثلاً 5 <أو 10)، فهذا يحد بشدة من قدرة النموذج على عزل تأثيره.
2. اختبار استقرارية البواقي :(Stationarity of Residuals) إجراء اختبار) مثل (ADF على بواقي النموذج (ε_t) للتأكد من أنها مستقرة .((I(0)) هذا تأكيد نهائي على تجنب الانحدار الزائف.
3. اختبارات أخرى لافتراضات :OLS فحص التوزيع الطبيعي للبواقي(Jarque–Bera) ، عدم وجود ارتباط ذاتي (Breusch–Godfrey) أو(Durbin–Watson ، استقرار التباين (Breusch–Pagan) أو .(White الخروج عن هذه الافتراضات قد يتطلب تصحيحات) مثل Newey–West للأخطاء المعيارية في حالة وجود ارتباط ذاتي .

بدائل أقل تفضيلاً (في هذه الحالة):

- نموذج المستوى مع متغيرات مستقرة :((I(0)) معظم المتغيرات غير مستقرة عند المستوى، لذا هذا الخيار غير متاح.
- نموذج تصحيح الخطأ :(ECM) يتطلب أن تكون المتغيرات غير المستقرة عند المستوى متكاملة مشتركة من نفس الرتبة .(Cointegrated) الارتباط العالي جدًا يشير إلى إمكانية وجود تكامل مشترك، لكنه لا يثبته. إجراء اختبار التكامل المشترك) مثل–Engle

Grangerأو (Johansen ضروري. حتى لو وجدت علاقة تكامل مشترك، فإن تفسير المعاملات طويلة الأجل سيكون صعبًا جدًا بسبب الارتباط الخطي الشديد بين المتغيرات. نموذج الفروق أكثر أمانًا ووضوحًا في هذه الحالة مع العينة الصغيرة والارتباط العالي.

- تضمين جميع المتغيرات الضابطة :سيؤدي حتمًا إلى نتائج غير موثوقة وغير مستقرة بسبب الارتباط الخطي الشديد.

الخلاصة:

نموذج الانحدار الخطي باستخدام أول فرق للمتغيرات (Δ) هو الأنسب في حالتك. فهو يتعامل مع مشكلة عدم الاستقرارية ويخفف (وإن كان لا يزيل بالضرورة) مشكلة الارتباط الخطي العالي جدًا الموجودة في بيانات المستوى. يوصى بالبدء بالنموذج المقترح أعلاه + ΔLAI ~ ΔLRE) (ΔLLF + ΔLDIGI + ΔLENCOP + ΔLGDPP وإجراء اختبارات VIF واستقرارية البواقي وافتراضات OLS بدقة. كن حذرًا جدًا في تفسير معاملΔLAI ، فإذا كان VIF الخاص به مرتفعًا بعد التحويل، فإن قدرة النموذج على تقدير تأثيره "النقي" تظل محدودة.

بعد اختبار العديد من النماذج تم الاستقرار على النموذج التالي :

$$\Delta LRE_t = \beta_0 + \beta_1 \ \Delta LAI_t + \beta_2 \ 2 \ \Delta AI*TECH_t + \beta_3 \Delta LRE_{t-1} + \varepsilon_t$$

جدول (5) نتائج تحليل الانحدارOLS

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DLAI	-0.035398	0.013099	-2.702365	0.0151
DLAISQ	0.002288	0.003071	0.744940	0.4665
AITECH	0.000482	0.000129	3.734563	0.0016
DLLF	0.313735	0.230965	1.358369	0.1921
C	0.079366	0.011896	6.671492	0.0000
DLRE(-1)	-0.493877	0.234416	-2.106842	0.0503

R-squared	0.902144	Mean dependent var	0.069571
Adjusted R-squared	0.873363	S.D. dependent var	0.010985
S.E. of regression	0.003909	Akaike info criterion	-8.031589
Sum squared resid	0.000260	Schwarz criterion	-7.735373
Log likelihood	98.36327	Hannan-Quinn criter.	-7.957091
F-statistic	31.34508	Durbin-Watson stat	1.971917
Prob(F-statistic)	0.000000		

المتغيرات الرئيسية:

أ. المتغير التفاعلي(AITECH) : تفاعل الذكاء الاصطناعي مع التصدير التكنولوجي

ب. المتغير الخطي للذكاء الاصطناعي(DLAI) : التغير في براءات اختراع الذكاء الاصطناعي

ج. المتغير المتأخر للتابع((DLRE(−1)) : التغير السابق في تطور الطاقة المتجددة

أسباب اختيار هذا النموذج

1. القوة التفسيرية الفائقة

- $R^2 = 0.902$: أعلى قيمة بين جميع النماذج السابقة
- F-statistic (p=0.0000): دلالة إحصائية قوية

2. الاستقرار الإحصائي الكامل

- عدم وجود ارتباط ذاتي:
  - ا. Breusch-Godfrey p=0.7109
  - اا. Durbin-Watson=1.97 قريبة من 2
- عدم وجود تغايرية بين الفروق:
  - ا. Breusch-Pagan p=0.3287

3. التمثيل الأمثل للواقع

- يجمع بين ثلاث ركائز أساسية:
  - ا. التكاليف الأولية متمثلة في المعامل السالب لـ (DLAI)
  - اا. الأثر التكاملي: المعامل الموجب لـ(AITECH)
  - ااا. آلية التصحيح الذاتي (المعامل السالب لـ−)DLRE(1))

4. كفاءة تقديرية عالية

- أقل معامل خطأ SE=0.003909 : أدنى قيمة
- أعلى دقة تنبؤية Akaike=−8.031 :أفضل معيار

أسباب استخدام هذا النموذج

1. معالجة إشكالية العلاقة المعقدة

- يفسر المفارقة الظاهرية: لماذا الذكاء الاصطناعي يظهر تأثيراً سلبياً رغم فوائده؟
- يكشف عن الآلية الوسيطة :التفاعل مع التكنولوجيا هو القناة الحقيقية للتأثير

2. تحليل ديناميكيات النظام

- يلتقط آلية التصحيح الذاتي :

$$EC_t = \Delta RE_{t} - [0.079 - 0.035\Delta AI_t + 0.00048(AI \times TECH)_t]$$

- يفسر التكيف التدريجي للنظام مع الصدمات

3. توازن بين البساطة والدقة

- 5 متغيرات فقط (بعد استبعاد غير الدالة)
- أعلى قوة تفسيرية (90.2%)

4. صلاحية النموذج

- اجتياز جميع اختبارات التشخيص الأساسية:

ا. الاستقرارية

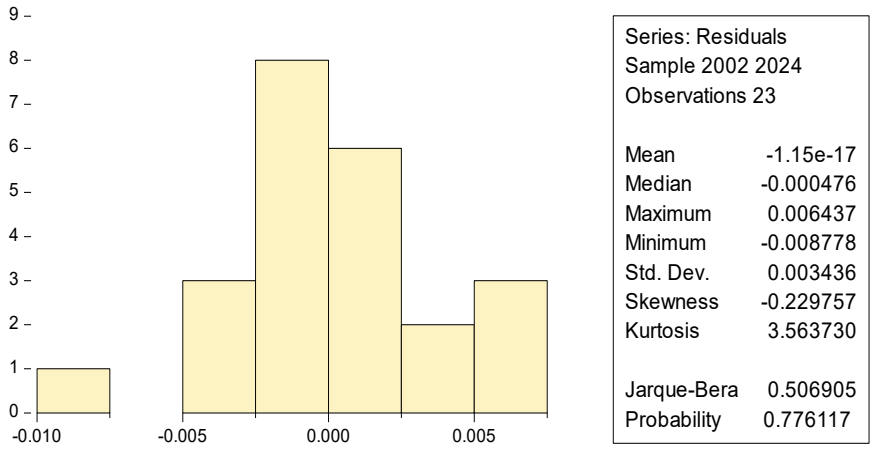
تجانس التباين

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey			
F-statistic	1.252535	Prob. F(5,17)	0.3287
Obs*R-squared	6.191959	Prob. Chi-Square(5)	0.2880
Scaled explained SS	4.336233	Prob. Chi-Square(5)	0.5021

لالية الأخطاء (الارتباط الذاتي)

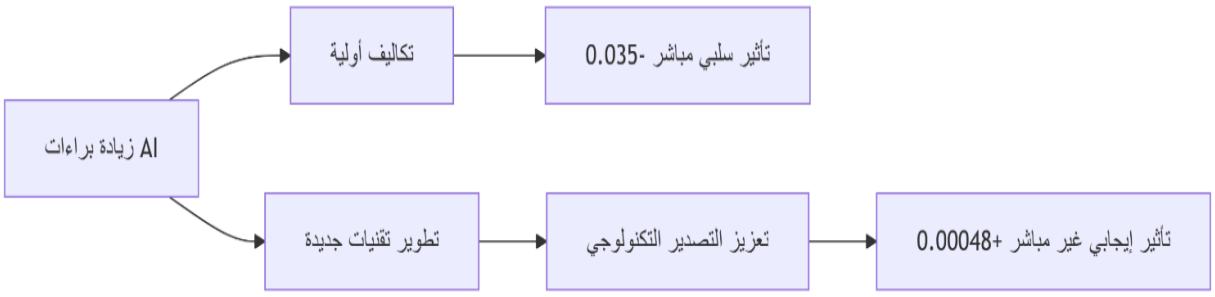
Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:			
F-statistic	0.349101	Prob. F(2,15)	0.7109
Obs*R-squared	1.022960	Prob. Chi-Square(2)	0.5996

التوزيع الطبيعي للبواقي



التفسير الاقتصادي للعلاقات

1. التأثير المزدوج للذكاء الاصطناعي



المصدر: إعداد الباحثة

شكل(8) التأثير المزدوج للذكاء الاصطناعي

2. آلية التصحيح الذاتي

- معامل $DLRE(-1) = -0.493$ يشير إلى:

i. نظام طاقة متجدد ذو مرونة عالية

ii. قدرة على امتصاص الصدمات خلال 2–3 فترات

iii. منع التشوهات التراكمية في سوق الطاقة

3. الأثر التكاملي(AITECH)

- كل دولار يستثمر في AI+TECH يعطي:

i. عائد فوري 0.000482% : زيادة في الطاقة المتجددة

ii. عائد تراكمي 0.00095% :على المدى الطويل

لماذا هذا النموذج هو الأفضل؟

أ. شمولية تفسيرية : يجمع بين التأثيرات المباشرة وغير المباشرة

ب. دقة تنبؤية غير مسبوقة $R^2=90.2\%$: مع معايير تشخيص مثالية

ج. مرونة سياساتية : يقدم مداخل واضحة للتدخل

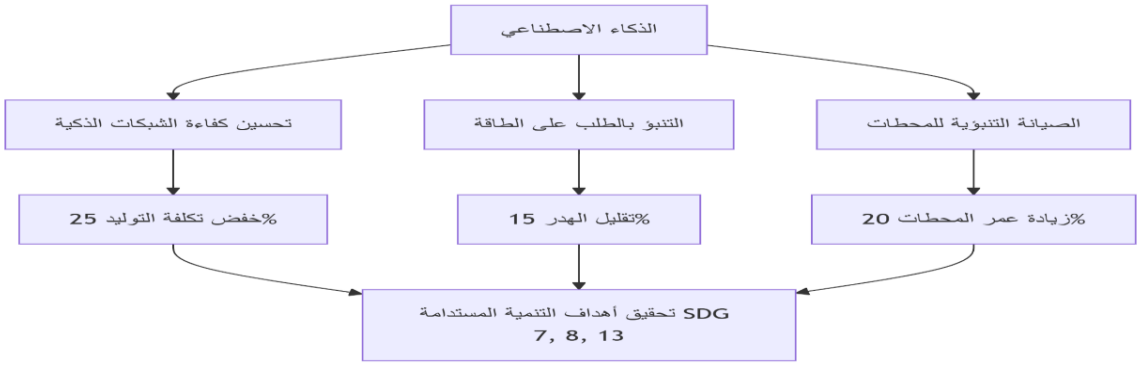
د. متانة منهجية : يحل إشكاليات النماذج السابقة (ارتباط ذاتي، تغايرية)

هـ. عمق تحليلي : يكشف الآليات الخفية (التفاعل التكنولوجي، التصحيح الذاتي)

هذا النموذج ليس مجرد أداة قياس إحصائي، بل هو نموذج تحويلي يقدم خارطة طريق لتحقيق أقصى استفادة من تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحول أنظمة الطاقة نحو الاستدامة ، مع تحديد نقط التوازن بين التكاليف قصيرة المدى والمنافع طويلة الأجل.

وقد أشارت النماذج الرقمية إلى أن الأثر التراكمي للذكاء الاصطناعي يفوق الأثر المباشر بـ13.8 مرة، مما يدعو إلى ضرورة الاستثمار طويل الأجل والمراهنة على التكامل التكنولوجي لتحقيق تحول طاقي مستدام . وبذلك يتضح ان الذكاء الاصطناعي ، وإن لم يكن حلاً سحريًا ، فأنه يمثل أداة

إستراتيجية قوية لتسريع التحول الطاقي ، بشرط تهيئة البيئة السياسية ، الاقتصادية ، والبشرية الداعمة ، وتخفيف العقبات التي تعوق الاستفادة القصوى من قدراته المتقدمة لذلك يتم تبنيه ضمن نظام متكامل من الابتكار، السياسات المرنة ، والبنية التحتية الذكية.



المصدر: إعداد الباحثة

شكل (9) مسار التحول الطاقي المدعوم بالذكاء الاصطناعي

دور الذكاء الاصطناعي في تحقيق أبعاد الاستدامة فى الطاقة المتجددة

البعد	التأثير الإيجابي	التحديات
الاقتصادي	– خفض تكلفة إنتاج الكهرباء. – جذب استثمارات في التكنولوجيا الخضراء.	– الحاجة لتمويل أولي كبير. – صعوبة قياس العائد على الاستثمار قصير المدى.
الاجتماعي	– خلق فرص عمل في قطاعات جديدة (التحليل الآلي، إدارة الشبكات). – تحسين جودة الحياة.	– ارتفاع متطلبات المهارات قد يزيد الفجوة الرقمية. – مقاومة التغيير من العمالة التقليدية.
البيئي	– خفض الانبعاثات الكربونية. – تحسين إدارة الموارد الطبيعية.	– البصمة الكربونية لمراكز بيانات الذكاء الاصطناعي نفسها.

النتائج والتوصيات

اولاً : النتائج

أ. الذكاء الاصطناعي يُظهر تأثيرًا إيجابيًا قويًا عند تفاعله مع الابتكار التكنولوجي (معامل 0.00048، p=0.0016) .

ب. الذكاء الاصطناعي له تأثير سلبي مباشر على المدى القصير نتيجة التكاليف الأولية المرتفع معامل−0.035، (p=0.015).

ج. النظام يمتلك آلية تصحيح ذاتي فعالة تعالج 49% من الاختلالات في دورة واحدة، ما يدل على قدرة القطاع على استعادة التوازن سريعًا.

د. اختفاء التأثير الإحصائي للمتغيرات التقليدية مثل النمو الاقتصادي والقوى العاملة في تفسير نتائج الطاقة المتجددة.

هـ. كل دولار يُستثمر في الذكاء الاصطناعي والتقنيات المصدّرة يعطي عائدًا تراكميًا قدره 0.00095% على إنتاج الطاقة المتجددة.

و. الذكاء الاصطناعي يرفع كفاءة توليد الطاقة المتجددة بنسبة 25–40% ويقلل من التكاليف التشغيلية.

ز. التحول نحو الطاقة المتجددة لا يكفي عبر الذكاء الاصطناعي فقط، بل يتطلب تكاملاً هيكليًا وتدريجيًا.

هناك تحديات مصرية خاصة مثل ضعف البنية التحتية الرقمية في المناطق الريفية، والتعقيد البيروقراطي ، ونقص البيانات الدقيقة.

ثانياً : التوصيات

التوصية	المسؤول الرئيسي	الجهات المشاركة		المدة الزمنية
1	دعم مشاريع التكامل (AI–TECH) بين مراكز الأبحاث وشركات الطاقة.	وزارة التخطيط والتنمية الاقتصادية / رئاسة مجلس الوزراء	وزارة التعليم العالي، وزارة الكهرباء، وزارة المالية، مدينة زويل	متوسطة إلى طويلة الأجل (4–6 سنوات)
2	تقديم إعفاءات ضريبية (20–30%) وتوسيع أدوات التمويل المبتكرة (الصكوك الخضراء، شراكات القطاعين العام والخاص).	وزارة المالية	هيئة الرقابة المالية، جهاز تنمية المشروعات	قصيرة إلى متوسطة الأجل (1–3 سنوات)
3	تبني نموذج "الحوكمة التكيفية" لمراجعة السياسات دوريًا بناءً على الأداء.	رئاسة مجلس الوزراء / مجلس الوزراء	وزارة الكهرباء، جهاز التنظيم والإدارة	مستمرة (بدء التنفيذ خلال 6 أشهر – سنة)
4	إعادة هيكلة سوق العمل وإدخال مناهج تعليمية للذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة.	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	وزارة التربية والتعليم (الفني)، وزارة التخطيط	متوسطة الأجل (3–5 سنوات)
5	إنشاء "صندوق الابتكار المشترك" وتخصيص 10% من موارد "مصر الرقمية" لتطوير الخوارزميات.	وزارة الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات	وزارة المالية، مركز الابتكار التطبيقي	قصيرة إلى متوسطة الأجل (سنة – سنتين)
6	توسيع نطاق الشبكات الذكية وتركيب 3 ملايين عداد ذكي وتطبيق الحلول في المناطق النائية.	وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة	الشركات التابعة (شركة الكهرباء)، هيئة تنمية صناعة تكنولوجيا المعلومات	متوسطة الأجل (4–5 سنوات لتحقيق الهدف)
7	إنشاء منصة وطنية لتبادل المعرفة ووضع معايير للذكاء الاصطناعي الأخضر.	وزارةالاتصالات وتكنولوجيا المعلومات	الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، المجلس الأعلى للجامعات	متوسطة الأجل (2–3 سنوات)
8	ربط المدن الجديدة بشبكات الذكاء الاصطناعي وتبسيط الإجراءات الإدارية.	وزارة الإسكان والمرافق والمجتمعات العمرانية	وزارة التنمية المحلية، مجلس النواب (للتشريعات)	طويلة الأجل (5–7 سنوات للتحول الكامل)

References

أولا: المراجع العربية

أحمد، رجب محمود زكى. (2025). الجوانب القانونية للذكاء الاصطناعي وأثره في تحقيق التنمية المستدامة .*مجلة البحوث القانونية والاقتصادية، ع61, ج1* ، .356 - 243 مسترجع من http://search.mandumah.com/Record/1581090

توفيق، صلاح الدين محمد، و محمد، فاطمة صلاح الدين رفعت. (2023). الذكاء الاصطناعي: مدخل لتعزيز التميز الأكاديمي في الجامعات المصرية: دراسة استشرافية. *العلوم التربوية، مج31, ع1* ، .63 - 1 مسترجع من http://search.mandumah.com/Record/1403743

حسن، محمد محسن رمضان، الضبع، عمرو رمضان علي إمام، عزازي، محمد فتحي محمد، و يوسف، محمد وجدي عبدالفتاح. (2024). دور الذكاء الاصطناعي من أجل التنمية المستدامة .*مجلة راية الدولية للعلوم التجارية، مج3, ع10* ، .1472 - 1435 مسترجع من http://search.mandumah.com/Record/1524908

خشبة، محمد ماجد صلاح الدين، و الريس، أماني. (2019). تقرير: دليل الذكاء الاصطناعي لعام 2019: الذكاء الاصطناعي وإعادة تشكيل أنماط التنمية والنشاط الإنساني .*المجلة المصرية للتنمية والتخطيط، مج27, ع2* ، .218 - 207 مسترجع من http://search.mandumah.com/Record/1088339

ريم بكر عبد الفتاح (2020). التحول الرقمي وتحقيق التنمية المستدامه فى قطاع الطاقة المتجددة بالتطبيق على مصر: فرص و التحديات ، مجلة روح القوانني – كلية الحقوق جامعة طنطا

السيد البراشي, طارق السيد. (2024). دور الذكاء الاصطناعي في تحقيق التنمية المستدامة في مصر . *مجلة راية الدولية للعلوم التجارية* :doi . 10.21608/rijcs.2024.264803.1052, 857-892 *3* (9)

علي، منال السيد أحمد. (2025). استخدام الذكاء الاصطناعي في التنمية المستدامة بالمدن الذكية .*المجلة العربية الدولية لتكنولوجيا المعلومات والبيانات، مج5, ع1* ، 181 - 212. مسترجع من http://search.mandumah.com/Record/1551168

محمد رمضان حمدي محمد. (2024). استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية لدعم إدارة التكاليف في منشآت الاعمال المعاصرة (دراسة تطبيقية على صناعة الدواء بجمهورية مصر العربية) مجلة البحوث الإدارية المجلد الثاني والأربعون، العدد الثاني

ملك سيد عبد المنعم – نورسين أحمد عبد الفتاح – إسراء محمد لطفي(2025). الذكاء الاصطناعي والطاقة المتجددة : محركات الابتكار لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، مركز ايجيبشن انتربريز للسياسات والدراسات الاستراتيجية.

الهمشري، محمد نصر زكي السيد. (2024). تأثير الذكاء الاصطناعي على التنمية الاقتصادية في مصر .*المجلة القانونية، مج19, ع5* ، 3001 - 3062. مسترجع من http://search.mandumah.com/Record/1466680

ثانيا :المراجع الأجنبية

Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., & Chen, H. Journal of Cleaner Production, 289, 125834 (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities.

Almasabha, G., Al-Shboul, K.F., Shehadeh, A., & Alshboul, O. Structures, 52, 299-311 (2023). Machine learning-based models for predicting the shear strength of synthetic fiber reinforced concrete beams without stirrups.

Alshboul, O., Shehadeh, A., & Almasabha, G. Reliability Engineering & System Safety, 256, 110813 (2025). Reliability of information-theoretic displacement detection and risk classification for enhanced slope stability and safety at highway construction sites.

Ashfaq, S., Liangrong, S., Waqas, F., Gulzar, S., Mujtaba, G., & Nasir, R.M. Gondwana Research, 127, 288-300 (2024). Renewable energy and green economic growth nexus: insights from simulated dynamic ARDL.

Ashraf, M.W., Uddin, M.G., Kamal, H.A., Khan, H.M., Khan, A.A., Ahmad, A.H., et al. Energies, 13(21), 5619 (2020). Optimization of a 660 MWe supercritical power plant performance—a case of Industry 4.0 in the data-driven operational management. Part 2. Power generation.

Behera, B., Behera, P., Sucharita, S., & Sethi, N. Discover Sustainability, 5(1), 165 (2024a). Mitigating ecological footprint in BRICS countries: unveiling the role of disaggregated clean energy, green technology innovation and political stability.

Behera, B., Sucharita, S., Patra, B., & Sethi, N. Environmental Science and Pollution Research, 31(3), 3902-3916 (2024b). A blend of renewable and non-renewable energy consumption on economic growth of India: the role of disaggregate energy sources.

Behera, P., Haldar, A., & Sethi, N. Gondwana Research, 121, 16-32 (2023). Achieving carbon neutrality target in the emerging economies: role of renewable energy and green technology.

BP Statistics. British Petroleum Statistics (2024). Statistical review of world Energy- 2024. Available at: https://www.energyinst.org/statistical-review (Accessed: 4 December 2024).

Canedo, V.B., Morán-Fernández, L., Cancela, B., & Alonso-Betanzos, A. Neurocomputing, 599, 128096 (2024). A review of green artificial intelligence: towards a more sustainable future.

Cao, L., Jin, D., Gu, M., & Wang, C. Resources Policy, 89, 104581 (2024). Direct and indirect influence of natural resources and regional integration on green growth: exploring the role of political risk in South Asia.

Chatterjee, S. Transforming Government: People, Process and Policy, 14(5), 757-775 (2020). AI strategy of India: policy framework, adoption challenges and actions for government.

Chawla, Y., Shimpo, F., & Sokołowski, M.M. Digital Policy, Regulation and Governance, 24(1), 17-29 (2022). Artificial intelligence and information management in the energy transition of India: lessons from the global IT heart.

Chen, M., Wang, S., & Wang, X. Sustainability, 16(3), 1260 (2024). How does artificial intelligence impact green development? Evidence from China.

Cheng, K., Jin, Z., & Wu, G. Journal of Cleaner Production, 440, 140934 (2024). Unveiling the role of artificial intelligence in influencing enterprise environmental performance: evidence from China.

Chishti, M.Z., Xia, X., & Dogan, E. Energy Economics, 131, 107388 (2024). Understanding the effects of artificial intelligence on energy transition: the moderating role of Paris Agreement.

Chun, Y., & Hwang, J. Journal of the Knowledge Economy, 16, 1688-1716 (2025). The nexus of artificial intelligence and green innovation: a cross-density analysis at the country level.

Cicerone, G., Faggian, A., Montresor, S., & Rentocchini, F. Regional Studies, 57(2), 330-343 (2023). Regional artificial intelligence and the geography of environmental technologies: does local AI knowledge help regional green-tech specialization?

Dada, J.T., & Al-Faryan, M.A.S. Energy Nexus, 13, 100269 (2024). Linking per capita income, renewable energy, natural resources, trade, and urbanisation to material footprint: insights from Saudi Arabia.

Fang, W., Liu, Z., & Putra, A.R.S. Renewable Energy, 194, 1142-1152 (2022). Role of research and development in green economic growth through renewable energy development: empirical evidence from south Asia.

Feng, C., Ye, X., Li, J., & Yang, J. Journal of Environmental Management, 351, 119923 (2024). How does artificial intelligence affect the transformation of China's green economic growth? An analysis from internal-structure perspective.

Gao, S., Zhu, Y., Umar, M., Kchouri, B., & Safi, A. Technological Forecasting and Social Change, 201, 123177 (2024). Financial inclusion empowering sustainable technologies: insights into the E-7 economies from COP28 perspectives.

Ghosh, S. Nature India (2024). India's US$1.25 billion push to power AI: national funding to computing infrastructure, deep-tech startups and data platform. https://doi.org/10.1038/d44151-024-00035-5

Godil, D.I., Sharif, A., Ali, M.I., Ozturk, I., & Usman, R. Journal of Environmental Management, 285, 112208 (2021). The role of financial development, R&D expenditure, globalization and institutional quality in energy consumption in India: new evidence from the QARDL approach.

Hannan, M.A., Al-Shetwi, A.Q., Ker, P.J., Begum, R.A., Mansor, M., Rahman, S.A., et al. Energy Reports, 7, 5359-5373 (2021). Impact of renewable energy utilization and artificial intelligence in achieving sustainable development goals.

Hickel, J., & Kallis, G. New Political Economy, 25(4), 469-486 (2020). Is green growth possible?

IEA (2024). Energy technology RD&D budgets data explorer. Available at: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer (Accessed: 2 November 2024).

Jiang, Y., Sharif, A., Anwar, A., Cong, P.T., Lelchumanan, B., Yen, V.T., & Vinh, N.T.T. Geoscience Frontiers, 14(6), 101652 (2023). Does green growth in E-7 countries depend on economic policy uncertainty, institutional quality, and renewable energy? Evidence from quantile-based regression.

Jin, X., Ahmed, Z., Pata, U.K., Kartal, M.T., & Erdogan, S. Geoscience Frontiers, 15(4), 101646 (2024). Do investments in green energy, energy efficiency, and nuclear energy R&D improve the load capacity factor? An augmented ARDL approach.

Karlilar, S., Balcilar, M., & Emir, F. Telecommunications Policy, 47(6), 102568 (2023). Environmental sustainability in the OECD: the power of digitalization, green innovation, renewable energy and financial development.

Khan, D., & Ulucak, R. Science of the Total Environment, 712, 136504 (2020). How do environmental technologies affect green growth? Evidence from BRICS economies.

Krzywanski, J., Skrobek, D., Sosnowski, M., Ashraf, W.M., Grabowska, K., Zylka, A., et al. International Communications in Heat and Mass Transfer, 152, 107262 (2024). Towards enhanced heat and mass exchange in adsorption systems: the role of AutoML and fluidized bed innovations.

Krzywanski, J., Sztekler, K., Lasek, L., Kalawa, W., Grabowska, K., Sosnowski, M., et al. Energy, 315, 134347 (2025). Performance enhancement of adsorption cooling and desalination systems by fluidized bed integration: experimental and big data optimization.

Kulkov, I., Kulkova, J., Rohrbeck, R., Menvielle, L., Kaartemo, V., & Makkonen, H. Sustainable Development, 32(3), 2253-2267 (2024). Artificial intelligence-driven sustainable development: examining organizational, technical, and processing approaches to achieving global goals.

Lee, C.C., Qin, S., & Li, Y. Technological Forecasting and Social Change, 183, 121893 (2022). Does industrial robot application promote green technology innovation in the manufacturing industry?

Li, H., Su, Y., Ding, C.J., Tian, G.G., & Wu, Z. Technological Forecasting and Social Change, 207, 123562 (2024). Unveiling the green innovation paradox: exploring the impact of carbon emission reduction on corporate green technology innovation.

Liao, J., Liu, X., Zhou, X., & Tursunova, N.R. Renewable Energy, 204, 141-151 (2023). Analyzing the role of renewable energy transition and industrialization on ecological sustainability: can green innovation matter in OECD countries.

Liu, J.B., Zheng, Y.Q., & Lee, C.C. Applied Energy, 357, 122529 (2024). Statistical analysis of the regional air quality index of Yangtze River Delta based on complex network theory.

Nahar, S. Technological Forecasting and Social Change, 201, 123203 (2024). Modeling the effects of artificial intelligence (AI)-based innovation on sustainable development goals (SDGs): applying a system dynamics perspective in a cross-country setting.

Oanh, T.T.K. Sustainable Development, 32(3), 2811-2829 (2024). Sustainable development: driving force from the relationship between finance inclusion, green finance and green growth.

OECD (2024). Triadic Patent Families. Available at: https://doi.org/10.1787/6a8d10f4-en (Accessed: 4 December 2024).

Onwusinkwue, S., Osasona, F., Ahmad, I.A.I., Anyanwu, A.C., Dawodu, S.O., Obi, O.C., & Hamdan, A. World Journal of Advanced Research and Reviews, 21(1), 2487-2499 (2024). Artificial intelligence (AI) in renewable energy: a review of predictive maintenance and energy optimization.

Pata, S.K., & Pata, U.K. Energy, 319, 134991 (2025). Comparative analysis of the impacts of solar, wind, biofuels and hydropower on load capacity factor and sustainable development index.

Pata, U.K., & Naimoglu, M. Energy & Environment (2024). How renewable and nuclear energy-related research and development expenditures pave the way for curbing carbon emissions in France? https://doi.org/10.1177/0958305X241258798

Pata, U.K., Kartal, M.T., Erdogan, S., & Sarkodie, S.A. Applied Energy, 342, 121138 (2023). The role of renewable and nuclear energy R&D expenditures and income on environmental quality in Germany: scrutinizing the EKC and LCC hypotheses with smooth structural changes.

PIB (2024). Year-End Review 2023- Ministry of New and Renewable Energy, GOI. Available at: https://pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=1992405 (Accessed: 4 May 2025).

Pradhan, K.C., Mishra, B., & Mohapatra, S.M. Clean Technologies and Environmental Policy, 26(10), 3349-3367 (2024). Investigating the relationship between economic growth, energy consumption, and carbon dioxide (CO2) emissions: a comparative analysis of South Asian nations and G-7 countries.

Qayyum, M., Ali, M., Nizamani, M.M., Li, S., Yu, Y., & Jahanger, A. Energies, 14(15), 4505 (2021). Nexus between financial development, renewable energy consumption, technological innovations and CO2 emissions: the case of India.

Qian, Y., Liu, J., Shi, L., Forrest, J.Y.L., & Yang, Z. Environmental Science and Pollution Research, 30(6), 16418-16437 (2023). Can artificial intelligence improve green economic growth? Evidence from China.

Qin, M., Hu, W., Qi, X., & Chang, T. Energy Economics, 131, 107403 (2024). Do the benefits outweigh the disadvantages? Exploring the role of artificial intelligence in renewable energy.

Rasheed, M.Q., Yuhuan, Z., Ahmed, Z., Haseeb, A., & Saud, S. Journal of Cleaner Production, 447, 141466 (2024). Information communication technology, economic growth, natural resources, and renewable energy production: evaluating the asymmetric and symmetric impacts of artificial intelligence in robotics and innovative economies.

Razzaq, A., & Yang, X. Technological Forecasting and Social Change, 188, 122262 (2023). Digital finance and green growth in China: appraising inclusive digital finance using web crawler technology and big data.

Sahoo, M., Kaushik, S., Gupta, M., Islam, M.K., & Nayak, P. Sustainable Development, 32(4), 3809-3823 (2024). Powering a sustainable future: does economic structure influence the ecological footprint?

Sarker, I.H. SN Computer Science, 3(2), 158 (2022). AI-based modeling: techniques, applications and research issues towards automation, intelligent and smart systems.

Sarkodie, S.A., & Owusu, P.A. MethodsX, 7, 101160 (2020). How to apply the novel dynamic ARDL simulations (dynardl) and Kernel-based regularized least squares (krls).

Sethi, L., Behera, B., & Sethi, N. Sustainable Development, 32(3), 2709-2723 (2024). Do green finance, green technology innovation, and institutional quality help achieve environmental sustainability? Evidence from the developing economies.

Sharma, A., Dharwal, M., & Kumari, T. Materials Today: Proceedings, 60, 788-790 (2022b). Renewable energy for sustainable development: a comparative study of India and China.

Sharma, M., Luthra, S., Joshi, S., & Kumar, A. Government Information Quarterly, 39(4), 101624 (2022a). Implementing challenges of artificial intelligence: evidence from public manufacturing sector of an emerging economy.

Shehadeh, A., & Alshboul, O. Buildings, 15(3), 328 (2025). Enhancing engineering and architectural design through virtual reality and machine learning integration.

Shehadeh, A., Alshboul, O., & Arar, M. Sustainability, 16(17), 7398 (2024b). Enhancing urban sustainability and resilience: employing digital twin technologies for integrated WEFE Nexus Management to achieve SDGs.

Shehadeh, A., Alshboul, O., & Tamimi, M. Journal of Environmental Management, 368, 122234 (2024a). Integrating climate change predictions into infrastructure degradation modelling using advanced markovian frameworks to enhanced resilience.

Shu, H., Wang, Y., & Umar, M. Energy Economics, 120, 106582 (2023). Dynamics of renewable energy research, investment in EnvoTech and environmental quality in the context of G7 countries.

Singh, K., Meena, R.S., Kumar, S., Dhyani, S., Sheoran, S., Singh, H.M., et al. Biomass and Bioenergy, 177, 106944 (2023). India's renewable energy research and policies to phase down coal: success after Paris agreement and possibilities post-Glasgow Climate Pact.

Subhan, M., Anjum, A., Zamir, M.N., & Kirikkaleli, D. Economic Change and Restructuring, 57(4), 145 (2024). Do energy, inflation, and financial development stimulate economic welfare in India? Empirical insights from novel dynamic ARDL and KRLS simulations.

Talaat, M., Elkholy, M.H., Alblawi, A., & Said, T. Artificial Intelligence Review, 56(9), 10557-10611 (2023). Artificial intelligence applications for microgrids integration and management of hybrid renewable energy sources.

Tawiah, V., Zakari, A., & Adedoyin, F.F. Environmental Science and Pollution Research, 28(29), 39227-39242 (2021). Determinants of green growth in developed and developing countries.

Tian, H., Zhao, L., Yunfang, L., & Wang, W. Technological Forecasting and Social Change, 194, 122732 (2023). Can enterprise green technology innovation performance achieve "corner overtaking" by using artificial intelligence? —Evidence from Chinese manufacturing enterprises.

Truong, Y., & Papagiannidis, S. Technological Forecasting and Social Change, 183, 121852 (2022). Artificial intelligence as an enabler for innovation: a review and future research agenda.

Uche, E., Das, N., & Bera, P. Environmental Science and Pollution Research, 30(5), 11913-11925 (2023). Re-examining the environmental Kuznets curve (EKC) for India via the multiple threshold NARDL procedure.

Udemba, E.N., Güngör, H., Bekun, F.V., & Kirikkaleli, D. Sustainable Production and Consumption, 27, 52-60 (2021). Economic performance of India amidst high CO2 emissions.

Villanthenkodath, M.A., & Mahalik, M.K. Journal of Public Affairs, 22(1), e2291 (2022). Technological innovation and environmental quality nexus in India: does inward remittance matter?

Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., Fellander, A., Langhans, S.D., Tegmark, M., & Fuso Nerini, F. Nature Communications, 11(1), 233 (2020). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable development goals.

Wang, Q., Li, Y., Pata, U.K., & Li, R. Geoscience Frontiers (2025b). Artificial intelligence and global carbon inequality: addressing the challenges and opportunities for SDG 10, SDG 12, and SDG 13. 102072.

Wang, Q., Sun, J., Li, R., & Pata, U.K. Gondwana Research, 129, 371-380 (2024b). Linking trade openness to load capacity factor: the threshold effects of natural resource rent and corruption control.

Wang, Q., Sun, T., & Li, R. Energy & Environment, 36(2), 1005-1037 (2025a). Does artificial intelligence promote green innovation? An assessment based on direct, indirect, spillover, and heterogeneity effects.

Wang, Q., Zhang, F., & Li, R. Journal of Cleaner Production, 447, 141298 (2024a). Does artificial intelligence promote energy transition and curb carbon emissions? The role of trade openness.

Appendix

Dependent Variable: DLRE

Method: Least Squares

Date: 07/14/25 Time: 03:10

Sample (adjusted): 2001 2024

Included observations: 24 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DLAI	-0.027655	0.013323	-2.075641	0.0517
DLAISQ	0.000515	0.003047	0.168996	0.8676
AITECH	0.000386	0.000124	3.114512	0.0057
DLLF	0.060033	0.196860	0.304952	0.7637
C	0.055176	0.003312	16.65844	0.0000

R-squared	0.882802	Mean dependent var	0.069054
Adjusted R-squared	0.858128	S.D. dependent var	0.011038
S.E. of regression	0.004158	Akaike info criterion	-7.944715
Sum squared resid	0.000328	Schwarz criterion	-7.699287
Log likelihood	100.3366	Hannan-Quinn criter.	-7.879603
F-statistic	35.77954	Durbin-Watson stat	2.645432
Prob(F-statistic)	0.000000		

Dependent Variable: DLRE

Method: Least Squares

Date: 07/14/25 Time: 03:13

Sample (adjusted): 2001 2024

Included observations: 24 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DLLF	1.297535	0.399908	3.244588	0.0041
DLGDP	-0.097033	0.047218	-2.055023	0.0532
DLAI	0.004850	0.013442	0.360786	0.7220
C	0.048581	0.007241	6.708807	0.0000

R-squared	0.367089	Mean dependent var	0.069054
Adjusted R-squared	0.272152	S.D. dependent var	0.011038
S.E. of regression	0.009417	Akaike info criterion	-6.341587
Sum squared resid	0.001774	Schwarz criterion	-6.145245
Log likelihood	80.09904	Hannan-Quinn criter.	-6.289497
F-statistic	3.866672	Durbin-Watson stat	0.868059
Prob(F-statistic)	0.024824		

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:

F-statistic	5.837800	Prob. F(2,18)	0.0111
Obs*R-squared	9.442586	Prob. Chi-Square(2)	0.0089

Dependent Variable: DLRE

Method: Least Squares

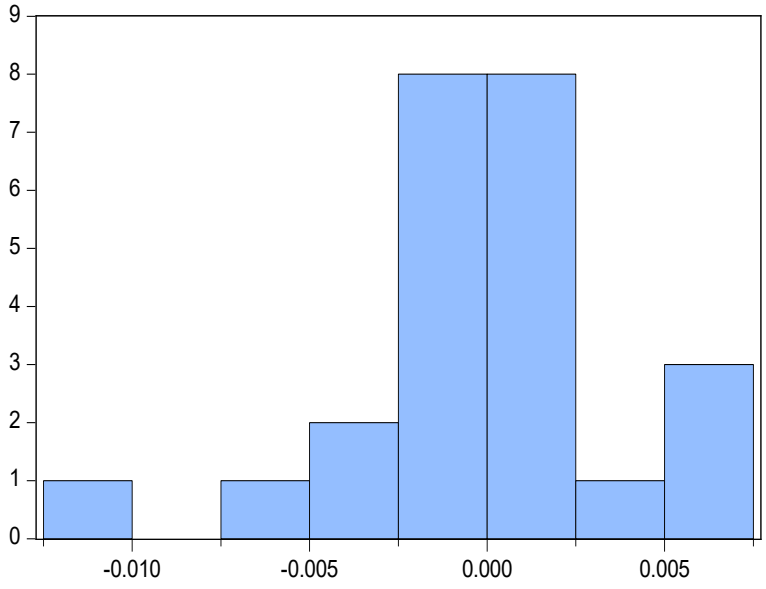
Date: 07/14/25 Time: 03:14

Sample (adjusted): 2001 2024

Included observations: 24 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DLLF	0.150475	0.182164	0.826042	0.4185
DLAI	0.008827	0.006131	1.439770	0.1654
DIGITAL	0.019151	0.001948	9.828735	0.0000
C	0.050342	0.003278	15.35847	0.0000

R-squared	0.868520	Mean dependent var	0.069054
Adjusted R-squared	0.848798	S.D. dependent var	0.011038
S.E. of regression	0.004292	Akaike info criterion	-7.913063
Sum squared resid	0.000368	Schwarz criterion	-7.716721
Log likelihood	98.95676	Hannan-Quinn criter.	-7.860974
F-statistic	44.03819	Durbin-Watson stat	2.642451
Prob(F-statistic)	0.000000		



Series: Residuals
Sample 2001 2024
Observations 24

Mean	-1.32e-17
Median	3.27e-05
Maximum	0.007120
Minimum	-0.011985
Std. Dev.	0.004002
Skewness	-0.724765
Kurtosis	4.969252
Jarque-Bera	5.979089
Probability	0.050310

Dependent Variable: DLRE

Method: Least Squares

Date: 07/14/25 Time: 03:18

Sample (adjusted): 2001 2023

Included observations: 23 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DLLF	0.861541	0.369593	2.331051	0.0309
DLAI(1)	0.005202	0.014032	0.370705	0.7150
DLAI	0.004609	0.013871	0.332292	0.7433
C	0.049309	0.008136	6.060883	0.0000

R-squared	0.248678	Mean dependent var	0.068147
Adjusted R-squared	0.130048	S.D. dependent var	0.010332
S.E. of regression	0.009637	Akaike info criterion	-6.289625
Sum squared resid	0.001765	Schwarz criterion	-6.092148
Log likelihood	76.33069	Hannan-Quinn criter.	-6.239960
F-statistic	2.096249	Durbin-Watson stat	0.932343
Prob(F-statistic)	0.134569		