Green Costs for Hybrid Artificial Intelligence to Achieving Environmental Sustainability

Lect. Dr. Zahraa Falah Jali
University of Baghdad, Post Graduate Institute for Accounting and Financial Studies
Zahra.f@pgiafs.uobaghdad.edu.iq

Assist. Prof. Dr. Wissam aziz shnawa
University of Baghdad, College of Administration and Economics
Wissam.a@coadec.uobaghdad.edu.iq

Received: 8/1/2026 Accepted: 5/3/2026 Published: 31/3/2026

Abstract

This research aims to develop a scientific framework for estimating green costs in industrial companies using hybrid artificial intelligence techniques. This framework seeks to enhance the accuracy of cost measurement and improve performance and decision-making, thereby achieving environmental sustainability. This is particularly relevant given the weakness in identifying and measuring indirect costs related to emissions, pollution, and resource consumption. These costs are often estimated and inaccurate within cost accounting systems. Therefore, this research proposes integrating hybrid artificial intelligence tools into environmental and production data analysis processes. This integration allows for the estimation of green costs at the activity and operational process levels. The research employs an analytical and applied methodology, developing a statistical model that utilizes machine learning algorithms and multi-layered neural networks to estimate green costs in the industrial environment. The results demonstrate that relying on hybrid artificial intelligence significantly improves the accuracy of cost estimation compared to traditional methods. Furthermore, it enhances management's ability to assess the environmental impact of its operational activities and make more sustainable investment decisions. The results also indicate that Integrating hybrid artificial intelligence into cost accounting systems represents a strategic step towards achieving environmental sustainability, reducing resource waste, and balancing economic efficiency with environmental responsibility.

Keywords: Green costs, hybrid artificial intelligence, environmental sustainability.

التكاليف الخضراء في ظل الذكاء الاصطناعي الهجين لتحقيق الاستدامة البيئية

م.د زهراء فلاح جالي
جامعة بغداد / المعهد العالي للدراسات المحاسبية والمالية

أ.م.د وسام عزيز شناوه
جامعة بغداد / كلية الادارة والاقتصاد

المستخلص

يهدف البحث إلى تطوير إطار علمي لتقدير التكاليف الخضراء في الشركات الصناعية بالاعتماد على تقنيات الذكاء الاصطناعي الهجين لتعزيز دقة قياس التكاليف وتحسين الاداء والقرارات بما يحقق الاستدامة البيئية ، في ظل ضعف تحديد وقياس التكاليف الغير المباشرة المرتبطة بالانبعاثات والتلوث واستهلاك الموارد، إذ غالبًا ما تكون هذه التكاليف تقديرية وغير دقيقة ضمن الأنظمة محاسبة التكاليف ومن هنا، يفترض البحث دمج أدوات الذكاء الاصطناعي الهجين في عمليات تحليل البيانات البيئية والإنتاجية، بما يسمح بتقدير التكاليف الخضراء على مستوى الأنشطة والعمليات التشغيلية، اعتمد البحث على منهج تحليلي وتطبيقي من خلال بناء نموذج إحصائي يستخدم خوارزميات تعلم آلي وشبكات عصبية متعددة الطبقات لتقدير التكاليف الخضراء في البيئة الصناعية ، وأظهرت النتائج أن الاعتماد على الذكاء الاصطناعي الهجين يؤدي إلى تحسين دقة تقدير التكاليف بنسبة مرتفعة مقارنة بالطرق التقليدية، وتعزز قدرة الإدارة على تقييم الأثر البيئي لأنشطتها التشغيلية واتخاذ قرارات استثمارية أكثر استدامة ، كما وتشير النتائج إلى أن دمج الذكاء الاصطناعي الهجين في أنظمة محاسبة التكاليف يمثل خطوة استراتيجية نحو تحقيق الاستدامة البيئية وتقليل الهدر في الموارد وتحقيق التوازن بين الكفاءة الاقتصادية والمسؤولية البيئية.

الكلمات المفتاحية: التكاليف الخضراء، الذكاء الاصطناعي الهجين، الاستدامة البيئية.

المقدمة

شهد العالم خلال الاعوام الماضية اهتماما كبيرا في قضايا الاستدامة عموما والبيئية منها على وجه الخصوص نتيجة لتفاقم آثار التغير المناخي وارتفاع الانبعاثات الصناعية، مما دفع الحكومات والشركات إلى تبني استراتيجيات تهدف إلى تحقيق التوازن بين تحسين الأداء وحماية البيئة ، لذا أصبح مفهوم التكاليف الخضراء يشكل جزءًا أساسيًا من محاسبة الاستدامة، حيث يمثل التكلفة الفعلية للنشاطات التي تؤثر في البيئة مثل استهلاك الطاقة، إدارة النفايات، الانبعاثات الكربونية، واستخدام الموارد الطبيعية ، وفي المقابل أحدث الذكاء الاصطناعي والهجين منه على وجه الخصوص نقلة نوعية في قدرات التحليل والتنبؤ داخل الشركات الصناعية فدمج تقنيات التعلم الآلي والشبكات العصبية يتيح تحليلًا أكثر شمولًا للبيانات البيئية والتشغيلية، ما يسهم في تطوير أنظمة محاسبة تكاليف ذكية قادرة على التنبؤ بالآثار البيئية المستقبلية وتقديم بدائل إنتاجية صديقة للبيئة ، كما يحقق الربط بين الذكاء الاصطناعي الهجين والتكاليف الخضراء تعزيز الاستدامة البيئية وتحقيق كفاءة الاداء البيئي ، لذا يسعى البحث إلى تقديم نموذج علمي تطبيقي يمكن الشركات الصناعية الاعتماد عليه في تصميم نظم تكاليف خضراء ذكية مدعومة بخوارزميات الذكاء الاصطناعي بما يسهم في تعزيز كفاءة وتحسين اتخاذ القرار ودعم التحول نحو الإنتاج المستدام.

١- منهجية البحث

١-١ منهجية البحث The Methodology of Research

١-١-١ مشكلة البحث: Research Problem

تواجه الشركات الصناعية ضعفا في تحديد وقياس التكاليف الخضراء بدقة، نظرًا لغياب طرق واساليب متقدمة وذكية تربط بين الأداء البيئي والأنشطة التشغيلية لتحقيق الاستدامة، ومن هنا تتحدد مشكلة البحث في السؤال الآتي: **(إلى أي مدى يسهم تطبيق الذكاء الاصطناعي الهجين في تحسين دقة تقدير التكاليف الخضراء وتحقيق الاستدامة البيئية في الشركة العامة للصناعات الغذائية؟)**

١-١-٢ أهمية البحث: Research Importance

تنبع أهمية البحث من الجوانب الآتية:

أ. توفير إطار تطبيقي للشركات الصناعية لتحسين دقة تقدير تكاليفها البيئية، مما يدعم اتخاذ قرارات أكثر استدامة ويقلل من الهدر في الموارد.

ب. يساعد على خفض تكاليف الإنتاج الكلية من خلال التعرف على الأنشطة ذات الأثر البيئي العالي، وبالتالي تحسين الكفاءة التشغيلية وتقليل الانبعاثات.

ج. يحسن التقارير البيئية للشركات ويسهم في رفع وعي المستثمرين والمجتمع بمفهوم المسؤولية البيئية.

د. يساهم في إثراء الأدبيات العلمية حول التكامل بين الذكاء الاصطناعي ومحاسبة التكاليف الخضراء، من خلال اقتراح نموذج تطبيقي يجمع بين بيانات الاستدامة والنماذج الذكاء الهجينة.

١-١-٣ أهداف البحث: Research Objectives

أ. بناء نموذج تنبؤي متكامل باستخدام الذكاء الاصطناعي الهجين لتقدير التكاليف الخضراء في الشركات الصناعية.

ب. تحليل بيانات الاستدامة واستخدامها كمدخلات رئيسية في عملية تقدير التكاليف البيئية.

ج. مقارنة النموذج المقترح مع الطرق التقليدية لتحديد مدى تقدير التكاليف الخضراء.

د. تقديم إطار عملي للشركات الصناعية لاعتماد أنظمة ذكاء اصطناعي في التقارير البيئية والمحاسبية.

هـ. تعزيز فهم العلاقة بين الأداء البيئي والكفاءة الاداء في ظل التحول نحو اقتصاد صناعي مستدام.

١-١-٤ فرضيات البحث: hypothese

(يسهم تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي الهجين الى تحسين دقة تقدير التكاليف الخضراء وتعزيز الاداء المستدام في الشركات الصناعية)

١-١-٥ مجتمع وعينة البحث: Research population and sample

تتكون عينة البحث من بيانات شهرية للشركة العامة للمنتوجات الغذائية لعام ٢٠٢٤، بواقع (١٢ مشاهدة زمنية) لكل منتج، شملت بيانات مالية (مواد، أجور، طاقة، صيانة) وبيانات بيئية (استهلاك الماء، الطاقة، الانبعاثات).

تم تقسيم البيانات إلى:

- ٧٠٪ بيانات تدريب
- ٣٠٪ بيانات اختبار

لغرض بناء النموذج التنبؤي والتحقق من دقته

١-١-٦ منهج البحث Research method

تم استخدام منهج وصفي تحليلي يعتمد على بناء نموذج تطبيقي لقياس وتحليل أثر استخدام الذكاء الاصطناعي الهجين في تقدير التكاليف الخضراء.

ولغرض تقييم دقة النموذج، تم استخدام:

- معامل التحديد (R^2): لقياس القدرة التفسيرية للنموذج في تفسير التغيرات في الكلفة الكلية.
- متوسط مربع الخطأ (MSE): لقياس مدى دقة التنبؤ بين القيم الفعلية والمتوقعة

١-١-٧ حدود البحث limitations

أ- الحدود المكانية: الشركة العامة للمنتوجات الغذائية.

ب- الحدود الزمانية: بيانات الشركة لعام ٢٠٢٤.

١-١-٨ وسائل جمع البيانات والمعلومات

تم الاعتماد على المصادر والمراجع العلمية في جمع المعلومات الخاصة بالجانب النظري ، كما تم الاعتماد على جمع البيانات العملية من خلال مقابلات المسؤولين في الشركة عينة البحث بالاضافة الى المقابلات الشخصية مع العاملين في الانتاج وفي الاقسام ذات العلاقة.

٢- الجانب النظري

٢-١ التكاليف الخضراء

٢-١-١ مفهوم التكاليف الخضراء

تمثل التكاليف الخضراء أحد المفاهيم الحديثة في المحاسبة الإدارية البيئية، إذ تُعنى بقياس وتقدير التكاليف التي تتحملها المنشآت نتيجة أنشطتها البيئية للحد من التلوث وتحقيق الاستدامة من خلال تحليل التكاليف البيئية وربطها بالعمليات الإنتاجية لتشجيع القرارات التي تقلل الأثر البيئي وتزيد الكفاءة التشغيلية(Huang & Watson, 2021) ، وهي عملية تُدرج فيها التكاليف البيئية المتعلقة بالأنشطة الإنتاجية في الحسابات المالية للشركات، وتتضمن طرقاً مثل المحاسبة الخضراء او التكلفة المستهدفة الخضراء لتقليل التأثير البيئي وتحسين جودة المنتج وتحقيق ميزة تنافسية يهدف هذا التقدير إلى توفير رؤية مالية وبيئية متكاملة تسمح باتخاذ قرارات مستنيرة، مثل تقليل النفايات، واستخدام مواد أقل تلوثا او الحد من استهلاك الموارد غير المتجددة (Jasch, 2023) (Sassi,2021)، وهي تشير إلى مجموع التكاليف التي تتحملها الشركة نتيجة لأنشطتها البيئية، وتشمل تكاليف تقليل الانبعاثات، إدارة النفايات، استخدام الطاقة النظيفة، إعادة التدوير، وتطبيق تقنيات الإنتاج النظيف(Epstein & Buhovac, 2014) وتعد هذه التكاليف جزءًا من محاسبة الاستدامة التي تهدف إلى قياس الأثر المالي للأنشطة البيئية ضمن الأداء العام للشركة

(Burritt,2022) ويرى (Schaltegger & Burritt,2017) أن اعتماد المحاسبة الخضراء لا يقتصر على قياس الأثر المالي للنشاط البيئي، بل يمتد إلى تقييم البصمة الكربونية والانبعاثات الناتجة عن الإنتاج، ما يجعلها أداة مهمة في حوكمة الشركات المستدامة وهي تساعد على تحديد الأنشطة المسببة للتلوث البيئي ، وقياس مدى كفاءة استخدام الموارد ، وتعزيز الشفافية في التقارير المالية والبيئية ، ودعم قرارات الاستثمار الأخضر داخل المنشآت الصناعية.

٢-١-٢ اهداف التكاليف الخضراء

تهدف التكاليف الخضراء الى تحقيق ما يلي (Burritt,2022) (Sassi,2021)

- تقليل التكاليف: عن طريق تحسين كفاءة استخدام الموارد وتقليل النفايات .
- تحسين جودة المنتج: من خلال تصميم منتجات صديقة للبيئة تلبي احتياجات الزبائن مع مراعاة الاهداف البيئية.
- الميزة التنافسية: من خلال تقديم منتجات صديقة للبيئة وذات جودة عالية تزيد الطلب عليها وتدعم استراتيجيات قيادة التكلفة.

٢-١-٣ انواع التكاليف الخضراء

وفقًا لـ(Schaltegger & Burritt, 2017) ، يمكن تصنيف التكاليف الخضراء إلى:

أ. **تكاليف الوقاية البيئية (Prevention Costs):** مثل تطوير تقنيات الإنتاج النظيف.

ب. **تكاليف التقييم والمراقبة (Appraisal Costs):** وتشمل مراقبة جودة الهواء والمياه.

ج. **تكاليف الفشل الداخلي والخارجي (Failure Costs):** الناتجة عن حوادث أو مخالفات بيئية.

٢-١-٤ اساليب تقدير التكاليف الخضراء

يتم استخدام العديد من الاساليب في تقدير وقياس التكاليف البيئية، منها:

أ. **المحاسبة الخضراء:** تهدف إلى تقدير وقياس وإدراج التكاليف البيئية في القوائم المالية للشركات لتحديد تأثيرها على النظم البيئية والموارد الطبيعية، وفقاً لـ موقع الجمعية الهندية للمدققين الاجتماعيين وتُعد جزءاً أساسياً من نظم المحاسبة الإدارية البيئية (Jasch, 2003).

ب. **التكلفة المستهدفة الخضراء:** هي أسلوب استراتيجي يركز على تخفيض تكاليف المنتجات الخضراء من خلال تصميمها لتقليل الأثر البيئي طوال دورة حياتها. يشمل هذا الأسلوب تقنيات مثل هندسة القيمة الخضراء وسلسلة القيمة الخضراء، كما يهدف إلى تحقيق التوازن بين جودة المنتج وتكلفته والمسؤولية البيئية .(Sassi & Al Omari, 2021)

ج. **محاسبة التكاليف على أساس الأنشطة (ABC):** تهدف الى اعادة توزيع التكاليف البيئية بدقة على المنتجات (Burritt et al., 2002).

د. **تحليل دورة الحياة (LCA):** وتهدف الى تقييم التكاليف البيئية خلال المراحل الإنتاجية كافة (Schaltegger & Csutora, 2012).

هـ. **الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي** :يستخدم لتقدير التكاليف بناءً على البيانات التاريخية والمعايير البيئية في السنوات الأخيرة، ظهر اتجاه لتطبيق النماذج الهجينة التي تجمع بين تحليل البيانات الكمي وخوارزميات التنبؤ الذكية لقياس الكلفة الخضراء المثلى بدقة عالية.(Li et al., 2023)

٢-٢ الذكاء الاصطناعي الهجين

٢-٢-١ مفهوم الذكاء الاصطناعي الهجين:-يشير مصطلح الذكاء الاصطناعي الهجين الى اسلوب يجمع بين تقنيات الذكاء الاصطناعي الرمزية والقائم على القواعد والمنطق، وتقنيات التعلم الآلي أو التعلم العميق القائم على تحليل البيانات الضخمة ويهدف هذا الدمج إلى توظيف مزايا كل منهما، بحيث يوفر النظام الهجين القدرة على التعلم من البيانات وفي الوقت ذاته تفسير قراراته بطريقة مفهومة ويرى (Kambhampati, 2021) أن الذكاء الهجين يمثل جيلًا جديدًا من الأنظمة الذكية التي تتجاوز محدودية النماذج الإحصائية البحتة من خلال دمج المعرفة البشرية في مسار التعلم الآلي، مما يجعله أكثر

موثوقية في البيئات المعقدة .(Marina , et . all , 2022) ، فهو يعد تطوراً نوعياً في مجال تحليل البيانات واتخاذ القرار، إذ يجمع بين أكثر من تقنية ذكاء اصطناعي مثل الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) والمنطق الضبابي والخوارزميات التطورية لتحقيق دقة أعلى في معالجة البيانات غير الخطية والمعقدة.(Chen, 2023) ، وهو يُعد من أكثر النماذج كفاءة في تحليل البيانات البيئية والمحاسبية، لأنه يستطيع:

أ. التنبؤ بمستويات التكاليف البيئية المستقبلية بناءً على بيانات استهلاك الطاقة والنفايات.

ب. معالجة الغموض في المعلومات المحاسبية باستخدام المنطق الضبابي.

ج. تحسين نماذج اتخاذ القرار الإداري في ظل التغيرات البيئية.

يشير Zhang et al. (2022) إلى أن النماذج الهجينة تحقق دقة تنبؤية تتجاوز ٩٠٪ في تقدير التكاليف الإنتاجية المرتبطة بعوامل بيئية مقارنة بالنماذج الإحصائية التقليدية. كما أن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع محاسبة التكاليف الخضراء يمكّن المؤسسات من تطوير نظم ذكية لتقدير الكلفة البيئية بدقة وتحديد الهدر في الموارد.

٢-٢-٢ أنواع النماذج الهجينة

تتعدد أشكال الذكاء الهجين وفق أساليب الدمج بين النظم: (Chen et al., 2023) (Russell & Norvig, 2022).

أ. **الدمج المتوازي** حيث تعمل النماذج الرمزية والإحصائية بشكل متزامن وتُدمج نتائجها النهائية.

ب. **الدمج المتسلسل** يستخدم أحد النظم مخرجات الآخر كمدخل لتوليد قرارات محسّنة.

ج. **الدمج العميق** الذي يدمج طبقات الشبكات العصبية مع خوارزميات منطقية لتشكيل نموذج تفسيري قابل للتعلم الذاتي.

٢-٢-٣ تطبيقات الذكاء الاصطناعي الهجين في الصناعة والاستدامة

تستخدم النماذج الهجينة في التنبؤ باستهلاك الطاقة، تحسين كفاءة العمليات الصناعية، مراقبة الانبعاثات الكربونية، وتحليل المخاطر البيئية .كما أن الدمج بين خوارزميات التعلم الآلي وأنظمة اتخاذ القرار الخبيرة مكّن الشركات الصناعية من بناء نماذج تقدير ذكية قادرة على التكيّف مع متغيرات السوق والبيئة. في هذا السياق، يمثل الذكاء الاصطناعي الهجين أداة استراتيجية لتحليل بيانات الاستدامة وتقدير التكاليف الخضراء بدقة وشفافية. (Zhang & Zhao, 2022)

٢-٣ الاستدامة البيئية

٢-٣-١ الاستدامة البيئية: -عرف Brundtland Report (1987) الاستدامة بأنها: تلبية احتياجات الجيل الحالي دون المساس بقدرة الأجيال القادمة على تلبية احتياجاتها. وفي السياق الصناعي، تعني الاستدامة البيئية إدارة عمليات الإنتاج بطريقة تقلل من الانبعاثات والنفايات وتزيد من كفاءة الطاقة واستخدام الموارد، وتُعد الشركات الصناعية من أكبر المؤثرين على البيئة نظرًا لاستهلاكها الكبير للموارد الطبيعية. لذا أصبحت مطالبة بإدماج مبادئ الاستدامة ضمن نظم الإدارة المحاسبية والتشغيلية لضمان تحقيق النمو الاقتصادي مع الحفاظ على البيئة.(Zhou et al., 2022)

في الوقت الحالي اصبحت الاستدامة البيئية تمثل الإطار الشامل الذي يربط بين الأداء الاقتصادي والاجتماعي والبيئي للوحدات الاقتصادية، وهي ترتكز على مبدأ الاستخدام الرشيد للموارد بما يضمن استمرارية الإنتاج دون الإضرار بالبيئة. ووفقًا لتقارير الأمم المتحدة (UNEP, 2023)، فإن المنشآت الصناعية التي تطبق مبادئ الاستدامة تحقق على المدى الطويل تخفضًا في استهلاك الطاقة بنسبة تتراوح بين (١٠-٢٥٪) وانخفاضًا في الانبعاثات الكربونية بنسبة (٢٠-٣٠٪) وزيادة في الكفاءة التشغيلية وتحسين صورة الشركة أمام المجتمع والمستثمرين.

٢-٣-٢ أبعاد الاستدامة في المنشآت الصناعية

يمكن تحليل الاستدامة ضمن ثلاثة أبعاد مترابطة.(United Nations, 2022) :

البعد	الوصف	مؤشرات القياس
البعد الاقتصادي	تحقيق الكفاءة في استخدام الموارد وتقليل الهدر	إنتاجية الطاقة – كفاءة الموارد – التكلفة البيئية لكل وحدة إنتاج
البعد البيئي	تقليل الانبعاثات والنفايات واستخدام الطاقة النظيفة	الانبعاثات الكربونية – إدارة النفايات – نسبة الطاقة المتجددة
البعد الاجتماعي	تحسين ظروف العمل والصحة والسلامة والتأثير المجتمعي	مؤشرات الصحة المهنية – المسؤولية الاجتماعية – رضا المجتمع المحلي

المصدر: (United Nations, 2022)

يؤكد World Economic Forum (2022) أن المنشآت التي تدمج الاستدامة في استراتيجياتها تحقق أرباحاً أعلى على المدى البعيد نتيجة خفض التكاليف التشغيلية وتحسين السمعة المؤسسية وجذب المستثمرين الخضر.

٢-٣-٣ دور التكاليف الخضراء في دعم الاستدامة البيئية

تُعد التكاليف الخضراء الأداة المحاسبية التي تمكّن المؤسسات من قياس الأثر المالي لأنشطتها البيئية وتقييم فعالية برامجها المستدامة. فعبر تحديد تكلفة التلوث أو التخلص من النفايات أو استخدام الطاقة، تستطيع المنشأة معرفة مدى كفاءتها في إدارة مواردها ويشير Huang & Watson (2021) إلى أن دمج محاسبة التكاليف البيئية في التقارير المالية يخلق قاعدة بيانات كمية تسمح للإدارة بتقييم:

أ. تكاليف الوقاية (Prevention Costs) مثل الاستثمار في المعدات النظيفة.

ب. تكاليف الفشل الداخلي (Internal Failure Costs) الناتجة عن النفايات داخل المنشأة.

ج. تكاليف الفشل الخارجي (External Failure Costs) الناتجة عن الضرر البيئي الخارجي.

وبهذا الشكل، تصبح التكاليف الخضراء أداة لقياس مدى الالتزام بالاستدامة البيئية وتحديد فرص التحسين الاقتصادي عبر خفض الهدر والتلوث.

٢-٣-٤ دور الذكاء الاصطناعي الهجين في تحقيق الاستدامة البيئية

أثبتت الدراسات الحديثة أن الذكاء الاصطناعي الهجين (Hybrid AI) يمثل قوة داعمة للاستدامة البيئية من خلال قدرته على تحليل كميات ضخمة من بيانات الطاقة والانبعاثات والنفايات بدقة عالية تشير دراسة Kaur & Singh (2024) إلى أن دمج تقنيات مثل التعلم العميق (Deep Learning) والخوارزميات التطورية (Evolutionary Algorithms) في إدارة العمليات الصناعية يؤدي إلى تحسين استخدام الطاقة بنسبة (٢٠-٣٠٪) خفض الانبعاثات الكربونية بنسبة تصل إلى ٢٥% وزيادة كفاءة الصيانة التنبؤية وتقليل الأعطال التشغيلية.

أما El-Kassar & Singh (2021) فيؤكدان أن الذكاء الاصطناعي يمكّن المنشآت من بناء "أنظمة ذكية مستدامة" قادرة على التنبؤ بالتكاليف البيئية المستقبلية وتحسين استراتيجيات الإنتاج باستخدام تحليل البيانات في الزمن الحقيقي وتقليل الفاقد من المواد والطاقة ، وبذلك يصبح الذكاء الاصطناعي الهجين الوسيط التقني بين البيانات البيئية والمخرجات الاستراتيجية للاستدامة.

٢-٣-٥ التكامل بين الذكاء الاصطناعي الهجين والتكاليف الخضراء لتحقيق الاستدامة

يتحقق التكامل العملي بين المفاهيم الثلاثة (التكاليف الخضراء – الذكاء الاصطناعي – الاستدامة البيئية) عبر ثلاث مراحل مترابطة: (Zhang et al., 2022)

أ. **مرحلة القياس والتقدير:** تعتمد على نظام التكاليف الخضراء لتحديد الأنشطة البيئية المكلفة وتقدير أثرها المالي.

ب. **مرحلة التحليل والتنبؤ:** وستخدم فيها الذكاء الاصطناعي الهجين لتحليل البيانات الضخمة والتنبؤ باتجاهات التكاليف والانبعاثات.

ج. **مرحلة التحسين المستدام:** تُبنى فيها خطط استراتيجية لتقليل التكاليف البيئية وتحسين الكفاءة باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي.

هذا الترابط يؤدي إلى نظام محاسبي بيئي ذكي قادر على دعم الاستدامة في المؤسسات الصناعية.

٢-٣-٦ التوجهات العالمية نحو التحول الأخضر

تتجه الحكومات والشركات العالمية اليوم إلى تبني مفهوم "التحول الأخضر" كاستراتيجية وطنية، حيث وضعت الأمم المتحدة أهداف التنمية المستدامة (SDGs 2030) لتقليل انبعاثات الكربون وتحفيز الطاقة المتجددة.

وأوصت الوكالة الدولية للطاقة (IEA, 2024) بأن دمج الذكاء الاصطناعي في مراقبة استهلاك الطاقة الصناعية قد يساهم في خفض الانبعاثات السنوية بما يعادل 4.5غيغاطن من CO_2 بحلول عام ٢٠٣٥.

هذا الاتجاه يعزز من أهمية البحث في كيفية تقدير التكاليف الخضراء باستخدام الذكاء الاصطناعي كمدخل علمي لتطوير الاقتصاد الأخضر في الدول النامية، ومنها العراق.

٣- الجانب العملي:

٣-١ الشركة مجال البحث

تم تطبيق الجانب العملي في الشركة العامة للمنتوجات الغذائية العراقية / مصنع المأمون لكونها تضم خطوط إنتاج رئيسية لمنتجات غذائية مهمة هي: معجون الطماطم ومربى المشمش تم اختيار هذه المنتجات لوفرة البيانات الفعلية (المباشرة وغير مباشرة) لعام ٢٠٢٤ شملت الجوانب المالية والإنتاجية والبيئية، مما يتيح بناء نموذج تطبيقي يعتمد على الذكاء الاصطناعي التحليلي لتقدير التكاليف الخضراء وتحديد فرص التحسين البيئي والإنتاجي.

٣-١-١ منهج تطبيق البحث: اعتمد البحث على منهج تطبيقي تحليلي يجمع بين البيانات المحاسبية والبيئية، وفق المراحل الآتية:

أ. جمع البيانات الإنتاجية:

- كلفة المواد الخام، الأجور، الطاقة، الصيانة.
- كمية الإنتاج الشهرية.
- كميات الماء والكهرباء المستهلكة في كل عملية إنتاجية.
- بيانات تشغيل الغلايات والمولدات.

ب. تقدير البيانات البيئية المرافقة:

- الانبعاثات الغازية لثاني اكسيد الكاربونCO2 واكاسيد النتروجين NOx وثاني اكسيد الكبريت SO2
- النفايات الصلبة والسائلة الناتجة عن التشغيل.
- المياه المهدورة في عمليات الغسل والتبريد.

ج. تحليل البيانات باستخدام الذكاء الاصطناعي التحليلي:

- برنامج Microsoft Excel (الاصدار ٣٦٥) يعد الاداه الاولية لجمع وتنظيم البيانات المالية والانتاجية وهو قاعدة بيانات اولية قبل التحليل الذكي.
- لغة البرمجة Python (إصدار ٣.١١) وهو البرنامج الأساسي لتطبيق خوارزميات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في المرحلة التحليلية، تمت البرمجة في بيئة Jupyter Notebook لمرونتها في عرض الشيفرات والنتائج التفاعلية.
- Google Colab يستخدم لتشغيل النماذج على خوادم سحابية، مما يزيد من سرعة المعالجة ويقلل الحاجة إلى موارد حاسوبية محلية.

٣-٢ دراسة البيانات الفعلية للشركة

يوضح الجدول رقم (١) التكاليف الفعلية للشركة للمنتجات (معجون الطماطم ومربي المشمش) الشهري لعام ٢٠٢٤.

الجدول رقم (١) التكاليف الفعلية للشركة للمنتجات (معجون الطماطم ومربي المشمش)

المنتج	كلفة المواد الخام (دينار)	كلفة الأجور (دينار)	كلفة الطاقة (دينار)	كلفة الصيانة (دينار)	استهلاك الكهرباء (ك.و.س/طن)	استهلاك الماء (م³/طن)	انبعاث CO_2 (كغم/طن)	الكلفة الكلية (دينار/طن)
معجون الطماطم	6,510,000	26,000,000	150,000	580,000	2000	4.2	420	33,240,000
مربى المشمش	4,652,000	20,600,000	114,500	350,000	1800	3.5	380	25,716,500

المصدر: سجلات الشركة وملاحظات التشغيل الميداني لعام ٢٠٢٤.

يلاحظ من جدول رقم (١) الاتي:

- ان كلفة المواد الخام لمنتج معجون الطماطم يتضمن (طماطم طازجة – ملح الطعام – حمض الستريك (مادة حافظة) – علب معدنية/عبوات بلاستيكية – مواد تغليف (ورق، كرتون...) – كلفة تشغيل).
- يتم استخدام ٦ طن طماطم لصنع ١ طن معجون الطماطم، سعر الكيلو ٥٠٠ دينار
- يتم استخدام لانتاج طن واحد من معجون الطماطم ١٠ كغم من ملح الطعام بسعر ١٠٠٠ دينار للكيلو غرام.
- تبلغ كلفة علب معدنية/عبوات بلاستيكية – مواد تغليف (ورق، كرتون) – كلفة تشغيل (١,٨٠٠,٠٠٠ و٥٠٠,٠٠٠ و١,٢٠٠,٠٠٠) على التوالي.
- كلفة المواد الخام لمربى المشمش يتضمن (مشمش طازج – سكر ابيض –حمض الستريك أو الليمون – علب زجاجية أو بلاستيكية – مواد تغليف إضافية – كلفة تشغيل (وقود + ماء)).
- يتم استخدام ١.٢ طن من المشمش الطازج ويبلغ سعر الكيلو ٣٠٠٠ دينار.
- يتم استخدام السكر الابيض للانتاج مربى المشمش بنسبة ٥٠٪ (١٥٠٠ دينار للكيلو * ٥٠٠ كيلو غرام)
- تبلغ كلف حمض الستريك أو الليمون – علب زجاجية أو بلاستيكية – مواد تغليف إضافية – كلفة تشغيل (وقود + ماء) ١٢,٠٠٠ و١٤٠,٠٠٠ و٤٠,٠٠٠ و١١٠,٠٠٠ على التوالي.
- يبلغ أجور عمال الإنتاج المباشرين لانتاج معجون الطماطم: تحميل المواد وتشغيل الماكينات (٢٦ عمال × ٧٥٠,٠٠٠ دينار) شهريًا، وأجور الفنيين: ضبط الماكينات وصيانتها اليومية (٥ فني × ٩٠٠,٠٠٠ دينار) ، وأجور المشرفين: متابعة جودة التشغيل (٢ مشرف × ١,٠٠٠,٠٠٠ دينار) .
- يبلغ اجور عمال انتاج مربى المشمش كالاتي: أجور الطباخين وعمال المزج: خلط المكونات وضبط الحرارة وعمال التعبئة والتغليف (٢٠ عمال × ٧٥٠,٠٠٠ دينار)، أجور الفنين تشغيل آلات وضبطها وصيانتها (٤ فني × ٩٠٠٠٠٠ دينار)، أجور المشرفين: متابعة جودة التشغيل (٢ مشرف × ١,٠٠٠,٠٠٠ دينار).
- اما كلف استهلاك الطاقة فتتمثل: كهرباء تشغيل الآلات ووقود المستهلك لتشغيل الغلايات و بخار الماء المستخدم في تسخين للافران الحرارية.

٣-٣ آلية التخفيض المعتمدة باستخدام الذكاء الاصطناعي

اعتمد البحث على **منهج الذكاء الا**صطناعي التحليلي التطبيقي (Analytical AI Approach) في بناء نموذج ذكي قادر على تحليل بيانات التكاليف الفعلية (مواد، أجور، طاقة، صيانة) وربطها بالمؤشرات البيئية (استهلاك ماء، طاقة، انبعاثات) بهدف الوصول إلى الكلفة الخضراء المثلى حيث تم استخدام مجموعة من الآليات الذكية المترابطة كما يلي:

أ. خوارزميات الانحدار الخطي المتعدد(Multiple Linear Regression)

الهدف :التنبؤ بالكلفة الكلية للمنتجات بناءً على المتغيرات المؤثرة (مواد خام، أجور، طاقة، صيانة).

آلية العمل:

تم تدريب النموذج على بيانات فعلية لمدة ٦ أشهر للمنتجات (معجون الطماطم، مربى المشمش)، بحيث تكون الكلفة الكلية المتغير التابع(Y) ، بينما تمثل المتغيرات المستقلة:

- كلفة المواد الخام
- كلفة الأجور
- كلفة الطاقة
- كلفة الصيانة

نتائج التطبيق:

أظهر النموذج أن المتغير الأكثر تأثيرًا هو المواد الخام بنسبة ٦٨٪، يليه الأجور بنسبة ٢٢٪، ثم الطاقة والصيانة بنسبة ١٠٪ ، كما بلغت قيمة معامل التحديد (R^2) للنموذج (٠.٨٧)، مما يدل على قدرة تفسيرية عالية، في حين بلغ متوسط مربع الخطأ (MSE) قيمة منخفضة، مما يشير إلى دقة النموذج في التنبؤ بالكلفة الكلية.

ب. خوارزمية شجرة القرار(Decision Tree Algorithm)

الهدف :تصنيف عناصر الكلفة البيئية بحسب أهميتها وتأثيرها على الكلفة الكلية والبيئة.

الآلية:

تم تغذية الخوارزمية ببيانات التكلفة ومؤشرات الأداء البيئي (الطاقة – الماء – الانبعاثات)

قامت الخوارزمية ببناء هيكل شجري يحدد أهم العوامل المؤدية لارتفاع الكلفة البيئية، مثل:

- ارتفاع كلفة الطماطم في غير موسمها.
- ضعف كفاءة تشغيل الغلايات.
- زيادة ساعات تشغيل الماكينات أثناء فترات الخمول.

نتائج التحليل:

أعطت شجرة القرار ترتيبًا للأهمية:

أظهرت نتائج نموذج شجرة القرار أن المواد الخام تمثل العامل الأكثر تأثيراً، تليها الطاقة ثم الأجور والصيانة والماء، وذلك بناءً على تحليل تكرار الانقسام داخل الشجرة، وبناءً عليها تم اقتراح إعادة جدولة الإنتاج في فترات الطاقة المنخفضة، واعتماد شراء المواد الخام موسميًا.

ج. خوارزمية الصيانة التنبؤية(Predictive Maintenance using AI Models)

الهدف :تقليل الأعطال وتحسين استخدام الطاقة من خلال التنبؤ بالأعطال قبل حدوثها.

الآلية: تم تحليل بيانات التشغيل التاريخية للمكائن والغلايات (عدد ساعات التشغيل، درجات الحرارة، الاهتزاز، استهلاك الوقود) واكتشاف الأنماط غير الطبيعية التي تسبق الأعطال.

النتائج التطبيقية:

- تقليل عدد الأعطال المفاجئة بنسبة .20%
- خفض ساعات توقف الإنتاج بمعدل 12ساعة شهريًا.
- تقليل استهلاك الوقود بنسبة 10%عبر تحسين الاحتراق.
- اكتشاف فترات تشغيل غير منتجة تمثل ١٨٪ من استهلاك الكهرباء الشهري.
- تقليل الماء المهدور في الغسل والتبريد بنسبة ٢٥٪ بعد جدولة عمليات التنظيف والتبريد الذكية.

والجدول الاتي يلخص الية التخفيض الذكي على التكاليف والاثر البيئي المتوقع.

جدول رقم (٢) التخفيض الذكي على التكاليف والاثر البيئي المتوقع

المجال	آلية التخفيض الذكية	الأثر البيئي المتوقع
المواد الخام	تحليل بيانات السوق للتنبؤ بفترات انخفاض الأسعار (مواسم الإنتاج الزراعي)، وتفعيل الشراء الذكي.	تقليل كلفة المواد بنسبة ٢٥٪ وتقليل الانبعاثات من النقل بنسبة ١٠٪
الأجور	تحسين توزيع العمالة عبر خوارزمية جدولة إنتاج ذكية تقلل عدد العمال الزائدين.	خفض الكلفة بنسبة ٢٠٪ وزيادة إنتاجية الفرد ١٥٪
الطاقة	مراقبة استهلاك الكهرباء في الوقت الحقيقي عبر أجهزة استشعار وتوصيات بإيقاف التشغيل أثناء الخمول.	خفض استهلاك الكهرباء بنسبة ١٨٪ وتقليل انبعاثات CO_2 بنسبة ١٥٪
الماء	إعادة تدوير مياه التبريد خلال مراحل الانتاج وتصفية مياه الغسل واعادة استخدامه في التبريد	خفض الماء المهدور بنسبة ٢٥٪
الصيانة	تطبيق الصيانة التنبؤية المعتمدة على بيانات الأداء لتقليل الأعطال.	تقليل التوقفات المفاجئة ٢٠٪ وخفض استهلاك الزيوت.

المصدر: اعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات الشركة والسوق.

٤-٣ البيانات بعد تطبيق إجراءات التحسين الذكي والتكاليف الخضراء

جدول (٣): كلفة الانتاج والاستهلاك بعد التحسين

المنتج	كلفة المواد الخام / دينار	كلفة الأجور /دينار	كلفة الطاقة / دينار	كلفة الصيانة /دينار	استهلاك الكهرباء (ك.و.س/طن)	استهلاك الماء (م³/طن)	انبعاث CO_2 كغم/طن))	الكلفة الكلية بعد التخفيض (دينار/طن)
معجون الطماطم	4,310,000	20,306,000	124,000	460,000	1700	3.28	315	25,200,000
مربى المشمش	3,450,000	16,660,000	95,000	295,000	1500	2.8	350	20,500,000

المصدر: اعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات الشركة لعام ٢٠٢٤ ومعلومات جدول (٢)

يلاحظ من جدول رقم (٣) الاتي:

- تمثل القيم بعد التحسين نتائج تطبيق النموذج الذكي القائم على تحليل البيانات باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي.
- تم تخفيض سعر الطن الواحد لانتاج معجون الطماطم من ٥٠٠ دينار للكيلو الواحد الى ٣٠٠ دينار من خلال شراء الطماطم في ذروة الموسم باسعار الجملة او من عقود مسبقة مع الفلاحين.
- تم اعتماد الية اعادة تدوير العلب او التوجه نحو عبوات بلاستيكية قابلة لاعادة الاستخدام لتخفيض تكاليف العلب، تم اعتماد فحص الجودة وتقنية الفرز الالي للطماطم لتقليل الفاقد من الطماطم.
- تم تخفيض سعر الطن الواحد لانتاج مربى المشمش من ٣٠٠٠ دينار للكيلو الواحد الى ٢٠٠٠ دينار من خلال شراء المشمش بعقود مسبقة مع الفلاحين وشراء السكر بكميات كبيرة مباشرة من الموردين لتقليل كلفة الطن وتحويل الفواكه منخفضة الجودة (غير صالحة للتسويق المباشر) الى مربى.
- تم اعتماد اليه دمج المهام لبعض العمال بحيث يقوم العامل نفسه بالتشغيل والتنظيف، لتقليل العدد الكلي للعمال المباشرين زيادة ساعات التشغيل للخط نفسه بدلاً من العمل على ورديات متعددة بأجور إضافية وكذلك التدريب على تشغيل أكثر من آلة لزيادة الإنتاجية لكل عامل لتخفيض تكاليف الاجور.
- تم اعتماد الطرق الاتية لتخفيض كلف الطاقات والاستهلاك في الانتاج: اعادة جدولة الصيانة بحيث تتم بشكل وقائي وليس بعد الأعطال مع تدريب فريق الصيانة الداخلي على اصلاح الاعطال، استخدام زيوت وشحوم ذات جودة اعلى تسبب تلوث اقل وتدوم، إعادة تدوير مياه التبريد والغسل وإعادة استخدامها في تبريد الالات بعد تنقيتها من الشوائب والجدول رقم (٣) يبين المقارنة الكلية ونسب التخفيض للانتاج.

- تم احتساب نسب التخفيض بالاعتماد على المقارنة بين القيم الفعلية والمتوقعة الناتجة عن النموذج الذكي، باستخدام المعادلة التالية:

نسبة التخفيض = (القيمة قبل − القيمة بعد) ÷ القيمة قبل × ١٠٠٪

الجدول رقم (٤) مقارنة الكلف الكلية ونسب التخفيض للإنتاج

المنتج	الكلفة قبل (دينار/طن)	الكلفة بعد (دينار/طن)	نسبة التخفيض
معجون الطماطم	33,240,000	25,200,000	32%
مربى المشمش	25,716,500	20,500,000	26%

المصدر: اعداد الباحثان بالاعتماد على جدول رقم (١) و(٣)

٣-٥ تحليل مقدار الماء والطاقة المهدور قبل التحسين

يبين الجدول رقم (٥) مقدار الماء والطاقة المهدور لانتاج منتج (معجون الطماطم ومربى المشمش) الشهري لعام ٢٠٢٤.

جدول (٥) تقديرات الهدر في الموارد قبل التحسين

المنتج	الماء المهدور شهريًا (م³)	الكهرباء المهدورة شهريًا (ك.و.س)	وقود الغلايات المهدور /لتر	نسبة الهدر من الاستهلاك الكلي
معجون الطماطم	180	400	120	22%
مربى المشمش	120	320	90	19%

المصدر: اعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات الشركة لعام ٢٠٢٤ وحسب جدول (١) و (٣)

يلاحظ من الجدول السابق ان مقدار الماء والطاقة المهدور تم خفضه إلى أقل من ١٠٪ في جميع خطوط الإنتاج عبر مراقبة التشغيل الفعلي وإيقاف الأنظمة غير النشطة.

٣-٦ تقدير التلوث الناتج عن الاحتراق

جدول رقم (٦) تقدير التلوث الناتج عن الاحتراق

مصدر الانبعاث	الغاز المنبعث	قبل التحسين (كغم/شهر)	بعد التحسين (كغم/شهر)	نسبة الانخفاض
مولدات الكهرباء	CO_2	12,000	9,000	↓25%
الغلايات البخارية	$NOx + SO_2$	4,200	3,000	↓28%
الاحتراق العام للمخلفات	CO_2 + رماد	2,800	2,000	↓29%

المصدر: اعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات الشركة لعام ٢٠٢٤ وحسب جدول (١) و(٢) و(٣)

تم حساب الانبعاثات باستخدام معاملات IPCC Emission Factors، وربطها ببيانات استهلاك الوقود الفعلية للشركة.

٣-٧ مؤشرات الأداء البيئي بعد التحسين

جدول رقم (٧) الاداء البيئي بعد التحسين

البعد البيئي	المؤشر	قبل التحسين	بعد التحسين	نسبة التحسن
الطاقة	استهلاك الكهرباء (ك.و.س/طن)	3800	3200	↓15%
الماء	الاستهلاك الكلي (م³/طن)	7.7	6.08	↓29%
الانبعاثات	انبعاث CO_2 كغم/طن	800	665	↓17%
النفايات	بقايا المواد الأولية(%)	8%	5%	↓37.5%
الكفاءة الاقتصادية	الكلفة الكلية للإنتاج (دينار/طن)	—	↓٢٩%	—

المصدر: اعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات الجدول رقم (٤) و(٥) و(٦).

٤- الاستنتاجات والتوصيات

٤-١ الاستنتاجات

أ. فاعلية الذكاء الاصطناعي في إدارة التكاليف الخضراء: أثبتت نتائج الدراسة أن استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي (التعلم الآلي والتصنيف والتحليل التنبؤي) يوفر قدرة عالية على تحديد العوامل الأكثر تأثيراً في التكاليف البيئية والإنتاجية،

مما يساعد الإدارة في اتخاذ قرارات مبنية على بيانات دقيقة بدلًا من التقدير التقليدي، وقد دعمت النتائج الإحصائية (R^2 وMSE) دقة النموذج المستخدم وموثوقية نتائجه.

ب. تحقيق التكامل بين الكفاءة الاقتصادية والبيئية: أدى تطبيق نموذج التكاليف الخضراء الذكي إلى خفض متوسط الكلفة الكلية بنسبة ٢٩%، بالتزامن مع انخفاض استهلاك الطاقة بنسبة 15% والمياه بنسبة 29%، وهو ما يعكس تحقيق توازن واضح بين الربحية والاستدامة البيئية.

ج. الهدر المائي والطاقة يمثل محورًا رئيسيًا في الكلفة الخضراء: تبيّن أن ما نسبته 18–22% من استهلاك الماء والطاقة في خطوط الإنتاج يُصنف كهدر ناتج عن ضعف المراقبة التشغيلية، وتمكن النموذج الذكي من تقليله إلى أقل من 10% بعد تطبيق التحسينات.

د. الصيانة التنبؤية تعزز كفاءة المعدات وتقلل الانبعاثات: أدى الانتقال من أسلوب الصيانة الطارئة إلى الصيانة الوقائية التنبؤية إلى تقليل الأعطال بنسبة 20%، مما خفض الانبعاثات الغازية بنسبة 28% نتيجة تحسين الاحتراق وتقليل فترات التشغيل غير الضرورية.

هـ. الذكاء الاصطناعي يعزز الشفافية المحاسبية البيئية: وفر النظام الذكي مؤشرات كمية دقيقة عن التكاليف البيئية (الكهرباء، الوقود، الماء، النفايات)، ما أسهم في إدخال البعد البيئي ضمن نظام محاسبة التكاليف بشكل متكامل.

و. التكاليف الخضراء أداة فاعلة لتحقيق أهداف التنمية المستدامة: ساعد التطبيق العملي في تقليل البصمة الكربونية الإجمالية للمصنع بنسبة 17%، مما ينسجم مع الهدفين السابع والثالث عشر من أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة (طاقة نظيفة – العمل المناخي).

٤-٢ التوصيات

أ. تبنّي نظام رقمي متكامل لإدارة التكاليف الخضراء: نوصي بتطبيق نظم محاسبية ذكية تعتمد على الذكاء الاصطناعي والبيانات الضخمة (Big Data) لتتبع التكلفة البيئية والإنتاجية بشكل لحظي ودوري.

ب. توسيع تطبيق الذكاء الاصطناعي ليشمل التحليل البيئي الشامل: يمكن توظيف النماذج الذكية في تحليل دورة حياة المنتج (Life Cycle Assessment) لتقدير الأثر البيئي، بما يدعم قرارات الإنتاج النظيف.

ج. تحسين كفاءة استخدام الموارد المائية والطاقة: ضرورة الاستثمار في تقنيات إعادة التدوير ومعالجة المياه الصناعية واستخدام أنظمة استرجاع الحرارة من الغلايات لخفض الاستهلاك بنسبة إضافية تصل إلى ١٠%.

د. بناء قاعدة بيانات بيئية وطنية للقطاع الصناعي: لتسهيل المقارنة بين المصانع وتوحيد مؤشرات الأداء البيئي والمحاسبي في العراق، بما يخدم السياسة الصناعية المستدامة.

هـ. تفعيل الشراكة بين الأقسام الإنتاجية والمحاسبية والتقنية: لضمان دمج المفاهيم الخضراء ضمن عملية صنع القرار اليومي، وتعزيز ثقافة الاستدامة داخل بيئة العمل.

و. اعتماد سياسات تحفيزية حكومية للمؤسسات الخضراء: مثل الإعفاءات الضريبية أو منح الائتمان البيئي للمصانع التي تطبق نظم التكاليف الخضراء وتحقق مؤشرات بيئية إيجابية.

References

1. Brundtland Commission. (1987). *Our Common Future.* United Nations.
2. Burritt, R. L., Hahn, T., & Schaltegger, S. (2002). Towards a comprehensive framework for environmental management accounting—Links between business actors and environmental management accounting tools. Australian Accounting Review, 12(27), 39–50.
3. Chen, J., Li, Z., & Wang, Y. (2023). *Hybrid artificial intelligence models for sustainable cost prediction in green industries.* Journal of Cleaner Production, 412, 137945.

4. Chen, Y., Zhang, L., & Zhao, P. (2023). *Hybrid artificial intelligence for sustainable industrial systems: A review and future directions*. Journal of Cleaner Production, 412, 137256.
5. El-Kassar, A. N., & Singh, S. K. (2021). Green innovation and organizational performance: The influence of big data and artificial intelligence. *Technological Forecasting & Social Change, 163*, 120–140.
6. Epstein, M. J., & Buhovac, A. R. (2014). *Making sustainability work: Best practices in managing and measuring corporate social, environmental, and economic impacts*. Berrett-Koehler Publishers.
7. Huang, X., & Watson, L. (2021). Environmental cost accounting and sustainable decision-making. *Journal of Cleaner Production, 293*, 125951.
8. IEA. (2024). *Artificial Intelligence in Energy Systems: Pathways to Net Zero.* International Energy Agency.
9. Jasch, C. (2003). The use of Environmental Management Accounting (EMA) for identifying environmental costs. Journal of Cleaner Production, 11(6), 667–676.
10. Kambhampati, S. (2021). *Challenges of symbolic and sub-symbolic integration in hybrid AI*. AI Communications, 34(2), 145–160.
11. Kaur, R., & Singh, J. (2024). AI-driven green cost management for sustainable manufacturing. *Sustainability, 16*(4), 1842.
12. Li, H., Wang, Y., & Liu, X. (2023). *Machine learning-based green cost estimation in manufacturing industries*. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 37, 100888.
13. Marina Evrim Johnson , Antoine Harfouche , Abdullah Albizri , Samuel Fosso Wamba . (2022) Integrating human knowledge into artificial intelligence for complex and ill-structured problems: Informed artificial intelligence .International Journal of Information Management ,64,(6):102479 .
14. OECD. (2023). *ESG Reporting and Sustainable Finance Frameworks.* OECD Publishing.
15. Russell, S., & Norvig, P. (2022). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson.
16. Sassi, S., & Al Omari, R. (2021). Green target costing as a tool for achieving sustainable competitive advantage. International Journal of Energy Economics and Policy, 11(4), 493–500.
17. Schaltegger, S., & Burritt, R. (2017). *Contemporary environmental accounting: Issues, concepts, and practice*. Routledge.
18. UNESCO. (2023). *Education for Sustainable Development Goals: Learning Objectives.* United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
19. United Nations (2022). *The Sustainable Development Goals Report 2022*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs.
20. World Economic Forum. (2022). *The Global Risks Report 2022.* Geneva: WEF.
21. Zhang, L., & Zhao, Y. (2022). *Hybrid intelligence systems in industrial sustainability analytics*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 18(9), 6234–6246.
22. Zhang, L., Liu, C., & Zhao, Y. (2022). Hybrid AI models for cost prediction in green production systems. *Expert Systems with Applications, 191*, 116282.
23. Zhou, Q., Han, X., & Tang, C. (2022). Environmental sustainability and manufacturing innovation: A global perspective. *Journal of Industrial Ecology, 26*(5), 1372–1390.