



أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية: الدور المعدل لكايزن – دراسة استطلاعية



د. رباب عدنان شهاب العبادي^٢

intesar_saber@uomosul.edu.iq

rabab_adnan@uomosul.edu.iq

انتصار صابر نوري الجبوري^١

^١ أستاذ مساعد/ كلية الإدارة والاقتصاد/ جامعة الموصل/ العراق.

^٢ مدرس/ كلية الإدارة والاقتصاد/ جامعة الموصل/ العراق.

المخلص

فكرة البحث: تمثل الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي أحد الاتجاهات الحديثة التي تسهم في التنبؤ المبكر بالأعطال وتقليل التوقفات غير المخططة والهدر في المورد، بما ينعكس على خفض التكاليف التشغيلية وتحسين كفاءة الأداء. وفي هذا الإطار، تبرز كايزن بوصفها مدخلاً داعماً للتحسين المستمر وتقليل الهدر في الشوكات الصناعية.

الهدف: يهدف البحث إلى بيان أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، فضلاً عن اختبار الدور المعدل لكايزن في تعزيز هذا الأثر في الشوكات الصناعية.

المنهجية: اعتمد البحث المنهج الاستنباطي التحليلي من خلال مراجعة الأدبيات الحديثة في مجالات الصيانة الذكية ومحاسبة التكاليف كايزن، إلى جانب استخدام الأساليب الإحصائية المناسبة لتحليل البيانات المجمعة عن طريق الاستبانة واختبار فرضيات البحث، بالاعتماد على البرنامج الإحصائي SPSS Ver. 24.

النتائج: أظهرت نتائج البحث أن الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي تمثل تحولاً في التعامل مع تكاليف الصيانة، من معالجة تكاليف الوقت الضائع بعد حدوث الأعطال إلى التنبؤ المبكر بالأعطال والتكاليف المرتبطة بها. كما أثبتت نتائج اختبار الفرضية الأولى وجود أثر معنوي إيجابي للصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، إذ فسوت ما نسبته (٤٤٪) من التغيرات الحاصلة فيها، بما يؤكد دورها في تقليل التوقفات غير المخططة وتحسين كفاءة استخدام المورد التشغيلية.

الخلاصة: خلص البحث إلى أن الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي تسهم في خفض التكاليف التشغيلية وتحسين الأداء المالي والتشغيلي، وأن تبني الكايزن يعزز هذا الأثر من خلال دعم التحسين المستمر وتقليل الهدر. ويوصي البحث بالتوسع في تطبيق أنظمة الصيانة التنبؤية وتبني الكايزن في الشوكات الصناعية، ولاسيما في خطوط الإنتاج والمعدات التي يترتب على توقفها تكاليف تشغيلية مرتفعة.

معلومات الأرشفة

الاستلام: ٢٠٢٦/٨/١٢

المراجعة: ٢٠٢٦/٩/١٢

القبول: ٢٠٢٦/٩/٢٧

النشر الإلكتروني: ٢٠٢٧/١٠/١

المراسلة

رباب عدنان شهاب العبادي

الكلمات المفتاحية

الصيانة التنبؤية؛ الذكاء الاصطناعي؛ التكاليف التشغيلية؛ كايزن؛ الشوكات الصناعية.

الاقتباس

الجبوري، انتصار. ص. ن.،

والعبادي، رباب، ع. ش.

(٢٠٢٧). أثر الصيانة التنبؤية

المعززة بالذكاء الاصطناعي في

خفض التكاليف التشغيلية: الدور

المعدل لكايزن – دراسة

استطلاعية. مجلة دراسات إقليمية.

٢٠ (٧١). ٤٢٧-٤٦٦.

<https://doi.org/10.33899/rsj.v20i70.64741>



© Authors, 2026, Regional Studies Center, University of Mosul. This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



The Impact of AI-Enhanced Predictive Maintenance on Operational Cost Reduction: The Moderating Role of Kaizen—An Exploratory Study

Intesar S. Nori Aljubouri¹ Dr. Rabab A. Shihab Alabadi²

¹ Assist. Prof./ College of Administration and Economics/ University of Mosul/ Iraq.

intesar_saber@uomosul.edu.iq

² Lect./ College of Administration and Economics/ University of Mosul/ Iraq.

rabab_adnan@uomosul.edu.iq



Article Information

Received: 12/8/2026

Revised: 12/9/2026

Accepted: 27/9/2026

Published: 1/10/2027

Corresponding

Rabab A. Shihab
Alabadi

Keywords

Predictive Maintenance;
Artificial Intelligence;
Operational Costs;
Kaizen; Industrial
Companies.

Citation

Aljubouri, I. S. N., &
Alabadi, R. A. S. (2027).
The Impact of AI-
Enhanced Predictive
Maintenance on
Operational Cost
Reduction: The
Moderating Role of
Kaizen—An Exploratory
Study. *Regional Studies
Journal*. 20(70).427-466.
[https://doi.org/10.3389/
rsj.v20i70.64741](https://doi.org/10.3389/rsj.v20i70.64741)

Abstract

Research Idea: AI-enhanced predictive maintenance is a modern approach that facilitates the early prediction of faults, reduces unplanned downtime, and minimizes resource waste, thereby contributing to lower operational costs and greater performance efficiency. Within this context, Kaizen serves as a complementary approach to continuous improvement and waste reduction in industrial companies.

Objective: This research aims to examine the effect of AI-enhanced predictive maintenance on operational cost reduction and to test the moderating role of Kaizen in strengthening this effect within industrial companies.

Methodology: The research adopted a deductive-analytical approach based on a review of recent literature on smart maintenance and Kaizen costing. Appropriate statistical methods were also employed to analyze questionnaire data and test the research hypotheses using IBM SPSS Statistics, Version 24.

Results: The findings indicate that AI-enhanced predictive maintenance represents a shift in the management of maintenance costs, from addressing the costs associated with downtime after failures occur to the early prediction of faults and their associated costs. The results of testing the first hypothesis confirmed a statistically significant positive effect of AI-enhanced predictive maintenance on reducing operational costs, accounting for 44% of the variance, and highlighting its role in minimizing unplanned downtime and improving the efficiency of operational resource utilization.

Conclusion: The research concludes that AI-enhanced predictive maintenance contributes to reducing operational costs and improving financial and operational performance, while the adoption of Kaizen strengthens this effect by supporting continuous improvement and reducing waste. The research recommends expanding the application of predictive maintenance systems and adopting Kaizen practices in industrial companies, particularly in production lines and equipment for which downtime results in substantial operational costs.



© Authors, 2026, *Regional Studies Center, University of Mosul*. This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

شهد العالم في الآونة الأخيرة تطورًا متسارعًا في استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي مما انعكس على أساليب الإنتاج والصيانة، وفي ظل هذه التطورات أصبحت الصيانة مهمة لما يرتبط بها من تكاليف تشغيلية وتوقف في الإنتاج وهدر في الموارد، فبرزت الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي بوصفها أحد التقنيات الحديثة التي تعتمد على تحليل البيانات التشغيلية للتنبؤ المبكر بالأعطال، بما يساعد على تقليل التوقفات غير المخططة وخفض التكاليف المرتبطة بها. وعلى الرغم من ذلك فإن توظيف هذه التقنيات في البيئة الصناعية العراقية ما يزال يواجه صعوبات في التطبيق.

يمثل كايزن إطارًا للتحسين المستمر والحد من الهدر مما يعزز الاستفادة من المعلومات التي توفرها الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي لتحسين عمليات الصيانة، ومن ثم فإن تكامله مع الصيانة التنبؤية يوفر أساسًا للانتقال من معالجة الآثار المترتبة على الأعطال بعد حدوثها إلى التنبؤ المبكر بها والعمل على الحد من آثارها.

ومن المنظور المحاسبي لا تقتصر آثار أعطال المعدات على تكاليف إصلاحها وصيانتها، وإنما تمتد إلى تكاليف التوقفات غير المخططة، والوقت الضائع، والطاقة العاطلة، ومن هنا تبرز أهمية المعلومات التي توفرها الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في دعم قياس وتحليل هذه التكاليف والكشف المبكر عن مصادرها.

وفي ضوء ذلك، يأتي هذا البحث لبيان أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، واختبار الدور المعدّل لكايزن في هذه العلاقة من خلال دراسة استطلاعية في الشركات الصناعية العراقية.

أهداف البحث: يهدف البحث إلى تحقيق الآتي:

- بيان أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية في الشركات الصناعية.
- تحديد أثر تبني كايزن في خفض التكاليف التشغيلية من خلال تخفيض الهدر في الموارد.
- اختبار الدور المعدّل لكايزن في تحسين أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، بما يوضح مدى قوة هذا الأثر في ظل تبني الكايزن.

- تحديد مستوى التكامل بين الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي وكايزن ومدى إسهامه في خفض التكاليف التشغيلية في الشركات الصناعية.

أهمية البحث :تتمثل بـ:

- **الأهمية العلمية:** إثراء الأدبيات المحاسبية بدراسة تربط بين ثلاث متغيرات هي: الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي، وخفض التكاليف التشغيلية، والكايزن. وتتمثل الإضافة العلمية في اختبار الدور المعدل للكايزن، وتوضيح ما إذا كان هذا الدور يمكن أن يقوي أو يضعف أثر استخدام الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، فضلاً عن توفير نتائج تحليل الدراسة الاستطلاعية يمكن الاستفادة منها في دراسات مستقبلية واختبار العلاقات في بيئات صناعية مختلفة.

- **الأهمية العملية:** بيان دور الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالأعطال وتقليل التوقفات والهدر وتحسين استغلال الموارد والطاقة الإنتاجية بما يدعم خفض التكاليف التشغيلية في الشركات الصناعية، كما توصل البحث الى ان نجاح تطبيق الصيانة التنبؤية لا يعتمد على الجانب التقني وحده، بل يتطلب دعم فلسفة تنظيمية قائمة على الكايزن والتحسين المستمر الأمر الذي قد يسهم في زيادة التوجه نحو الاستثمار بتقنيات الصيانة التنبؤية بما يعزز كفاءة استخدام الموارد ويدعم القدرة التنافسية للشركات الصناعية.

مشكلة البحث: تواجه الشركات الصناعية ضغوطاً متزايدة نتيجة المنافسة الشديدة وارتفاع تكاليف الإنتاج، وتعد تكاليف الصيانة والتوقفات غير المخطط لها للآلات من أهم عناصر التكاليف التشغيلية التي تشكل نسبة كبيرة من أجمالي التكاليف، مما يجعل تخفيض هذه التكاليف خياراً استراتيجياً للبقاء والاستمرارية من خلال البحث عن تقنيات حديثة لتخفيضها. وتتمثل الفجوة البحثية في قلة الدراسات التي جمعت بين الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن، ولا سيما من منظور محاسبي، بما يبرز الحاجة إلى دراسة أثر الصيانة التنبؤية في خفض التكاليف التشغيلية، ومدى إسهام الكايزن في تعزيز هذا الأثر، وتحويل مخرجات التنبؤ بالأعطال من معلومات فنية إلى معلومات ذات قيمة في إدارة التكلفة واتخاذ القرارات. وبناءً على ذلك، تتمثل مشكلة البحث في التساؤل الرئيس الآتي:

فرضيات البحث: وفق تساؤلات مشكلة البحث والأهداف التي يسعى إلى تحقيقها، بُني البحث على أربع فرضيات رئيسية، كما يأتي:

الفرضية الأولى: (H1) يوجد أثر ذو دلالة معنوية للصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية.

الفرضية الثانية: (H2) يوجد أثر ذو دلالة معنوية لتبني كايزن في خفض التكاليف التشغيلية.

الفرضية الثالثة: (H3) يعزز الكايزن أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية.

الفرضية الرابعة: (H4): هناك فروق معنوية للعلاقة بين الصيانة التنبؤية والكايزن ودورها في تخفيض التكاليف التشغيلية.

منهجية البحث: اعتمد البحث المنهج الاستنباطي التحليلي في الجانب النظري، من خلال دراسة الأدبيات ذات الصلة بموضوع البحث.

أما الجانب العملي فكان دراسة استطلاعية باستخدام استمارة الاستبانة أداة رئيسية لجمع البيانات، بهدف قياس أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، واختبار الدور المعدّل كايزن في هذه العلاقة. وتم تحليل البيانات واختبار فرضيات البحث باستخدام الأساليب الإحصائية المناسبة باعتماد البرنامج الإحصائي (SPSS Ver. 24)

حدود البحث

- **الحدود الموضوعية:** يقتصر البحث على دراسة أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، مع التركيز على الدور المعدّل كايزن في هذه العلاقة.
- **الحدود المكانية:** تتمثل في الشركات الصناعية العراقية التي تمثل عينة البحث.
- **الحدود البشرية:** تشمل الفئات ذات الصلة بموضوع البحث في الشركات الصناعية، ولاسيما العاملين في المجالات المحاسبية والمالية والفنية والصيانة والإنتاج.

هيكلية البحث: وتتضمن جانبين:

أولاً: الجانب النظري

ثانياً: الجانب العملي



الدراسات السابقة

أولاً: الدراسات العربية

ت	الباحث والسنة	عنوان الدراسة	الهدف والمنهج ومجال التطبيق	أهم النتائج
١	شنن (2024)	دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في دعم الدور الحديث لإدارة التكلفة: دراسة ميدانية	الهدف: بيان دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في دعم إدارة التكلفة، ولاسيما التنبؤ بالتكاليف وقياسها وخفضها. المنهج والتطبيق: دراسة ميدانية في بيئة الأعمال المصرية.	أظهرت الدراسة أن تقنيات الذكاء الاصطناعي تساعد في التنبؤ بالتكاليف وقياسها بصورة أكثر دقة، وتسهم في خفضها، فضلاً عن توفير معلومات ملائمة لدعم القرارات التشغيلية والاستراتيجية.
٢	محمد (2025)	تحليل أثر تقنيات الذكاء الاصطناعي في تقليل التكاليف وزيادة كفاءة استخدام الموارد في مشاريع التطوير التكنولوجي في المملكة العربية السعودية	الهدف: تحديد أثر تقنيات الذكاء الاصطناعي في تقليل التكاليف وزيادة كفاءة استخدام الموارد. المنهج والتطبيق: المنهج الوصفي باستخدام الاستبانة لعينة من (٩٧) عاملاً في مشاريع التطوير التكنولوجي بالمملكة العربية السعودية.	توصلت إلى وجود أثر لتقنيات الذكاء الاصطناعي في تقليل التكاليف وزيادة كفاءة استخدام الموارد، إذ حقق محور تقليل التكاليف مستوى استجابة مرتفعاً.
٣	علي دقروم إلقاضي (2026)	تحليل التكلفة والعائد للصيانة التنبؤية: تقييم الآثار الاقتصادية والكفاءة التشغيلية	الهدف: تقييم التكلفة والعائد للصيانة التنبؤية وآثارها الاقتصادية والتشغيلية. المنهج والتطبيق: تحليل التكلفة والعائد بالاعتماد على الأدبيات ودراسات حالة ومقاييس كمية من قطاعات صناعية مختلفة.	بينت أن الوفورات طويلة الأجل ومكاسب الكفاءة الناتجة عن الصيانة التنبؤية تفوق في كثير من الحالات تكاليف الاستثمار الأولية، وتسهم في خفض تكاليف الصيانة وتحسين الإنتاجية وموثوقية الأصول.

ثانياً: الدراسات الأجنبية

ت	الباحث والسنة	عنوان الدراسة	الهدف والمنهج ومجال التطبيق	أهم النتائج
1	Busse, Metternich & Abele (2019)	تقييم فوائد الصيانة التنبؤية في الإنتاج: مدخل شامل لتحليل التكلفة والعائد	الهدف: تقييم فوائد الصيانة التنبؤية في الإنتاج من منظور التكلفة والعائد. المنهج والتطبيق: مدخل تحليلي شامل لتقييم التكلفة والعائد للصيانة التنبؤية في بيئات الإنتاج.	بينت أن الصيانة التنبؤية تحقق منافع اقتصادية من خلال تقليل التوقفات والخسائر الإنتاجية وتحسين جدولة أعمال الصيانة، بما يعزز الجدوى الاقتصادية لعمليات الصيانة.
2	Turnbull & Carroll (2021)	التكلفة والعائد من تطبيق استراتيجيات المراقبة المتقدمة والصيانة التنبؤية في مزارع الرياح البحرية	الهدف: قياس المنافع الاقتصادية لتطبيق استراتيجيات المراقبة المتقدمة والصيانة التنبؤية. المنهج والتطبيق: دراسة لتقييم التكلفة والعائد في مزارع الرياح البحرية.	أظهرت أن تطبيق المراقبة المتقدمة والصيانة التنبؤية يمكن أن يحقق وفورات في التكاليف التشغيلية المباشرة والإنتاج المفقود، وأن التدخل المبكر أكثر فاعلية من الصيانة التفاعلية التقليدية.
3	Weshah (2025)	رؤى حول خفض التكاليف التشغيلية من خلال الذكاء الاصطناعي: دراسة للشركات الأردنية	الهدف: تحليل كيفية إسهام الذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية وتحسين كفاءة استخدام الموارد. المنهج والتطبيق: مراجعة منهجية للأدبيات وتحليل موضوعي مع التركيز على الشركات الأردنية.	توصلت إلى أن الذكاء الاصطناعي يساهم في خفض التكاليف التشغيلية من خلال الأتمتة والتحليلات التنبؤية وتحسين استخدام الموارد، مع وجود تحديات ترتبط بكلفة التطبيق والتدريب.

وجه التشابه والاختلاف بين الدراسات السابقة والدراسة الحالية

تتفق الدراسات السابقة مع الدراسة الحالية في اهتمامها بتوظيف التقنيات الحديثة والذكاء الاصطناعي في تحسين عمليات الصيانة ورفع كفاءة استخدام الموارد وخفض التكاليف. فقد ركزت بعض الدراسات على دور الذكاء الاصطناعي في إدارة التكلفة وتقليل التكاليف التشغيلية وتحسين استخدام الموارد، في حين تناولت دراسات أخرى الصيانة التنبؤية من منظور التكلفة والعائد وما تحققه من تقليل للتوقفات والخسائر الإنتاجية وتكاليف الصيانة .

وتختلف الدراسة الحالية عن الدراسات السابقة في أنها لا تقتصر على دراسة الصيانة التنبؤية أو الذكاء الاصطناعي أو خفض التكاليف كل على حدة، وإنما تربط بين الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي وخفض التكاليف التشغيلية من منظور محاسبي، مع إدخال كايزن بوصفها متغيراً معدلاً لهذه العلاقة، فضلاً عن تطبيقها ميدانياً في البيئة الصناعية العراقية.

الفجوة البحثية

يتضح من استعراض الدراسات السابقة أنها تناولت جوانب متعددة من الصيانة التنبؤية والذكاء الاصطناعي، وأكدت دورهما في تقليل التوقفات وتحسين استخدام الموارد وخفض تكاليف الصيانة والتكاليف التشغيلية. فعلى سبيل المثال، أظهرت بعض الدراسات منافع مالية مباشرة للصيانة التنبؤية، في حين ركزت دراسات أخرى على دور الذكاء الاصطناعي والتحليلات التنبؤية في خفض التكاليف وتحسين كفاءة الموارد . إلا أن الدراسات التي تم استعراضها لم تجمع ضمن نموذج واحد بين الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي، وخفض التكاليف التشغيلية، وكايزن بوصفها متغيراً معدلاً، ولاسيما من منظور محاسبي وفي البيئة الصناعية العراقية. ومن هنا تتحدد الفجوة التي يسعى البحث الحالي إلى معالجتها.

-ما يميز الدراسة الحالية عن الدراسات السابقة

تتميز الدراسة الحالية بتناول الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي من منظور محاسبي يركز على انعكاساتها في خفض التكاليف التشغيلية، مع اختبار الدور المعدل لكايزن في تعزيز هذا الأثر. وبذلك تجمع الدراسة في نموذج واحد بين البعد التقني المتمثل في الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي، والبعد المحاسبي المتمثل في خفض التكاليف التشغيلية، والبعد الإداري المتمثل في كايزن، فضلاً عن اختبار هذه العلاقات ميدانياً في الشركات الصناعية العراقية.

أولاً: الجانب النظري

المحور الأول: الإطار النظري للصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي وأثرها المحاسبي

أولاً: مفهوم الصيانة التنبؤية

شهدت الصيانة انتقالاً جوهرياً؛ فالصيانة التقليدية تنقسم الى (Mobley, 2002, 45):

- صيانة علاجية (Corrective) تنتظر وقوع العطل لإصلاحه، إذ تعتمد على مبدأ "التفاعل مع الحدث" مما يتسبب في خسائر مالية فادحة ناتجة عن توقف خطوط الإنتاج، وتراكم العمالة العاطلة، وارتفاع تكاليف الإصلاح الطارئة
- صيانة وقائية (Preventive) تعتمد على جداول زمنية ثابتة بغض النظر عن حالة الآلة، ورغم اعتمادها على جداول زمنية مخططة، إلا أنه يعاني من عيبين:
الأول: احتمالية استبدال قطع غيار لا تزال صالحة للعمل (هدر مادي) .
الثاني: تعرض الآلة لأعطال مفاجئة خارج أوقات الصيانة المجدولة نتيجة عدم أخذ ظروف التشغيل الفعلية بعين الاعتبار .

تعد صيانة الآلات عنصراً مهماً وحاسماً في الحفاظ على استمرارية الإنتاج، وتقليل فترات التوقف المفاجئة، وتحسين كفاءة العمليات الصناعية وزيادة فاعليتها. ومع تطور أدوات الذكاء الاصطناعي أصبحت الحاجة ضرورية وملحة لإحداث تحول جذري في الصيانة التقليدية وأنواعها وتحولها من الصيانة الوقائية إلى الصيانة التنبؤية والذكاء، مما يعزز من موثوقية المعدات ويقلل التكاليف. وتعرف الصيانة التنبؤية بأنها محاولة لتحديد الوقت الأفضل لأداء أنشطة الصيانة الدورية التي تعتمد على السجلات التاريخية وتحليل البيانات والمعلومات عن الجوانب الفنية (المتعلقة بالأعطال وانماطها) للتنبؤ بالوقت الذي تقترب فيه المعدات بالفشل (طاهر وشريف، ٢٠١٤، ٢٤).

كما تعرف بأنها استراتيجية صيانة تعتمد على أدوات وتقنيات تحليل البيانات للكشف عن أي انحراف أو أداء غير متوقع في أداء المعدات والتنبؤ بالموعد المناسب لإجراء الصيانة. ويُتوقع أن يحقق هذا النهج وفورات في التكاليف مقارنة بالصيانة الوقائية الروتينية أو تلك القائمة على فترات زمنية محددة، نظراً لأن المهام لا تُنفَّذ إلا عند الحاجة الفعلية إليها. وقد حظي دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في أنظمة الصيانة التنبؤية بدراسة واسعة النطاق منذ أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، مع تسارع ملحوظ في مجالي البحث والتطبيق عقب ظهور تقنيات تحليل البيانات الضخمة وتطور تقنيات الاستشعار. وقد حظي دمج أدوات الذكاء الاصطناعي في أنظمة الصيانة التنبؤية باهتمام واسع في الدراسات العلمية منذ أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، إلا أن وتيرة البحث والتطبيق في هذا المجال شهدت تسارعاً

ملحوظاً مع ظهور تحليلات البيانات الضخمة والتطور الكبير في تقنيات أجهزة الاستشعار، الأمر الذي عزز دقة التنبؤ بالأعطال، وسرعة معالجتها، وأسهم في تحسين موثوقية المعدات، وتقليل التكاليف التشغيلية، ورفع كفاءة الأداء التشغيلي للوحدات الاقتصادية. (Anupama , 2022,656).

تُمثل الصيانة التنبؤية نقلة نوعية عن الأساليب التقليدية، فهي استراتيجية استباقية تركز على المراقبة المستمرة لحالة المعدات والاصول التشغيلية، مستعينة بتحليل البيانات اللحظية والتاريخية بهدف استكشاف الاعطال المحتملة قبل وقوعها وتحديد اللحظة المثلى للتدخل لأجراء الصيانة وبذلك يتم تجاوز فكرة الصيانة المجدولة أو التفاعلية، مما يقلل من الاعطال المفاجئة، ويحد من فترات التوقف غي المخطط لها، ويحسن من كفاءة استخدام الموارد المتاحة. (Surucu et al, 2023,). وعليه فالصيانة التنبؤية تقلل من التكاليف وتحسن من رضا الزبائن وتزيد الكفاءة والإنتاجية في بيئة تنافسية سريعة التغير.

أسهمت تطبيقات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء الصناعي في تطوير ممارسات الصيانة نحو الصيانة التنبؤية التي تركز على المتابعة الفورية لبيانات المعدات وتحليلها للتنبؤ بالأعطال المحتملة قبل حدوثها فعلياً (Carvalho et al., 2019,8).

تبرز الصيانة بوصفها نشاطاً مؤثراً في الأداء الاقتصادي للشركة الصناعية، إذ إن الأعطال والاختلالات التي تصيب الآلات والمعدات تؤدي إلى تعطيل العملية الإنتاجية وانخفاض الإنتاجية والكفاءة، ومن ثم فإن تحسين أداء الصيانة والسيطرة على تكاليفها يسهمان في دعم كفاءة النشاط وربحية الوحدة الاقتصادية ، وتوفر البيانات المتعلقة بالحالة التشغيلية للأصول والمعدات معلومات مهمة تساعد الإدارة في التعرف على التغيرات التي تطرأ على أداء المعدات وتوقيت احتياجات الصيانة، الأمر الذي يدعم القرارات المتعلقة بإدارة الأصول واستمرار تشغيلها بكفاءة، ويحد من الآثار الاقتصادية المترتبة على الأعطال والتوقفات الإنتاجية (تيطراوي وبرحومة، ٢٠١٩، ٤٣-٤٤)

ومن منظور إدارة التكلفة، يساعد التخطيط المسبق لأعمال الصيانة في دعم القرارات المتعلقة بتوقيت التدخل، إذ ينبغي المفاضلة بين تكلفة تنفيذ الصيانة وتكاليف إصلاح الأعطال وتوقف العملية الإنتاجية، بما يساعد الوحدة الاقتصادية على اختيار سياسة الصيانة الأكثر ملاءمة وترشيد تكاليفها ومن الناحية الاقتصادية، ينبغي ألا يقتصر تقييم سياسة الصيانة على تكلفة تنفيذ أعمال الصيانة، وإنما يمتد ليشمل تكاليف إصلاح الأعطال وتكاليف توقف العملية الإنتاجية؛ ومن ثم فإن المفاضلة بين سياسات الصيانة تساعد في اختيار البديل الذي يحقق ترشيحاً أفضل لتكاليف الصيانة ويحد من الخسائر المرتبطة بالتوقف. (بوقرة وقريد، ٢٠١١، ٢٠-٢١)

تعتمد الصيانة التنبؤية على مراقبة حالة المعدات وتحليل البيانات المستمدة من الحساسات والمؤشرات التشغيلية، والاستفادة من تقنيات التعلم الآلي في اكتشاف الأعطال والتنبؤ بحالة المعدات، بما يدعم اتخاذ إجراءات الصيانة قبل وقوع الفشل. (Zonta et al., 2020, 10–12)

ثانياً: المنافع المتحققة من الصيانة التنبؤية

تسهم الصيانة التنبؤية في تحقيق مجموعة من المنافع التشغيلية والاقتصادية من خلال الاعتماد على بيانات المعدات وتحليلها للتنبؤ بالأعطال ودعم قرارات الصيانة ويمكن عرض أهم هذه المنافع على النحو الآتي (Patel et al., 2023, 4):

١- تقليل فترات التوقف عن العمل:

- الحد من التوقيات غير المخططة: يساعد التنبؤ بالأعطال المحتملة على التخطيط لأعمال الصيانة قبل وقوع الفشل، بما يقلل من الاضطرابات والتوقيات المفاجئة في العمليات الإنتاجية .
- تحسين جاهزية الأصول: تسهم متابعة حالة المعدات والتدخل في الوقت المناسب في المحافظة على جاهزيتها واستمرارية تشغيلها عند الحاجة .

٢- توفير التكاليف:

- خفض تكاليف الصيانة: يسهم اكتشاف الأعطال المحتملة قبل تطورها في الحد من الحاجة إلى الإصلاحات الطارئة وما يرتبط بها من تكاليف .
- تحسين إدارة قطع الغيار: تساعد معرفة احتياجات الصيانة المتوقعة على تحسين التخطيط لقطع الغيار والحد من الاحتفاظ غير الضروري بالمخزون .

٣- زيادة الكفاءة

- تحسين توقيت أعمال الصيانة: تساعد الصيانة التنبؤية على تنفيذ أعمال الصيانة عند الحاجة إليها، بدلاً من إجرائها مبكراً أو الانتظار إلى حين وقوع العطل .
- تعزيز الأداء التشغيلي: يسهم تقليل الأعطال والتوقيات غير المخططة في تحسين موثوقية المعدات واستمرارية العمليات الإنتاجية .

وترى الباحثتان، في ضوء ما سبق، أن منافع الصيانة التنبؤية لا تقتصر على تجنب الأعطال، وإنما تمتد إلى دعم إدارة التكلفة من خلال تحسين توقيت أعمال الصيانة، والحد من الهدر المرتبط بالتوقيات والإصلاحات غير المخططة، وتحسين استغلال الموارد. كما يمكن أن تنعكس هذه المنافع على كفاءة المعدات من خلال تعزيز توافرها وأدائها، إذ تساعد المعلومات المسبقة عن حالتها والأعطال المحتملة في الاستعداد لأعمال الصيانة وتقليل الوقت المرتبط بالتوقف، بما يدعم زيادة الوقت الفعلي المتاح للإنتاج.

ثالثاً: أساليب الصيانة التنبؤية

- تستند الصيانة التنبؤية في عملها الى عدة أساليب تتمثل بـ: (Mobley, 2002, 99–113)
- ١- مراقبة الاهتزازات (Vibration Monitoring) نظراً لأن معظم المنشآت الصناعية تتكون من أنظمة كهروميكانيكية، تُعد مراقبة الاهتزازات الأداة الرئيسة في الصيانة التنبؤية. وخلال السنوات العشر الماضية، اعتمدت معظم برامج الصيانة التنبؤية على استخدام أجهزة جمع بيانات أحادية القناة تعتمد على المعالجات الدقيقة، إلى جانب عدد من البرمجيات، وذلك لجمع بيانات الاهتزازات، وإدارتها، وتحليل اتجاهاتها، وتقييم الطاقة الاهتزازية المتولدة عن هذه الأنظمة الكهروميكانيكية.
 - ٢- التصوير الحراري (Thermography) يُعد التصوير الحراري إحدى تقنيات الصيانة التنبؤية التي يمكن استخدامها لمراقبة الحالة التشغيلية للآلات والمعدات الصناعية، والهياكل، والأنظمة المختلفة، وليس المعدات الكهربائية فقط. وتعتمد هذه التقنية على استخدام أجهزة قياس صُممت لرصد انبعاثات الطاقة تحت الحمراء (أي درجة حرارة السطح)، وذلك لتحديد الحالة التشغيلية للمعدات والأنظمة. ومن خلالها يستطيع الفني ذو الخبرة تحديد المشكلات الأولية وتشخيصها بدقة داخل الوحدة الاقتصادية الصناعية، قبل أن تتطور إلى أعطال فعلية.
 - ٣- الزيوت والتزييت (Tribology) مصطلحاً عاماً يشير إلى دراسة تصميم وديناميكيات التشغيل لمنظومة المحمل (Bearing)، ومواد التزييت (Lubrication)، والدوار (Rotor)، وهيكل دعم الدوار في الآلات والمعدات. ويُعنى هذا المجال بدراسة التفاعلات التي تحدث بين الأسطح المتلامسة أثناء الحركة، وتأثيرها في أداء المعدات وموثوقيتها. وتُستخدم تقنيتان رئيسيتان في إطار الصيانة التنبؤية ضمن هذا المجال، هما تحليل زيوت التزييت وتحليل جسيمات التآكل.
 - ٤- الفحوصات البصرية (Visual Inspections) تُعد الفحوصات البصرية أول أسلوب استخدم في تطبيقات الصيانة التنبؤية. فمنذ البدايات الأولى للثورة الصناعية، اعتاد فنيو الصيانة إجراء جولات تقديعية يومية للمعدات والأنظمة الحيوية في خطوط الإنتاج والتصنيع، بهدف التعرف على حالات الفشل المحتملة أو المشكلات المرتبطة بالصيانة التي قد تؤثر في موثوقية المعدات، وجودة المنتج، وتكاليف الإنتاج. ولا تزال الفحوصات البصرية حتى اليوم تمثل أداة فعالة في مجال الصيانة التنبؤية، وينبغي أن تُدرج ضمن جميع برامج الإدارة المتكاملة لصيانة المنشآت الصناعية.
 - ٥- الموجات فوق الصوتية: (Ultrasonics) تُعد تقنية الموجات فوق الصوتية، شأنها شأن تحليل الاهتزازات، أحد الفروع المتخصصة لتحليل الضوضاء. ويتمثل الاختلاف الرئيس بين التقنيتين في نطاق التردد الذي تراقبه كل منهما؛ وتُعد هذه الترددات العالية مفيدة في بعض التطبيقات المحددة، مثل الكشف

عن التسربات التي غالبًا ما تُولد ضوضاء عالية التردد نتيجة تمدد أو انضغاط الهواء أو الغازات أو السوائل أثناء تدفقها عبر الفتحات، أو نتيجة وجود تسرب في أوعية الضغط أو التفريغ، كما تُستخدم هذه الترددات في قياس مستويات الضوضاء المحيطة في مختلف مناطق الوحدة الاقتصادية الصناعية.

٦- **تقنيات أخرى (Other techniques):** يمكن استخدام العديد من التقنيات الأخرى غير الإتلافية للكشف عن المشكلات الأولية في معدات أو أنظمة الوحدة الاقتصادية؛ ومع ذلك، فإن هذه التقنيات إما أن تكون مجالات تطبيقها محدودة أو تكون تكلفتها باهظة بما يحول دون اعتمادها كركيزة لبرنامج الصيانة التنبؤية. ولذلك، تُستخدم هذه التقنيات كوسيلة للتحقق من أنماط الفشل التي تم رصدها بواسطة تقنيات الصيانة التنبؤية.

رابعاً: تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في الصيانة التنبؤية

تشمل الصيانة التنبؤية على مجموعة من تقنيات الذكاء الاصطناعي والتي تسهم في تحليل بيانات المعدات والتنبؤ بأعطالها بما يدعم خفض التكاليف التشغيلية والكابزين، أهمها: بتصرف من الباحثين (Kuppaswami & Kumar, 2024, 14)

١- التعلم الآلي (Machine Learning – ML)

المبدأ والتقنيات: يعتمد على تحليل البيانات التاريخية والتشغيلية والتعرف على الأنماط للتنبؤ بالأعطال، باستخدام تقنيات التصنيف والانحدار والتجميع والكشف عن الحالات الشاذة. **مساهمته:** يساعد على الكشف المبكر عن الأعطال، بما يقلل تكاليف الإصلاح والتوقف والهدر في الموارد، ويدعم التحسين المستمر الذي يقوم عليه الكابزين.

٢- التعلم العميق (Deep Learning)

المبدأ والتقنيات: يعتمد على الشبكات العصبية متعددة الطبقات لتحليل البيانات المعقدة والتعرف على أنماط الأعطال، ومن أبرز تقنياته الشبكات الالتفافية والمتكررة والمشفرات التلقائية. **مساهمته:** يساهم في اكتشاف الأعطال والانحرافات التشغيلية مبكراً، مما يساعد على الحد من تكاليف الأعطال والتوقف، وتوفير معلومات تدعم تحسين العمليات وتقليل الهدر.

٣- معالجة البيانات في الوقت الفعلي (Real-Time Data Processing)

المبدأ والتقنيات: تعتمد على معالجة البيانات التشغيلية فور توليدها باستخدام الحوسبة الطرفية وتحليل البيانات المتدفقة، بما يتيح متابعة حالة المعدات بصورة مستمرة. **مساهمتها:** تساعد على سرعة اكتشاف المشكلات والتدخل في الوقت المناسب، بما يقلل تكاليف التوقف والإصلاح الطارئ، ويدعم المتابعة والتحسين المستمر للعمليات وفق الكابزين.

٤- التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics)

المبدأ والتقنيات: يعتمد على النماذج الإحصائية والتعلم الآلي للتنبؤ بالأعطال وتقدير العمر التشغيلي المتبقي للمعدات (RUL) وتقييم المخاطر.

مساهمتها: تدعم تحديد توقيت الصيانة وتوجيه الموارد نحو الاحتياجات الفعلية، بما يقلل أعمال الصيانة غير الضرورية والتوقيفات وتكاليفها، ويساعد على تحديد مواطن الهدر وتحسين العمليات باستمرار.

وترى الباحثتان أن أهمية هذه التقنيات لا تقتصر على التنبؤ بالأعطال، بل تمتد إلى توفير معلومات تساعد في تحديد مصادر التكلفة والهدر، وتحسين توقيت الصيانة واستخدام الموارد، بما يدعم خفض التكاليف التشغيلية وتعزيز التحسين المستمر في إطار كاي زن.

المحور الثاني: التكاليف التشغيلية وعلاقتها بالصيانة التنبؤية

أولاً: مفهوم التكاليف التشغيلية

تعد التكاليف التشغيلية من العناصر المهمة في إدارة أنشطة الوحدة الاقتصادية، لارتباطها باستخدام الموارد واستمرار العمليات الإنتاجية. وفي الإطار المحاسبي، ترتبط المصروفات بما يطرأ من انخفاض في المنافع الاقتصادية نتيجة ممارسة الشركات الصناعية لأنشطتها، وهو ما يوفر أساساً محاسبياً لفهم التكاليف المرتبطة بالنشاط والتشغيل، فهي كل ما يتعلق بتكلفة المنتجات والخدمات منذ التصميم إلى وصولها للأسواق (أي على طول دورة حياة المنتج). فهي تلك المصاريف الجارية التي تتكبدها الوحدة الاقتصادية كنتيجة لممارسة أنشطتها الاعتيادية، وتشمل على وجه التحديد أجور العمال وتكاليف المواد والإيجارات والخدمات العامة، مع استثناء للنفقات والاستثمارات أو أنها تلك المصروفات المترتبة على ممارسة النشاط الاعتيادي للوحدة الاقتصادية والتي تشمل على كلا من تكاليف التشغيل المباشرة وغير مباشرة، مع عدم اشتمالها على أية بنود تمويلية أو استثمارية.

كما تعد تكلفة التشغيل من المجالات المهمة التي تستهدفها نظم محاسبة التكاليف الحديثة، إذ تسهم هذه النظم في تحقيق الرقابة على عناصر التكاليف والعمل على تخفيضها، كما يساعد استبعاد تكاليف الأنشطة غير المضيئة للقيمة وتحسين تخصيص التكاليف على تعزيز الرقابة على التكلفة ودعم القرارات الإدارية، بما يسهم في خفض تكلفة التشغيل وتحسين الأداء الاقتصادي للشركات الصناعية. (عمر، ٢٠٢٣، ١٥٠-١٥١).

تمثل التكاليف التشغيلية مجموع المصاريف اليومية اللازمة لإدارة الأعمال (مواد غير مباشرة، عمالة، طاقة، صيانة). وفي البيئات الصناعية الحديثة، تتأثر هذه التكاليف بشكل مباشر بمدى استقرار العمليات. كما أنها تمثل كافة التكاليف اللازمة لتحويل المواد الخام إلى منتجات مبيعة أو تلك المتعلقة بتحقيق

الانجاز خلال فترة زمنية معينة، كما تتضمن اضافة الى المواد الخام الاجور المباشرة، والتكاليف الصناعية غير المباشرة، وارتفاع هذه التكاليف سيؤدي الى ارتفاع في تكاليف الإنتاج.

تزداد أهمية التكاليف التشغيلية في البيئة الصناعية نتيجة ارتباطها باستمرارية العملية الإنتاجية؛ إذ يترتب على تعطل المعدات تكلفة للوقت الضائع تشمل أجور العاملين المتوقفين وتعطل المعدات والمكانن، فضلاً عن خسارة الإنتاج الذي كان من الممكن تحقيقه لولا حدوث التوقف (بوقرة وقريد، ٢٠١١، ٦).

وفي ظل بيئة الأعمال الحديثة، يرتبط تحسين الأداء التشغيلي بإدارة طاقة الموارد وتحليل التكاليف غير المباشرة (التشغيلية من ضمنها)، إذ تساعد المعلومات المتعلقة باستخدام الموارد والطاقة المتاحة في دعم الرقابة على التكلفة وتحسين كفاءة استغلال الموارد (Blocher et al., 2022, 645–646).

تحظى هذه التكاليف باهتمام كبير في الوحدات الاقتصادية في ظل بيئة التصنيع الحديثة، حيث تسعى الوحدات الاقتصادية إلى ترشيد استخدام الموارد وتحقيق أعلى مستويات الكفاءة التشغيلية دون التأثير في جودة المنتجات أو رضا العملاء. كما ان إدارة التكاليف التشغيلية أصبحت محوراً رئيساً في الفكر الحديث لمحاسبة التكاليف والإدارة الاستراتيجية، من خلال التركيز على إزالة الأنشطة التي لا تضيف قيمة وتعظيم كفاءة استغلال الموارد.

وترى الباحثتان أن التكاليف التشغيلية، في إطار البحث الحالي، تتمثل في التكاليف المرتبطة باستخدام الموارد واستمرار العمليات الإنتاجية، فضلاً عما ينشأ عن أعطال المعدات والتوقفات غير المخططة والوقت الضائع والهدر في الموارد. ومن ثم فإن خفضها لا يقتصر على تقليل نفقات الصيانة، وإنما يمتد إلى تحسين كفاءة استخدام الموارد والحد من التوقفات والهدر والأنشطة التي لا تضيف قيمة.

ثانياً: أنواع التكاليف التشغيلية

تعد تكاليف الصيانة أحد أهم أنواع التكاليف التشغيلية التي يعزى إليها ارتفاع تكاليف الإنتاج والتي تحتاج لتقييم وإعادة نظر في الانفاق عليها، وتقسّم الى تكاليف مباشرة كشرء المواد، وقطع الغيار، وأجور العمال، وتكاليف غير مباشرة (عدم الصيانة) تظهر بسبب ضعف الصيانة وانعدام فعاليتها أو غيابها نهائياً. وتقسّم الى (مزريق، ٢٠٠٩، ٥٧):

١- **تكاليف الصيانة المباشرة:** تتمثل في مجموع التكاليف التي تتحملها الوحدة الاقتصادية نتيجة التدخل المباشر لتنفيذ أعمال الصيانة وإعادة المعدات والتجهيزات إلى حالتها التشغيلية، وتشمل:

• **أجور عمال الصيانة:** وتشمل أجور العاملين المتخصصين في تنفيذ أعمال الصيانة، والتي تتحدد في ضوء عدد العاملين وساعات العمل المنجزة ومتوسط أجر الساعة، مما يستدعي تحديد العدد الملائم من العاملين بما يحقق كفاءة تنفيذ أعمال الصيانة دون تحمل تكاليف غير ضرورية.

- **تكاليف المواد وقطع الغيار:** وتشمل المواد وقطع الغيار والزيوت والأجزاء المستخدمة أو المستبدلة أثناء تنفيذ أعمال الصيانة، وهو ما يتطلب ترشيدها واستخدامها وإدارة مخزونها بما يحد من ارتفاع تكاليف الصيانة.
 - **تكاليف شراء واستغلال الوسائل والمعدات:** وتشمل تكاليف معدات الفحص والمراقبة وأجهزة القياس والضبط وأدوات الفك والتركيب وغيرها من التجهيزات المستخدمة في تنفيذ أعمال الصيانة، فضلاً عن تكاليف تشغيلها وصيانتها واستهلاكها.
 - **تكاليف الخدمات الخارجية:** وتتمثل في التكاليف التي تتحملها الوحدة الاقتصادية عند الاستعانة بجهات خارجية متخصصة لإصلاح المعدات والتجهيزات التي تتطلب خبرات أو إمكانيات فنية لا تتوفر لديها.
 - **تكاليف إدارة أعمال الصيانة:** وتشمل أجور الموظفين والإداريين والمشرفين على خطط وبرامج الصيانة والعاملين في مخازن قطع الغيار وغيرها من التكاليف الإدارية المرتبطة بإدارة نشاط الصيانة.
 - **تكاليف أخرى:** وتشمل تكاليف الفحوص والمعاينات الدورية وعمليات إعادة التصميم والتطوير والأعمال الفنية الأخرى المرتبطة بالمحافظة على كفاءة المعدات والتجهيزات.
- يتأثر الوصول إلى المستوى الملائم لتكاليف الصيانة بمجموعة من العوامل، من أبرزها تصميم المعدات والتجهيزات، وتوقيت استبدالها، ومدى الالتزام بخطط الصيانة الموضوعة.
- ٢- **تكاليف عدم الصيانة (التكاليف غير المباشرة):** تنشأ نتيجة ضعف أعمال الصيانة أو انخفاض فاعليتها، وتظهر آثارها من خلال الأعطال وما يترتب عليها من تكاليف وخسائر، ومن أبرزها:
- **تكلفة الأضرار:** وتشمل الأضرار الداخلية والخارجية التي قد تتحملها الوحدة الاقتصادية نتيجة الأعطال الجسيمة في المعدات والتجهيزات.
 - **تكلفة التأثير السلبي في العلامة التجارية:** وتتمثل في الأضرار المعنوية التي قد تنتج عن تكرار الأعطال وانعكاساتها على جودة المنتجات وعلاقة الوحدة الاقتصادية بالزبائن والمتعاملين.
 - **تكلفة خسارة الإنتاج:** وتشمل الخسائر الناتجة عن توقف المعدات والتجهيزات والوقت غير المنتج، فضلاً عن أجور العاملين التي تستمر الوحدة الاقتصادية في تحملها خلال مدة التوقف.
 - **تكلفة شكوى الزبائن:** تنشأ نتيجة المشاكل المرتبطة بجودة الإنتاج وما يترتب عليها من فقدان ثقة الزبائن والإضرار بسمعة الوحدة الاقتصادية.
 - **تكاليف الأمن والوقاية من الحوادث والمخاطر:** وهي التكاليف المرتبطة بالحد من المخاطر والحوادث التي يمكن أن تنتج عن تكرار أعطال المعدات وتدهور بيئة العمل.
 - **تكلفة الفرصة الضائعة:** إن تكلفة الفرصة الضائعة هي تكلفة ناتجة عن ضياع فرصة استثمار الأموال التي انفق على العناصر (أجور، مواد، تكلفة غير مباشرة) (أحسن وهيبه، ٢٠١٤، ٢٣٤).

ثانيا: انواع التكاليف التي تسببها الصيانة التنبؤية

تصنف التكاليف المرتبطة بتطبيق الصيانة التنبؤية (Ali & Elgadi, 2026, 320) :

١-تكاليف الاستثمار الأولية: (Initial Investment Costs) استند تقديرها إلى دراسات الحالة والمعايير الصناعية، وتضمنت تكاليف شراء الحاسبات، وبرامج تحليل البيانات، ودمج الأنظمة، وتدريب العاملين.

٢-التكاليف التشغيلية: (Operational Costs) وشملت التكاليف المستمرة المرتبطة بصيانة النظام، وتحديثات البرمجيات، ورواتب العاملين المسؤولين عن تشغيله وإدارته، وبذلك تعد التكاليف التشغيلية جزء مهم من التكاليف المترتبة على تطبيق الصيانة التنبؤية بالإضافة الى انواع التكاليف التشغيلية المتحققة نتيجة الانتاج والعمليات الانتاجية.

ثالثاً: أبرز مجالات خفض التكاليف التشغيلية بالاعتماد على الذكاء الاصطناعي

يسهم استخدام الذكاء الاصطناعي والتحول الرقمي في خفض التكاليف التشغيلية من خلال الحد من الإجراءات الورقية، وتقليل تكاليف الصيانة بالاعتماد على أنظمة المراقبة الذكية، والحد من الأخطاء البشرية، إلى جانب تحسين إدارة المخزون وتقليل الفاقد ورفع كفاءة استهلاك الطاقة، وهذا من شأنه يساعد الشركات الصناعية على ترشيد مواردها وتحقيق وفورات في تكاليفها التشغيلية.

رابعاً: المنافع المتحققة من تطبيق الصيانة التنبؤية وأثرها على التكاليف التشغيلية

تتحقق من تطبيق الصيانة التنبؤية مجموعة من المنافع الكمية والنوعية التي تنعكس على الأداء والتكاليف التشغيلية، ويمكن توضيحها على النحو الآتي (Ali & Elgadi, 2026, 319–320) :

أولاً: المنافع الكمي: تتمثل أهمها في:

١. تقليل فترات التوقف غير المخطط لها .

٢. خفض تكاليف الصيانة .

٣. تحقيق وفورات في استهلاك الطاقة .

ويعتمد تقييم هذه المنافع على احتساب التكاليف التي يمكن تجنبها نتيجة الحد من الأعطال وتقليل فترات التوقف، ومقارنتها بتكاليف تطبيق وتشغيل نظام الصيانة التنبؤية.

ثانياً: المنافع النوعية: وتتمثل أهمها في:

١. تحسين مستويات السلامة المهنية .

٢. رفع الروح المعنوية للعاملين .

٣. إطالة العمر التشغيلي المتوقع للألات والمعدات.

المحور الثالث: التكامل مع كايزن للتحسين المستمر

أولاً: مفهوم الكايزن

يستند الكايزن على التحسين المتواصل والمستمر للعمليات عبر التعرف على مصادر الهدر والعمل على الحد منها أو القضاء عليها بصورة منهجية. ويعرف التحسين المستمر بأنه طريقة تطوير تدريجية مستمرة تطبق على المدخلات والعمليات والمخرجات لتبسط العمل وهي استراتيجية بعيدة عن استخدام الاساليب المعقدة ويتم ذلك طريق تقليل الخطوات غير الضرورية لتسهيل العمل والقضاء على كل ما يعيق الاداء بالشكل الذي يساعد في خفض التكاليف وزيادة الانتاج وحل المشكلات والقضاء على الفشل وتحول دون جعل هذه الخطوات اسوء وتؤثر على الانتاج، وذلك من خلال التنفيذ التدريجي للتحسينات البسيطة والمراقبة المستمرة (Nofemela & Winberg, 2020, 45).

كما يعزز هذا النهج التعلم من خلال التزام ومشاركة العاملين بالتحسين المستمر، مما يؤدي الى تطوير منتجات جديدة وتحسين العمليات وفتح أسواق جديدة (Al-Baik & Miller, 2016, 5389) ويدعم التحسين المستمر المرونة التشغيلية، ما يسمح بالتكيف مع المتغيرات السوقية بسرعة، (Alsakka et al., 2022, 890) ويساعد كذلك على تقليل التكاليف التشغيلية عبر إزالة أوجه الهدر وتحسين معنويات الموظفين بمشاركتهم في عمليات التحسين (Kumar et al., 2023, 3845).

ثانياً: أهمية تطبيق كايزن

ان تطبيق أداة كايزن في بيئة عمل ما يجلب العديد من التطورات التي تؤدي الى العديد من الفوائد للوحدة الاقتصادية والتي تتمثل بزيادة الابتكار والجودة وسلامة أعلى وتخفيض للتكاليف وتطوير خدمات العملاء سواء الداخليين أو الخارجيين وزيادة الربحية والقدرة على الاحتفاظ والموظفين وتطور ثقافة المنظمة بشكل عام ، ويمكن تلخيص أهمية تطبيق الكايزن بالاتي (الشهريلي وداد، ٢٠١٧، ٤٣-٤٥):

- ١- التخلص من الهدر في عمليات الوحدة الاقتصادية، بما يسهم في تحسين تكلفة العملية وجودتها.
 - ٢- تحسين الجانب الاجتماعي من خلال تغيير ثقافة العاملين في الوحدة الاقتصادية عن طريق التعليم.
 - ٣- المساعدة على إيجاد بيئة قيادية ترغب في التطوير وصنع التغيير.
- ان التحسن المالي الذي يحدث نتيجة لتطبيق الكايزن في جميع أنشطة الشركات الصناعية سوف يدعم المركز التنافسي في السوق من خلال مسارين:

- تبني فلسفة كايزن في دعم جهود تخفيض التكلفة من خلال التحسين المستمر للعمليات، والعمل على إزالة أوجه الهدر وتحسين استخدام الموارد، بما يعزز كفاءة الأداء ويمكن الشركات الصناعية من تحقيق أهدافها الاقتصادية والتنافسية (خان وباقادر، ٢٠٢٢، ٥٦)

- يسهم الحد من الأعطال والتوقفات وتحسين أداء أعمال الصيانة في تقليل الخسائر والتكاليف المرتبطة بتعطّل العملية الإنتاجية، الأمر الذي ينعكس إيجاباً على الأداء الاقتصادي وربحية الوحدة الإنتاجية، ويوفر أساساً أفضل لتوجيه الموارد نحو الأنشطة الإنتاجية والتحسينية (تيطراوي وبرحومة، ٢٠١٩، ١٠١٤).

ثالثاً: العلاقة بين الصيانة التنبؤية والكايزن

تسهم تقنيات الذكاء الاصطناعي والصيانة التنبؤية في دعم الكايزن من خلال تحويل عملية التحسين المستمر من الاستجابة للمشكلات بعد وقوعها إلى التعرف المبكر على الانحرافات والمشكلات المحتملة قبل تحولها إلى أعطال فعلية. وتتيح أجهزة الاستشعار وتقنيات إنترنت الأشياء جمع البيانات التشغيلية بصورة مستمرة وتحليلها في الزمن الحقيقي، الأمر الذي يساعد العاملين على مراقبة حالة المعدات واكتشاف مؤشرات التدهور واتخاذ الإجراءات التصحيحية في الوقت المناسب.

كما تتيح الصيانة التنبؤية والتحليلات التنبؤية الاستفادة من البيانات التاريخية والآنية للتنبؤ بالأعطال المحتملة وتحديد توقيت الصيانة بصورة أكثر دقة، وهو ما يدعم أحد المبادئ الأساسية لكايزن، والمتمثل في منع تكرار المشكلات ومعالجة أسبابها بصورة مستمرة بدل الاكتفاء بمعالجة آثارها. ومن ثم فإن الصيانة التنبؤية لا تمثل مجرد أسلوب فني لصيانة المعدات، وإنما يمكن أن تكون أداة داعمة للتحسين المستمر عندما تُدمج مع تحليل البيانات واتخاذ القرارات التشغيلية المبنية على الأدلة.

رابعاً: التكامل بين الصيانة التنبؤية وكايزن ودورها في تخفيض التكاليف التشغيلية

ويمكن أن يسهم التكامل بين ممارسات الكايزن والمعلومات التي توفرها أنظمة الصيانة في دعم تحسين العمليات وترشيد استخدام الموارد وخفض أوجه الهدر؛ إذ تركز الكايزن على إجراء تحسينات مستمرة في العمليات بما يدعم تخفيض التكاليف وتحسين الأداء وتحقيق مستويات أفضل من الإنجاز ويتم ذلك من خلال (خان وباقادر، ٢٠٢٢، ٦٠):

- **الصيانة التنبؤية:** ترصد الحالة التشغيلية وتوفر البيانات اللحظية والزمنية بدقة وتمنع الهدر المادي والزمني المفاجئ.

- **كما ان الكايزن** يستخدم التقارير الشفافة كقاعدة بيانات لتطبيق تحسينات مستمرة متدرجة تضمن استدامة انخفاض التكاليف التشغيلية ورفع المؤشرات الاستراتيجية مثل العائد على الأصول والتدفقات النقدية التشغيلية.

ويمثل التكامل بين الصيانة التنبؤية والكايزن أحد المداخل الحديثة التي يمكن أن تسهم في تحسين الكفاءة التشغيلية وخفض التكاليف وخصوصاً التكاليف التشغيلية في الشركات الصناعية، فالصيانة التنبؤية تعتمد على المراقبة المستمرة لحالة المعدات وتحليل البيانات والمؤشرات الفنية للتنبؤ بالأعطال قبل وقوعها،

الأمر الذي يساعد على تقليل الأعطال المفاجئة والتوقفات غير المخططة، وتحسين توقيت أعمال الصيانة، والحد من الاستخدام غير الكفوء للموارد إلا أن مدى انعكاس هذه المزايا على التكاليف التشغيلية يمكن أن يختلف باختلاف البيئة الإدارية والتنظيمية التي تطبق فيها الصيانة التنبؤية، وهنا تبرز أهمية الكايزن. ويعمل الكايزن بوصفه متغيراً معدّلاً على تعزيز العلاقة بين الصيانة التنبؤية وتخفيض التكاليف التشغيلية، من خلال توفير بيئة تنظيمية تشجع على التحسين المستمر، ومشاركة العاملين في تحديد المشكلات ومعالجتها، وتحليل أسباب الأعطال والهدر، وتطوير إجراءات التشغيل والصيانة بصورة مستمرة. فعندما تتوافر لدى الشركات الصناعية نتائج ومعلومات دقيقة ناتجة عن الصيانة التنبؤية، فإن تبنيها للكايزن يساعد على استثمار هذه المعلومات في إدخال تحسينات مستمرة على العمليات وإجراءات الصيانة واستخدام الموارد؛ فإذا كان مستوى تطبيق الكايزن مرتفع في الشركات الصناعية يمكن أن يقوّي الأثر الإيجابي للصيانة التنبؤية في تخفيض التكاليف التشغيلية؛ إذ لا تقتصر الشركات الصناعية على اكتشاف مؤشرات الأعطال والتدخل قبل حدوثها، بل تستفيد من المعلومات المتاحة في البحث المستمر عن مصادر الهدر، وتحسين أساليب العمل، وتقليل تكرار الأعطال، وتحسين استخدام قطع الغيار والطاقة والعمالة، بما يؤدي إلى تحقيق وفورات تشغيلية أكبر. أما في حالة انخفاض مستوى الكايزن، فقد لا يستفاد بصورة كاملة من المعلومات التي توفرها الصيانة التنبؤية، وبالتالي قد يكون أثرها في خفض التكاليف التشغيلية أقل قوة. وترى الباحثتان أن التكامل بين الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن يمثل مدخلاً يجمع بين المعلومات التنبؤية والتحسين المستمر، بما يحول نتائج الصيانة من مجرد معلومات عن حالة المعدات إلى أساس يمكن الاستفادة منه في تطوير العمليات وتخفيض وترشيد التكاليف التشغيلية بصورة مستمرة.

ثانياً: الجانب العملي

المحور الأول: منهجية وإجراءات البحث الميداني

أولاً. أسلوب وإجراءات البحث الميداني

في سياق البحث الميداني وتلبيةً لمتطلباته في هذا الجانب العملي للبحث فقد تم اعتماد المنهج الوصفي التحليلي، وقد تم اختيار هذا المنهج نظراً لملاءمته لأسلوب جمع البيانات القائم على الأسلوب الاستطلاعي وفق المسح الميداني باستخدام استمارة استبيان أعدت من قبل الباحثين لغرض جمع البيانات الأولية للبحث، التي تعد نقطة الانطلاق للإجراءات العملية والتحليلية، إذ وفق هذه البيانات تم استخدام عدد من الأساليب الرياضية والاحصائية كالوسط الحسابي والانحراف المعياري ومعامل الارتباط بيرسون (Pearson) ومعادلة الانحدار الخطي البسيط والمتعدد باعتماد البرنامج الاحصائي (SPSS Ver.24)، بما يسح بإجراء التحليل الوصفي والاستدلالي والوصول إلى النتائج التي يتم على أساسها تحقيق الأهداف العملية للبحث واختبار فرضياته.

ثانياً. مجتمع وعينة البحث

تمثل ميدان بالشركات الصناعية العراقية، وقد تم اختيار هذا الميدان نظراً لملاءمته لموضوع البحث الذي يناقش الدور المعَدّل للتحسين المستمر (الكايزن) لمستوى أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي على خفض التكاليف التشغيلية، وقد تمثل مجتمع البحث بمحاسبي الكلفة والمالية، والفنيين ومهندسي الصيانة ومهندسي الإنتاج، ولكون المجتمع المستهدف كان من النوع المفتوح، لذا لجأ الباحثين إلى اعتماد معادلة (Green, 1991) لغرض تحديد الحد الأدنى المطلوب لتحديد حجم العينة العشوائية للبحث كما يلي:

$$n = 50 + 8(p)$$

$$n = 50 + 8(2)$$

$$n = 50 + 16 = 66$$

حيث أن:

(p). يمثل عدد المتغيرات المستقلة.

(n). يمثل حجم العينة.

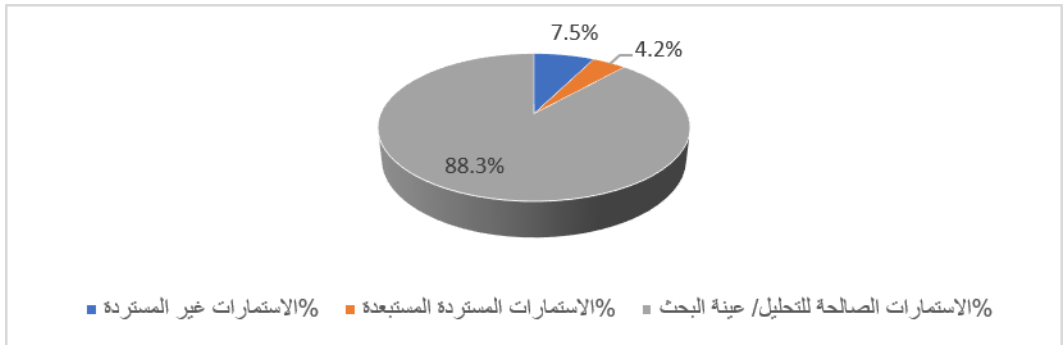
وبناءً على نتائج المعادلة فإن الحد الأدنى المطلوب لحجم العينة لتمثيل مجتمع البحث المستهدف هو (٦٦) مفردة وفق المعادلة السابقة، وللتأكد من تغطية هذا الحد الأدنى فقد لجأ الباحثين إلى توزيع (١٢٠) استمارة استبيان على افراد العينة بصورة ورقية وإلكترونية، تم استرجاع (١١١) استمارة، ولوجود نقص في ٥ استمارات تم استبعادها، ليتبقى (١٠٦) استمارة مستردة صالحة للتحليل وهي ما تمثل عينة البحث كونها تغطي الحد الأدنى المطلوب، ويظهر الجدول رقم (١) تفاصيل توزيع استمارة الاستبيان.

الجدول (١) تفاصيل توزيع استمارة الاستبيان

العدد	استمارة الاستبيان
٦٦	الحد الأدنى المطلوب للعينة
١٢٠	الاستمارات الموزعة
٩	الاستمارات غير المستردة
١١١	الاستمارات المستردة
٥	الاستمارات المستردة المستبعدة
١٠٦	الاستمارات الصالحة للتحليل/ عينة البحث

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

وبناءً على عدد الاستثمارات المستردة الصالحة للتحليل البالغة (١٠٦) التي مثلت حجم عينة البحث، فإن نسبة هذه العينة بلغت ٨٨,٣٪ من إجمالي الاستثمارات الموزعة، كما هو مبين في الشكل رقم (١).



الشكل (١): نسبة الاستثمارات عينة البحث

ثالثاً. قياس المتغيرات واختبار استمارة الاستبيان

تضمن البحث أربع متغيرات، الأول متغير مستقل (الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي) والثاني متغير تابع (خفض التكاليف التشغيلية) والثالث متغير المعدل (الكايزن)، والرابع متغير دخیل (ترابط المتغيرات) (ويقصد بالمتغير الدخیل هو اي عامل خارجي أو غير مقصود قد يؤثر على نتائج البحث دون ان يكون هو المتغير المستقل الذي يدرس)، وقد تم قياس هذه المتغيرات باستخدام استمارة استبيان اعدت من قبل الباحثين، إذ تضمنت هذه الاستمارة في هيكليتها خمس محاور رئيسة، اختص المحور الأول في تحديد الخصائص الديموغرافية لأفراد العينة من خلال أربع معلومات (أ. المؤهل العلمي، ب. التخصص العلمي، ج. المسمى الوظيفي، د. سنوات الخبرة)، في حين اختص المحور الثاني بقياس متغير الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي (المتغير المستقل) من خلال ٨ عبارات، واهتم المحور الثالث بقياس متغير خفض التكاليف التشغيلية (المتغير التابع) وفق ٨ عبارات أيضاً، وخصص المحور الرابع لقياس متغير الكايزن (المتغير المعدل) من خلال ٨ عبارات، واخيراً خصص المحور الخامس لقياس متغير ترابط المتغيرات (المتغير الدخیل) وفق ١٠ عبارات، الجدول رقم (٢) يظهر ترميز المتغيرات ضمن استمارة الاستبيان.

الجدول (٢): ترميز المتغيرات ضمن استمارة الاستبيان

المحاور	المتغيرات	الرمز	العدد	التسلسل
المحور ١: المعلومات الديموغرافية	أ. المؤهل العلمي	D1	5	
	ب. التخصص العلمي	D2	7	
	ج. المسمى الوظيفي	D3	8	
	د. سنوات الخبرة	D4	4	
المحور ٢: المستقل	الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي	X	8	X1-X8
المحور ٣: التابع	خفض التكاليف التشغيلية	Y	8	Y1-Y8
المحور ٤: المعزّل	الكايزن	M	8	M1-M8
المحور ٥: الدخيل	ترابط المتغيرات	Z	10	Z1-Z10

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

ولغرض تكميم إجابات افراد العينة فقد اعتمد الباحثين درجات مقياس لكرت الخماسي وبصورة تصاعدية باتجاه الاتفاق، إذ تعطى لإجابة (غير موافق بشدة) القيمة (١)، وإجابة (غير موافق)، القيمة (٢)، وإجابة (محايد) القيمة (٣)، وإجابة (موافق) القيمة (٤)، وإجابة (موافق بشدة) القيمة (٥). والجدول رقم (٣) يوضح اختبار صدق وثبات الاستمارة

كما تم اختبار صدق استمارة الاستبيان للتحقق من ان بنود استمارة الاستبيان تعبر بصدق عما يراد قياسه من متغيرات، وقد تم اجراء هذا الاختبار باستخدام معامل الصدق والذي تم حسابه من خلال إيجاد الجذر التربيعي لمعامل الفا كرونباخ.

الجدول (٣): اختبار صدق وثبات استمارة الاستبيان

المتغيرات	الرمز	معامل الصدق	معامل الفا كرونباخ	عدد العبارات
الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي	X	0.901	0.811	8
خفض التكاليف التشغيلية	Y	0.905	0.819	8
الكايزن	M	0.928	0.862	8
ترابط المتغيرات	Z	0.946	0.895	10

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

وبالاطلاع على الجدول رقم (٣) يلاحظ ارتفاع القيمة المحتسبة لمعامل الصدق للمتغيرات كافة، مما يدل على توافر الصدق الذاتي في بيانات هذه المتغيرات ومن ثم صلاحيتها لإجراءات التحليل، كما تم اختبار ثبات استمارة الاستبيان من خلال حساب معامل الفا كرونباخ المحدد بقيمة فرضية لا تقل عن ٠.٧٠، للتحقق من أنه إذا ما تم إعادة توزيع استمارة الاستبيان على ذات أفراد العينة في ظروف مماثلة، فإنه يتم الوصول إلى نتائج مشابهة، وبالاطلاع على الجدول رقم (٣) أيضاً يلاحظ ارتفاع قيمة معامل الصدق المحتسبة للمتغيرات وتجاوزها للقيمة الفرضية لهذا المعامل البالغة ٠.٧٠، مما يؤكد الثبات الذاتي لاستمارة الاستبيان، وهذه النتائج تعزز من اعتمادية البيانات لإغراء الاختبارات الإحصائية في هذا البحث.

رابعاً. وصف أفراد العينة

تم وصف افراد العينة من خلال الخصائص الديموغرافية الممثلة لهؤلاء الافراد ووفق أربع معلومات (أ. المؤهل العلمي، ب. التخصص العلمي، ج. المسمى الوظيفي، د. سنوات الخبرة)، وقد تم اجراء هذا الوصف باستخدام كل من التكرارات والنسب المئوية كما هو مبين في الجدول رقم (٤)، إذ أنه حسب المؤهل العلمي فإن أغلب أفراد العينة هم من فئة (بكالوريوس)، إذ بلغ عددهم ٦٨ من اجمالي حجم العينة البالغ (n=106)، ونسبة تبلغ (٦٤.٢٪)، يليهم فئة (ماجستير) بنسبة تبلغ (١٢.٣٪)، ومن ثم فئة (دكتوراه) بنسبة تبلغ (١١.٣٪)، يتبعها فئة (دبلوم عالي) بنسبة (٦.٦٪)، وأخيراً فئة (دبلوم) بنسبة (٥.٧٪)، وهذه النتائج تؤكد توافر الادراك المعرفي الأكاديمي لدى افراد العينة الذي ينعكس بإجابات موضوعية ملائمة على عبارات استمارة الاستبيان.

الجدول (٤): وصف افراد العينة بحسب المعلومات الديموغرافية

الترتيب	النسبة %	التكرار	الفئات	المعلومات
5	5.7	6	دبلوم	أ. المؤهل العلمي
1	64.2	68	بكالوريوس	
4	6.6	7	دبلوم عالي	
2	12.3	13	ماجستير	
3	11.3	12	دكتوراه	
2	36.8	39	محاسبة	ب. التخصص العلمي
1	41.5	44	إدارة أعمال	
5	3.8	4	إدارة صناعية	
6	0.9	1	علوم مالية	

7	0.9	1	نظم معلومات إدارية	ج. المسمى الوظيفي
4	6.6	7	هندسة	
3	9.4	10	أخرى	
2	24.5	26	أكاديمي	
3	19.8	21	محاسب مالي	
8	0.9	1	محاسب تكاليف	
5	3.8	4	مهندس صيانة	
7	1.9	2	موظف انتاج	
4	5.7	6	فني	
6	3.8	4	مدير مالي	
1	39.6	42	أخرى	د. سنوات الخبرة
2	25.5	27	اقل من ٥ سنوات	
3	10.4	11	من ٥-١٠ سنة	
4	3.8	4	من ١١-١٥ سنة	
1	60.4	64	أكثر من ١٥ سنة	

المصدر: الجدول من اعداد الباحثتين استناداً الى التحليل الاحصائي

أما من حيث التخصص العلمي فيلاحظ أن أغلب أفراد العينة هم ضمن فئة (إدارة أعمال) بنسبة تبلغ (٤١.٥٪)، يليهم فئة (محاسبة) بنسبة تبلغ (٣٦.٨٪)، في حين أن فئة (علوم مالية) وفئة (نظم معلومات إدارية) كانت الأدنى تمثيلاً بنسبة تبلغ (٠.٩٪)، وهذه النتائج تدعم إمكانات فهم عبارات الاستبانة بصورة أكثر استيعاباً مما يعزز مستوى موثوقية الإجابة على عبارات استمارة الاستبيان.

كما أنه حسب معلومة المسمى الوظيفي، يلاحظ أن أغلب افراد العينة يشغلون مناصب ضمن فئة (أخرى) بنسبة تبلغ (٣٩.٦٪)، يليهم فئة (أكاديمي) بنسبة تبلغ (٢٤.٥٪)، في حين أن فئة (محاسب تكاليف) كانت الأدنى تمثيلاً بنسبة تبلغ (٠.٩٪)، وهذه النتائج تعزز الشمولية في تمثيل العينة لعدة جهات نظر ضمن اهتمام موضوع البحث والذي يعزز من اعتمادية إجابات افراد العينة على عبارات استمارة الاستبيان. كما أنه حسب معلومة سنوات الخدمة يلاحظ أن فئة (أكثر من ١٥ سنة) كانت الأكثر تمثيلاً بين افراد العينة بنسبة تبلغ (٦٠.٤٪)، يليهم فئة (اقل من ٥ سنوات) بنسبة تبلغ (٢٥.٥٪)، ومن ثم فئة (من ٥-١٠ سنة) بنسبة تبلغ (١٠.٤٪)، وأخيراً فئة (من ١١-١٥ سنة) بنسبة (٣.٨٪)، وهذه النتائج تظهر وجود

معرفة متراكمة تعزز مستويات الإدراك وفهم عبارات الاستبيان مما يعزز من موضوعية الإجابة على تلك العبارات من قبل أفراد العينة.

المحور الثاني: التحليل الوصفي واختبار علاقات الارتباط

أولاً. وصف اتجاهات إجابات الأفراد نحو عبارات استمارة الاستبيان

تتضمن استمارة الاستبيان ٣٤ عبارة صنفت ضمن أربع متغيرات (الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي، خفض التكاليف التشغيلية، الكايزن، ترابط المتغيرات) وقد تم وصف اتجاهات إجابات أفراد العينة نحو هذه العبارات وفق عدد من الأساليب الإحصائية كما هو مبين في الجدول رقم (٥)،

الجدول (٥): وصف اتجاهات إجابات أفراد العينة نحو عبارات استمارة الاستبيان

م	ت	العبارات	الوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الأهمية النسبية	الترتيب
المستقل: الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي	X1	تعتمد الشركة على الحساسات وأجهزة الاستشعار الذكية لمتابعة المؤشرات الحيوية للآلات لحظة بلحظة.	4.07	0.772	81.3%	5
	X2	تستخدم خوارزميات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي للتنبؤ بالأعطال وتحليل بيانات الاهتزاز والحرارة قبل وقوع الفشل الفعلي.	3.95	0.695	79.1%	7
	X3	تساهم تقنيات الصيانة التنبؤية في التحول من نمط الصيانة التفاعلية الطارئة النمط الاستباقي (قبل حدوث العطل)	4.09	0.724	81.9%	3
	X4	تمتلك الشركة نظاماً رقمياً متكاملاً يتضمن كل البيانات المتعلقة بالآلات والأجهزة ويوفر تقارير فورية عن حالتها التشغيلية.	3.93	0.865	78.7%	8
	X5	يساهم التنبؤ الذكي بالأعطال في تقليص أزمات الإصلاح والتشخيص وتجنب التوقفات غير المخططة لخطوط الإنتاج.	4.05	0.761	80.9%	6
	X6	يؤدي تطبيق الصيانة التنبؤية المدعومة بالذكاء الاصطناعي إلى استقرار جودة الإنتاج وتقليل المنتجات المعيبة	4.12	0.672	82.5%	2
	X7	توفر الصيانة التنبؤية معلومات مبكرة تساعد على تجنب التوقفات غير المخططة	4.14	0.624	82.8%	1

4	81.5%	0.752	4.08	تسهل تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحديد الوقت الأمثل لتنفيذ أعمال الصيانة	X8	المتغير التابع: خفض التكاليف التشغيلية
6	80.9%	0.773	4.05	ساهمت الصيانة التنبؤية في تخفيض التكاليف التشغيلية الطارئة الناتجة عن الإصلاحات المفاجئة وأجور العمل الإضافي.	Y1	
7	79.8%	0.775	3.99	تساعد الصيانة التنبؤية قبل حدوث العطل في خفض أجور العمال المدفوعة لهم عند توقف الانتاج اثناء حدوث العطل	Y2	
2	83.0%	0.673	4.15	يؤدي رفع كفاءة الآلات بفضل الصيانة التنبؤية إلى ترشيد استهلاك الطاقة والموارد في البيئة الصناعية	Y3	
8	76.4%	0.871	3.82	يلغي التنبؤ الدقيق بالأعطال الحاجة للاحتفاظ بمخزون أمان ضخم ومكلف من قطع الغيار والادوات الاحتياطية	Y4	
1	84.3%	0.617	4.22	تساعد الصيانة التنبؤية في تحسين كفاءة استهلاك الموارد التشغيلية	Y5	
4	82.6%	0.718	4.13	ينعكس خفض الهدر التشغيلي والمالي بفضل الصيانة الذكية إيجاباً على زيادة ربحية الشركة ودعم مركزها التنافسي (استراتيجية القيادة في التكلفة).	Y6	
5	81.7%	0.745	4.08	تساعد الصيانة التنبؤية في تحقيق وفورات تشغيلية طويلة الأجل	Y7	
3	83.0%	0.659	4.15	تحقق الصيانة التنبؤية توازناً أفضل بين تكلفة الصيانة ومستوى الأداء.	Y8	المتغير المعجل: الكايزن
2	81.5%	0.700	4.08	تتبنى الشركة الكايزن كإطار إداري وعملي للتحسين التدريجي والمستمر للعمليات الصناعية	M1	
7	77.9%	0.780	3.90	يتم إشراك العاملين في المستويات التشغيلية كافة بتقديم مقترحات دورية للقضاء على الهدر بجميع أشكاله	M2	
6	79.4%	0.736	3.97	تشكل الشركة فرق عمل نوعية بشكل دوري لتحليل مشكلات التشغيل واختناقات خطوط الإنتاج.	M3	
8	77.5%	0.739	3.88	ساهم الكايزن في التخلص المستمر من الأنشطة والعمليات التي لا تضيف قيمة للمنتج النهائي	M4	



5	79.8%	0.775	3.99	تتبنى الشركة الكايزن كإطار إداري وعملي لتخفيض التكاليف التشغيلية	M5
1	84.0%	0.798	4.20	يتم تقييم أداء اعمال الصيانة بصورة دورية بهدف التحسين المستمر	M6
3	81.1%	0.630	4.06	يساعد تطبيق الكايزن على رفع كفاءة المعدات الإجمالية من خلال تحسين مؤشرات التوافر والأداء والجودة.	M7
4	81.1%	0.791	4.06	يسهم الكايزن في تحسين كفاءة عمليات الصيانة	M8
5	81.3%	0.621	4.07	توفر الصيانة التنبؤية الذكية قاعدة بيانات وتقارير شفافة ولحظية تدعم جهود الكايزن للتحسين المستمر.	Z1
1	82.3%	0.747	4.11	يسهم التكامل بين الصيانة التنبؤية والذكاء الاصطناعي في دعم جهود التحسين المستمر داخل المنظمة.	Z2
10	78.5%	0.672	3.92	يؤدي الربط بين الصيانة التنبؤية والكايزن إلى تحسين كفاءة استخدام الموارد غير المخططة	Z3
6	80.8%	0.703	4.04	يعزز دمج الكايزن مع برامج الصيانة التنبؤية في خفض التكاليف التشغيلية	Z4
7	80.8%	0.729	4.04	تساهم ممارسات الكايزن في رفع كفاءة ووعي الكوادر البشرية في التعامل مع برامج الصيانة الرقمية.	Z5
2	82.1%	0.780	4.10	يؤدي الاعتماد على الصيانة التنبؤية والكايزن إلى زيادة كفاءة أداء المعدات.	Z6
3	82.1%	0.768	4.10	يعزز التكامل بين الصيانة التنبؤية والكايزن قدرة الوحدة الاقتصادية على تحقيق ميزة تنافسية من خلال خفض التكاليف.	Z7
8	80.2%	0.787	4.01	يحقق التكامل بين الذكاء الاصطناعي والصيانة والكايزن قيمة اقتصادية من خلال تقليل الفاقد والهدر.	Z8
4	81.9%	0.655	4.09	يساعد الربط بين الصيانة التنبؤية والكايزن في تحسين التخطيط المسبق لأعمال الصيانة	Z9
9	79.4%	0.723	3.97	تساعد نتائج تحليل بيانات الصيانة التنبؤية في تحديد فرص التحسين المستمر للعمليات.	Z10

المتغير الدخيل: ترابط المتغيرات

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

إذ يلاحظ من الجدول (٥) وجود اتفاق مرتفع باتجاه العبارات الكافة (X1-X8) لمتغير الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي حسب إدراك افراد العينة في الشركات الصناعية ميدان البحث، إذ تجاوزت قيمة الوسط الحسابي المحتسب لهذه العبارات القيمة الفرضية للوسط الحسابي البالغة ٣، فضلاً عن ارتفاع قيمة الأهمية النسبية للعبارات كافة، كما يلاحظ أن العبارة رقم (X7) المتمثلة بـ(توفر الصيانة التنبؤية معلومات مبكرة تساعد على تجنب التوقفات غير المخططة) حققت أعلى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (4.14)، في حين أن العبارة رقم (X4) المتمثلة بـ(تمتلك الشركة نظاماً رقمياً متكاملًا يتضمن كل البيانات المتعلقة بالآلات والجهزة ويوفر تقارير فورية عن حالتها التشغيلية.) حققت أدنى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (3.93)، كما يلاحظ من الجدول (٥) أيضاً وجود اتفاق مرتفع باتجاه العبارات الكافة (Y1-Y8) لمتغير خفض التكاليف التشغيلية حسب إدراك افراد العينة في الشركات الصناعية ميدان البحث، إذ تجاوزت قيمة الوسط الحسابي المحتسب لهذه العبارات القيمة الفرضية للوسط الحسابي البالغة ٣، فضلاً عن ارتفاع قيمة الأهمية النسبية للعبارات كافة، كما يلاحظ أن العبارة رقم (Y5) المتمثلة بـ(تساعد الصيانة التنبؤية في تحسين كفاءة استهلاك الموارد التشغيلية) حققت أعلى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (4.22)، في حين أن العبارة رقم (Y4) المتمثلة بـ(يلغي التنبؤ الدقيق بالأعطال الحاجة للاحتفاظ بمخزون أمان ضخم ومكلف من قطع الغيار والادوات الاحتياطية) حققت أدنى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (3.82)، كذلك يلاحظ من الجدول وجود اتفاق مرتفع باتجاه العبارات الكافة (M1-M8) لمتغير الكايزن حسب إدراك افراد العينة في الشركات الصناعية ميدان البحث، إذ تجاوزت قيمة الوسط الحسابي المحتسب لهذه العبارات القيمة الفرضية للوسط الحسابي البالغة ٣، فضلاً عن ارتفاع قيمة الأهمية النسبية للعبارات كافة، كما يلاحظ أن العبارة رقم (M6) المتمثلة بـ(يتم تقييم أداء اعمال الصيانة بصورة دورية بهدف التحسين المستمر) حققت أعلى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (4.20)، في حين أن العبارة رقم (M4) المتمثلة بـ(ساهم الكايزن في التخلص المستمر من الأنشطة والعمليات التي لا تضيف قيمة للمنتج النهائي) حققت أدنى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (3.88)، ويلاحظ كذلك من الجدول رقم (5) وجود اتفاق مرتفع باتجاه العبارات الكافة (Z1-Z10) لمتغير ترابط المتغيرات حسب إدراك افراد العينة في الشركات الصناعية ميدان البحث، إذ تجاوزت قيمة الوسط الحسابي المحتسب لهذه العبارات القيمة الفرضية للوسط الحسابي البالغة ٣، فضلاً عن ارتفاع قيمة الأهمية النسبية للعبارات كافة، كما يلاحظ أن العبارة رقم (Z2) المتمثلة بـ(يسهم التكامل بين الصيانة التنبؤية والذكاء الاصطناعي في دعم جهود التحسين المستمر داخل المنظمة) حققت أعلى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (4.11)، في حين أن العبارة رقم (Z3) المتمثلة بـ(يؤدي الربط بين الصيانة التنبؤية والكايزن إلى تحسين كفاءة استخدام الموارد غير

المخططة) حققت أدنى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (3.92). كما تشير القيمة المنخفضة للانحراف المعياري لعبارات استمارة الاستبيان كافة إلى وجود اتساق وعدم تشتت في إجابات افراد العينة باتجاه هذه العبارات، مما يعزز اعتمادية نتائج الوسط الحسابي في تمثيل اجمالي العينة.

ثانياً. التحليل الوصفي للمتغيرات

يظهر الجدول رقم(٦) التحليل الوصفي لمتغيرات البحث كافة (الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي، خفض التكاليف التشغيلية، الكايزن، ترابط المتغيرات)، وقد تم اجراء هذا التحليل باستخدام عدد من الأساليب الإحصائية كالوسط الحسابي والانحراف المعياري وأدنى وأعلى قيمة.

الجدول (٦): وصف متغيرات البحث

المتغيرات	الرمز	الوسط الحسابي	الانحراف المعياري	أدنى قيمة	أعلى قيمة	الأهمية النسبية	معامل الاختلاف	Skewness
الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي	X	4.054	0.483	2.63	5.00	81.1%	11.9%	-0.282
خفض التكاليف التشغيلية	Y	4.074	0.487	2.63	5.00	81.5%	12.0%	-0.190
الكايزن	M	4.015	0.532	2.25	5.00	80.3%	13.2%	-0.382
ترابط المتغيرات	Z	4.050	0.522	2.50	5.00	81.0%	12.9%	-0.528

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

يلاحظ من الجدول رقم (٦) وجود اتفاق مرتفع حول توافر متغيرات الأربع، حسب إدراك افراد العينة في الشركات الصناعية ميدان البحث، إذ تجاوزت قيمة الوسط الحسابي المحتسب لهذه المتغيرات القيمة الفرضية للوسط الحسابي البالغة ٣، فضلاً عن ارتفاع قيمة الأهمية النسبية للعبارات كافة، كما يلاحظ أن متغير (خفض التكاليف التشغيلية) سجل أعلى مستوى اتفاق بوسط حسابي يبلغ (4.074)، وبأهمية نسبية تبلغ (81.5%)، يليه متغير (الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي) بوسط حسابي يبلغ (4.054)، وبأهمية نسبية تبلغ (81.1%)، من ثم متغير (ترابط المتغيرات) بوسط حسابي يبلغ (4.050)، وبأهمية نسبية تبلغ (81.0%)، أخيراً متغير (الكايزن) بوسط حسابي يبلغ (4.015)، وبأهمية نسبية تبلغ (80.3%)، كما تشير القيمة المنخفضة للانحراف المعياري وتدني قيمة معامل الاختلاف إلى أقل من القيمة الفرضية له البالغة ٥٠٪ للمتغيرات كافة إلى وجود اتساق وعدم تشتت في إجابات افراد العينة نحو متغيرات البحث، مما يعزز اعتمادية نتائج الوسط الحسابي في تمثيل اجمالي العينة.

ثالثاً. اختبار التوزيع الطبيعي للبيانات

تم التحقق من توافر شرط الاعتدالية في بيانات متغيرات البحث من خلال اختبار التوزيع الطبيعي لتلك البيانات وذلك عبر حساب معامل الالتواء (Skewness)، إذ تعد البيانات موزعة توزيع طبيعي إذا كانت قيمة معامل الالتواء المحتسبة ضمن المدى ما بين $1+$ إلى $1-$ ، وبالرجوع إلى الجدول (٦) يلاحظ أن قيم معامل الالتواء كانت ضمن المدى المحدد، مما يؤكد التوزيع الطبيعي للبيانات، ومن ثم يؤكد توافر شرط الاعتدالية في تلك البيانات، مما يسمح للباحثين من استخدام الأساليب الإحصائية المعلمية لأغراض اختبار فرضيات البحث.

رابعاً. اختبار العلاقة

باستخدام معامل الارتباط بيرسون (Pearson) تم تحديد معنوية وقوة واتجاه العلاقة بين المتغيرات كافة (الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي، خفض التكاليف التشغيلية، الكايزن، ترابط المتغيرات)، إذ تدل الاحتمالية المعنوية لمعامل الارتباط على وجود أو عدمية العلق، إذ تشير الاحتمالية المساوية أو أقل من ٥٪ إلى وجود العلاقة، وتتفني العلاقة بخلاف ذلك، كما تدل قيمة معامل الارتباط التي تكون ما بين $1 =$ إلى $1 -$ على قوة العلاقة فكلما اقتربت من الواحد الصحيح بغض النظر عن الإشارة دل ذلك على قوة العلاقة وكلما اقترب من الصفر دل ذلك على ضعف العلاقة، كما تدل الإشارة الموجبة لمعامل الارتباط إلى أن العلاقة إيجابية (طردية) في حين تدل الإشارة السالبة على أن العلاقة سلبية (عكسية) بين المتغيرات، ويظهر الجدول رقم (٧) اختبار العلاقة.

الجدول (٧): نتائج اختبار العلاقة بين المتغيرات

المتغيرات	البيان	Y	M	Z
X	Pearson	0.663**	0.697**	0.660**
	Sig.	0.000	0.000	0.000
Y	Pearson	1	0.711**	0.755**
	Sig.		0.000	0.000
M	Pearson		1	0.713**
	Sig.			0.000

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

(**). دالة احصائياً عند مستوى دلالة ١٪، (*). دالة احصائياً عند مستوى دلالة ٥٪

يلاحظ من الجدول (٧) ما يلي:

١. وجود علاقة ارتباط معنوية إيجابية (طردية) عند مستوى دلالة أقل من ٥٪ بين متغير الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي وكل من (خفض التكاليف التشغيلية، الكايزن، ترابط المتغيرات)، وهذا يدل

على أن ارتفاع مستوى الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي سوف يرافقه اتساع نطاق خفض التكاليف التشغيلية وزيادة مستوى تبني التحسين المستمر (الكايزن) وكذلك تعزيز ترابط المتغيرات، في الشركات الصناعية ميدان البحث حسب إدراك افراد العينة.

٢. وجود علاقة ارتباط معنوية إيجابية (طردية) عند مستوى دلالة أقل من ٥٪ بين متغير الكايزن وكل من خفض التكاليف التشغيلية، ترابط المتغيرات، وهذا يدل على أن ارتفاع مستوى تبني (الكايزن) سوف يرافقه اتساع نطاق خفض التكاليف التشغيلية وتعزيز ترابط المتغيرات، في الشركات الصناعية ميدان البحث حسب إدراك افراد العينة.

٣. وجود علاقة ارتباط معنوية إيجابية (طردية) عند مستوى دلالة أقل من ٥٪ بين متغير خفض التكاليف التشغيلية وترابط المتغيرات، وهذا يدل على أن اتساع نطاق خفض التكاليف التشغيلية سوف يرافقه تعزيز ترابط المتغيرات، في الشركات الصناعية ميدان البحث حسب إدراك افراد العينة.

المحور الثالث: اختبار الفرضيات

تضمن البحث أربع فرضيات رئيسية

أولاً: اختبار الفرضية الأولى (H1): هناك أثر ذو دلالة معنوية للصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي على تخفيض التكاليف التشغيلية

لاختبار هذه الفرضية تم اعداد معادلة انحدار خطي بسيط لتقدير قيمة خفض التكاليف التشغيلية من خلال متغير الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي، وذلك لتحديد مدى أثر الأخير على خفض التكاليف التشغيلية، ويظهر الجدول (٨) نتائج الاثر .

الجدول (٨): أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي على خفض التكاليف التشغيلية

التفسيري	المعتمد	المعامل الثابت (β_0)	معامل الانحدار (β)	T (Sig.)	F (Sig.)	R ²
X	Y	1.366	0.668	9.031 (0.000)	81.560 (0.000)	0.440

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

يلاحظ من الجدول رقم (٨) ثبات صحة نموذج معادلة الانحدار بدلالة قيمة (F) البالغة (81.560) عند مستوى دلالة معنوية أقل من ٥٪، مما يعني إمكانية تقدير قيمة خفض التكاليف التشغيلية من خلال متغير الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي، كما تشير قيمة (T) البالغة (9.031) عند مستوى دلالة معنوية أقل من ٥٪ إلى ثبات وجود الاثر المعنوي، في حين تشير قيمة معامل الانحدار بيتا (β) الموجبة والبالغة (0.668) إلى الاثر الإيجابي، بمعنى أن الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي يؤثر ايجاباً على خفض التكاليف التشغيلية، وذلك عبر توسيع نطاق ومجالات خفض هذه التكاليف في

الشركات ميدان البحث حسب إدراك افراد العينة، كما تدل قيمة معامل التحديد (R^2) البالغة (0.440) على أن الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي تفسر ما نسبته (٤٤٪) من التغيرات الحاصلة في متغير خفض التكاليف التشغيلية، وأن النسبة المتبقية تعود إلى عوامل أخرى غير ظاهرة في النموذج الحالي، عليه تقبل الفرضية الأولى للبحث.

ثانياً: اختبار الفرضية الثانية (H2): هناك أثر ذو دلالة معنوية لتبني الكايزن على تخفيض التكاليف التشغيلية. لاختبار هذه الفرضية تم اعداد معادلة انحدار خطي بسيط لتقدير قيمة خفض التكاليف التشغيلية من خلال متغير الكايزن، وذلك لتحديد مدى أثر الأخير على خفض التكاليف التشغيلية، ويظهر الجدول رقم (٩) نتائج الاثر.

الجدول (٩): أثر الكايزن على خفض التكاليف التشغيلية

التفسيري	المعتمد	المعامل الثابت (β_0)	معامل الانحدار (β)	T (Sig.)	F (Sig.)	R^2
M	Y	1.459	0.651	10.322 (0.000)	106.546 (0.000)	0.506

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

يلاحظ من الجدول رقم (٩) ثبات صحة نموذج معادلة الانحدار بدلالة قيمة (F) البالغة (106.546) عند مستوى دلالة معنوية أقل من ٥٪، مما يعني إمكانية تقدير قيمة خفض التكاليف التشغيلية من خلال متغير الكايزن، كما تشير قيمة (T) البالغة (10.322) عند مستوى دلالة معنوية أقل من ٥٪ إلى ثبات وجود الاثر المعنوي، في حين تشير قيمة معامل الانحدار بيتا (β) الموجبة والبالغة (0.651) إلى الاثر ايجابي، بمعنى أن (الكايزن) تؤثر ايجاباً على خفض التكاليف التشغيلية، وذلك عبر إيجاد مجالات مختلفة تسهم في زيادة مستوى خفض هذه التكاليف في الشركات ميدان البحث حسب إدراك افراد العينة، كما تدل قيمة معامل التحديد (R^2) البالغة (0.506) على أن الكايزن تفسر ما نسبته (٥٠.٦٪) من التغيرات الحاصلة في متغير خفض التكاليف التشغيلية، وأن النسبة المتبقية تعود إلى عوامل أخرى غير ظاهرة في النموذج الحالي، عليه تقبل الفرضية الثانية للبحث.

ثالثاً: اختبار الفرضية الثالثة (H3): يعمل تبني الكايزن على تعديل مستوى اثر للصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي على تخفيض التكاليف التشغيلية

لاختبار هذه الفرضية تم اعداد معادلة انحدار خطي متعدد لتقدير قيمة خفض التكاليف التشغيلية من خلال متغير الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن كمتغير معدل وذلك لتحديد الدور المعدل لمتغير الكايزن لمستوى أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي على خفض التكاليف التشغيلية، ويظهر الجدول (١٠) نتائج الاثر.

الجدول (١٠): تعديل مستوى أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي على خفض التكاليف

التشغيلية في ظل تبني الكايزن

(Sig.)	F	Adjusted R ²	R ²	المعتمد	التفسيري
0.000	84.031	0.703	0.712		
(Sig.)	T	معامل الانحدار (β)	المعامل الثابت (β0)		
0.203	1.280	0.124	3.090	Y	X
0.195	1.305	0.136			M
0.000	7.326	0.122			X M

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

يلاحظ من الجدول رقم (١٠) ثبات صحة نموذج معادلة الانحدار بدلالة قيمة (F) البالغة (84.031) عند مستوى دلالة معنوية أقل من ٥٪، مما يعني إمكانية تقدير قيمة خفض التكاليف التشغيلية من خلال متغير الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن كمتغير معدل كما تشير قيمة (T) البالغة (7.326) لمتغير الكايزن كمتغير معدل (X_M) عند مستوى دلالة معنوية أقل من ٥٪ إلى ثبات معنوية الدور المعدل لمتغير الكايزن في تعديل مستوى اثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي على خفض التكاليف التشغيلية، في حين تشير قيمة معامل الانحدار بيتا (β) الموجبة والبالغة (0.122) لمتغير الكايزن كمتغير معدل (X_M) إلى أن الدور المعدل الايجابي على مستوى الاثر، بمعنى أن الكايزن تسهم في تعزيز مستوى الاثر الإيجابي للصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي على خفض التكاليف التشغيلية، ففي بيئة تتبنى (الكايزن) يكون مستوى أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي أكثر واقوى إيجابية على خفض التكاليف التشغيلية في الشركات ميدان البحث حسب إدراك افراد العينة، كما تدل قيمة معامل التحديد المعدل (Adjusted R²) البالغة (0.703) على أن الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن كمتغير معدل تفسر ما نسبته (٧٠.٣٪) من التغيرات الحاصلة في متغير خفض التكاليف التشغيلية، وأن النسبة المتبقية تعود إلى عوامل أخرى غير ظاهرة في النموذج الحالي، عليه تقبل رابعاً: اختبار الفرضية الرابعة (H4): هناك فروق معنوية للعلاقة بين الصيانة التنبؤية والكايزن ودورها في تخفيض التكاليف التشغيلية. لاختبار هذه الفرضية تم استخدام اختبار (One Sample T-Test)، لتحديد الفروق المعنوية لمتوسطات للعلاقة بين الصيانة التنبؤية والكايزن ودورها في تخفيض التكاليف التشغيلية عن الوسط الفرضي، ويظهر الجدول رقم (١١) نتائج الاختبار.

الجدول (١١): نتائج الفروق المعنوية للعلاقة بين الصيانة التنبؤية والكايزن ودورها في تخفيض

التكاليف التشغيلية

المتغيرات	الرمز	الوسط الحسابي الفرضي = ٣		
		Sig. (2-tailed)	df	t
ترابط المتغيرات	Z	0.000	105	20.710

المصدر: الجدول من اعداد الباحثين استناداً الى التحليل الاحصائي

يلاحظ من الجدول رقم (١١) أن قيمة (t) البالغة (20.710) كانت ذات دلالة معنوية أقل من ٥٪ مما يدل على وجود فروق معنوية للمتوسطات عن الوسط الحسابي الفرضي، وهذا يعني أن العلاقة بين الصيانة التنبؤية و (الكايزن) تعمل على تعزيز مستوى تخفيض التكاليف التشغيلية في الشركات الصناعية ميدان البحث حسب إدراك افراد العينة، عليه تقبل الفرضية الرابعة للبحث.

ويعزز ذلك أن (٩٤.٣٪) من أفراد العينة سجلوا وسطاً حسابياً على محور ترابط المتغيرات أعلى من الوسط الحسابي الفرضي البالغ (٣)، وأن (٨٣.٢٪) من استجاباتهم على عبارات هذا المحور جاءت في خانتي (موافق) و (موافق بشدة) مقابل (٢.٧٪) فقط في خانتي عدم الموافقة، وبأهمية نسبية بلغت (٨١.٠٪)، بما يؤكد أن الفروق المعنوية جاءت في الاتجاه الموجب الداعم للفرضية الرابعة، وبذلك فإن للكايزن اثر مباشر على كل من الصيانة التنبؤية والتكاليف التشغيلية كونه متغير معدل بين المتغيرات والاثار المباشر هو احد خواص المتغير معدل .

النتائج:

. أكدت النتائج أن الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي غيرت من طريقة احتساب التكاليف التشغيلية لدى الشركات الصناعية حيث تغير مفهوم ادارات تلك الشركات من تحمل "تكاليف الوقت الضائع والإصلاحات الطارئة" بعد وقوع المشكلة، إلى التنبؤ المبكر وضبط الموازنات التشغيلية وتوقع مبالغ أقل لتكاليف التشغيل قبل أن تتفاقم الأعطال.

٢. وضح البحث أن الصيانة التنبؤية لوحدها لا تكفي للحصول على أقصى تخفيض في التكاليف التشغيلية، بل إن تبني بيئة تنظيمية قائمة على "الكايزن" (التحسين المستمر ومشاركة العاملين) يعمل كـ "مُعزّز" و"معدل" للنتائج.

٣. البيانات الناتجة عن تقنيات الذكاء الاصطناعي ومنها الصيانة التنبؤية تحتاج إلى كوادرات تحسين استغلال هذه المعلومات للقضاء على مختلف أشكال الهدر.

الاستنتاجات

أولاً: استنتاجات الجانب النظري

١. تمثل الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي تحولاً من معالجة الأعطال بعد وقوعها إلى التنبؤ بها مسبقاً، بما يسهم في تقليل التوقفات غير المخططة وتحسين تخطيط أعمال الصيانة واستغلال الموارد المتاحة .
٢. لا تقتصر تكلفة الأعطال على تكاليف الإصلاح واستبدال الأجزاء التالفة، بل تمتد إلى تكاليف توقف الإنتاج وعدم الاستفادة من الموارد وتأخير إنجاز وتسليم المنتجات والتكاليف الصناعية غير المباشرة، مما يجعل الصيانة التنبؤية مدخلاً مهماً لخفض التكاليف التشغيلية .
٣. تعزز تقنيات الذكاء الاصطناعي فاعلية الصيانة التنبؤية من خلال تحليل بيانات الآلات والمعدات والكشف المبكر عن مؤشرات الأعطال، وتحويل البيانات إلى معلومات تدعم القرارات التشغيلية والتكفوية .
٤. يوفر الكايزن إطاراً للتحسين المستمر يركز على تحديد مصادر الهدر والأنشطة غير المضيئة للقيمة والعمل على تخفيضها، بما يدعم تحسين عمليات الصيانة وخفض التكاليف التشغيلية بصورة مستمرة .
٥. يتضح نظرياً وجود تكامل بين الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن، إذ يمكن أن يسهم تبني كايزن في تعزيز أثر الصيانة التنبؤية في خفض التكاليف التشغيلية، وهو ما يوفر الأساس النظري لدورها كمتغير معدّل في هذه العلاقة .

ثانياً: استنتاجات الجانب العملي

١. أظهرت نتائج التحليل الوصفي ارتفاع مستوى إدراك أفراد العينة لمتغيرات البحث، إذ تجاوزت أوساطها الحسابية الوسط الفرضي، وبلغت أهميتها النسبية أكثر من (٨٠٪)، مما يعكس إدراك أفراد العينة لأهمية الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن وخفض التكاليف التشغيلية كما يتضح من نتائج الجدول (6) .
٢. أثبتت نتائج اختبار الفرضية الأولى وجود أثر معنوي إيجابي للصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، إذ فسرت ما نسبته (44%) من التغيرات الحاصلة فيها، مما يؤكد دورها في توفير المعلومات المبكرة عن الأعطال وتقليل التوقفات غير المخططة وتحسين استخدام الموارد التشغيلية (كما يتضح من نتائج الجدول رقم (٨) .

٣. أظهرت نتائج اختبار الفرضية الثانية وجود أثر معنوي إيجابي لكايزن في خفض التكاليف التشغيلية، إذ فسرت ما نسبته (50.6%) من التغيرات الحاصلة فيها، مما يؤكد أهمية التحسين المستمر في تقليل الهدر وتحسين العمليات وترشيد استخدام الموارد (كما يتضح من نتائج الجدول رقم (٩) .

٤. أثبتت نتائج اختبار الفرضية الثالثة وجود دور معدّل معنوي وإيجابي لكايزن في أثر الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية، إذ بلغت القدرة التفسيرية للنموذج التفاعلي (70.3%)، مما يدل على أن تبني كايزن يعزز أثر الصيانة التنبؤية في خفض التكاليف التشغيلية (الجدول رقم (10)

٥. أظهرت نتائج اختبار الفرضية الرابعة وجود فروق معنوية في ترابط متغيرات البحث، إذ بلغت قيمة (20.710) (t) وبمستوى معنوية (0.000)، مما يدعم وجود علاقة تكاملية بين الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن وخفض التكاليف التشغيلية (كما يتضح من نتائج الجدول رقم (١١) وبذلك فإن للكايزن اثر مباشر على كل من الصيانة التنبؤية والتكاليف التشغيلية كونه متغير معدّل بين المتغيرات والاثار المباشر هو احد خواص المتغير معدّل .

ثالثاً: التوصيات

١. استفادة إدارات الشركات الصناعية من التوجه الإيجابي بين المتغيرات من خلال وضع برامج عملية ومتكاملة لتطبيق الصيانة التنبؤية المعززة بالذكاء الاصطناعي والكايزن، وربطها بأهداف خفض التكاليف التشغيلية، بدلاً من التعامل معها كممارسات منفصلة.

٢. يمكن للشركات الصناعية التوسع التدريجي في تطبيق الصيانة التنبؤية، ولا سيما في المعدات وخطوط الإنتاج ذات الأهمية الكبيرة، مع توظيف بياناتها في التنبؤ بالأعطال واتخاذ إجراءات الصيانة قبل حدوث التوقفات غير المخططة.

٣. تعزيز إدارات الشركات الصناعية تطبيق الكايزن من خلال اعتماده كجزء من ممارسات العمل اليومية، وتشجيع العاملين على تحديد مصادر الهدر واقتراح الحلول التي تسهم في تحسين العمليات واستخدام الموارد.

٤. الاهتمام بتوفير البيئة التنظيمية والتقنية التي تدعم تطبيق الصيانة التنبؤية وكايزن، بما يسهم في تحويل نتائج التحليل والتنبؤ بالأعطال إلى إجراءات عملية لتحسين العمليات وترشيد استخدام الموارد.

٥. التنسيق المشترك والمستمر بين إدارات الصيانة والإنتاج والمحاسبة والتكاليف، بما يضمن تحويل المعلومات الناتجة عن الصيانة التنبؤية إلى قرارات فعلية للتحسين المستمر وخفض التكاليف التشغيلية.

المصادر والمراجع

١. المصادر العربية

- الشهريلي، إ. ع. ت.، وداود، م. س. (٢٠١٧). أثر استراتيجية كايزن في تحسين جودة تكنولوجيا المعلومات في مدينة بابل الأثرية السياحية. المجلة العراقية لتكنولوجيا المعلومات، ٧(٣)، ٣٨-٦١.
<https://doi.org/10.34279/0923-007-003-003>
- بوقرة، ر.، وقرید، م. (٢٠١١). ترشيد تكاليف الصيانة بأسلوب النموذج الاحتمالي: دراسة حالة مطاحن الحضنة بالمسيلة. مجلة العلوم الاقتصادية والتسيير والعلوم التجارية، ٤(٥)، ١-٢٤.
<https://asjp.cerist.dz/en/article/13279>
- تيطراوي، آ.، وبرحومة، ع. (٢٠١٩). تقييم أثر تكلفة الصيانة على ربحية المؤسسة الإنتاجية: دراسة حالة مؤسسة مطاحن الحضنة بالمسيلة. مجلة البشائر الاقتصادية، ٥(٢)، ١٠١٤-١٠٢٨.
<https://asjp.cerist.dz/en/article/101139>
- خان، أ. إ.، وباقدر، ص. م. ص. (٢٠٢٢). ملائمة تطبيق أداة كايزن في التحسين المستمر، تخفيض التكاليف، وتعظيم الإنجاز. مجلة العلوم الاقتصادية والإدارية والقانونية، ٦(١٩)، ٥٦-٧١.
<https://doi.org/10.26389/AJSRP.Q240422>
- طاهر، م. ع.، وشريف، ر. خ. (٢٠١٤). دور الصيانة المنتجة الشاملة في تحسين أداء العمليات باستخدام أسلوب عملية التحليل الهرمي: دراسة ميدانية في شركة الحفر العراقية. مجلة دراسات إدارية، جامعة البصرة، كلية الإدارة والاقتصاد، ٦(١٢)، ٤٧-١.
<https://doi.org/10.33762/0671-006-012-001>
- طيار، أ.، وبوعنينة، و. (٢٠١٤). دور ركائز إدارة الصيانة في تخفيض تكاليفها في المؤسسة الاقتصادية. مجلة الباحث الاقتصادي، ٢(٢)، ٢٢٤-٢٤٤.
<https://asjp.cerist.dz/en/article/11295>
- عمر، ع. أ. ك. (٢٠٢٣). الاتجاهات الحديثة في محاسبة التكاليف ودورها في خفض تكلفة التشغيل: دراسة ميدانية على شركة سكر كنانة المحدودة. المجلة العربية للعلوم الإنسانية والاجتماعية، ١(١٩)، ١-٤٩.
<https://doi.org/10.59735/arabjhs.v1i19.12>
- مزريق، ع. (٢٠٠٩). صيانة التجهيزات الإنتاجية كأداة لحماية البيئة وتدعيم التنمية المستدامة: حالة مؤسسة الإسمنت ومشتقاته بالشلف. أطروحة دكتوراه، كلية العلوم الاقتصادية وعلوم التسيير، جامعة الجزائر.

<https://dspace.univ-alger3.dz/jspui/handle/123456789/1150>

٢. ترجمة المصادر العربية إلى الإنكليزية

- Al-Shahrabli, I. A. T., & Dawood, M. S. (2017). The impact of Kaizen strategy on improving IT quality in the ancient tourist city of Babylon. Iraqi Journal of Information Technology, 7(3), 38–61. <https://doi.org/10.34279/0923-007-003-003>
- Bouguera, R., & Guerid, M. (2011). Rationalizing maintenance costs using the probabilistic model: A case study of Hodna Mills in M'sila. Journal of Economic Sciences, Management and Commercial Sciences, 4(5), 1–24. <https://asjp.cerist.dz/en/article/13279>
- Titrawi, A., & Barhouma, A. (2019). Assessing the impact of maintenance costs on the profitability of a production enterprise: A case study of Hodna Mills in M'sila. Al-Bashaer Economic Journal, 5(2), 1014–1028. <https://asjp.cerist.dz/en/article/101139>
- Khan, A. I., & Baqader, S. M. S. (2022). The suitability of applying Kaizen tool in continuous improvement, cost reduction, and performance maximization. Journal of Economic, Administrative and Legal Sciences, 6(19), 56–71. <https://doi.org/10.26389/AJSRP.Q240422>
- Taher, M. A., & Sharif, R. Kh. (2014). The role of total productive maintenance in improving operational performance using the analytic hierarchy process: A field study in the Iraqi Drilling

Company. Administrative Studies Journal, University of Basra, College of Management and Economics, 6(12), 1–47. <https://doi.org/10.33762/0671-006-012-001>

Tayar, A., & Bouanina, W. (2014). The role of maintenance management pillars in reducing costs in economic enterprises. Economic Researcher Journal, 2(2), 224–244. <https://asjp.cerist.dz/en/article/11295>

Omar, A. A. K. (2023). Modern trends in cost accounting and their role in reducing operating costs: A field study on Kenana Sugar Company Ltd. Arab Journal of Humanities and Social Sciences, 1(19), Part 1, 1–49. <https://doi.org/10.59735/arabjhs.v1i19.12>

Mezrig, A. (2009). Maintenance of production equipment as a tool for environmental protection and sustainable development: The case of the Cement and Derivatives Company in Chlef. Doctoral dissertation, Faculty of Economic Sciences and Management Sciences, University of Algiers. <https://dspace.univ-alger3.dz/jspui/handle/123456789/1150>

٣. المراجع الأجنبية

Al-Baik, O., & Miller, J. (2016). *Kaizen Cookbook: The success recipe for continuous learning and improvements*. In 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.666>

Ali, A. O. D., & Elgadi, O. (2026). Cost-benefit analysis of predictive maintenance: Evaluating economic impacts and operational efficiency. *Afro-Asian Journal of Scientific Research (AAJSR)*, 4(2), 317–323. <https://aajsr.com/index.php/aajsr/article/view/942>

Alsakka, F., Darwish, M. A., Yu, H., Hamzeh, F., & AlHussein, M. (2022). *The impacts of lean implementation revealed in the course of building a digital twin of a construction manufacturing facility*. <https://doi.org/10.24928/2022/0200>

Anupama, A., Yamikar, R. S., & Banu, A. (2022). AI-powered predictive maintenance for industrial machinery: A comprehensive analysis of machine learning applications and industrial implementation. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 15(3), 656–665. <https://wjarr.com/content/ai-powered-predictive-maintenance-industrial-machinery-comprehensive-analysis-machine>

Blocher, E. J., Juras, P. E., & Smith, S. D. (2022). *Cost management: A strategic emphasis* (9th ed.). McGraw-Hill.

Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P. T. V., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>

Kumar, M. B., Parameshwaran, R., Antony, J., & Cudney, E. (2023). Framework for lean implementation through fuzzy AHP-COPRAS integrated approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(11), 3836–3848. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3089691>

Kuppaswami, S., & Kumar, G. S. (2024). Advancements in AI for predictive maintenance in industrial systems. *International Journal of Modern Engineering and Management*, 1(3), 14–16. <https://ijmem.com/papers?paper=advancements-in-ai-for-predictive-maintenance-in-industrial-systems>

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann/Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7531-4.X5000-3>

Nofemela, F. R., & Winberg, C. (2020). The relevance of Kaizen-based work-readiness training for South African University of Technology students. *The Journal for Transdisciplinary Research in Southern Africa*, 16(1), a729. <https://doi.org/10.4102/td.v16i1.729>

Patel, M., Vasa, J., & Patel, B. (2023). *Predictive maintenance: A comprehensive analysis and future outlook*. In 2023 2nd International Conference on Futuristic Technologies (INCOFT). <https://doi.org/10.1109/INCOFT60753.2023.10425122>

Surucu, O., Gadsden, S. A., & Yawney, J. (2023). *Condition monitoring using machine learning: A review of theory, applications, and recent advances*. *Expert Systems with Applications*, 221, 119738. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119738>

Susto, G. A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S., & Beghi, A. (2015). Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(3), 812–820. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2349359>



Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). *Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review*. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>