

UKJAES

University of Kirkuk Journal
For Administrative
and Economic Science

ISSN:2222-2995 E-ISSN:3079-3521

University of Kirkuk Journal For
Administrative and Economic Science



Alhalawi Noora Sabah BahaAldin , Al-Bazzawi Baraa Bazzawi Hussein & Aljboory Mahmood Sami Mahmood. The Role of Artificial Intelligence in Reducing Production Costs and Improving Operating Budgets: An Applied Study on Northern Region Cement Company (2019–2023). *University of Kirkuk Journal for Administrative and Economic Science* Volume (15) Issue (4) Appendix (1) A special issue of the 1st Scientific Conference of the College of Administration and Economics - University of Kirkuk - Information technology, digitization, and their impact on sustainable development - 8-9, Oct- 2025, p-p:528-535.

The Role of Artificial Intelligence in Reducing Production Costs and Improving Operating Budgets: An Applied Study on Northern Region Cement Company (2019–2023)

Noora Sabah BahaAldin Alhalawi ¹, Baraa Bazzawi Hussein Al-Bazzawi ², Mahmood Sami Mahmood Aljboory ³

^{1,2,3} Business Administration-College of Administration & Economics/Kirkuk University, Kirkuk, Iraq

noorasabah@uokirkuk.edu.iq ¹
baraa-albazawi@uokirkuk.edu.iq ²
mahmoodsami@uokirkuk.edu.iq ³

Abstract: This study aims to analyze the impact of artificial intelligence applications on reducing production costs and improving operating budgets in the cement industry, Through a case study of the Northern Region Cement Company in Iraq during the period 2019–2023, Monthly operational data was collected and analyzed over a period of 60 months, including indicators of production, energy consumption, and product quality, The results showed a significant improvement in all indicators, with production efficiency increasing from 76.2% to 85.6%, and energy consumption decreasing from 752 to 683 kilocalories per kilogram. Quality indicators also improved, with the coefficient of variation decreasing by 42.7%. This resulted in lower unit costs and annual savings of \$10.3 million, with a return on investment of 1,872% and a payback period of just two months. The study highlights its importance by providing quantitative evidence from an underrepresented area and illustrating how these results can be used to prepare more accurate and realistic operating budgets, This enhances the value of the research for accountants and decision-makers in the industrial sector.

Keywords: Artificial Intelligence, Reducing Costs, Operating Budgets, Cement Industry, Cost Accounting, Iraq.

دور الـ AI في خفض تكاليف الإنتاج وتحسين الموازنات التشغيلية: دراسة تطبيقية على شركة
أسمنت المنطقة الشمالية (٢٠١٩–٢٠٢٣)

م.د. نورا صباح بهاء الدين^١، م.د. براء بزاوي حسين^٢، م.م. محمود سامي محمود^٣

^{١,٢,٣} قسم إدارة الاعمال-كلية الإدارة والاقتصاد/جامعة كركوك، كركوك، العراق

المستخلص: تهدف هذه الدراسة إلى تحليل أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي على خفض تكاليف الإنتاج وتحسين الموازنات التشغيلية في صناعة الإسمنت، من خلال دراسة حالة شركة أسمنت المنطقة الشمالية في العراق خلال الفترة ٢٠١٩-٢٠٢٣. تم جمع وتحليل بيانات تشغيلية شهرية لمدة ٦٠ شهراً شملت مؤشرات الإنتاج واستهلاك الطاقة وجودة المنتج. أظهرت النتائج تحسناً كبيراً في جميع المؤشرات حيث ارتفعت كفاءة الإنتاج من ٧٦,٢٪ إلى ٨٥,٦٪، وانخفض استهلاك الطاقة من ٧٥٢ إلى ٦٨٣ كيلو كالوري لكل كيلوغرام، كما تحسنت مؤشرات الجودة بانخفاض معامل التباين بنسبة ٤٢,٧٪. أدى ذلك إلى خفض تكلفة الوحدة وتحقيق وفورات سنوية بلغت ١٠,٣ مليون دولار بعائد على الاستثمار قدره ١,٨٧٢٪ وفترة استرداد شهرين فقط. تبرز الدراسة أهميتها من خلال تقديم أدلة كمية من منطقة نادرة التمثيل وتوضيح كيفية استخدام هذه النتائج في إعداد موازنات تشغيلية أكثر دقة وواقعية، مما يعزز من قيمة البحث للمحاسبين وصناع القرار في القطاع الصناعي.

الكلمات المفتاحية: AI، خفض التكاليف، الموازنات التشغيلية، صناعة الإسمنت، محاسبة التكاليف، العراق.

Corresponding Author: E-mail: noorasabah@uokirkuk.edu.iq

المقدمة

تواجه صناعة الإسمنت العالمية تحديات متزايدة في القرن الحادي والعشرين، فهي تستهلك حوالي خمسة بالمئة من إجمالي الطاقة الصناعية العالمية وتساهم بنحو سبعة إلى ثمانية بالمئة من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على مستوى العالم كما أوضح Summerbell وزملاؤه في دراستهم المنشورة عام ٢٠١٦ في مجلة *Journal of Cleaner Production*. في ظل هذه الظروف الضاغطة، أصبح البحث عن حلول مبتكرة لتحسين الكفاءة التشغيلية وخفض الأثر البيئي ضرورة استراتيجية لا مفر منها لضمان استدامة هذه الصناعة الحيوية.

يبرز الذكاء الاصطناعي كأحد الحلول الواعدة لمواجهة هذه التحديات. فقد أظهرت دراسة حديثة أجرتها شركة McKinsey & Company ونشرتها في كانون الأول ٢٠١٩ أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي قادرة على تحسين الكفاءة التشغيلية في الصناعات الثقيلة بنسب تتراوح بين ثمانية إلى عشرة بالمئة من خلال التحسين الآلي للعمليات والصيانة التنبؤية. في صناعة الإسمنت تحديداً، تتركز التطبيقات الرئيسية للذكاء الاصطناعي على تحسين عمليات الأفران والمطاحن، إدارة استهلاك الطاقة بكفاءة أعلى، والتحكم الدقيق في جودة المنتج النهائي كما وثقتها دراسات متعددة من شركات عالمية رائدة مثل Cemex و Carbon Re. في السياق العراقي، تمثل صناعة الإسمنت قطاعاً حيويًا يضم اثنين وعشرين مصنعاً بطاقة إنتاجية إجمالية تصل إلى حوالي ثلاثين مليون طن سنوياً وفقاً لما نشرته Arabian Gulf Business Insight في يناير ٢٠٢٤. تعمل شركة أسمنت المنطقة الشمالية كأحد اللاعبين الرئيسيين في هذا القطاع، وقد شرعت في رحلة تحول رقمي طموحة منذ عام ٢٠١٩ حيث بدأت بتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي المتقدمة في عملياتها التشغيلية الأساسية بهدف تحسين الأداء ومواجهة التحديات التنافسية المتزايدة في السوق المحلية والإقليمية.

أولاً: مشكلة البحث وأهميتها

على الرغم من الاهتمام المتزايد بتطبيقات الذكاء الاصطناعي في القطاع الصناعي عالمياً، إلا أن هناك نقصاً واضحاً في الدراسات التطبيقية التي توثق بدقة الأثر الفعلي والقابل للقياس الكمي لهذه التطبيقات على الكفاءة التشغيلية في صناعة الإسمنت، خاصة في منطقة الشرق الأوسط. معظم الدراسات السابقة كانت إما نظرية بحتة أو تعتمد على حالات دراسية قصيرة المدى لا تسمح بتقييم الأثر الحقيقي على المدى المتوسط والطويل. تتمحور مشكلة البحث الأساسية حول السؤال الرئيسي: ما هو التأثير الفعلي والقابل للقياس الكمي لتطبيقات الذكاء الاصطناعي على الكفاءة التشغيلية في صناعة الإسمنت؟

ثانياً: أهداف الدراسة وفرضياتها

تهدف هذه الدراسة بشكل رئيسي إلى قياس وتحليل أثر تطبيقات الذكاء الاصطناعي على ثلاثة محاور حيوية هي كفاءة الإنتاج واستهلاك الطاقة وجودة المنتج النهائي. للإجابة على السؤال البحثي، تم وضع ثلاث فرضيات رئيسية.
الفرضية الأولى تفترض أن تطبيق أنظمة الذكاء الاصطناعي أدى إلى تحسين ملموس وقابل للقياس في كفاءة الإنتاج.
الفرضية الثانية تفترض مساهمة هذه التطبيقات في خفض استهلاك الطاقة النوعي بشكل كبير ذي دلالة اقتصادية.
أما الفرضية الثالثة فتفترض أن استخدام أنظمة التحكم الذكية أدى إلى تحسين واضح في جودة المنتج وتقليل التباين في خصائصه.

المبحث الأول: مراجعة الأدبيات

أولاً: الإطار النظري ومراجعة الأدبيات

ترتكز الدراسة على دمج ثلاثة أطر: انتشار الابتكار (Rogers, 2003)، والقدرات الديناميكية (Teece et al., 1997)، ونموذج قبول التكنولوجيا (Davis, 1989) تفسر هذه الأطر كيف تنتقل التقنية من الإدراك إلى التبني، وكيف تتحول إلى قدرة ديناميكية تمكن المنظمة من تكييف عملياتها واغتنام الفرص. ضمن الصناعات الثقيلة، تشير الأدلة التطبيقية إلى أن نماذج التعلم الآلي

والشبكات العصبية والرؤية الحاسوبية قادرة على استشعار التغيرات الدقيقة وتحسين نقاط الضبط في الأفران والمطاحن والأنظمة المساعدة (McKinsey, 2019؛ Carbon Re, 2022؛ Imubit, 2025؛ Ripik.ai, 2024). وتوصي أدلة الممارسة في صناعة الإسمنت ببنّي إطار مؤشرات أداء قياسية يوازن بين الإنتاج والطاقة والجودة (The Cement Institute, 2020؛ Amrina & Vils, 2015).

في المقابل، تكشف مراجعات منهجية حديثة (MDPI, 2024) عن فجوات بحثية تتعلق بندرة الدراسات الطولية المعتمدة على بيانات تشغيلية فعلية في الشرق الأوسط، وبهيمنة دراسات قصيرة الأجل أو تصويرية أو مبنية على تصورات إدراكية. وعليه، تشكل الدراسة الحالية إضافة مهمة من حيث طول الفترة، وثرأء البيانات الفعلية، وسياق السوق الناشئة.

ثانياً: مؤشرات الكفاءة التشغيلية: الإطار المفاهيمي

في صناعة الإسمنت، تُقاس الكفاءة التشغيلية من خلال مجموعة محددة من المؤشرات الكمية الحرجة كما حددها معهد الإسمنت في توثيقه الشامل المنشور في مارس ٢٠٢٠. تنقسم هذه المؤشرات إلى ثلاث فئات رئيسية. الفئة الأولى هي مؤشرات الإنتاج وتشمل معدل التشغيل وهو نسبة ساعات التشغيل الفعلية إلى إجمالي الساعات المتاحة، ومعامل الأداء الذي يقيس نسبة الإنتاج الفعلي إلى الطاقة التصميمية للمصنع، بالإضافة إلى معدل الإنتاجية المقاس بالطن لكل وحدة زمنية. الفئة الثانية هي مؤشرات الطاقة التي تعتبر حاسمة في صناعة كثيفة الاستهلاك للطاقة. يقاس الاستهلاك الحراري النوعي بالكيلو كالوري اللازمة لإنتاج كيلوغرام واحد من الكلنكر وهو المنتج الوسيط الأساسي، كما يُقاس الاستهلاك الكهربائي النوعي بالكيلو واط ساعة اللازمة لإنتاج طن واحد من الإسمنت النهائي. هذه المؤشرات تشكل جزءاً كبيراً من تكاليف التشغيل حيث تمثل الطاقة ثلاثين إلى أربعين بالمئة من إجمالي تكاليف الإنتاج. الفئة الثالثة هي مؤشرات الجودة التي تشمل معدل الجير الحر وهو مؤشر حاسم على اكتمال عملية الحرق، ومعامل التباين الذي يقيس مدى اتساق خصائص المنتج بين الدفعات المختلفة، ونسبة المنتج المطابق للمواصفات القياسية. في هذا السياق، أشار الباحثان Amrina و Vils في دراستهما المنشورة في مجلة Procedia CIRP عام ٢٠١٥ إلى أهمية تقييم هذه المؤشرات ضمن إطار الاستدامة الثلاثي الذي يشمل الأبعاد الاقتصادية والبيئية والاجتماعية لضمان تحقيق تصنيع مستدام في صناعة الإسمنت.

ثالثاً: الفجوة البحثية التي تسدها هذه الدراسة

من خلال المراجعة الشاملة والمنهجية للأدبيات العلمية المنشورة، يتضح وجود عدة فجوات بحثية واضحة ومهمة. أولاً، هناك ندرة شديدة في الدراسات التطبيقية الكمية من منطقة الشرق الأوسط، حيث تركزت الغالبية العظمى من الأبحاث المنشورة في المجالات العلمية المحكمة على دراسات حالة من أوروبا وأمريكا الشمالية وشرق آسيا. ثانياً، هناك قلة ملحوظة في الدراسات الطولية التي تتبع التأثير الفعلي للتطبيقات على مدى عدة سنوات، إذ أن معظم الدراسات السابقة كانت إما قصيرة المدى أو تركز على فترات تجريبية محدودة لا تتجاوز بضعة أشهر. ثالثاً، هناك نقص واضح في البيانات الكمية الدقيقة والمفصلة، حيث اعتمدت كثير من الدراسات على تقديرات أو بيانات إجمالية غير مفصلة أو على مقابلات واستبانات بدلاً من البيانات التشغيلية الفعلية. رابعاً، هناك ضعف عام في توثيق التجارب الناجحة في السياقات المحلية المختلفة خاصة في الدول النامية والأسواق الناشئة. تسعى هذه الدراسة الحالية إلى سد هذه الفجوات البحثية الأربع من خلال تقديم تحليل كمي دقيق ومفصل لبيانات تشغيلية فعلية تم جمعها بدقة على مدى سنتين شهراً متواصلاً في سياق عراقي محدد، مع توثيق شامل ومنهجي للتجربة والدروس المستفادة منها بما يفيد الباحثين وصناع القرار في المنطقة.

المبحث الثاني: المنهجية

أولاً: التصميم والمنهج

تم اعتماد تصميم دراسة حالة طولية أحادية (Yin, 2018؛ Eisenhardt, 1989) مع تحليل كمي صارم. يسمح هذا التصميم بفهم التغيير داخل الحالة عبر الزمن، وفحص آليات التأثير في بيئة تشغيلية واقعية.

ثانياً: وحدة التحليل والسياق

وحدة التحليل هي شركة أسمنت المنطقة الشمالية (العراق). تم اختيارها لكونها حالة نموذجية من حيث الحجم والتقنية، ولتوفر بيانات تشغيلية شهرية تفصيلية لخمس سنوات، ولاعتمادها حزمة متكاملة من حلول الذكاء الاصطناعي عبر مراحل متتالية.

ثالثاً: البيانات والمتغيرات

اعتمدت الدراسة على بيانات تشغيلية شهرية للفترة ٢٠١٩-٢٠٢٣، متضمنة الإنتاج ومعدل التشغيل وساعات التوقف، ومؤشرات الطاقة (SHC, SEC)، ومقاييس الجودة (fCaO)، ومعامل التباين CV، نسبة المطابقة. جرى التحقق من الجودة عبر المطابقة المتقاطعة والتدقيق المنطقي واستيفاء محدد للفجوات. عُرّف متغيرٌ ثنائي لتحديد مرحلة ما قبل/بعد التطبيق الكامل للذكاء الاصطناعي (٠ للفترة ٢٠١٩-٢٠٢٠، و١ للفترة ٢٠٢١-٢٠٢٣)، مع متغيرات ضابطة كحجم المصنع وعمر المعدات وأسعار الوقود والعوامل المناخية.

رابعاً: الأساليب الإحصائية

شملت التحليلات الإحصاء الوصفي، واختبارات t للعينات المستقلة مع تصحيح عدم تجانس التباين عند الحاجة، وانحدارات خطية روبرست، وتحليل اتجاه زمني للسلسلة الزمنية، جميعها عند مستوى دلالة $\alpha=0.05$ تم فحص الاعتدالية والتعددية الخطية وعدم تجانس التباين وفق المعايير القياسية. (Cohen, 1988)

المبحث الثالث: النتائج

أولاً: التطبيق التدريجي لأنظمة الذكاء الاصطناعي

بدأت رحلة التحول الرقمي في شركة أسمنت المنطقة الشمالية بشكل منهجي ومدروس. يوضح الجدول التالي التطور الزمني التفصيلي لتطبيق مختلف أنظمة الذكاء الاصطناعي على مدى خمس سنوات.

جدول (١): الجدول الزمني لتطبيق أنظمة الذكاء الاصطناعي والاستثمارات

السنة	الربع	النظام المطبق	نطاق التغطية	الاستثمار (ألف دولار)
2019	Q4	دراسة جدوى وتخطيط	-	50
2020	Q1	نظام تحسين الأفران - تجريبي	30%	280
2020	Q2	توسيع نظام الأفران	100%	320
2020	Q3	نظام تحسين المطاحن - تجريبي	25%	180
2020	Q4	توسيع نظام المطاحن	100%	240
2021	Q1	نظام إدارة الطاقة	100%	150
2021	Q3	نظام التحكم في الجودة	100%	120
2022	Q1	نظام الصيانة التنبؤية	100%	200
2022-2023	-	تحسينات وتطوير مستمر	-	180
الإجمالي				1,720

يتضح من الجدول أعلاه أن الشركة اتبعت نهجاً تدريجياً حكيماً في التطبيق. بدأت في نهاية عام ٢٠١٩ بدراسة جدوى شاملة استثمرت فيها خمسين ألف دولار، ثم انتقلت في الربع الأول من ٢٠٢٠ إلى المرحلة التجريبية لنظام تحسين الأفران التي غطت ثلاثين بالمائة فقط من العمليات باستثمار قدره مئتان وثمانون ألف دولار. بعد التأكد من نجاح المرحلة التجريبية، تم التوسع التدريجي حتى وصل إجمالي الاستثمار إلى مليون وسبعمائة وعشرين ألف دولار على مدى خمس سنوات.

ثانياً: تحسن كفاءة الإنتاج

أظهرت البيانات التشغيلية تحسناً كبيراً وواضحاً في جميع مؤشرات الإنتاج بعد تطبيق أنظمة الذكاء الاصطناعي. يلخص الجدول التالي المقارنة الشاملة بين الفترتين.

جدول (٢): مقارنة مؤشرات الإنتاج قبل وبعد تطبيق الذكاء الاصطناعي

المؤشر	قبل التطبيق (2019-2020)	بعد التطبيق (2021-2023)	التغير المطلق	النسبة المئوية	p-value
الإنتاج الشهري (طن)	103,750	116,500	+12,750	+12.3%	<0.001
معدل التشغيل (%)	76.2	85.6	+9.4	+12.3%	<0.001
ساعات التوقف/شهر	78.5	51.2	-27.3	-34.8%	<0.001
الطاقة الإنتاجية المستغلة (%)	78.9	88.7	+9.8	+12.4%	<0.001

جدول ٢ يوضح تحسناً شاملاً في الأداء بعد تطبيق الذكاء الاصطناعي؛ إذ ارتفع الإنتاج الشهري بنسبة ١٢,٣٪، وتحسن معدل التشغيل بنفس النسبة تقريباً، فيما انخفضت ساعات التوقف بنسبة ٣٤,٨٪، وجميع الفروق ذات دلالة إحصائية عالية ($p<0.001$). تتماشى هذه النتائج بقوة مع ما وثقته دراسة (McKinsey 2019) التي سجلت تحسناً بحدود ١٠٪، بل وتتجاوزها قليلاً، ما يعكس نجاح التطبيق الشامل للأنظمة في هذه الحالة ويؤكد أن التجربة قابلة للتكرار وذات موثوقية عالية. تُظهر الإحصاءات الوصفية انخفاض التشتت في مرحلة ما بعد التطبيق، بما يعكس استقراراً أعلى للعملية وتحسناً في قابلية التنبؤ. كما لا تظهر القيم الشاذة القوية، وجميع المؤشرات تقع ضمن حدود $\pm 3\sigma$ ، ما يدعم موثوقية القياس.

جدول (٣): الإحصاءات الوصفية للمتغيرات الرئيسية حسب الفترة

السنة	الإنتاج السنوي (ألف طن)	معدل التشغيل (%)	النمو السنوي (%)	النمو التراكمي (%)
2019	1,245	76.2	-	-
2020	1,268	77.6	+1.8	+1.8
2021	1,315	80.5	+3.7	+5.6
2022	1,362	83.4	+3.6	+9.4
2023	1,398	85.6	+2.6	+12.3

يبين جدول ٣ وجود تحسن مندرج ومستمر في الأداء عبر فترة الدراسة. بدأ الإنتاج في ٢٠١٩ عند ١,٢٤٥ مليون طن بمعدل تشغيل ٧٦,٢٪، ثم ارتفع بشكل طفيف عام ٢٠٢٠ (+١,٨٪) مع التطبيق التجريبي للذكاء الاصطناعي. شهد عام ٢٠٢١ قفزة أكبر (+٣,٧٪) بفضل إدخال نظام إدارة الطاقة، تلاه تحسن مشابه في ٢٠٢٢ (+٣,٦٪) بعد تطبيق الصيانة التنبؤية، ثم زيادة إضافية في ٢٠٢٣ (+٢,٦٪). وبلغ النمو التراكمي الكلي للإنتاج خلال خمس سنوات ١٢,٣٪، ما يعكس أثرًا إيجابيًا تدريجيًا ومستدامًا لتطبيق الأنظمة الذكية.

ثالثاً: الوفورات الكبيرة في استهلاك الطاقة

يمثل استهلاك الطاقة أحد أكبر بنود التكلفة في صناعة الإسمنت، ولذا فإن أي تحسن في هذا المجال له تأثير اقتصادي مباشر وكبير. يلخص الجدول التالي التحسن الملموس في مؤشرات الطاقة.

جدول (٤): مقارنة مؤشرات استهلاك الطاقة قبل وبعد التطبيق

المؤشر	قبل التطبيق (2019-2020)	بعد التطبيق (2021-2023)	التغير المطلق	النسبة (%)	الوفورات السنوية
الاستهلاك الحراري (kcal/kg clinker)	752	683	-69	-9.2%	\$2.8M
الاستهلاك الكهربائي (kWh/ton cement)	118	107	-11	-9.3%	\$1.4M
تكلفة الطاقة/طن (USD)	42.5	38.7	-3.8	-8.9%	\$4.2M
كفاءة استخدام الوقود (%)	65.2	71.8	+6.6	+10.1%	-

يبين جدول ٤ تحقيق تحسن كبير في كفاءة الطاقة بعد تطبيق أنظمة الذكاء الاصطناعي؛ إذ انخفض الاستهلاك الحراري النوعي بنسبة ٩,٢٪، والاستهلاك الكهربائي بنسبة ٩,٣٪، مع تراجع تكلفة الطاقة لكل طن بمقدار ٣,٨ دولارات (-٨,٩٪)، وارتفاع كفاءة استخدام الوقود بنحو ٦,٦ نقاط مئوية (+١٠,١٪). تقع هذه النتائج تماماً ضمن النطاق المرجعي لدراسة Carbon Re (2022) و (MDPI (2024)، ما يعزز مصداقيتها ويؤكد أن التحسن حقيقي ومستدام. اقتصادياً، تعني هذه التحسينات وفورات سنوية تقارب ٤,٢ مليون دولار، وهو ما يبرز الأثر المالي المباشر والملموس لهذه التحسينات التشغيلية. لفهم التطور الزمني بشكل أفضل، يعرض الجدول التالي عينة من التحسن التدريجي الشهري.

جدول (٥): التطور الشهري في استهلاك الطاقة الحرارية النوعية (عينة)

الفترة	المتوسط (kcal/kg)	الانحراف المعياري	التحسن التراكمي (%)
2019 (متوسط السنة)	758	32.5	-
2020 Q1	752	28.6	-0.8%
2020 Q4	728	24.3	-4.0%
2021 Q2	705	21.7	-7.0%
2022 Q2	689	19.8	-9.1%
2023 Q2	683	18.2	-9.9%

يبرز جدول ٥ الانخفاض التدريجي والمستمر في الاستهلاك الحراري النوعي من kcal/kg ٧٥٨ إلى kcal/kg ٦٨٣ في ٢٠٢٣، بتحسين تراكمي بلغ ٩,٩٪. بدأ الانخفاض الطفيف مع التطبيق التجريبي في ٢٠٢٠ ثم تسارع مع تشغيل نظام الأفران وإدارة الطاقة، واستمر حتى استقر الأداء في ٢٠٢٣. كما انخفض الانحراف المعياري من ٣٢,٥ إلى ١٨,٢، ما يدل على استقرار أكبر وتقليل واضح في تذبذب الاستهلاك عبر الأشهر.

رابعاً: التحسن الاستثنائي في جودة المنتج

شهدت مؤشرات الجودة تحسناً ملحوظاً تجاوز التوقعات الأولية بشكل واضح. يلخص الجدول التالي التحسن الشامل في جميع مؤشرات الجودة المقاسة.

جدول (٦): مقارنة مؤشرات الجودة قبل وبعد التطبيق

المؤشر	قبل التطبيق (2019-2020)	بعد التطبيق (2021-2023)	التغير	النسبة (%)	p-value
معدل الجير الحر (%)	1.68	1.21	-0.47	-28.0%	<0.001
معامل التباين	0.089	0.051	-0.038	-42.7%	<0.001
المطابقة للمواصفات (%)	91.3	96.8	+5.5	+6.0%	<0.001
انحراف قوة الضغط (MPa)	3.8	2.1	-1.7	-44.7%	<0.001
الشكاوى/١٠٠٠ طن	4.2	1.8	-2.4	-57.1%	<0.001

يبين جدول ٦ تحسناً جوهرياً وشاملاً في جميع مؤشرات الجودة بعد تطبيق الذكاء الاصطناعي؛ إذ انخفض معدل الجير الحر بنسبة ٢٨٪، وتراجع معامل التباين بنسبة استثنائية بلغت ٤٢,٧٪، وهو ما يشير إلى اتساق أكبر في خصائص المنتج. كما ارتفعت نسبة المطابقة للمواصفات إلى ٩٦,٨٪، وانخفض انحراف قوة الضغط بنسبة ٤٤,٧٪، وتراجعت شكاوى العملاء بنسبة ٥٧,١٪. جميع الفروق ذات دلالة إحصائية قوية ($p < 0.001$) تتجاوز نتيجة تقليل التباين قليلاً نطاق ٣٠-٤٠٪ الوارد في مراجعة MDPI (2024)، وهو تجاوز يمكن تفسيره بالتكامل الكامل للأنظمة، فترة النضوج الطويلة، والتزام الإدارة. كما تتوافق هذه النتائج مع دراسات (Basetwo (2024) و Imubit (2025) التي أكدت دور الذكاء الاصطناعي في تحقيق استقرار وتحكم أدق بعمليات الإنتاج.

خامساً: التحليل المالي الشامل للعوائد

عند تجميع كل الفوائد المحققة من مختلف جوانب التحسن، يتضح حجم العائد الاقتصادي الاستثنائي من الاستثمار في الذكاء الاصطناعي. يوضح الجدول التالي التحليل المالي التفصيلي.

جدول (٧): تحليل العائد على الاستثمار (سنوياً)

البند	القيمة (ألف دولار)
التكاليف:	
حصة الاستثمار الأولى (موزع على ٥ سنوات)	344
الصيانة والتشغيل السنوي	120
التدريب والتطوير	85
إجمالي التكاليف السنوية	549
الفوائد:	
وفورات الطاقة	4,200
زيادة الإنتاج (١٥٣,٠٠٠ طن × ٣٥\$)	5,355
تحسين الجودة (تقليل الهدر)	850
تقليل تكاليف الصيانة	420
إجمالي الفوائد السنوية	10,825
صافي العائد السنوي	10,276
نسبة العائد على الاستثمار (ROI)	1,872%
فترة استرداد الاستثمار	شهران

يوضح جدول ٧ أن التكاليف السنوية الكلية بلغت ٥٤٩ ألف دولار، بينما وصلت الفوائد السنوية إلى ١٠,٨ مليون دولار، معظمها من زيادة الإنتاج ووفورات الطاقة. أسفر ذلك عن صافي عائد سنوي قدره ١٠,٣ مليون دولار، ونسبة عائد على الاستثمار (ROI) مذهلة بلغت ١,٨٧٢٪، مع فترة استرداد قصيرة جداً لا تتجاوز شهرين. تشير هذه النتائج إلى جدوى مالية استثنائية لتطبيق أنظمة الذكاء الاصطناعي في صناعة الإسمنت، وتفسر العوائد المرتفعة مقارنة بالدراسات المرجعية مثل (McKinsey (2019) و (Cemex (2020) و (Carbon Re (2022)، ما يؤكد أن التحسينات التشغيلية الملموسة تنعكس بشكل مباشر على الأداء المالي.

سادساً: اختبار الفرضيات

بناءً على النتائج المفصلة أعلاه، يمكن اختبار الفرضيات الثلاث للدراسة. يلخص الجدول التالي نتائج الاختبار الإحصائي لكل فرضية.

جدول (٨): ملخص نتائج اختبار الفرضيات

الفرضية	المؤشر المستخدم	التغير المحقق	p-value	القرار
H1: تحسين كفاءة الإنتاج	معدل التشغيل	+12.3%	<0.001	✓قبول
H2: خفض استهلاك الطاقة	الاستهلاك الحراري النوعي	-9.2%	<0.001	✓قبول
H3: تحسين جودة المنتج	معامل التباين	-42.7%	<0.001	✓قبول

يظهر الجدول أعلاه أن جميع الفرضيات الثلاث تم قبولها بمستوى ثقة إحصائية عالي جداً حيث كانت قيمة p أقل من ٠,٠٠١ في جميع الحالات. الفرضية الأولى تأكدت بتحسين كفاءة الإنتاج بنسبة اثني عشر فاصل ثلاثة بالمئة. الفرضية الثانية تأكدت بانخفاض استهلاك الطاقة بنسبة تسعة فاصل اثنين بالمئة. الفرضية الثالثة تأكدت بتحسين استثنائي في الجودة بانخفاض معامل التباين بنسبة اثنين وأربعين فاصل سبعة بالمئة.

سابعاً: جدول مقارنة شامل مع الدراسات الدولية

لتسهيل المقارنة الشاملة، يعرض الجدول التالي ملخصاً لنتائج دراستنا مقابل النتائج المنشورة في أهم الدراسات الدولية.

جدول (٩): مقارنة شاملة بين نتائج الدراسة الحالية والدراسات الدولية

فترة الدراسة	تحسين الجودة	الوفورات في الطاقة	التحسن في الإنتاج	السياق	الدراسة
60 شهر	42.7-تباين	-9.2%	+12.3%	العراق	دراستنا(2024)
قصيرة	غير محدد	+10%	+10%	أمريكا الشمالية	McKinsey (2019)
متفاوتة	غير محدد	٧- إلى ١٢٪	غير محدد	متعدد	Carbon Re (2022)
محدودة	غير محدد	تحسن في الطحن	غير محدد	عالمي	Cemex (2020)
مراجعة	٣٠- إلى ٤٠٪ تباين	7-12%	5-10%	عالمي	MDPI (2024)مراجعة
متفاوتة	تحسن في fCaO	تحسن	تحسن	متعدد	Imubit (2025)
محدودة	غير محدد	غير محدد	20%-توقعات	متعدد	Ripik.ai (2024)

يبين جدول ٩ أن نتائج الدراسة الحالية تقع ضمن أو عند الحد الأعلى للنطاقات التي توقعها الأدبيات الدولية، ما يعزز قوتها وموثوقيتها. تحسن الإنتاج بنسبة ١٢,٣٪ يتجاوز قليلاً نتائج McKinsey (10%) ويقع في الحد الأعلى من نطاق مراجعة MDPI (5-10%) أما وفورات الطاقة (٩,٢٪) فتتطابق تقريباً مع المتوسط المرجعي لدراسة Carbon Re (7-12%) ، ما يدل على دقة القياسات. على صعيد الجودة، خفض معامل التباين بنسبة ٤٢,٧٪ يتجاوز هامشياً نطاق ٣٠-٤٠٪ الذي حددته MDPI، ما يعكس أثر التكامل الشامل للأنظمة. وتتفوق الدراسة الحالية زمنياً بفضل فترة الرصد البالغة ٦٠ شهراً، وهي أطول من معظم الدراسات السابقة، مما يمنحها قوة تفسيرية وأهمية بحثية أعلى.

المبحث الرابع: المناقشة

أولاً: تفسير النتائج في ضوء الدراسات السابقة

تُظهر الدراسة أن التحسن في كفاءة الإنتاج بنسبة ١٢,٣٪ يتماشى تماماً مع نتائج McKinsey (2019) التي سجلت تحسناً يصل إلى ١٠٪ عند التشغيل المستقل، بل ويتجاوزها قليلاً بفضل التطبيق الشامل للأنظمة وفترة النضوج الطويلة والتزام الإدارة. كما تقع النتيجة في الحد الأعلى لنطاق مراجعة MDPI (2024) (5-10%) ، ما يجعلها انعكاساً لأفضل الممارسات العالمية. أما خفض استهلاك الطاقة بنسبة ٩,٢٪ فيقع تماماً في منتصف نطاق Carbon Re (2022) (7-12%) و MDPI (2024) (5-10%)، مما يعزز مصداقية النتائج ويشير إلى إمكانية التحسين للوصول للحد الأعلى. هذا التحسن يُعزى إلى تجنب "الحرق الزائد" كما أوضحت Imubit (2025) وإلى تحسينات النمذجة كما أشارت Cemex (2020) وفيما يخص الجودة، فإن الانخفاض الكبير في معامل التباين (٤٢,٧٪) يتجاوز قليلاً نطاق MDPI (30-40%) ، وهو ما يمكن تفسيره بدمج الأنظمة على نحو متكامل، وتحسين دقة القياس، وفترة التعلم الطويلة، وتدريب الكوادر. النتائج مدعومة بدراسات Basetwo (2024) و Imubit (2025) التي أكدت قدرة الذكاء الاصطناعي على تعزيز الاستقرار وتحقيق اتساق أعلى في العملية الإنتاجية.

ثانياً: الآثار النظرية والعملية

من الناحية النظرية، تسهم الدراسة في سد فجوة معرفية مهمة عبر تقديم دليل تجريبي كمي طويل الأمد من العراق، ما يثري الأدبيات العالمية التي تنفقر إلى تمثيل المنطقة. كما تعزز النتائج موثوقية الدراسات الدولية السابقة (McKinsey)، Cemex، Carbon Re) وتؤكد قابلية تعميمها، إضافة إلى تقديم نموذج تطبيقي تدريجي يمكن الاسترشاد به. أما عملياً، فتبرز الدراسة الجدوى المالية الكبيرة للاستثمار في أنظمة الذكاء الاصطناعي بفضل عائد استثمار استثنائي (ROI 1,872%) وفترة استرداد قصيرة جداً، ما يجعل القرار مبرراً اقتصادياً. كما توصي بتطبيق تدريجي يبدأ بالمراحل الأكثر تأثيراً، والاستثمار في التدريب المستمر، وضمان جودة البيانات عبر مستشعرات دقيقة وصيانة منتظمة لضمان نجاح التطبيق واستدامة النتائج.

ثالثاً: الأثر على الموازنات التشغيلية وتحليل التكاليف

تشير النتائج الكمية لهذه الدراسة إلى أن التحسن في كفاءة الإنتاج وخفض استهلاك الطاقة انعكس بشكل مباشر على تكلفة الوحدة الكلية للإنتاج، ما يتيح للإدارة إعداد موازنات تشغيلية أكثر دقة وواقعية. فارتفع معدل التشغيل بنسبة ١٢,٣٪ وانخفض استهلاك الطاقة بنسبة ٩,٢٪. أدت إلى تقليص التكاليف المتغيرة والثابتة لكل طن، وهو ما يخفض الانحرافات بين التكاليف الفعلية والمخططة عند مقارنة الأداء بالموازنة. كما أن استقرار الجودة وتقليل الهدر بنسبة ٤٢,٧٪ يساهمان في تحسين دقة التقديرات المستقبلية وتقليل مخصصات الانحرافات في الموازنات القادمة. بناءً على ذلك، تمثل نتائج هذه الدراسة مدخلاً عملياً لتحديث النماذج المحاسبية للموازنات التشغيلية وتحسين قدرتها على التنبؤ بالتكاليف، بما يتماشى مع أهداف الإدارة في السيطرة على التكاليف وتعظيم الربحية.

رابعاً: محددات الدراسة

رغم شموليتها، هذه الدراسة لها محدداتها التي يجب الإقرار بها بوضوح. أولاً، النتائج خاصة بشركة واحدة في سياق محدد، وقد تختلف النتائج في شركات أخرى بطور مختلف من حيث حجم المصنع أو عمر المعدات أو مستوى الأتمتة الأولي أو الثقافة التنظيمية. ثانياً، من الصعب عزل تأثير الذكاء الاصطناعي بشكل كامل عن عوامل أخرى قد تكون ساهمت في التحسن مثل تطويرات إدارية متزامنة أو تحديثات عادية في المعدات أو تحسن في نوعية المواد الخام. ثالثاً، بعض الأرقام المالية تقديرية بسبب حساسية بعض المعلومات التجارية والصعوبة في الحصول على أرقام دقيقة تماماً لبعض بنود التكلفة والفائدة. رابعاً، الدراسة ركزت على التطبيقات التشغيلية الأساسية ولم تشمل تطبيقات أخرى محتملة في المجالات الإدارية أو التسويقية أو اللوجستية.

المبحث الخامس: الخلاصة والتوصيات

أولاً: ملخص النتائج الأساسية

تؤكد نتائج الدراسة أن تطبيق أنظمة الذكاء الاصطناعي في شركة أسمنت المنطقة الشمالية بين ٢٠١٩ و ٢٠٢٣ أدى إلى تحسن كبير وملحوس في الأداء التشغيلي. ارتفع معدل التشغيل بنسبة ١٢,٣٪ متجاوزاً قليلاً نتائج (McKinsey 2019)، وانخفض استهلاك الطاقة الحرارية بنسبة ٩,٢٪ وهو ما يتوافق تماماً مع نطاقات (Carbon Re 2022) و (MDPI 2024). كما شهدت جودة المنتج تحسناً استثنائياً بانخفاض معامل التباين بنسبة ٤٢,٧٪ متجاوزاً الحد الأعلى للنطاق المرجعي. مالياً، حققت الشركة وفورات سنوية تقارب ١٠,٣ مليون دولار مقابل استثمار أولي قدره ١,٧٢ مليون دولار وتكاليف تشغيل سنوية ٥٤٩ ألف دولار، ما أسفر عن عائد استثمار سنوي استثنائي بلغ ١,٨٧٢٪ وفترة استرداد لا تتجاوز شهرين، مؤكداً الجدوى الاقتصادية القوية لتطبيق الذكاء الاصطناعي في هذا القطاع.

ثانياً: التوصيات

بناءً على النتائج والدروس المستفادة، نقدم التوصيات التالية لشركات الإسمنت في المنطقة وللباحثين المستقبليين. للشركات، نوصي بالبدء بالتطبيقات ذات العائد الأكبر خاصة تحسين الأفران وإدارة الطاقة، واعتماد نهج تدريجي يبدأ بمرحلة تجريبية ثم يتوسع، والاستثمار الجاد في البنية التحتية التقنية والتدريب المستمر، والتركيز على جودة البيانات المدخلة للباحثين، نقترح إجراء دراسات مقارنة بين شركات متعددة، ودراسات طويلة المدى تتجاوز عشر سنوات، وتوسيع النطاق لصناعات ثقيلة أخرى.

References

- 1- Amrina, E., & Vils, A. L. (2015). Key performance indicators for sustainable manufacturing evaluation in cement industry. *Procedia CIRP*, 26, 19-23.
- 2- Arabian Gulf Business Insight (AGBI). (2024, January 23). Iraq cement company gets \$130m to double production.
- 3- Basetwo. (2024). Cement manufacturing improved with AI. Retrieved from <https://www.basetwo.ai/blogs/cement-manufacturing-improved-with-ai>
- 4- Carbon Re. (2022). How AI is helping cement plant operators reduce energy consumption and carbon emissions. *Carbon Re White Paper*.
- 5- Cemex. (2020). Improving cement production through artificial intelligence. *Cemex Corporate Website*.
- 6- Imubit. (2025, March 20). AI technology for cement manufacturing. Retrieved from <https://imubit.com/ai-technology-for-cement-manufacturing/>
- 7- McKinsey & Company. (2019, December 31). Artificial intelligence helps cut emissions and costs in cement plants. *McKinsey Insights*.
- 8- MDPI. (2024, June 5). Towards leveraging artificial intelligence for sustainable cement manufacturing: A systematic review. *Sustainability*, 16(11), 4798.
- 9- Ripik.ai. (2024, November 21). AI in the cement industry: Optimization in cement manufacturing.
- 10-Summerbell, D., Barlow, C., & Cullen, J. (2016). Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1327-1339.
- 11-The Cement Institute. (2020, March 11). Maintenance key performance indicators (KPIs) for the cement industry.