مجلة البحوث الإدارية والمالية والكمية
Journal of Managerial, Financial & Quantitative Research
جامعة السويس
كلية التجارة

توظيف الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة لوجستيات سلاسل التبريد

دراسة نظرية

(بحث مقبول للنشر كجزء من متطلبات الحصول على درجة الدكتوراه في إدارة الأعمال)

إعداد

جهاد محسن على

باحثة دكتوراه بقسم إدارة الأعمال – كلية التجارة – جامعة السويس

الأستاذ الدكتور

رانية عبد المنعم شمعة

عميد كلية التجارة

أستاذ إدارة الإنتاج والعمليات

كلية التجارة - جامعة السويس

الدكتور

هبة السيد البدوي

أستاذ مساعد إدارة الأعمال

كلية التجارة- جامعة السويس

مجلة البحوث الإدارية والمالية والكمية

كلية التجارة – جامعة السويس

المجلد الخامس – العدد الثالث

سبتمبر 2025

رابط المجلة: https://safq.journals.ekb.eg/

توظيف الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة لوجستيات سلاسل التبريد

دراسة نظرية

المستخلص:

تسعى هذه الدراسة إلى استكشاف دور الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة واستدامة سلاسل التبريد، وذلك من خلال مراجعة منهجية للأدبيات المنشورة بين 2015–2025. فقد أظهرت المراجعة أن الذكاء الاصطناعي يمثل أداة محورية لمعالجة التحديات المعقدة مثل الانحرافات الحرارية، استهلاك الطاقة المرتفع، ونقص الشفافية بين الشركاء. وتركزت أبرز التقنيات المدمجة في هذا السياق على إنترنت الأشياء(IoT) ، شبكات الاستشعار اللاسلكية، تقنية تحديد الهوية بموجات الراديو(RFID) ، وتقنية البلوك تشين. أظهرت النتائج أن هذه الحلول تسهم في تقليل الفاقد من المنتجات بنسبة تصل إلى 20%، وتحسين كفاءة الطاقة بما يتجاوز 15%، إلى جانب تعزيز الثقة والشفافية في سلاسل التوريد. وأكدت الدراسة أن نجاح هذه الحلول يتطلب تعزيز البنية التحتية الرقمية، معالجة قضايا الأمان والخصوصية، وتوفير استثمارات طويلة الأمد، مما يجعل دمج الذكاء الاصطناعي في سلاسل التبريد خطوة جوهرية نحو تحقيق الكفاءة والاستدامة.

الكلمات المفتاحية :الذكاء الاصطناعي، سلاسل التبريد، إنترنت الأشياء، RFID، البلوك تشين، الاستدامة.

Abstract:

This study explores the role of artificial intelligence (AI) in enhancing the efficiency and sustainability of cold chains through a systematic literature review covering 2015–2025. The review reveals that AI serves as a pivotal tool to address complex challenges, including thermal deviations, high energy consumption, and the lack of transparency among supply chain partners. Key enabling technologies include the Internet of Things (IoT), wireless sensor networks, Radio-Frequency Identification (RFID), and blockchain. Findings indicate that integrating these solutions can reduce product losses by up to 20%, improve energy efficiency by more than 15%, and strengthen trust and transparency across the supply chain. The study concludes that the successful adoption of AI-driven cold chains requires strengthening digital infrastructure, addressing security and privacy concerns, and ensuring sustainable long-term investments. Integrating AI into cold chains thus emerges as a critical pathway to achieving operational efficiency and sustainability.

Keywords: Artificial Intelligence, Cold Chains, IoT, RFID, Blockchain, Sustainability.

مقدمة:

حظيت أنظمة إدارة سلسلة التوريد المبردة باهتمام كبير نظرًا لقدرتها العالية على دمج تقنيات متنوعة بما في ذلك إنترنت الأشياء، والبلوك تشين، وتكنولوجيا المعلومات، والأنظمة الفيزيائية السيبرانية في أطر عمل موحدة. فقد قام الباحثون السابقون بدمج الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء والبلوك تشين لتحقيق تتبع فعال في المنتجات المبردة والمجمدة(Alshdady et al., 2024) . وأصبح لا يمكن فصل تأثير وكفاءة نظام سلسلة التبريد الغذائي عن دعم التكنولوجيا. تواجه الأنظمة التقليدية صعوبات تتعلق بالأمن، وإدارة البيانات اللامركزية، وسهولة التلاعب بالبيانات المتبادلة ذات الصلة بالعمليات اللوجستية (Zhang and Hua., 2020). ومع تزايد التحديات المرتبطة بالتقلبات البيئية وتنامي الحاجة إلى الاستجابة السريعة للأعطال والمخاطر، برزت الحاجة إلى دمج الذكاء الاصطناعي بتقنياته المختلفة لتحسين جودة وكفاءة سلاسل التبريد. حيث تشير العديد من الدراسات إلى أن الذكاء الاصطناعي أصبح أداه رئيسية في تطير سلاسل التبريد الذكية، من خلال تقديم حلول تنبؤية واتخاذ قرارات ذاتية، مما يسهم في تقليل الفاقد وتحسين جودة التبريد وخفض التكاليف (Wamba & Queiro., 2021). كما أن تقنيات مثل تعلم الآلة وتحليل البيانات الضخمة توفر فرصاً غير مسبوقة لفهم الأنماط التشغيلية والتنبؤ بالأعطال قبل حدوثها (Ivanov & Dolgui., 2020). وبالتالي، يمكننا القول إن هدف هذه الدراسة هو تحديد التطبيقات الأساسية للذكاء الاصطناعي AI في سلاسل التبريد وتقييم تأثير AI على الكفاءة، تقليل الفاقد، وضمان جودة المنتجات ضمن السلسلة.

أولاً: الدراسات السابقة:

أ الدراسات السابقة الخاصة بسلاسل التبريد:

هدفت دراسة (Xuet al., 2023) إلى عمل مراجعة شاملة لتطورات سلاسل التبريد لمنتجات الأغذية الطازجة وتحديد التوجهات البحثية المستقبلية. واعتمد البحث في ذلك على مراجعة الأدبيات مراجعه شاملة على عدة أوراق علمية دون تحديد نطاق محدد. حُددت ستة محاور بحثية رئيسية منها إدارة متكاملة، الاستدامة، التكنولوجيا الرقمية، ومشاكل البنية التحتية والطاقة. وقد أوصت الدراسة بتشجيع البحث التطبيقي، دمج التكنولوجيا(IoT/AI) ، وتطوير بنى تحتية باردة مستدامة.

وكان الهدف من دراسة (Zhang & Mohamed, 2024) هو تقييم تحديات استدامة سلاسل التبريد للمواد القابلة للتلف من خلال مراجعة منهجية للأدبيات من عام 2000 – 2023، شملت دراسات من بلدان متقدمة ونامية. وكان من النتائج التي توصلت لها الدراسة أن أهم هذه التحديات محدودية البنى التحتية، الاستهلاك العالي للطاقة، والنقص في مهارات القوى العاملة. وأوصت الدراسة بضرورة تحسين كفاءة الطاقة ودعم التدريب بالإضافة إلى وضع سياسات تدعم التحول الأخضر لسلاسل التبريد.

بينما هدفت دراسة (Shi et al., 2024) إلى مراجعة نماذج توزيع البضائع الطازجة داخل سلاسل التبريد والتشبيك المشترك Joint Distribution. واعتمدت الدراسة في ذلك على مراجعة الأدبيات ومقارنة طرق التشغيل. وتوصلت الدراسة من خلال هذه المراجعة إلى أن التوزيع المشترك Joint Distribution يقلل التكاليف والانبعاثات، لكنه يحتاج تنسيق عالي وتكنولوجي بين الأطراف. وبالتالي أوصت الدراسة بضرورة توفير اعتماد نماذج تشاركية وتقنيات رقمية لزيادة الكفاءة وخفض التأثير البيئي.

وهدفت دراسة (Iyer & Robb, 2025) إلى تجميع نماذج التحسين المطبقة على سلاسل التبريد (تخطيط الطرق routing، إدارة المخزون inventory، التحكم في درجة الحرارة control temperature). وكان ذلك بناء على

مراجعة منهجية وتحليل تصنيفي للنماذج الرياضية والمحاكاة، من خلال أبحاث متخصصة ونماذج محاكاة من مختلف البلدان. وتوصلت الدراسة إلى أن الأدبيات تزخر بنماذج تحسين لكن هناك فجوات في دمج المتغيرات البيئية والبيانات اللحظية. وأوصت الدراسة بضرورة دمج نماذج هجينة تجمع بين البيانات IoT والقيود البيئية وإدراج استدامة من مصدر التصميم.

وهدفت دراسة (Nozari et al., 2025) إلى اقتراح نموذج AIOT لتقليل التكاليف التشغيلية مع الحفاظ على جودة المنتجات المبردة وبناء نموذج رياضي/تحسين مع محاكاة(modeling + numerical experiments) . وكان ذلك عبر محاكاه شبكة توزيع افتراضية مع بيانات سيناريوهات. وأشارت النتائج إلى خفض ملحوظ في التكاليف التشغيلية إلى جانب المحافظة على متطلبات الجودة وذلك عند تطبيق AIOT في سلاسل التبريد. وأوصت الدراسة بالتالي بضرورة تبنّي AIOT عمليًا مع الاهتمام بأمن البيانات والتكاليف الأولية.

ب الدراسات السابقة التي تناولت الذكاء الاصطناعي:

هدفت دراسة (Mustafa et al., 2024) إلى تقديم خارطة طريق للبحوث المستقبلية في الذكاء الاصطناعي في التعليم من خلال مراجعة منهجية للأدبيات من خلال مراجعات دراسات AIED المنشورة سابقًا. وقد استطاعت الدراسة تحديد فجوات موضوعية مثل قلة التحليل التجريبي، ونقص التداخل مع أهداف التنمية المستدامة. وأوصت الدراسة في النهاية بضرورة توجيه البحث نحو تطبيقات أكثر تجريبية، دمجSDG ، واعتماد منهجيات متعددة التخصصات.

وهدفت دراسة (Wang et al., 2025) إلى استكشاف استخدامات GenAI في الممارسات التعليمية بين 2022 و2024. واعتمدت الدراسة في ذلك على مراجعة منهجية للدراسات التجريبية (28 دراسة). توصلت الدراسة إلى إثبات أن GenAI حسّن الكفاءة التعليمية، التفاعل، والتفكير النقدي، لكنه أظهر بعض تحديات في الدقة والانحياز. كانت من ضمن توصيات الدراسة ضرورة استخدام GenAI بشكل مساعد في الممارسات التعليمية، تحليل التأثيرات طويلة الأمد، وربطها بالأهداف العالمية.

بينما هدفت دراسة (Akour et al., 2024) إلى دراسة قبول الذكاء الاصطناعي في التعليم العالي في الإمارات عبر نموذج ممزوج بين SEM وخوارزمياتML . وكان ذلك من خلال توزيع استبيان على عينة قوامها 466 مفردة مكونة من طلاب ومعلمون من جامعات الإمارات العربية المتحدة. وقام الباحث باستخدام تحليل SEM وتصنيف باستخدام خوارزميةJ48 . وتوصلت الدراسة إلى وجود تأثير إيجابي لعوامل مثل التوافق وسهولة الاستخدام وأوصت بضرورة تحسين البرامج التدريبية وبيئة الاستخدام لتبني AI في التعليم.

وكان هدف دراسة (Derinalp, 2024) إلى تحليل تطور أبحاث AI في التعليم عبر الزمن من خلال تحليل ببليومتري لعدد ونمو المؤلفات (من 1989 حتى 2023) من خلال لبيانات تم جمعها من بيانات من Web of Science. واستطاعت الدراسة التوصل إلى أن هناك زيادة واضحة منذ 2015، للتركيز على التعليم العالي والتعلم التكيفي. وأوصت ب تشجيع الأبحاث التطبيقية وتوسيع نطاق التحليل الجغرافي.

وهدفت دراسة (Chen et al., 2025) إلى تصنيف تطبيقات الذكاء الاصطناعي في البحث العلمي وتحليل الثغرات. واعتمدت الدراسة على مسح شامل وتصنيف وتجميع موارد تطبيقات LLMs والأدوات التلقائية في مجالات علمية متعددة. صنفت الدراسة خمس مهمات أساسية لـ AI في البحث وهي اكتشاف المعرفة، إنتاج الفرضيات، تصميم التجارب وتنفيذها، تحليل البيانات، والنشر والتواصل العلمي؛ ولاحظت وجود نقص في قابلية التوسع وشفافية التجارب في الأنظمة الحالية عند التعامل مع بيانات ضخمة جدًا.

ج الدراسات السابقة التي تناولت علاقة الذكاء الاصطناعي بسلاسل التبريد:

قامت دراسة (Jackson et al., 2024) من أجل دراسة كيف يمكن لأدوات AI/ML تحسين التنبؤ بالسعة وإدارة الطلب في السلاسل الباردة. قامت الدراسة على تطبيق نماذج ML (Prophet, SARIMA, XGBoost/LSTM hybrids) على بيانات تشغيلية من شركات تبريد/موزعين) حالات تطبيقية، بما في ذلك Americold كحالة مرجعية. الدراسة إلى أن نماذج هجينة (LSTM+XGBoost) حسّنت الدقة مقارنة بنماذج تقليدية في كثير من السيناريوهات؛ لكن في بعض الحالات المتفوقة SARIMA للبيانات القصيرة المدى. وأوصت الدراسة في النهاية بضرورة دمج النماذج التقليدية مثل المحاكاة البسيطة والنماذج الإحصائية، مع النماذج الحديثة مثل خوارزميات التعلم الآلي والشبكات العصبية يحسن م جودة البيانات ويجعلها دقيقة وكاملة.

وهدفت دراسة (Fatorachian, Pawar, 2023) تقييم كيف تساعد نماذج التنبؤ القائمة على AI و IoTفي تقليل هدر الأغذية في السلاسل الباردة. وكان ذلك من خلال مراجعة منهجية وتحليل مقارن لنماذج تنبؤية (ARIMA, ML, DL) وإثباتها على بيانات حالة لشركات لوجستية، شركات أدوية، وقطاع الأغذية. وكان من أبرز النتائج أن دمج AI مع IoT يؤدي إلى تقليل نفايات الغذاء وتحسين المردود؛ لكن تظل هناك حاجة لبيانات مستمرة وموحدة. وبالتالي أوصت الدراسة بضرورة اعتماد أنظمة قياس لحظية، تبادل بيانات ممنهج، ومقاييس أداء موحدة.

وهدفت دراسة (Prasad, 2025) إلى مناقشة اتحاد بين الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء لتحسين المراقبة اللحظية، التنبؤ والصيانة التنبؤية في السلاسل الباردة. وقامت الدراسة بناء على مراجعة أدبيات شاملة لبناء إطار نظري مفاهيمي يبين أوجه القصور والفجوات البحثية ومن ثم تصميم نموذج علمي يوضح كيف يمكن تطبيق الذكاء الاصطناعي في لوجستيات التبريد. كما تم دعم النموذج من خلال محاكاة توضيحية اعتمدت على بيانات تجريبية بهدف اختبار قابلية تطبيقه وقياس فعاليته في تحسين الكفاءة والاعتمادية. وأكدت النتائج أن تبني هذه الأدوات يسهم في رفع الكفاءة والاعتمادية التشغيلية، بينما أوصت بضرورة بناء حلول متكاملة تعالج قضايا الأمان والخصوصية، بجانب الحاجة لإجراء تجارب ميدانية واسعة النطاق لقياس الأثر الفعلي للتطبيقات المقترحة.

وكان الهدف من دراسة (Elashmawyet aI., 2025) هو طوير نهج يعتمد على الذكاء الاصطناعي لتقييم جودة المنتجات الزراعية في سلاسل التبريد. ركزت الدراسة على حالة تطبيقية تخص الفراولة، حيث جُمعت بيانات من حساسات الحرارة أثناء مراحل النقل والتسويق، وتم توظيفها في نماذج تنبؤية قائمة على الذكاء الاصطناعي. اعتمدت المنهجية على مزيج من التجارب المخبرية والتجارب الميدانية بهدف محاكاة ظروف التوزيع الحقيقية. وأظهرت النتائج قدرة النماذج على التنبؤ بمستوى النضارة وقابلية التسويق بدقة عالية، بما يتيح تحسين قرارات التخزين والتوزيع وتقليل الفاقد. وأوصت الدراسة بضرورة تبني أنظمة مراقبة مستمرة تعتمد على الحساسات والذكاء الاصطناعي لتطوير حلول تنبؤية تسهم في تقليل الهدر وتحقيق استدامة أفضل في سلاسل التبريد.

وتعليقاً على الدراسات السابقة بشكل عام يتضح ما يلي:

1. أن موضوع الذكاء الاصطناعي وسلاسل التبريد قد تمت معالجته من زوايا متباينة، وهو ما يثري المجال ولكنه في الوقت ذاته يكشف عن ثغرات بحثية تحتاج إلى معالجة.
2. هذه الدراسات أبرزت تحديات سلاسل التبريد وهي البنية التحتية، الطاقة، إدارة التوزيع، والتحسين التشغيلي، واقترحت حلولاً عملية مثل التوزيع المشترك، النماذج الهجينة، ودمجAIOT.
3. معظم الدراسات اعتمدت على مراجعات أدبيات أو نماذج محاكاة، مع قلة الدراسات الميدانية الواسعة التي تختبر الحلول عملياً في بيئات تشغيلية متعددة.

4. دراسة (Zhang & Mohamed, 2024) ودراسة (Xu et al., 2023) قدموا رؤية كلية استراتيجية حول استدامة السلاسل، بينما (Iyer & Robb., 2025) و (Nozari et al., 2025)ركزوا على النمذجة الرياضية والتقنيات الحديثة لخفض التكاليف وتحسين الكفاءة.
5. تقدم أساساً لفهم كيف يمكن تبني AI في بيئات متعددة، وتكشف عن فجوات مثل *الشفافية، والتحليل التجريبي، وقابلية التوسع* التي يمكن أن تنعكس على تطبيقات سلسلة التبريد.
6. ركزت الأبحاث (Jackson et al., 2024; Fatorachian & Pawar, 2023; Prasad, 2025; Elashmawy et al., 2025) على التنبؤ بالطلب، تقليل الهدر الغذائي، الصيانة التنبؤية، وتقييم جودة المنتجات المبردة باستخدامAI/IoT .
7. كان من أبرز أشكال القصور في هذه الأبحاث:

- معظم الدراسات ركزت على دراسات حالة ضيقة (منتج أو شركة واحدة).
- ضعف في التحقق الميداني واسع النطاق (scalability).
- قضايا مثل الأمن السيبراني، تكاليف التنفيذ، والاعتمادية طويلة الأمد لم يتم معالجتها بعمق.

وبالتالي يمكن تحديد الفجوة البحثية في الحاجة إلى دراسات تكاملية شاملة تجمع بين النماذج النظرية كما عند (Prasad, 2025)والتطبيقات الميدانية كما عند (Elashmawy, 2025) مع إدماج أبعاد الاستدامة، الأمان، والتوسع الدولي.

ثانياً: الإطار العام للدراسة:

أ مشكلة الدراسة:

على الرغم من التوسع في تطبيق الذكاء الاصطناعي في سلاسل التبريد، تظهر الدراسات الحديثة فجوات واضحة على المستويات التشغيلية والتنظيمية مثل نقص الدراسات الميدانية الواسعة النطاق مثل دراسة (Xu et al., 2023) أشارت إلى أن أكثر من 70% من الدراسات حول سلاسل التبريد تعتمد على مراجعات أدبية أو نماذج محاكاة، مع غياب البيانات الميدانية الشاملة. ودراسة (Nozari et al., 2025)التي وجدت أن تنفيذ حلول AIOT على نطاق تجريبي قلل التكاليف بنسبة 18–22%، لكن تم تطبيقها على شبكات محدودة فقط، مما يحد من التعميم. بالإضافة إلى وجود قصور في التكامل بين الذكاء الاصطناعي وسلاسل التبريد مثل دراسة (Jackson et al., 2024) حيث أظهرت أن نماذج التنبؤ الهجينة (LSTM + XGBoost) حسّنت دقة إدارة الطلب بنسبة 15–20% مقارنة بالنماذج التقليدية، إلا أن دمج هذه النماذج مع نظم التشغيل الفعلية لا يتجاوز 30% من شركات السلاسل الباردة المدروسة. كما لوحظ نقص في التركيز على الأبعاد العملية والتنظيمية مثل دراسة (Fatorachian & Pawar., 2023)، بينت أن 65% من شركات اللوجستيات لم تعتمد بروتوكولات أمان وحماية البيانات عند استخدام الذكاء الاصطناعي معIoT ، ما يشكل تهديدًا للأمن السيبراني ودراسة (Elashmawy et al., 2025)أظهرت أن تطبيق نظم AI لتحسين مراقبة جودة الفراولة أدى لتقليل الهدر بنسبة 25%، لكن التكلفة الأولية للتقنيات الجديدة ارتفعت بنسبة 40%، مما يحد من انتشارها. كما يتبين أن هنا حاجة لحلول متكاملة ومستدامة مثل ما أكدت دراسة (Iyer & Robb, 2025)، أن هناك فجوات تصل إلى 50% في دمج المتغيرات البيئية والبيانات اللحظية ضمن نماذج تحسين سلاسل التبريد، مما يشير إلى ضعف دمج الاستدامة في التصميم التشغيلي.

والخلاصة أنه بالرغم من الإمكانات الكبيرة للذكاء الاصطناعي في تحسين الكفاءة، مراقبة الجودة، والتقليل من الهدر، إلا أن محدودية البيانات الميدانية، نقص التكامل التشغيلي، ارتفاع التكاليف، وضعف اعتماد معايير الأمان

والاستدامة يعيق تحويل هذه الإمكانات إلى تطبيقات عملية واسعة النطاق. ومن خلال ما سبق يمكننا تحديد أسئلة الدراسة في الآتي:

1. كيف يُستخدم الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة سلاسل التبريد؟
2. ما هي الفجوات والتحديات المرتبطة بتطبيق الذكاء الاصطناعي في سلاسل التبريد؟
3. كيف يمكن تطوير حلول متكاملة تعتمد على الذكاء الاصطناعي لتعزيز الأداء التشغيلي وضمان الاستدامة في سلاسل التبريد؟

ب هدف الدراسة:

يهدف هذا البحث إلى تحليل دور الذكاء الاصطناعي في تعزيز كفاءة وسلامة سلاسل التبريد من خلال مراجعة الأدبيات العلمية الحديثة، وذلك عبر:

1. استكشاف التطبيقات الحالية للذكاء الاصطناعي في سلاسل التبريد، بما يشمل التنبؤ بالطلب، إدارة المخزون، تحسين التخطيط اللوجستي، مراقبة الجودة اللحظية، والصيانة التنبؤية.
2. تحديد الفجوات البحثية والتحديات العملية المرتبطة بتطبيق الذكاء الاصطناعي في سلاسل التبريد.
3. اقتراح حلول متكاملة قابلة للتطبيق لتعزيز الأداء التشغيلي وضمان استدامة سلاسل التبريد، من خلال دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي.

ج أهمية الدراسة:

1. الأهمية العلمية:

- توفر هذه الدراسة فهمًا معمقًا لكيفية توظيف الذكاء الاصطناعي في سلاسل التبريد، بما يشمل تحسين الكفاءة التشغيلية، تقليل الهدر، وضمان جودة المنتجات.
- تحدد الفجوات البحثية والتحديات العملية، مثل الأمن السيبراني، تكاليف التنفيذ، ودمج البيانات اللحظية، ما يسهم في توجيه البحوث المستقبلية نحو حلول أكثر فعالية واستدامة.
- تساهم الدراسة في بناء قاعدة معرفية متكاملة لدمج الذكاء الاصطناعي مع تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) وأطر الاستدامة البيئية، ما يدعم تطوير نماذج تطبيقية قابلة للتوسع في بيئات صناعية متنوعة.

2. الأهمية الشخصية:

- تساعد هذه الدراسة الباحثين والممارسين في قطاع اللوجستيات وسلاسل التبريد على فهم الإمكانات الحقيقية للذكاء الاصطناعي، وتطبيقها بشكل علمي وفعال لتحسين أداء العمليات.
- توفر توصيات عملية للمنظمات والشركات حول كيفية دمج الذكاء الاصطناعي في العمليات اليومية مع مراعاة الأمن، الكفاءة، وتقليل الهدر، مما يزيد من قدرتهم التنافسية.
- تمكن الأفراد المعنيين من اتخاذ قرارات مستنيرة حول الاستثمار في تقنيات الذكاء الاصطناعي وتطوير مهاراتهم للتكيف مع التحول الرقمي المستقبلي في هذا القطاع الحيوي.

د حدود الدراسة:

1. **الحدود المكانية:**
   - تركز الدراسة على سلاسل التبريد المستخدمة في الصناعات الغذائية والزراعية، مع مراعاة الأمثلة التطبيقية من الدراسات الحديثة في عدة دول (مثل الصين، الولايات المتحدة، أوروبا)، بدون التعميم على جميع الصناعات الأخرى.
2. **الحدود الزمنية:**

- تعتمد الدراسة على الأدبيات المنشورة في الفترة بين **2025–2015**لضمان تناول أحدث التطورات في الذكاء الاصطناعي وسلاسل التبريد.

3. **الحدود المنهجية:**

- تمثل الدراسة مراجعة منهجية للأدبيات، أي أنها لا تشمل تطبيقات ميدانية أصلية من الباحث، وتعتمد على تحليل الدراسات السابقة والتجارب المنشورة.

4. **الحدود الموضوعية:**

- تركز الدراسة على العلاقة بين الذكاء الاصطناعي وكفاءة وسلامة سلاسل التبريد، مع التركيز على تحسين الكفاءة التشغيلية، مراقبة الجودة، تقليل الهدر، ودعم الاستدامة.

ثالثاً: الإطار النظري للدراسة:

أ سلاسل التبريد Cold Chains:

1. مفهوم سلاسل التبريد:

ظهر مصطلح لوجستيات سلاسل التبريد عام 1894م، من قبل باریر الأمريكي وبريدتش البريطاني. هذا المصطلح يعبر بشكل دقيق عن خلق شبكة لوجستية مجهزة بمعدات خاصة وقادرة على الحفاظ على جودة الأغذية المجمدة والمبردة في بيئة حرارية منخفضة من الإنتاج الى الاستهلاك(Zheng et al; 2021) . وتتضمن سلسلة التبريد نقل المنتجات الحساسة لدرجة الحرارة على طول سلسلة التوريد من خلال طرق التعبئة الحرارية والمبردة والتخطيط اللوجستي لحماية سلامة هذه الشحنات. وهناك العديد من الوسائل التي يمكن من خلالها نقل منتجات سلسلة التبريد، بما في ذلك الشاحنات المبردة وعربات السكك الحديدية، وسفن الشحن المبردة، والثلاجات، والشحن الجوي (Rodrigue & Notteboom; 2020) .

ووفقا للقاموس الدولي للتبريد، فإن سلسلة التبريد هي "مصطلح يرمز إلى استمرارية الوسائل المستخدمة على التوالي لتوفير الحفظ المبرد للمواد الغذائية القابلة للتلف من مرحلة الإنتاج إلى مرحلة الاستهلاك (Hongxia et al; 2018).

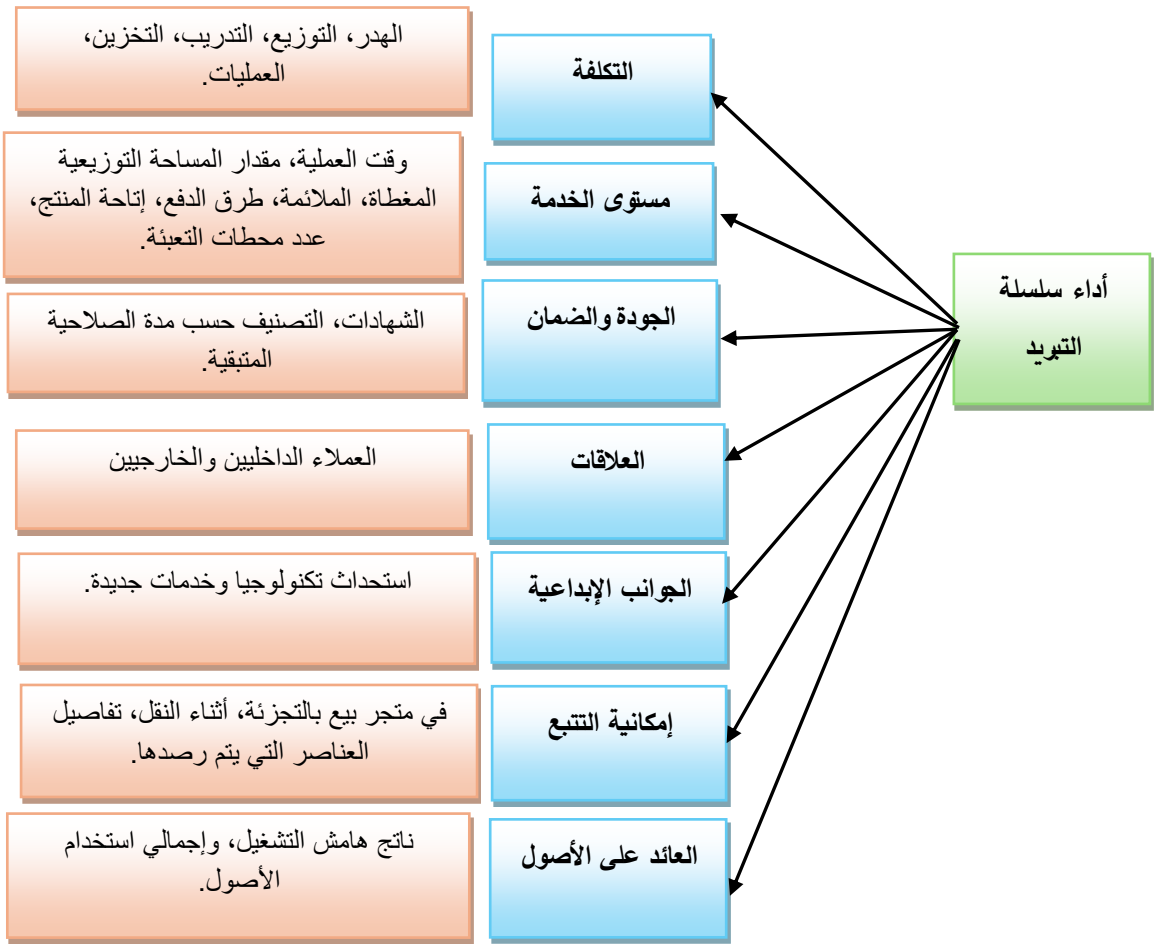
تعرف سلاسل التبريد بأنها منظومة من العمليات اللوجستية المصممة لضمان الحفاظ على درجة حرارة محددة للمنتجات الحساسة للحرارة، مثل الأغذية الطازجة، الأدوية، واللقاحات، بدءًا من مرحلة الإنتاج مرورًا بالتخزين والنقل وصولًا إلى المستهلك النهائي، بهدف الحفاظ على الجودة والسلامة وتقليل الفاقد (Inbound Logistics, 2025).

2. أهمية سلاسل التبريد:

تعد سلاسل التبريد من العناصر الحيوية في الحفاظ على جودة وسلامة المنتجات الغذائية الطازجة، وتقليل الفاقد وتحسين رضا المستهلك. أظهرت الدراسات الحديثة أن التطورات التكنولوجية في سلاسل التبريد ساهمت بشكل كبير في تحسين عمليات النقل والتخزين وتقليل المخاطر المرتبطة بتدهور المنتجات(Xue et al., 2023) . ومع ذلك، تواجه سلاسل التبريد تحديات كبيرة فيما يخص الاستدامة البيئية والاستهلاك العالي للطاقة، بالإضافة إلى نقص المهارات الفنية للقوى العاملة، ما يستدعي تطوير سياسات داعمة للتحول الأخضر وتدريب العاملين (Zhang & Mohamed, 2024). من جانب آخر، أظهرت مراجعات النماذج الرياضية والتحليلية أن التحسين في سلاسل التبريد من خلال التخطيط الأمثل للطرق، إدارة المخزون والتحكم في درجة الحرارة يمكن أن يقلل من الفاقد والهدر، ويزيد الكفاءة الاقتصادية دون المساس بجودة المنتجات(Iyer & Robb, 2025) . لذلك، يمثل الجمع بين الإدارة الفعالة والتقنيات الحديثة عنصرًا أساسيًا لتعزيز أداء سلاسل التبريد على الصعيدين الاقتصادي والبيئي.

3. العوامل التي تؤثر على أداء سلسلة التبريد:

لخصت دراسة (Joshi et al; 2012) العوامل التي يمكن أن تؤثر على أداء سلسلة التبريد في سبعة عوامل يلخصها الشكل التالي:



شكل (1): العوامل التي تؤثر على أداء سلسلة التبريد.

المصـــدر: Joshi et al; (2012)، Performance improvements of cold chain in an emerging economy, p11.

وفيما يلي شرح مفسر للشكل السابق:

- التكلفة: تتمثل التكلفة في النفقات الخاصة بتشغيل سلسلة التبريد، والتي تتمثل في (تكلفة التلفيات، التشغيل والعمليات، الصيانة)؛ وكلما انخفضت التكلفة كلما زادت القدرة التنافسية.
- مستوى الخدمة: القدرة على تلبية احتياجات العملاء؛ ويمكن أن تتمثل في مميزات تتميز بها الشركة مقدمة الخدمة عن غيرها من الشركات مثل (تغطية نطاق أوسع في التسليم، طرق دفع مختلفة، ساعة فتح أطول).
- الجودة والسلامة: يتم تعريفها على أنها متطلبات العملاء للسلامة ومستوى النظافة ونضارة المنتج؛ وقد بدأ الاهتمام بهذا العنصر من قبل العملاء تدريجياً في السنوات الأخيرة.
- العلاقات: تعنى العلاقات بين المورد والعميل والموظف كذلك، وتؤدي العلاقات المتناغمة إلى أداء أفضل لسلسلة التبريد.

- الجوانب الإبداعية: يمكن تفسيرها على أنها أفكار إبداعية وتحسينية في كل من (الخدمة – التكنولوجيا – التسويق) في سلسلة التبريد، والتحسين المستمر المبني على الابتكار.
- التتبع: هو عملية تتبع المعلومات الخاصة بالمنتج على طول السلسلة. وهذه المعلومات يمكن أن تكون (معلومات المعاملات- معلومات الحالة مثل: درجة الحرارة، الموقع، مقدار الجودة، ومدة الصلاحية).
- العائد على الأصول: يشير العائد على الأصول إلى القدرة على إجراء الإنتاج وتحقيق الربح واستخدام أصول التبريد والموارد البشرية بكفاءة لتحقيق الهدف المتمثل في تكلفة أقل وجودة مستقرة.

4. التحديات التي تواجه سلاسل التبريد:

على الرغم من الأهمية الحيوية لسلاسل التبريد في الحفاظ على جودة وسلامة المنتجات الغذائية والدوائية، إلا أنها تواجه مجموعة من التحديات المزمنة والمعاصرة التي تحد من كفاءتها واستدامتها. يمكن تصنيف هذه التحديات في ثلاثة محاور رئيسية مترابطة:

1/4. التحديات الهيكلية والتشغيلية

- **عدم كفاية السعة التخزينية والتوزيعية** :أشارت تقارير *Clinton Health Access Initiative*إلى أن النمو السكاني وتنوع الاحتياجات يؤدي إلى ضغوط متزايدة على سعة سلاسل التبريد، في ظل غياب نظم دقيقة للتنبؤ بالاحتياجات المستقبلية أو التنفيذ الفعّال لتوسعة القدرات(Ashok et al., 2017) .
- **مشاكل البنية التحتية** :ضعف شبكات النقل المبرد، ارتفاع تكاليف الإنشاء والتشغيل، واعتماد بعض البلدان على معدات قديمة منخفضة الكفاءة، كلها عوامل تقلل من قدرة السلاسل على تلبية الطلب المتزايد (Zhang & Mohamed, 2024)؛(Shi et al., 2024) .
- **التوزيع التقليدي غير التشاركي** :أظهرت الأدبيات أن الاعتماد على أنماط النقل الفردية يزيد من التكاليف والانبعاثات، بينما يظل تطبيق نماذج التوزيع المشترك بحاجة إلى تنسيق عالٍ بين الأطراف المختلفة (Shi et al., 2024).

2/4. التحديات التقنية والتكنولوجية

- **غياب أو تقادم التقنيات الحديثة** :وجود معدات قديمة ذات عمر افتراضي قصير وضعف في ضبط درجات الحرارة يعرض المنتجات للخطر ويؤدي إلى فقد الجودة، كما أن ارتفاع أسعار المعدات الحديثة أو فشل بعض التجارب (مثل البطاريات الشمسية) أدى إلى إحجام الدول عن تبنيها(Ashok et al., 2017) .
- **ضعف التكامل الرقمي** :رغم توفر حلول رقمية مثل إنترنت الأشياء (IoT) والذكاء الاصطناعي(AI) ، فإن الاعتماد عليها لا يزال محدوداً. فالأدبيات تشير إلى وجود فجوات في دمج البيانات اللحظية (real-time data)في النماذج التشغيلية، إضافة إلى قصور في استغلال التحليلات التنبؤية(Iyer & Robb, 2025) ؛ (Nozari et al., 2025).
- **محدودية أنظمة المراقبة الذكية** :لا تزال كثير من المرافق تعتمد على أدوات تقليدية مثل موازين الحرارة اليدوية، ما يجعل اكتشاف حالات التجمد أو ارتفاع الحرارة تحدياً كبيراً. كما أن ضعف تدريب الفنيين وندرة قطع الغيار يضاعف من صعوبة الصيانة(Ashok et al., 2017) ؛(Xu et al., 2023) .

3/4. التحديات البيئية والاستدامة

- **الاستنزاف الطاقي والانبعاثات** :تستهلك سلاسل التبريد كميات كبيرة من الطاقة، وتساهم في انبعاثات غازات الدفيئة بدرجات متفاوتة، خاصة مع ضعف إدماج مصادر الطاقة المتجددة أو تقنيات التبريد منخفضة الكربون(Zhang & Mohamed, 2024) .

- **نقص الوعي والسياسات الداعمة** :أظهرت الدراسات أن غياب استراتيجيات وطنية متكاملة وضعف التنسيق بين الإدارات يعوقان وضع حلول طويلة الأمد، سواء على صعيد كفاءة الطاقة أو تطوير البنية التحتية المستدامة(Xu et al., 2023) .

يتضح من دمج الأدبيات الكلاسيكية (Ashok et al., 2017) بالدراسات الحديثة(Xu et al., 2023 ؛ Nozari et al., 2025) ؛ Iyer & Robb, 2025؛ Shi et al., 2024؛Zhang & Mohamed, 2024 أن التحديات التي تواجه سلاسل التبريد لم تعد تقتصر على مشكلات البنية التحتية والمعدات القديمة فقط، بل اتسعت لتشمل قضايا أكثر تعقيداً تتعلق بالتحول الرقمي، إدارة البيانات اللحظية، واستدامة الطاقة. وبالتالي، فإن أي مسار إصلاحي يتطلب مقاربة شمولية تجمع بين: التوسعة الهيكلية، التحديث التقني، التكامل الرقمي، والسياسات البيئية طويلة الأمد.

5. خصائص لوجستيات سلسلة التبريد:(Stanton et al; 2019)

يمكننا وصف سلسلة التبريد على أنها دورة حياة يتم التحكم فيها بيئياً لسلعة واحدة أو مجموعة سلع، وسلسلة التبريد اللوجستية تعتبر "مشروعا نظاميا لضمان جودة وأداء البضائع في الإنتاج، والتخزين، والنقل، والمبيعات، وجميع الجوانب" من بداية دورة حياة المنتج المؤدية إلى نقطة الاستهلاك. ويحتوي الأصل الفردي إما على سلسلة تبريد مستمرة أو مكسورة. إن الآلات العامة لتخزين الأصول وتسليمها ونقلها هي لوجستيات سلسلة التبريد. قد تختلف أهمية الخصائص التالية عبر أنواع مختلفة من الأصول، ولكن لا يزال يجب أخذها في الاعتبار على الأقل بطريقة ما لتحديد فعالية نظام لوجستيات سلسلة التبريد.

- الحساسية البيئية:

كل الأصول حساسة للظروف البيئية القاسية؛ الحرارة الزائدة تفسد اللقاحات، الرطوبة الزائدة تغذي نمو العفن، كما يمكن للضوء الزائد تدمير بعض المواد الكيميائية والأفلام. وهناك العديد والعديد من الأمثلة الأخرى للعوامل البيئية المدمرة مثل: الاهتزاز، تكوين الغاز، الضغط، الإشعاع.

يمكن الاحتفاظ بمعظم الأصول في ظروف الغلاف الجوي القياسية (أي البيئة المحيطة) لفترة زمنية متواضعة دون التعرض لأضرار؛ ولكن لا يمكننا افتراض أو الاعتماد على هذه الأنواع من الفجوات في سلسلة التبريد، في حين أننا غالبا ما نحتاج إلى التحكم في المعايير البيئية أثناء تصنيع الأصول وتخزينها ونقلها لضمان فعالية الأصل؛ فمن غير المعقول أن ننفق ما هو أبعد من قيمة الأصل. وبالنسبة لسلاسل لإمداد الغذائية، فإن التوجيه العام هو أن التكاليف اللوجستية يجب ألا تتجاوز 50 ٪ من تكلفة الغذاء. بينما يصعب تطبيق هذا المبدأ على المستحضرات الصيدلانية؛ حيث قد تكون التكاليف معروفة ولكن يصعب تحديد القيمة المجتمعية؛ فلقاح غير فعال قد يؤدي إلى وفاة الإنسان، والأسوأ من ذلك، أن المريض الذي نعتقد أنه تم تلقيحه ولكنه لا يزال في خطر حقا يمكن أن يصبح عن غير قصد ناقلا للعدوى للمرضى الآخرين.

- العديد من المعالجات :

يتعامل العديد من الأطراف مع اللقاح خلال دورة حياته؛ فأولا يجب تصنيع اللقاح في المختبر، ثم يتم جمعه للنقل، وبعد ذلك قد يحدث النقل لمسافات طويلة باستخدام وسائط نقل متعددة مثل: البر، أو البحر، أو الجو. وأخيرا، يجلب التسليم المحلي اللقاح إلى الشخص الذي سيتلقى الدواء. وينطبق الأمر ذاته على المواد الغذائية التي يتم تحصيلها من المزرعة، ثم نقلها داخلياً إلى غرف التجهيز والتعبئة، ومن ثم نقلها إلى تجار الجملة، ثم إلى تجار التجزئة، وأخيرا إلى المستهلك النهائي.

وعبر هذه المراحل، هناك غموض فيما يتعلق بمن فعل ماذا، وإلى متى، وإلى أي تأثير. وبالتالي، فإن ظهور واعتماد الحوسبة السحابية في مجال لوجستيات التبريد قد جعل من السهل على كل معالج تسجيل البيانات في قواعد البيانات وإبقاء جميع الأطراف المعنية على علم بحالة سلسلة التبريد. وفي الوقت نفسه، تعمل المستشعرات وأجهزة إنترنت الأشياء على تبسيط جمع وتسجيل المعلومات البيئية أثناء كل مرحلة من مراحل سلسلة التبريد. ولكن لا تزال هناك مخاوف كبيرة بشأن أدلة التحكم من قبل طرف معين داخل سلسلة التبريد. إذ يجب أن تكون ملفات السجل غير قابلة للتغيير ولا تنسى حتى يتم اعتبارها دليلا حقيقيا على التحكم.

- ظروف التشغيل غير المتجانسة:

كانت هناك محاولات عديدة لإنشاء أطر لوصف فائدة أنظمة لوجستيات سلسلة التبريد، خاصة بالنسبة للغذاء؛ حيث يوجد عادة معالج مختلف لكل مرحلة من مراحل سلسلة التبريد ،على سبيل المثال، (التخزين مقابل التسليم المحلي)، ويعني عدم تجانس المدخلات والمخرجات للمراحل المختلفة أنه لا يمكننا افتراض حاوية واحدة واستخدام نفس نوع الاتصال لمراقبة سلسلة التبريد من البداية إلى النهاية؛ وقد أدت حقيقة ظروف التشغيل غير المتجانسة هذه إلى تحسين التركيز على مرحلة واحدة من سلسلة التبريد، بينما يجب أن نسعى جاهدين لتحسين ما في وسعنا، إلا أنه من الضروري تحسين مرحلة واحدة بشكل مفرط وأكثر تركيزاً ،على سبيل المثال،(مراكز التوزيع الإقليمية) مع انخفاض الاهتمام بمرحلة أخرى ،على سبيل المثال، (التسليم المحلي).

ب الذكاء الاصطناعي Artificial Intelligence:

أصبح الذكاء الاصطناعي (AI) محورياً في تطوير الأعمال والبحث العلمي والخدمات، حيث يوفر أدوات متقدمة لمعالجة البيانات، التنبؤ بالنتائج، ودعم اتخاذ القرار. أظهرت الدراسات الحديثة أن تطبيق الذكاء الاصطناعي يمكن أن يعزز الكفاءة التشغيلية، تحسين جودة الخدمات، ودعم الابتكار في القطاعات المختلفة، بما في ذلك التعليم والخدمات اللوجستية (Mustafa et al., 2024) ؛(Wang et al., 2025) . ومن بين التطبيقات الأكثر شيوعاً، توظيف نماذج التعلم الآلي والشبكات العصبية العميقة للتنبؤ، التحليل التكيفي، واكتشاف الأنماط في البيانات الكبيرة (Derinalp, 2024).

1. مفهوم الذكاء الاصطناعي:

يُعرّف الذكاء الاصطناعي (AI) على أنه مجموعة من النظم والخوارزميات القادرة على محاكاة القدرات البشرية مثل التعلم، التنبؤ، اتخاذ القرار، والتفاعل مع البيئة المحيطة. وقد توسع تطبيقه بشكل لافت في العقد الأخير داخل قطاعات التعليم، الصحة، اللوجستيات، والحوكمة. وتُجمع الأدبيات الحديثة على أن قيمة الذكاء الاصطناعي لا تكمن فقط في زيادة الكفاءة التشغيلية، بل أيضًا في دعمه للتحولات الاستراتيجية نحو الاستدامة والرقمنة (Mustafa et al., 2024; Chen et al., 2025).

في قطاع التعليم مثلًا، أظهرت دراسات حديثة كيف أن دمج تقنيات التعلم الآلي (ML) والنماذج التوليدية (GenAI)أسهم في رفع مستويات التفاعل والتفكير النقدي، لكنه أظهر أيضًا تحديات متعلقة بالانحياز والدقة. وهو ما يعكس أهمية التوظيف المسؤول للتقنيات الذكية، مع ضرورة وضع أطر حوكمة ومعايير جودة تضمن الاستخدام الآمن والفعّال(Wang et al., 2025; Derinalp, 2024) .

أما على مستوى البنية التحتية الرقمية، فإن الدراسات تؤكد أن توافر البيانات الضخمة (Big Data) وإنترنت الأشياء (IoT) يمثل شرطًا أساسيًا لتحقيق فعالية الذكاء الاصطناعي. فبدون تدفق البيانات اللحظية، لا يمكن للنماذج الذكية بناء توقعات دقيقة أو اتخاذ قرارات مبنية على الواقع الفعلي (Akour et al., 2024; Chen et al., 2025).

وبالرغم من هذه الإمكانيات الكبيرة، فإن تبني الذكاء الاصطناعي ما يزال يواجه عقبات تتعلق بـ مقاومة التغيير، نقص الكفاءات البشرية، وغياب الأطر القانونية الواضحة، ما يجعل من الضروري النظر في كيفية سد هذه الفجوات لتحقيق أقصى استفادة ممكنة(Mustafa et al., 2024; Wang et al., 2025) .

2. أهمية الذكاء الاصطناعي: (العريمي وآخرون، 2023)

- تحسين تخصيص الموارد: من خلال تحليل البيانات والتنبؤ بالطلب المستقبلي مما يمكن الشركات من تخصيص أفضل للموارد بشكل فعال وكفء.
- تحسين تجربة العملاء: من خلال توفير خدمة مخصصة مما يؤدي لارتفاع معدلات الرضا.
- تعزيز الكفاءة: حيث يمكن للذكاء الاصطناعي أتمتة المهام الشاقة والمستهلكة للوقت، مثل إدخال البيانات وتحليلها.
- زيادة الدقة، بحيث يمكن للذكاء الاصطناعي أن يحلل كمية كبيرة من البيانات، ويجري تنبؤات دقيقة ويقلل الأخطاء ويساعد في تحسين جودة الخدمات.
- تخصيص الخدمات: وذلك من خلال تحليل بيانات العملاء وتفضيلاتهم لتقديم توصيات وخدمات مخصصة مما يؤدي لزيادة ولاء العملاء.
- تمكين الصيانة: من خلال تحليل البيانات والتعرف على أسباب الأعطال مما يقلل من معدل توقف العمل.

3. تحديات الذكاء الاصطناعي:

وقد حددت دراسة (El Bhilat et al; 2024)، من خلال الاستعانة بدراسات سابقة عليها، بعض التأثيرات والتحديات التي تواجه الذكاء الاصطناعي في مختلف الأصعدة؛ نتناولها في الجدول التالي:

جدول (1): الذكاء الاصطناعي: تأثيرات وتحديات.

الذكاء الاصطناعي AI	
التأثيرات	التكنولوجية: • يمكن تحديد البيانات السيئة وتنظيفها، وتوفير منظور للبيانات النظيفة. • زيادة سرعة البيانات من خلال تمكين قرارات الكمبيوتر السريعة التي تؤثر على القرارات الأخرى. • تقليل التنوع من خلال الحصول على البيانات غير المنظمة وتنظيمها وفهمها وإنتاج بيانات منظمة. • تحليل البيانات واتخاذ القرارات.
	الاجتماعية: • الجمع بين خبرة العديد من البشر. • التخفيف من انتشار الخطأ البشري. • فحص المعاملات التي قد يفوتها البشر ذوي الخبرة. • تقليل التدخل البشري حتى يتمكن الخبراء من التركيز على مهام أكثر إبداعاً.
	الاقتصادية: • تقليل نفقات تدريب الموظفين.

	• زيادة الكفاءة، وتقصير الوقت المستغرق لحل المشكلات وتحسين تقنيات حلها.
	عمليات الأعمال: • تسمح الأنظمة الخبيرة بإصدار الأحكام في الوقت الفعلي مع خفض التكلفة على مستوى الخبراء من قبل غير الخبراء وتحسين استخدام غالبية البيانات التي يمكن الوصول إليها. كما أنها تزيد من فرص وتكرار واتساق اتخاذ القرارات الفعالة. • إظهار القدرة تعلم معينة بدلا من مجرد تنفيذ استنتاجات مبرمجة مسبقاً. • إضافة قيمة من خلال تقديم تحليل متطور للبيانات الضخمة للشركة والتقاط تفسيرات منظمة لمجموعة متنوعة من البيانات غير المنظمة التي أصبحت أكثر سهولة.
	وظيفية: • يتم إجراء المراقبة بسرعة ودقة أكبر من أدوات المراقبة التقليدية. • نظام منع الاحتيال لمستوى وكفاءة وسرعة غير مسبوقين. • الدفاع البيئي. • تخطيط التصنيع.
التحديات	التكنولوجية: • قد تكون الهياكل الفرعية الناشئة التي تساعد في الموازاة موجودة في خوارزميات الذكاء الاصطناعي التي تم إنشاؤها لسياقات الآلة الواحدة. • لن تتمكن الأنظمة الخبيرة من الاستجابة بشكل خلاق للمواقف غير المألوفة بالطريقة التي يستطيعها الخبراء البشريون. • عدم الإدراك، في حالة غياب الحلول. • أكبر عقبة أمام استخدام تكنولوجيا النظم الخبيرة في المجالات الجديدة هي اكتساب المعرفة. • بالنسبة لقاعدة القواعد الكبيرة يصعب التوسع والصيانة.
	الاجتماعية: • استبدال التدخل البشري كتهديد.

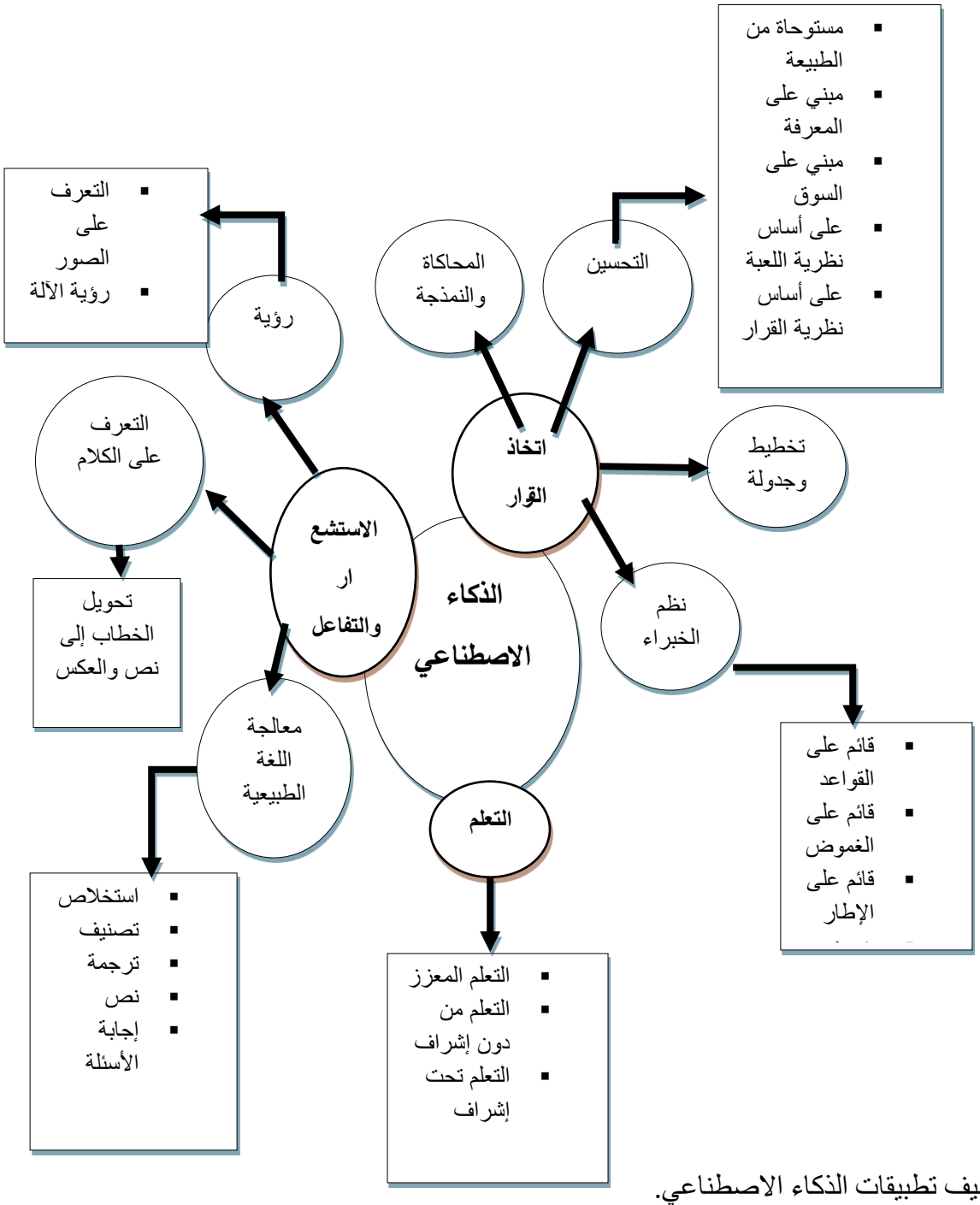
المصدر: El Bhilat, E. M., El Jaouhari, A., & Hamidi, L. S. (2024). Assessing the influence of artificial intelligence on agri-food supply chain performance: The mediating effect of distribution network efficiency. *Technological Forecasting and Social Change, P.2*.

وقد ساهمت عدة عوامل في الزخم الأخير الذي لاقاه الذكاء الاصطناعي في الوسائط الأكاديمية والصناعية وهي:

- تحسينات كبيرة في القوة الحسابية.
- توافر مجموعات كبيرة لتدريب الخوارزميات نتيجة التبني الواسع لأجهزة إنترنت الأشياء.
- تطوير خوارزميات التعلم الجديدة.

ويوضح الشكل التالي (2) تصنيفاً لتطبيقات الذكاء الاصطناعي الذي اتفق عليه بعض العلماء حسبما جاء في (Pournader et al;2021).

4. تصنيفات الذكاء الاصطناعي:



الشكل (2): تصنيف تطبيقات الذكاء الاصطناعي.

المصدر: Pournader, M., Ghaderi, H., Hassanzadegan, A., & Fahimnia, B. (2021). *Artificial intelligence applications in supply chain management*. International Journal of Production Economics, 241, p.3.

يوفر الشكل السابق تصنيفاً ثلاثي المنظور للذكاء الاصطناعي: أولاً، "الفرع"، والذي يحدد المجال الوظيفي الرئيسي. ثانياً، "التطبيق"، الذي يشير إلى الاستخدام المحدد للذكاء الاصطناعي. وثالثاً، "الطريقة"، والتي تنص على أساس التقني. وبالتالي، يمكن تصنيف الذكاء الاصطناعي على نطاق واسع إلى ثلاثة فروع نظراً لوظيفتها في النظام. حيث يتكون الفرع الأول من الأساليب المرتبطة بالاستشعار والتفاعل بأشكال مختلفة، مثل النص أو الصوت أو الفيديو، وهي: الكلام والرؤية والبرمجة العصبية. ويتضمن الفرع الثاني التطبيقات وأساليبها التي تهدف إلى التعلم من البيانات. -يمكن تصنيف معظم طرق التعلم الآلي، مثل التعلم العميق، ضمن هذه الفئة-. بينما يضم الفرع الثالث التطبيقات والأساليب المتعلقة باتخاذ القرارات، بما في ذلك :(النظم الخبيرة، التخطيط، المحاكاة، النمذجة، الجدولة، التحسينات). وتوافق تصنيف الذكاء الاصطناعي إلى الاستشعار والتفاعل، والتعلم واتخاذ القرار مع أحد التعريفات المعروفة للذكاء الاصطناعي من قبل كابلان وهينلين عام 2019، والذي هو قدرة النظام على "تفسير البيانات الخارجية بشكل صحيح"، و"التعلم من هذه البيانات"، و"استخدام تلك الدروس لتحقيق أهداف ومهام محددة".

- التفاعل والاستشعار: يوضح هذا القسم طرق الذكاء الاصطناعي المتعلقة بالاستشعار والتفاعل. معالجة اللغة الطبيعية (البرمجة اللغوية العصبية) هو تطبيق للذكاء الاصطناعي يشمل تطوير أنظمة لأداء المهام بموجب تعليمات اللغة البشرية.
- الطرق الرئيسية للبرمجة اللغوية العصبية هي :(استخراج النص، التصنيف، الترجمة، توليد النص، الإجابة على الأسئلة). وقد أثبتت طرق الذكاء الاصطناعي الأخرى أنها الحل النهائي لحل المشكلات المعرفية باستخدام التطبيقات التي يحركها الصوت والتعرف على الكلام. فالتعرف على الكلام يشمل الطرق التي يمكن التعرف تلقائياً وبدقة الكلمات المنطوقة للتحويل إلى النص والعكس بالعكس. في حين أن التعرف على الكلام بعيداً عن الكمال، ولاتزال هناك تحديات من حيث اللهجة وتشابه الكلمات وجودة الصوت، تم تحسين دقة حزم البرامج الحالية بشكل كبير خلال العقد الماضي. بعض الأمثلة الصناعية المستخدمة على نطاق واسع من التعرف على الكلام تشمل جوجل الرئيسية، نسخ أمازون، اليكسا من مايكروسوفت، وسيري أبل. ومع التطورات الأخيرة في قدرات الذكاء الاصطناعي، حظيت الأساليب القائمة على الرؤية لتحليلات الصور والفيديو باهتمام كبير في مجال الذكاء الاصطناعي، بهدف تمكين أجهزة الكمبيوتر من تحليل وتفسير المعلومات ذات المغزى باستخدام البيانات التي تم جمعها من أجهزة الاستشعار القائمة على الرؤية. يمكن تصنيف طرق الرؤية القائمة على الذكاء الاصطناعي بشكل فضفاض إلى رؤية الآلة والتعرف على الصور. بينما يشير التعرف على الصور إلى عملية تحديد واكتشاف كائن أو ميزة في صورة رقمية أو فيديو، فإن رؤية الجهاز أو الكمبيوتر تشمل الطرق التي تمكن الجهاز من التقاط الصور ومعالجتها وتفسيرها للقيام بمهمة معينة بذكاء. وفي السنوات الأخيرة، تلقت رؤية الكمبيوتر زخماً إضافياً في مجال التنقل، مما مكن المركبات ذاتية القيادة من التفاعل بفعالية مع البيئة المحيطة بها.
- التعلم من البيانات: ربما يكون فرع الذكاء الاصطناعي الأكثر شهرة وشعبية هو التعلم الآلي، والذي يصنف في التطبيق الرئيسي لـ "التعلم" في التصنيف المقترح. ويرتبط التعلم الآلي بتطوير الخوارزميات التي يمكن أن تتعلم من خلال بيانات التدريب لحل المشكلات باستخدام المعرفة التي تم الحصول عليها من المشكلات القديمة أو السابقة. على سبيل المثال، تم استخدام التعلم الآلي على نطاق واسع للتنبؤ بالسلاسل الزمنية. يمكن تصنيف التعلم الآلي إلى ثلاث طرق رئيسية للتعلم الخاضع للإشراف، والتعلم غير الخاضع للإشراف، والتعلم المعزز.

ويدور التعلم تحت الإشـراف حول تدريب آلة مع مجموعة بيانات معروفة (عينات التدريب) للتنبؤ بالمخرجات. ويمكن أن تحتوي نماذج التعلم الخاضـعة للإشـراف بشـكل أسـاسـي على نماذج شـجرة القرار، والانحدار الخطي، وآلات التوجيه الداعمة، والشبكات العصبية. وفي التعلم غير الخاضع للإشراف، ستتعلم الآلة التعرف على الأنماط دون أي بيانات مدربة أو معلومات محددة مسبقاً. يستخدم التعلم غير الخاضع للإشراف على نطاق واسع في تجميع المشـكلات لتحديد أوجه التشـابه. ويشـبه التعلم المعزز التعلم غير الخاضـع للإشـراف، مع اختلاف أن الجهاز يتلقى ملاحظات بعد إكمال المهمة. بمعنى آخر، تعمل الآلة على تحسين أدائها عن طريق التجربة والخطأ، حيث يتم توجيه المحاولات.

- صنع القرار: يمكن تجميع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في اتخاذ قرارات سلسلة التوريد على نطاق واسع في التحسين، والأنظمة الخبيرة، بالإضافة إلى الأساليب المتعلقة بالتخطيط والجدولة والمحاكاة والنمذجة. في حين يتم تقديم العديد من الأساليب الحالية المستخدمة لحل مشاكل التحسين منذ أوائل الستينات، إلا انه في عام 2000 فقط تم استخدام هذه الأساليب لمعالجة مشاكل أكثر ديناميكية باستخدام مجموعات بيانات كبيرة. ويمكن تجميع طرق التحسين في "مستوحاة من الطبيعة" مثال: تحسين مستعمرة النمل والخوارزمية الجينية؛ "القائمة على نظرية اللعبة"، مثل: النماذج التعاونية؛ "القائمة على السوق"، مثل: خوارزميات التفاوض والمزاد؛ "القائمة على نظرية القرار"، على سبيل المثال: نهج بايزي؛ و "الأساليب القائمة على المعرفة". وقد استخدمت هذه الأساليب لحل مجموعة من العمليات ومشاكل تحسين سلسلة التوريد.

بالنسبة للأنظمة الخبيرة، المعروفة أيضاً باسم الأنظمة القائمة على المعرفة، هي تطبيق آخر للذكاء الاصطناعي يشمل مجموعة متنوعة من المجالات وطرق حل المشكلات التي تهدف إلى تمكين الأنظمة من إنجاز المهام التي يؤديها الخبراء البشريون. وقد خط كوساك وتشن عام 1988 الخطوط العريضة لمكونات نظم الخبراء وهي:

- إعادة توجيه المعرفة حيث يتم تأطير المعرفة.
- محرك الواجهة الذي يحدد استراتيجية التحكم.
- اكتساب المعرفة التي تمكن النظام من الحصول على البيانات والمعرفة لحل المشكلات.

ويمكن أن تتضمن أمثلة الأنظمة الخبيرة في الأساليب القائمة على القواعد والغموض والقائمة على الأطر الهجينة التي تجمع بين أكثر من نظام ذكي. وتشير الأبحاث إلى أن الأنظمة الخبيرة تؤدي أداء جيد في المجالات التي يمكن فيها إضفاء الطابع الرسمي على الذكاء البشري وتنظيمه.

واختصـاراً لما سبق فإن الذكاء الاصـطناعي يعتمد على اسـتشـعار الشـيء وتسـجيل بياناته، تجميع هذه البيانات وتحليلها لبناء التعلم الآلي ومن ثم صـنع قرار مناسـب للحالة. وهنا يمكننا القول بأن دراسـتنا الحالية تتناول وجه تعلم الآلة للذكاء الاصـطناعي ودوره في تحسـين جودة لوجسـتيات النقل المبرد. ويعتبر الذكاء الاصـطناعي (AI)، هو التكنولوجيا الأسـاسـية للثورة الصـناعية الرابعة 4.0. وهو يخلف قيمة اقتصـادية وتجارية جديدة من خلال تحسـين تجميع كميات كبيرة من البيانات لتحديد المحتوى ذي الصـلة، وتحسـين العمليات، وتقديم أيضـاً توصـيات قابلة للتنفيذ. وقد اقترح جولان وآخرون عام 2021، أن تقنية الذكاء الاصطناعي تساعد المديرين في سلسلة التوريد على تحسين الكفاءة والمرونة عبر جميع مراحلها وفي المجالات المرتبطة بها ودعم الأداء الأمثل للنظام(Gao et al; 2023) . وقد أكدت دراسة (lagorio et al;2023) على أن الخدمات اللوجستية الذكية أو ما يسمى logistics 4.0، تساهم في زيادة الحاجة إلى إنشاء شبكات اتصالات موثوقة وفعالة، لإدارة كميات كبيرة من تبادل البيانات. كما أكدت على أن الجمع بين إنترنت الأشياء والحوسبة السحابية والذكاء الاصطناعي يسمح بالتحسينات في العديد من العمليات اللوجستية على طول سلسلة التبريد، وهو ما سيتم مناقشته في القسم التالي.

ج دور الذكاء الاصطناعي في تحسين جودة لوجستيات التبريد:

يشير تقرير حديث صادر عن شركة Grand View Research, Inc. إلى أن الخدمات اللوجستية لسلسلة التبريد تشهد اليوم نموًا سريعًا، حيث قُدر حجم السوق العالمي بمبلغ 233.2 مليار دولار أمريكي في عام 2022 ومن المتوقع أن يصل إلى 271 مليار دولار أمريكي في عام 2023. كما أنه من المتوقع أن يصل حجم سوق سلسلة التبريد العالمي إلى 892.3 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2030، مسجلاً معدل نمو سنوي مركب قدره 18.6٪ من عام 2023 إلى عام 2030 يتوسع السوق بسبب تزايد الاستثمار في تطوير سلسلة التبريد (Grand View Research, 2022)، وارتفاع الإنفاق على تكنولوجيا المعلومات في الخدمات اللوجستية للتخزين البارد، وتزايد الطلب على السلع عالية الجودة (Tezcan, 2024).

وتتضمن سلسلة التبريد جميع الخطوات والمرافق من تخزين ومناولة ونقل المنتجات القابلة للتلف، والتي يجب الحفاظ على ظروف ودرجة الحرارة التي يتم التحكم فيها من نقطة الإنتاج إلى نقطة الاستهلاك. وتعتبر لوجستيات التبريد جزءاً من سلسلة التبريد التي تشارك فيها حاويات التبريد كتغليف لنقل البضائع القابلة للتلف. وتحتوي المبردات على وحدات تبريد مدمجة في هيكلها تعمل بالكهرباء إما من مصدر طاقة خارجي أثناء النقل أو في ساحة الحاويات. ويتم تزويد المبرد أيضاً بنظام تحكم لمراقبة درجة الحرارة وأجهزة الإنذار لضمان سلامة المنتجات المعرضة للتلف. وقد اهتمت الأبحاث الحالية بشكل كبير جداً بموضوع المراقبة، والذي يشير الى الأجهزة الخاصة بتتبع ظروف التبريد الداخلية، مثل درجة الحرارة والرطوبة. وقد ناقشت تلك الأبحاث مفهوم الحاوية الذكية، والتي هي ثلاجة مجهزة بوحدات مراقبة وتحكم إضافية، حيث أن استخدام الحاوية الذكية يمكن من مراقبة الظروف الجوية الداخلية للمنتجات القابلة للتلف وتعديلها باستمرار. ويمكن استخدام البيانات التي تم جمعها لعمل تحليل للعمر الافتراضي للمنتج أو توقع درجة جودته (Fan et al; 2020). يتطلب نقل الأغذية الطازجة والعقاقير لوجستيات سلاسل التبريد للحفاظ على بيئة منخفضة الحرارة، والتي يمكن أن تقلل من هدر الطعام وتضمن سلامة المنتج. لذلك، يعد التحكم في درجة الحرارة تحدياً كبيراً يواجه لوجستيات سلاسل التبريد. وقد أدت الانحرافات الفعلية لدرجات الحرارة إلى إحداث الأضرار بجودة البضائع الحساسة لدرجة الحرارة، وخاصة الغذائية منها. ونظراً لذلك، فإن التنبؤ بدرجات الحرارة، والذي يمكنه تحديد الأخطاء القادمة أو التي على وشك الحدوث بشكل فعال لضبط درجات الحرارة في الوقت المناسب وضمان جودة الطعام، أمر بالغ الأهمية (lim et al; 2022). وقد اتفقت اغلب الدراسات على نفس الأسباب التي دفعتهم للبحث في تأثير الذكاء الاصطناعي على لوجستيات سلاسل التبريد، وهي في جميع أنحاء العالم (Wu et al;2023).

أولاً، في ظل حائجة كورونا (COVID-19)، واجهت لوجستيات التبريد تحديا في وظيفة التخزين الخاصة باللقاحات، حيث أن بعض اللقاحات تحتاج للتخزين في درجة حرارة بين 60°-80°c، والبعض الآخر يحتاج إلى التخزين في درجة حرارة 2°-8°c. وقد لوحظ أن هذا الاختلاف يضر بحياة اللقاحات. وبحلول عام 2020، أُفيد بأن حوالي 28 شخص لاقوا حتفهم بسبب تطعيمات كورونا في كوريا، وبناء عليه تم سحب 0.48 مليون جرعة من اللقاحات. وارجع الخبراء سبب هذه الكارثة إلى نظام التبريد في الشاحنة الناقلة للقاحات كورونا. وبسبب ذلك، ظهرت أهمية المراقبة الاستباقية في الوقت المناسب لظروف التخزين طوال دورة حياة اللقاح.

ثانياً، بشأن المخاوف المحيطة بجودة المنتج، يتوقع تعرض العاملين في غرف مبردة ومغلقة لمخاطر محتملة. حيث وقع حادث حقيقي في مخزن بارد للشحن الجوي في هونغ كونغ، أدى لسقوط عامل على الأرض لمدة خمس ساعات، واتضح أنه متجمد حتى الموت، بينما بقي المشرفون في مكتب بعيد وفشلوا في إدراك هذا الحادث في الوقت المناسب. وقت كان هذا الحادث بمثابة دعوة للاستيقاظ من أجل إدارة فعالة لسلامة الموظفين داخل سلسلة التبريد.

وقد اقترح حلا لهذه المشكلة وهي دمج الكشف النشط للحركة البشرية غير الطبيعية داخل الموقع المبرد في الوقت الفعلي لتسهيل الاستجابات السريعة والتعامل معها.

ثالثاً، عدم وجود ما يكفي من البيانات والتحليلات يعوق تحسين العملية وتحسين سلاسل التبريد التقليدية. فقد اعتمد جمع البيانات بشكل أساسي على الورق والعمل اليدوي من قبل البشر، وهو امر يستغرق وقتاً طويلاً وقد يتعرض صاحبه للخطأ البشري المحتمل. مما يجعل دمج تكنولوجيا المستشعرات القارئة للبيانات والمخزنة لها والمترجمة لها أيضاً لخلق معلومات يمكن بناء قرارات دقيقة عليها مع خاصية الوقت الفعلي أمراً حيوياً للتغلب على هذه الفجوة.

ومن هنا، تعتبر المعلومات أكثر من مجرد قوة في صناعات سلسلة التوريد. وفي الوقت الحاضر، يتم إجراء مراقبة سلسلة التبريد بشكل أساسي عن طريق استخدام أجهزة تسجيل البيانات عادة أثناء النقل فقط وليس في جميع أنحاء السلسلة. كما أن هناك طريقة أخرى لا تزال شائعة في الوقت الحالي، وهي استخدام مسجلات البيانات التي تتم قراءتها عبر جهاز كمبيوتر على فترات منتظمة (يومياً أو أسبوعياً)، ويتم تنزيل جميع المعلومات في جدول بيانات وطباعتها. ولكن عادة ما يكون هذا النوع من أنظمة مراقبة درجة الحرارة مكلفاً وغير آلي، مما يتطلب فحصاً يدوياً. إلى جانب تحديد الترددات الراديويةRFID، حيث أوضح العلماء أن المرحلة الجديدة من هذه التكنولوجيا هي ربطها بأجهزة الاستشعار لتوسيع وظائفها، وبالتالي المساعدة على تحسين أداء سلسلة التبريد عبر تتبع ومراقبة البضائع القابلة للتلف. وقد ركزت أحدث مراجعات لوجستيات سلسلة التبريد للمواد سريعة التلف على صناعات وتقنيات محددة. وهي تؤكد من جديد أتمتة كل أغراض مراقبة الجودة والأمن من خلال التتبع في الوقت الحقيقي. وتشير جميع الدراسات إلى أهمية تكنولوجيا المعلومات والاتصالات لتلبية متطلبات السوق المتطورة، وفوائد وتحديات تطبيق تكنولوجيا الصناعة 4.0 في كل منها، وضرورة التعاون في مراحل سلسلة التبريد المختلفة لتنفيذها بنجاح. بعض هذه الدراسات تركز على أهمية نهج إنترنت الأشياء التكنولوجي لتبادل المعلومات وجعلها في متناول قواعد البيانات التي تربط الأجهزة والبرمجيات بين العناصر في سلسلة التبريد، وتقنيات الترددات اللاسلكية، وشبكة الشبكات الاجتماعية (Ramires et al; 2022) .

1. أدوات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في سلاسل التبريد:

تتضمن لوجستيات سلسلة التبريد تخزين ونقل وتوزيع المنتجات الحساسة لدرجة الحرارة مع الحد الأدنى من فقد المنتج. ومع ذلك، لوحظت انحرافات كبيرة في درجات الحرارة أثناء النقل والتوزيع قد تضر بجودة المنتج. تم إجراء مراجعات الأدبيات في لوجستيات سلسلة التبريد وأثبتت أهمية مراقبة درجة الحرارة كإجراء بارز لمراقبة الجودة. على الرغم من أن المعلمات الأخرى مثل الرطوبة يمكن أن يكون لها تأثير على تدهور المنتج، تظل درجة الحرارة هي المؤشر الأبرز لجودة المنتج. (Chan et al; 2024)

ولقد كان التحكم في درجة الحرارة في لوجستيات سلسلة التبريد موضوع بحث وتطبيقات مكثفة. وفي المجال الأكاديمي، كانت نقطة التركيز في هذا الموضوع منصبة على مراقبة درجة حرارة الشاحنات المبردة أثناء النقل اللوجستي خلال سلسلة التبريد. ومن أهم التطورات في هذا المجال البحثي هي استخدام شبكات الاستشعار اللاسلكية وإنترنت الأشياء لتخزين ونقل بيانات درجات الحرارة أثناء نقل البضائع الحساسة لدرجة الحرارة، وبالتالي تحقيق المراقبة البصرية .(lim et al;2022)

يقود الذكاء الاصطناعي بشكل عام تطوير أدوات لتحويل مجموعات البيانات الكبيرة إلى مبادرات لبناء المرونة. ومن أهم أدوات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في سلاسل التوريد وإدارة الأعمال بشكل عام هي: (Staydev & Roshan: 2024)

1.1. إنترنت الأشياء (Internet of Things):

في السنوات الأخيرة، أصبح إنترنت الأشياء (IOT) موضوعا بحثيا مهما، وتنضج تقنيات إنترنت الأشياء الناشئة تدريجيا. بعد ما يقرب من عقد من التطوير، أصبح تعريف إنترنت الأشياء أكثر شمولا، ويتضمن تطبيق إنترنت الأشياء المزيد من المجالات التي تشمل إدارة سلسلة التوريد والرعاية الصحية والمرافق والنقل وغيرها من المجالات. بشكل عام، يتضمن إنترنت الأشياء ميزتين مهمتين: واحدة هي جمع البيانات وربط نفسها بالكيانات المتصورة للسحابة، والأخرى هي استضافة الخدمات السحابية التي تستخدم البيانات التي تم جمعها بواسطة أجهزة الاستشعار. تم استخدام إنترنت الأشياء على نطاق واسع. على سبيل المثال، يستخدم عدد من المشاريع تقنيات إنترنت الأشياء وشبكات الاستشعار اللاسلكية لتحقيق التحكم في درجة حرارة سلسلة التبريد للمنتجات الزراعية؛ للحد من فقدان المنتجات الزراعية الطازجة وضمان سلامة الأغذية، تم استخدام إنترنت الأشياء على نطاق واسع في عملية لوجستيات سلسلة التبريد، مثل نظام شبكة الاستشعار اللاسلكي للمراقبة في الوقت الفعلي للمنتجات الزراعية والمانجو والعنب والتفاح وللمنتجات المائية المجمدة والمبردة. بالمقارنة مع الذاكرة الرقمية المؤمنة (بطاقة الذاكرة الرقمية الآمنة)، يتمتع نظام النقل اللاسلكي بالعديد من المزايا، بما في ذلك مرونة أفضل وحركة أعلى ونشر سريع في المناسبات الخاصة. يستخدم نظام المراقبة في الغالب طريقة الإرسال اللاسلكي، مثل مراقبة درجة حرارة صندوق التبريد في لوجستيات سلسلة التبريد، والتي تستخدم وحدة الاستشعار اللاسلكية (WSM) والشبكة، ومنصة على شبكة الإنترنت لجمع بيانات ظروف درجة الحرارة في جميع أنحاء سلسلة توريد الأغذية المبردة والمجمدة.

بشكل عام، ينتج الطعام القابل للتلف كمية كبيرة من البيانات من عملية الإنتاج إلى الاستهلاك، ويمكن الحصول على هذه البيانات من خلال مراقبة أجهزة الاستشعار متعددة المصادر، ونظام تحديد المواقع، والهاتف، والإنترنت، والقنوات الأخرى. ثم بعد ذلك، من خلال تحليل البيانات والنمذجة، من الممكن التنبؤ بفترة صلاحية المنتجات الطازجة. وتقدم الأدبيات أيضاً العديد من المساهمات حول التحكم في سلامة الأغذية ومدة صلاحية المنتجات. من أجل ضمان ومراقبة سلامة الأغذية ومدة صلاحية المنتجات، تم تطوير نظام مراقبة سلسلة التوريد على أساس وحدة لوجستية ذكية مخصصة للمنتجات الغذائية القابلة للتلف. تم استخدام وحدة لوجستية ذكية (SLO) مجهزة بوحدة نظام تحديد المواقع العالمي، ووحدة اتصال 3G لوضع الشاحنة في الوقت الفعلي ومراقبة الجودة عن بعد. استنادا إلى الدراسات السابقة،.(Li et al; 2019) وقد عرف (Yan, 2017) إنترنت الأشياء بأنه إنترنت يعتمد على الشبكات الذكية، والتي لها القدرة على نقل المعلومات في الوقت الصحيح والمناسب، فضلاً عن تحديد وتتبع وإدارة المنتجات من خلال التقنيات المتقدمة مثل: تحديد الترددات الراديوية (RFID)، وأجهزة الاستشعار بالأشعة تحت الحمراء، ونظام تحديد المواقع العالمي(GPS) ، والماسح الضوئي (الليزر). كما لخص التأثير المتوقع لإنترنت الأشياء على سلاسل التوريد على النحو التالي: (Ben- Daya et al; 2017)

- إنترنت الأشياء عبارة عن شبكة من الأشياء المادية المتصلة رقمياً للاستشعار والمراقبة والتفاعل داخل الشركة، وبين الشركة وسلسلة التوريد الخاصة بها، مما يتيح المرونة والرؤية والتتبع وتبادل المعلومات لتسهيل التخطيط والتحكم والتنسيق في الوقت المناسب لعمليات سلسلة التوريد.
- تهدف تقنية إنترنت الأشياء إلى ربط كل طرف في سلسلة التوريد الأولية والمصب، وتوليد البيانات ذات الصلة حول المجال الذي تعمل فيه. وقد نما اعتمادها في السنوات الأخيرة بفضل تقدم الأجهزة والاتصال وذكاء الحوسبة التي تدعمها(C. Ramires et al; 2022) .

1.2. تقنية RFID:

تعرف تقنية RFID بأنها تكنولوجيا الاتصـــالات اللاســلكية والتي يمكنها تحديد الأهداف، وقراءه البيانات ذات الصلة والتقاطها من دون أي شكل من أشكال الاتصال البشري أو الجسدي. وتعتمد هذه التقنية على دائرة متكاملة مزودة بعلامة يمكنها تخزين البيانات. وعادة ما يتم إرفاق هذه العلامات بالحزم على طول سلسلة التوريد، وتستورد بياناتها الجوهرية من خلال القارئ اللاسلكي. وبشكل عام، يكون استرجاع المعلومات من قبل القارئ من دون تعامل بشري/عن بعد.

1.3. تقنية الـBlockchain :

تم تطوير تقنية Blockchain في الأصل عام 1991م، وقد صاغ ساتوشي تاكا موتو البيتكوين عام 2008م أول قاعدة بيانات بلوكتشـين. وتمكن هذه التقنية من تخزين كميات هائلة من البيانات التي يمكن الوصـول إليها والتغيير فيها بسـرعه وفعالية من قبل أي عدد من العملاء في وقت واحد. وقد أكد بورنادر وآخرون (2020) أنه مع ابتكار البلوكتشين لم يعد هناك حاجة إلى طرف ثالث للتحقق من المعاملات، إذ يتم إعادة تنظيم التأكيدات وتنفيذها بواسطة العقد المرتبطة بكل كتله. ومن المزايا التي يوفرها الـ:Blockchain

- الشفافية والثقة.
- القدرة على تتبع المكونات والمنتجات من المصدر إلى الوجهة النهائية.
- ضمان توفر المعلومات والبيانات بسهولة لأصحاب المصلحة المعنيين.
- سرعة كشف الانحرافات في سلسلة التوريد والتعامل معها.

لكن هناك بعض الحواجز التي تحول دون تنفيذ تقنيةBlockchain ومنها:

- سوء إدارة تكنولوجيا المعلومات: التنفيذ الفعال لحوكمة تكنولوجيا المعلومات معقد ويستدعي قواعد قوية تساعد المنظمات على إنشاء هياكل وعمليات ومكونات اجتماعية قابلة للتطبيق وفعالة لإدارة تكنولوجيا المعلومات.
- أسلوب القيادة الضعيف للإدارة العليا: يجب أن يدرك القادة كيف ستغيّر الحلول المبتكرة الحديثة طرق العمل ونقل السلع والخدمات. وقد كشفت الأدبيات السابقة عن مقاومة التغيير والشك لدى القادة الذين لا يدعمون التقنيات الجديدة بشكل كامل.
- ضـعف الاسـتثمار المالي في تكنولوجيا Blockchain: الاسـتثمار في هذه التقنية يتطلب موارد مالية كبيرة. كما تحتاج الشـركات إلى وقت طويل لإتقانها بسـبب تعقيدها، وغالبًا ما يقلقون من أن الفوائد لن تفوق التكلفة العالية، لذلك لا يتوقع معظمهم عوائد فورية على استثماراتهم.
- البصـمة الكربونية الرقمية المرهقة: إن هدر الطعام بلا شـك يسـاهم في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وعلى الرغم من أن سـلسـلة التبريد تهدف إلى اسـتخدام التطورات في التبريد لمنع إفسـاد الطعام، فإن هذه التطورات قد تؤدي إلى مشـكلات، مثل تسـرب الهواء البارد مما يزيد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري.
- عدم الاسـتعداد الرقمي: لا يزال البلوكتشـين في مراحله الأولى، وقدرته على التعامل مع عدد كبير من المعاملات في طور التطور. وغالبا ما تتردد الشـركات في الاعتقاد بأن جميع المعاملات يمكن التقاطها بالكامل عن طريق العقود الذكية؛ لأن إنشاء مثل هذه العقود لمنطق التجارة المعقدة لا يزال مهمة صعبة.
- نقص البنية التحتية لتكنولوجيا الـ:Blockchain قابلية التوسع واعتمادية الحوسبة أمران حيويان، ولا تزدهر هذه التقنية إلا في بيئة إنترنت مستقرة وقوية.

- غياب مهارات تقنية الـــ Blockchain المطلوبة داخل الشـركات: تعد المهارات المتخصـصـة في البلوكتشـين نادرة، واكتسـابها عملية طويلة وشـاقة، مما يتطلب التزاما ودعما طويل الأجل من الإدارة العليا. ضعف هذا الالتزام يعرقل التنفيذ. إن الحاجة إلى إدارة عليا على دراية بتقنية الـBlockchain ، يمكن أن يؤخر عملية التنفيذ، ذلك لان المديرين لن يكونوا ملتزمين بالكامل ويصـعب تقديم نسـخه احتياطية أساسية لعملية التنفيذ.
- عدم التعاون مع شركاء ومزودي خدمة الـBlockchain : عدم التعاون مع مزودي خدمات البلوكتشين وشـركاء الأعمال يؤدي أيضـاً إلى تطبيقات غير ناجحة، بينما اختيار الموردين ومقدمي الخدمات المناسبين أمراً مهماً لأن مشاركتهم في مشاريع البلوكتشين هي مفتاح النجاح. فإذا لم يتم اختيار الشركاء بشكل صحيح يمكن أن يؤدي ذلك إلى إهدار المال والوقت.
- الخوف من تطبيق تقنية Blockchain :قد تؤدي مشـاركة البيانات إلى مقاومة التغيير. ومع اسـتمرار تطوير تقنيةBlockchain ، قد تواجه صعوبات في التحويلات الثقافية والاجتماعية .
- انعدام الأمن وسياسات الخصوصية: قد تنشأ المخاوف من الشفافية المفرطة، حيث يتمتع أعضاء الشبكة بقدرة على التتبع والتعقب والعرض، ما قد يثير مخاوف حول الأمان والخصـوصـية، وهو ما يسـمى بالشفافية. ويمكن للشركات مراقبة الإجراءات وتحركات المنتجات في اتجاه المنبع أو المصب في سلسلة التوريد.

وفيما يلي جدول يوضح التقنيات الحديثة المستخدمة في سلاسل التبريد:

جدول (2): التقنيات الحديثة المستخدمة في سلاسل التبريد.

المعلمات البيئية	التقنيات	تسجيل البيانات	الاتصال	التطبيقات
"درجة الحرارة، الرطوبة النسـبية (RH)، الأكسجين (O_2)، ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، الصـدمـات والاهتزازات."	إنترنت الأشياء	عقد الاستشعار	شـبكات الاتصـال اللاسلكية	الـخضـراوات والفواكه الطازجة
درجـات حـرارة منخفضة للمنتجات المجمدة	"إنترنت الأشـياء (IoT)، تـحـديـد الهويـة بموجـات الراديو (RFID)، سـلسـلـة الكتل (blockchain)."	عقد الاستشعار	شبكات الاستشعار اللاسلكية	تتبع وسـلامـة مصايد الأسماك
"درجـة الحرارة والـرطـوبـة	"مـراقـبـة وإشـعـارات في الوقت الفعلي بنـاءً	نـظـام مـتـعـدد المستشعرات	بلوتوث، الإنترنت	إدارة تـخـزيـن المنتجات المبردة

والإضاءة وتركيز الغاز."	على إنترنت الأشياء + الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) للتصنيف."			
الضغط	إنترنت الأشياء والشبكات العصبية الاصطناعية	وحدات التحكم الدقيقة (Microcontrollers)	شبكات الاستشعار اللاسلكية في طبقة خدمة التوزيع	التنسيق في توزيع المنتجات المبردة بناءً على إنترنت الأشياء
درجة الحرارة، أجهزة الاستشعار الحيوية، أجهزة استشعار الغاز، مؤشرات النضارة	إنترنت الأشياء والاتصالات	-	أدوات اتصال متنوعة	إدارة سلسلة الإمداد الغذائي
درجة حرارة التجميد	إنترنت الأشياء، تقنية الاتصالات من الجيل الخامس (5G)	مصفوفة البوابات المنطقية القابلة للبرمجة ميدانيًا FPGA	شبكات الجيل الخامس(5G) ، نظام تحديد المواقع العالمي(GPS)	نظام لوجستيات سلسلة التوريد المبردة
درجة الحرارة، الموقع، الرطوبة، الضغط، التعرض للضوء	سلسلة الكتل (Blockchain)، إنترنت الأشياء (IoT)	-	تحديد الهوية بموجات الراديو (RFID)، محفظة إيثريوم، خدمات المراسلة السحابية	عقد ذكي قائم على إنترنت الأشياء وسلسلة الكتل

- المصدر: **Alshdady, A., Kamel, S., Alsolami, E., Lytras, M., Boubaker, S (2024).** An IoT Smart System for Cold Supply Chain Storage and Transportation Management. *Applied Science Research & Engineering, Technology*، p. 13169.

ومن خلال ما سبق يمكننا أن نقول إن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي الناشئة في سلاسل التبريد يخلق سلاسل تبريد ذكية وهي ما يوضحه الشكل التالي :(Yinuo Zhang & Guowei Hua, 2020)

طبقة المستخدمين	الجهة الحكومية	المؤسسة الصناعية	المشاريع ذات الصلة	المستهلكين

طبقة التطبيقات	نظام إدارة الإنتاج والعلميات المبردة	نظام إدارة الخزين المبرد	نظام إدارة النقل المبرد	نظام إدارة البيع المبرد	
	منصة الإشراف على المعلومات اللوجستية				
طبقة الشبكات	Internet	NB-IOT	Web Server	ZIGBEE	Blockchain
طبقة الاستشعار	RFID	WMSN	GPS/ GIS	Audio/Video	
طبقة العمليات	الإنتاج	التخزين	النقل	البيع	

شكل (3): سلسلة التبريد الذكية.

المصدر: - Yinuo Zhang & Guowei Hua. (2020). Intelligent Food Cold Chain System Design. IOP Conference Series: Materials Science & Engineering. P.6.

2. دور الذكاء الاصطناعي في تعزيز كفاءة سلاسل التبريد: بناء سلسلة تبريد ذكية

تشهد سلاسل التبريد العالمية توسعًا غير مسبوق، حيث بلغ حجم السوق 233.2 مليار دولار أمريكي عام 2022 ومن المتوقع أن يصل إلى 892.3 مليار دولار أمريكي بحلول 2030، بمعدل نمو سنوي مركب يقدر بـــ 18.6%، مدفوعًا بزيادة الاســـتثمارات في البنية التحتية، والاعتماد المتزايد على تقنيات تكنولوجيا المعلومات والاتصـــالات (Grand View Research, 2022; Tezcan, 2024). غير أن هذا النمو الســريع يقابله تحديات هيكلية وتقنية، أبرزها :التحكم في درجات الحرارة أثناء النقل والتخزين، ضـــعف نظم المراقبة اللحظية، نقص البيانات والتحليلات الدقيقة، وغياب تكامل الأنظمة الذكية عبر مراحل السلسلة المختلفة .(Fan et al., 2020; Lim et al., 2022)

في هذا السياق، يظهر الذكاء الاصطناعي كأحد المحركات الرئيسية لتطوير "سلاسل التبريد الذكية"، عبر قدرته على تحليل البيانات الضخمة، التنبؤ بالانحرافات، إدارة المخاطر، وتطوير أنظمة مراقبة استباقية .فقد أثبتت دراسات حديثة أن النماذج الهجينة مثل XGBoostو LSTMتفوقت على الطرق التقليدية) مثل SARIMA) في التنبؤ بالطلب وضـــبط الجداول اللوجســـتية، مما ســـاعد في تحســـين الكفاءة التشـــغيلية وتقليل الهدر (Jackson et al., 2024). كما أن دمج إنترنت الأشياء مع الذكاء الاصطناعي (AIoT) أتاح مراقبة آنية لظروف التخزين والنقل، مما ساعد على تقليل الفاقد الغذائي وضمان الجودة.(Fatorachian & Pawar, 2023)

وتتجلى أهمية الذكاء الاصطناعي أيضًا في إدارة المخاطر الصحية وسلامة الموظفين .فحادث هونغ كونغ (وفاة عامل بالتجمد داخل غرفة تبريد) كشـف الحاجة إلى تطبيق أنظمة اسـتشـعار ذكية للكشـف عن الحركة البشـرية غير الطبيعية لحماية الأفراد .(Wu et al., 2023) كما أبرزت أزمة لقاحات "كوفيد-19" خطورة الاعتماد على أنظمة تبريد غير دقيقة، وأهمية المراقبة الذكية لتقليل الخسائر البشرية والمادية.

أما على صعيد الأدوات، فقد أصبح إنترنت الأشياء (IoT) محورًا أساسيًا لجمع البيانات من أجهزة الاستشعار، وربطها بالســـحابة لتحليلها في الوقت الحقيقي .(Li et al., 2019; Ben-Daya et al., 2017) إلى جانب ذلك، وفرت تقنيات مثل RFIDقدرات تتبع دقيقة للبضـائع دون تدخل بشري، بينما أضـافت البلوكتشين (Blockchain)

بُعدًا جديدًا من الشفافية والثقة عبر تمكين التتبع الآمن للمنتجات من المصدر حتى المستهلك النهائي (Pournader et al., 2021; Ramires et al., 2022). ومع ذلك، ما تزال هناك تحديات مرتبطة بالتكلفة، البنية التحتية الرقمية، ونقص المهارات التقنية المتخصصة.

ويشير تحليل الأدبيات إلى أن دمج هذه التقنيات في إطار متكامل يُحوّل سلسلة التبريد التقليدية إلى "سلسلة تبريد ذكية" متعددة الطبقات: تبدأ من طبقة الاستشعار (RFID, GPS, WSNs) ، مرورًا بـــ طبقة الشبكات (IoT, Blockchain, NB-IoT)، ووصولًا إلى طبقة التطبيقات التي تشمل نظم إدارة الإنتاج والتخزين والنقل والتوزيع المبرد (Zhang & Hua, 2020; Alshdady et al., 2024). هذا التكامل لا يعزز فقط من جودة المنتجات وسلامتها، بل يسهم أيضًا في تحقيق الاستدامة عبر تقليل الهدر الغذائي وخفض البصمة الكربونية.

وبالتالي، يمكن القول إن العلاقة بين الذكاء الاصطناعي وسلاسل التبريد ليست مجرد علاقة "تكامل تقني"، بل هي علاقة استراتيجية تسعى إلى تحقيق ثلاثة أهداف رئيسية:

- تحسين الكفاءة التشغيلية عبر التنبؤ والجدولة الذكية.
- تعزيز الجودة والسلامة عبر المراقبة الاستباقية وإدارة المخاطر.
- تحقيق الاستدامة عبر خفض الفاقد والهدر وتقليل الانبعاثات الكربونية.

هذا ما ينسجم بدقة مع أهداف هذه الرسالة، التي تسعى إلى تحليل كيفية توظيف أدوات الذكاء الاصطناعي لابتكار حلول متكاملة قادرة على مواجهة تحديات سلاسل التبريد التقليدية، وتحويلها إلى نظم ذكية تدعم الأمن الغذائي والصحي على المستويين المحلي والعالمي.

رابعاً: النتائج والتوصيات:

أ نتائج الدراسة:

من خلال استعراض وتحليل الدراسات السابقة التي تناولت سلاسل التبريد والذكاء الاصطناعي والعلاقة التكاملية بينهما، يمكن القول إن الأدبيات الحديثة تكشف عن صورة متكاملة للتحديات الراهنة والفرص المستقبلية في هذا المجال. فقد أظهرت البحوث بوضوح أن سلاسل التبريد التقليدية ما زالت تواجه صعوبات جوهرية تتعلق بضعف المراقبة والتحكم في درجات الحرارة، ونقص البيانات الفورية، وغياب الأنظمة الذكية للتنبؤ وإدارة المخاطر، وهو ما ينعكس سلبًا على كفاءة العمليات وجودة المنتجات القابلة للتلف (Ashok et al., 2017; Xu et al., 2023; Zhang & Mohamed, 2024). في المقابل، بيّنت الأدلة التجريبية والتطبيقات الحديثة أن توظيف أدوات الذكاء الاصطناعي – بما في ذلك إنترنت الأشياء، وخوارزميات التعلم الآلي، وتقنيات النمذجة التنبؤية – يسهم في بناء "سلاسل تبريد ذكية" أكثر مرونة وفعالية واستدامة (Nozari et al., 2025; Jackson et al., 2024; Elashmawy et al., 2025).

هذه النتائج تتوافق بدرجة كبيرة مع أهداف الدراسة الحالية التي تسعى إلى: (1) استكشاف الإمكانات التي يوفرها الذكاء الاصطناعي في تعزيز كفاءة سلاسل التبريد، (2) تحليل كيف يمكن لهذه الأدوات أن تُحسن من جودة وسلامة المنتجات، و(3) تقييم دور الذكاء الاصطناعي في دعم استدامة سلاسل التبريد والحد من الهدر الغذائي والفاقد الاقتصادي. كما أن هذه النتائج تتماشى مع حدود الدراسة التي ركزت على الفترة الزمنية (2015–2025) وعلى الأدبيات الحديثة ذات الصلة المباشرة بسلاسل التبريد والذكاء الاصطناعي.

وتلخيصاً للنتائج التي توصلت إليها الدراسة:

1. **تحديات سلاسل التبريد التقليدية :**تتجلى في ضعف البنية التحتية، تقادم المعدات، غياب نظم المراقبة المستمرة، وارتفاع تكاليف الطاقة، وهو ما يؤدي إلى فاقد كبير في الأغذية والمنتجات الطبية (Ashok et al., 2017; Shi et al., 2024).
2. **الذكاء الاصطناعي كأداة تمكين :**يوفر الذكاء الاصطناعي إمكانات متقدمة في التنبؤ بالطلب، إدارة المخزون، المراقبة اللحظية، وتحسين جودة القرارات التشغيلية، مما يعزز الكفاءة ويخفض التكاليف (Mustafa et al., 2024; Wang et al., 2025).
3. **التكامل بين AI وسلاسل التبريد :**دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع إنترنت الأشياء يتيح تقليل الهدر وتحسين الاستدامة وجودة المنتجات، لكنه يتطلب بنية تحتية رقمية قوية، وضمانات للأمان السيبراني، وتجارب تطبيقية واسعة(Fatorachian & Pawar, 2023; Prasad, 2025) .
4. **الفجوات البحثية :**تظل هناك فجوات واضحة في دمج المتغيرات البيئية والاجتماعية في نماذج التحسين، بجانب الحاجة إلى بيانات موحدة وعابرة للمنظمات لدعم اتخاذ القرار (Iyer & Robb, 2025; Chen et al., 2025).

بناءً على ما سبق، يمكن القول إن توظيف الذكاء الاصطناعي في سلاسل التبريد لا يمثل مجرد توجه تقني حديث، بل يُعد ضرورة استراتيجية لتحقيق الكفاءة التشغيلية، وضمان جودة المنتجات، وتعزيز الاستدامة الاقتصادية والبيئية.

ب توصيات الدراسة:

فيما يلي جدول (4) يوضح أهم التوصيات التي توصل إليها الدراسة بناء على مراجعة الدراسات السابقة لأهم التطورات في علاقة الذكاء الاصطناعي بسلاسل التبريد في الفترة (2015-2025):

التحدي	التوصية	الأهمية	المصدر
المراقبة الذكية	تطبيق أنظمة إنترنت الأشياء وأجهزة الاستشعار الذكية لمراقبة درجات الحرارة والرطوبة في الوقت الفعلي	يساهم في تقليل الأخطاء البشرية وضمان جودة المنتج طوال سلسلة التبريد	Xu et al., 2023; Li et al., 2019
التنبؤ وتحليل البيانات	استخدام نماذج الذكاء الاصطناعي التنبؤية لتوقع الانحرافات الحرارية ومشاكل التخزين	يعزز القدرة على التدخل الاستباقي وحماية المنتجات الحساسة	Lim et al., 2022; Jackson et al., 2024
الأمان والجودة	دمج تقنيات Blockchainلضمان الشفافية وتتبع المنتجات	يدعم الثقة ويقلل من مشاكل الغش أو التلاعب	Bornader et al., 2020; Zhang & Mohamed, 2024

	من المصدر حتى المستهلك		
الاستدامة	تطوير حلول لوجستية خضراء مدعومة بـ AI & IoT لتقليل الهدر الغذائي وانبعاثات الكربون	يحقق التوازن بين الكفاءة التشغيلية والحفاظ على البيئة	Fatorachian & Pawar, 2023; Prasad, 2025
التدريب وبناء القدرات	تأهيل الكوادر البشرية على استخدام التقنيات الذكية وإدارة سلاسل التبريد الرقمية	يقلل من مقاومة التغيير ويدعم نجاح التنفيذ	Mustafa et al., 2024; Wang et al., 2025
التكامل التقني	ربط البيانات عبر RFID + IoT + AI لتشكيل أنظمة تبريد ذكية ومتكاملة	يسهل اتخاذ القرارات المبنية على البيانات بشكل فوري	Alshdady et al., 2024

المصدر: إعداد الباحثة.

خامساً: قائمة المراجع:

- Alshdady, A., Kamel, S., Alsolami, E., Lytras, M., Boubaker, S. (2024). An IoT Smart System for Cold Supply Chain Storage and Transportation Management. Engineering***, Technology & Applied Science Research*** ،p. 13169.
- Akour, I., Alshurideh, M., Al Kurdi, B., Alzoubi, H., & Salloum, S. (2024). Acceptance of AI in higher education: A SEM-ML hybrid approach. ***International Journal of Educational Technology in Higher Education****, 21*(3), 112–129.
- Ashok, A., Brison, M., & LeTallec, Y. (2017). Improving cold chain systems: Challenges and solutions. *Vaccine, 35*(17), 2217–2223.
- Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2019). Internet of Things and supply chain management: A literature review. ***International Journal of Production Research****, 57*(15–16), 4719–4742.
- Chen, Y., Li, X., & Wang, T. (2025). Applications of AI in scientific research: A systematic review of LLM-based tools**.** ***Journal of Scientometrics,*** *130*(2), 455–478.
- Derinalp, S. (2024). Mapping the evolution of AI in education: A bibliometric analysis (1989–2023). ***Education and Information Technologies****, 29*(4), 5879–5902.

- Elashmawy, M., Hassan, A., & Liu, J. (2025). AI-driven monitoring of strawberry freshness in cold chains: A case study. ***Journal of Food Engineering****, 360*, 112–126.
- El Bhilat, E. M., El Jaouhari, A., & Hamidi, L. S. (2024). Assessing the influence of artificial intelligence on agri-food supply chain performance: The mediating effect of distribution network efficiency**.** ***Technological Forecasting and Social Change****, 200*.
- Fatorachian, H., & Pawar, K. (2023). Reducing food waste in cold supply chains through AI and IoT predictive models: A systematic review. ***Computers & Industrial Engineering****, 177*, 108–125.
- Hongxia, Z. (2018). Research on cold chain logistics based on Internet of Things. ***IOP Conference Series: Materials Science and Engineering***, 394(5), 052024.
- Ivanov, D., Dolgui, A .(2020) .A digital supply chain twin from managing the distruption risks and resilience in the era of industry 4.0 ***.Production Planning & Control***.788-775 ،
- Iyer, G., & Robb, D. J. (2025). Optimization models in cold supply chains: A systematic review. ***Omega****, 126*, 102952.
- Jackson, I., Namdar, J., Saénz, M. J., Elmquist III, R. A & ,.Dávila Novoa, L. R . .(2024)Revolutionize cold chain: an AI/ML driven approach to overcome capacity shortages .***International Journal of Production Research***.2212–2190 ,(6)63 ،
- Jackson, P., Kumar, R., & Li, H. (2024). Enhancing demand forecasting in cold chains using AI/ML hybrid models. ***International Journal of Production Research****, 62*(18), 6012–6029.
- Joshi, D. (2012). Supply chain management in agriculture sector: A review**.** ***International Journal of Engineering and Management Research****, 2*(2), 118–122.
- Li, H., Fan, W., Shi, S., & Chou, Q. (2019). A modified LIME and its application to explain service supply chain forecasting. In J. Tang, M.-Y. Kan, D. Zhao, S. Li, & H. Zan (Eds.), ***Natural Language Processing and Chinese Computing: 8th CCF International Conference, NLPCC 2019, Dunhuang, China, October 9–14, 2019, Proceedings, Part II*** **(Lecture Notes in Computer Science**, Vol. 11839, pp. 637–644).
- Lim, M. K., Bahr, W., & Leung, S. C. H. (2022). RFID in the supply chain: The value of integration. ***Journal of Business Logistics***, 43(1), 56–73.
- Mustafa, N., Khan, Z., & Ali, S. (2024). Future research roadmap for AI in education: A systematic review. ***Computers & Education****, 198*, 104728.

- Nozari, H., Rezaei, J., & Ghezavati, V. (2025). AIoT-enabled optimization for cold chain logistics: A modeling and simulation approach. ***Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review****, 188*, 103583.
- Pournader, M., Ghaderi, H., Hassanzadegan, A., & Fahimnia, B. (2021). *Artificial intelligence applications in supply chain management*. ***International Journal of Production Economics,*** 241, 1–16.
- Prasad, R. (2025). Integrating AI and IoT for sustainable cold chain logistics: A conceptual framework and simulation study. ***Sustainable Production and Consumption****, 38*, 145–159.
- Ramires, I. E., Causton, C. E., Cunninghame, F., et al. (2022). A novel approach for evaluating potential biological control agents of the avian vampire fly. ***Functional Ecology***, 36(1), 123–135.
- Rodrigue, J.-P., & Notteboom, T. (2020). The geography of transport systems (5th ed.). ***Routledge.***
- Shi, L., Tang, Y., & Wang, Z. (2024). Joint distribution models in fresh food cold chains: A literature review. ***Journal of Cleaner Production****, 412*, 137–150.
- Staydev, S., & Roshan, R. (2024). Artificial intelligence and IoT applications in cold chain logistics: Opportunities and challenges. International Journal of Logistics Research and Applications***. Advance online publication.***
- Tezcan Aral Tezcan .(2024) .Determining the Key Factors and Estimation of Fuel Consumption in Cold Chain Logistics: A Machine Learning Approach .***Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Ingegneria Gestionale (Engineering And Management***.58-1 ،
- Wamba, S. F., Queiroz, M. M .(2021) .Industry 4.0 and the Supply Chain digital transformation: A literature review and a research agenda .***International Journal of Production Research***.6410-6381 ،
- Wang, H., Liu, F., & Zhou, Y. (2025). Generative AI in education: A systematic review of empirical studies (2022–2024). ***Computers & Education: Artificial Intelligence,*** *7*, 100245.
- Xu, X., Li, J., & Chen, Q. (2023). Cold chain logistics for fresh products: A comprehensive review and research agenda. ***Food Control****, 145*, 109–122.
- Yan, B. (2017). Cold chain logistics system based on the Internet of Things. International Journal of Simulation Systems, ***Science & Technology,*** 18(2), 1–6.
- Yinuo Zhang and Guowei Hua .(2020) .Intelligent Food Cold Chain System Design ***.IOP Conference Series:Materials Science and Engineering***.782 ،

- Zhang, Y., & Mohamed, S. (2024). Sustainability challenges in cold chain logistics: A systematic literature review (2000–2023). ***Renewable and Sustainable Energy Reviews****, 184*, 113553.
- Zheng, J. (2021). Applications of artificial intelligence in supply chain management: A review. ***Journal of Industrial Integration and Management,*** *6*(3), 245–267
- Grand View Research. (2022). Cold chain market size, share & trends analysis report by type, by packaging, by equipment, by application, by region, and segment forecasts, 2022–2030. ***Grand View Research***.