Strategic Management Accounting
Volume 3, issue 1- Spring 2026- pages 1-31
Home page: https://www.smajournal.ir/

Analyzing and Ranking of Critical Success Factors in the Integration of Artificial Intelligence and Circular Economy for Achieving a Smart and Sustainable Supply Chain with the DEMATEL Approach

Mohammad Zarei Mahmoudabadi[1*], Amirmahdi Torkzaban[2]

1. Associate Prof., Department of Management, Meybod University, Meybod, Iran. zarei.m@meybod.ac.ir
2. MSc. Student of Performance Management, Department of Management, Meybod University, Meybod, Iran. torkzaban@stu.meybod.ac.ir

OPEN ACCESS

Article type: Research Article

***Correspondence:**

Mohammad Zarei Mahmoudabadi

zarei.m@meybod.ac.ir

Received: December 11, 2026
Accepted: January 29, 2026
Published: Spring 2026

Citation: **Zarei Mahmoudabadi, M. and Torkzaban, A. (2026). Analyzing and Ranking of Critical Success Factors in the Integration of Artificial Intelligence and Circular Economy for Achieving a Smart and Sustainable Supply Chain with the DEMATEL Approach. *Strategic Management Accounting*, *3*(1),1-31.**

Publisher's Note: MSDS stays neutral withregard to jurisdictional claims in published material and institutional affiliations.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstract

The purpose of this paper is to identify and analyze the Critical Success Factors (CSFs) in the integration of Artificial Intelligence (AI) and Circular Economy (CE) within the context of Smart and Sustainable Supply Chains (SSC). This research is applied in nature, with a descriptive-survey approach for data collection. The data were gathered through bibliographic studies and surveys from industry experts and academic professionals, and analyzed using the DEMATEL technique. The Critical Success Factors in the integration of AI and Circular Economy in Smart and Sustainable Supply Chains were identified across five dimensions: managerial, technological, network collaboration, process, and sustainability. The DEMATEL analysis revealed that managerial and technological dimensions are recognized as the primary causal and impactful factors, while process and sustainability dimensions are most affected by other areas. Furthermore, the network collaboration dimension plays a key mediating role between managerial and sustainability dimensions, with the highest overall correlation. The results led to the development of an integrated conceptual framework, demonstrating that the integration of AI and Circular Economy, through enhancing the managerial, technological, and network collaboration dimensions, can optimize processes, promote sustainability, and lead to the creation of a smart and resilient supply chain. This framework elucidates the causal and structural relationships between the critical success factors and provides a pathway for achieving sustainable development and competitive advantage for organizations.

Keywords: Artificial Intelligence, Circular Economy, Key Success Factors, Smart and Sustainable Supply Chain, Industry 4.0.

JEL Classification: **O33; O32; M11; Q55; Q56; C44.**

DOI: ***https://doi.org/10.22034/smajournal.2026.565578.1280***

INTRODUCTION

In the contemporary business environment, supply chains serve as critical systems in production, distribution, and consumption processes, playing a significant role in organizational success and competitiveness (Qiao et al., 2025). With rapid technological changes and increasing environmental and economic pressures, organizations seek solutions to improve efficiency, reduce costs, and enhance sustainability in their supply chains (Vudugula, 2025). In this context, the concept of smart supply chains has emerged, leveraging advanced technologies such as Artificial Intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and blockchain, providing unprecedented capabilities for optimal management of complex supply chain processes (Xu et al., 2024).

AI, with its capacity for big data analytics, accurate predictions, and real-time decision optimization, represents a key tool for supply chain transformation (Zejjari & Benhayoun, 2024). Simultaneously, the Circular Economy (CE) has emerged as a sustainable approach aimed at waste reduction, resource recovery, and product lifecycle improvement, seeking to create green and environmentally responsible supply chains (Liu et al., 2022). The integration of AI with CE within a smart supply chain framework creates unique opportunities for performance enhancement, productivity improvement, and sustainable development achievement (Raut et al., 2025).

Despite this potential, numerous challenges exist in this integration pathway requiring precise identification of Critical Success Factors (CSFs). These factors include investments in technological infrastructure, organizational leadership support, innovation culture development, stakeholder collaboration, and organizational change management (Huang et al., 2022; Yontar, 2023). Neglecting these factors can hinder the full economic and environmental realization of AI and CE projects. Previous literature has examined AI applications in supply chains (Pournader et al., 2021; Culot et al., 2024), AI in CE (Raut et al., 2025; Acerbi et al., 2021), and smart sustainable supply chains (Demir et al., 2023; Ghanbari, 2023; Karimi Takalo et al., 2024). However, few studies have systematically and multidimensionally examined the causal relationships among CSFs in AI-CE integration. This study addresses this gap by answering: (1) What are the CSFs in AI and CE integration for smart sustainable supply chains? (2) What are the causal relationships among managerial, technological, network collaboration, process, and sustainability dimensions? (3) How can DEMATEL analysis determine the causal structure among these factors?

METHODOLOGY

This research is applied in purpose and employs a descriptive-survey method for data collection. The study was conducted in two phases. First, through systematic literature review, CSFs in AI and CE integration for smart sustainable supply chains were identified across five dimensions: managerial, technological, network collaboration, process, and sustainability. These factors were validated through expert consultation. The expert panel consisted of 12 specialists with at least three years of experience in AI and information technology, supply chain and logistics, sustainability, and circular economy. Purposive and snowball sampling methods were employed, and data collection continued until theoretical saturation was achieved.

Second, the DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory) method was applied to analyze causal relationships among the identified dimensions. DEMATEL is a comprehensive tool for constructing and analyzing structural models that capture causal relationships among complex factors (Wu & Lee, 2007). Developed by Gabus and Fontela (1973), this methodology identifies interdependencies among variables and distinguishes causal from effect factors through matrix calculations, including initial average matrix, normalized direct relation matrix, total relation matrix, and calculation of R (sum of rows) and J (sum of columns) values. The R+J value indicates factor importance, while R-J determines whether a factor is causal (positive) or effect (negative). Experts rated pairwise comparisons using a 0-4 scale (0 = no influence, 4 = very high influence). Data were analyzed using Excel and MATLAB software following standard DEMATEL procedures.

RESULTS

Literature review and expert validation identified 31 CSFs across five dimensions: managerial (7 factors), technological (7 factors), network collaboration (5 factors), process (5 factors), and sustainability (7 factors). The managerial dimension encompasses top management commitment, sustainability and digital transformation strategies, innovation-oriented organizational culture, participative leadership, incentive policies, change management, and human resource empowerment. The technological dimension includes robust technological infrastructure, quality data and predictive analytics capabilities, AI algorithm development, cybersecurity, systems integration capability, open standards and modular architecture, and technology adaptability. Network collaboration comprises data sharing among stakeholders, trust and transparency, process coordination, long-term strategic partnerships, and robust legal mechanisms. The process dimension covers product lifecycle optimization, real-time data utilization, reverse logistics management, traceability capabilities, and process flexibility. The sustainability dimension includes positive environmental impacts, long-term sustainable development orientation, regulatory compliance, circular economy awareness, resource efficiency, and data-driven governance for sustainability.

DEMATEL analysis yielded the total relation matrix and calculated R, J, R+J, and R-J values for each dimension. The technological dimension (B) showed the highest R value (4.3602), indicating its strong influence on other dimensions. The managerial dimension (A) followed with R = 4.1888. The sustainability dimension (E) had the lowest R value (2.3211), indicating its high dependence on other factors. For J values (representing influence received), the process dimension (D) received the highest influence (4.2287), followed by sustainability (3.4419). The R+J values, indicating overall interaction intensity, ranked as: technological (7.7119), managerial (7.0515), process (7.4168), network collaboration (7.2306), and sustainability (5.763). The R-J values revealed: managerial (1.3261) and technological (1.0086) as positive causal factors, while network collaboration (-0.1732), process (-1.0407), and sustainability (-1.1207) emerged as negative effect factors. These results demonstrate that managerial and technological dimensions are the primary drivers in AI-CE integration, actively influencing other dimensions. Network collaboration plays a mediating role, while process and sustainability dimensions are predominantly influenced by others. The network collaboration dimension showed the highest internal connectivity, serving as a crucial bridge between managerial/technological drivers and sustainability outcomes.

CONCLUSION

This study provides a comprehensive analysis of CSFs in AI and CE integration for smart sustainable supply chains, employing DEMATEL methodology to reveal causal structures among five key dimensions. The findings demonstrate that successful integration fundamentally depends on factors rooted in managerial and technological domains, which function as system drivers shaping the transformation pathway and maturity of other dimensions. This reveals a critical gap between technological capabilities and organizational competencies—a gap that without transformational leadership, innovation culture, and structural change management, prevents AI technologies from effectively achieving circular and sustainability objectives. The findings align with prior research emphasizing management's role in technology adoption (Gaur et al., 2025) while extending understanding by conceptualizing management as an integrated system of leadership, culture, change management, and skill development. The technological dimension's causal position confirms that AI functions not as an independent technology but as a holistic enabling platform whose effectiveness depends on digital architecture coherence, consistent with Raut et al. (2025). Notably, network collaboration emerged as a mediating element with the highest internal connectivity, transferring managerial and technological effects to operational processes and sustainability outcomes—a structural reinterpretation beyond descriptive treatments in previous literature (Rehman et al., 2025). The process and sustainability dimensions, despite their fundamental importance, are predominantly influenced rather than causal, indicating that sustainability achievement depends on strategic decisions and technological investments. This contrasts with approaches viewing sustainability as a starting point driven solely by regulatory pressure.

Practically, organizations should prioritize developing future-oriented management systems with clear integration vision, supported by top management commitment and innovation culture. Technological infrastructure investment, data quality assurance, cybersecurity, and open standards adoption are essential prerequisites. Network collaboration requires trust-based mechanisms, transparent contracts, and shared digital platforms. Process reengineering toward agile, data-driven operations with smart traceability enables waste reduction and regulatory compliance. Sustainability must be embedded in strategic planning through responsible consumption culture and data-driven environmental performance monitoring. Future research should employ complex systems modeling (agent-based modeling, system dynamics), hybrid MCDM methods integrated with machine learning, digital twin development for circular process simulation, and policy simulation approaches to examine incentive effects and governance mechanisms. This study contributes to AI-CE integration literature by providing a causally validated framework revealing systemic interdependencies, offering theoretical and practical guidance for digital transformation strategies and sustainability policies at organizational and macro levels.

Contribution of Authors
All authors participated equally in all stages of the research.

Ethical Approval
This research was conducted in compliance with the principles of research ethics and informed consent of the respondents.

Sponsor
The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript.

Conflict of Interest
The authors declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgements
The authors sincerely thank the expert panel members who participated in this study and generously shared their time and expertise. Their valuable insights significantly contributed to the quality and depth of this research.

حسابداری مدیریت راهبردی
سال سوم، شماره یک، بهار۱۴۰۵- صفحه ۱-۳۱
Home page: https:// smajournal.ir

تحلیل و رتبه‌بندی عوامل کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی برای تحقق زنجیره تأمین هوشمند و پایدار با رویکرد دیمتل

محمد زارعی محمودآبادی*[۱]، امیرمهدی ترک زبان[۲]

۱. دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران. (نویسنده مسئول) zarei.m@meybod.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت عملکرد، گروه مدیریت، دانشگاه میبد، میبد، ایران. torkzaban@stu.meybod.ac.ir
۳.

دسترسی آزاد
نوع مقاله: مقاله پژوهشی
*نویسنده مسئول:
محمد زارعی محمودآبادی
zarei.m@meybod.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۹
تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵
استناد: زارعی محمودآبادی، محمد و ترک زبان، امیرمهدی. (۱۴۰۵). تحلیل و رتبه‌بندی عوامل کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی برای تحقق زنجیره تأمین هوشمند و پایدار با رویکرد دیمتل، *فصلنامه حسابداری مدیریت راهبردی*، ۳(۱)، ۱-۳۱.

یادداشت ناشر: MSDS در خصوص ادعاهای قضایی در مطالب منتشرشده و وابستگی‌های سازمانی بی‌طرف می‌ماند.

کپی‌رایت: © 2026 by the authors
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

چکیده

این مقاله درصدد شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی موفقیت (CSFs) در ادغام هوش مصنوعی (AI) و اقتصاد چرخشی (CE) در بستر زنجیره تأمین هوشمند (SSC) و پایدار است. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش گردآوری داده‌ها، توصیفی-پیمایشی است. داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و نظرسنجی از خبرگان صنعت و دانشگاه گردآوری و با تکنیک دیمتل تحلیل شدند. یافته‌های پژوهش نشان دادند که عوامل حیاتی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین هوشمند و پایدار در پنج بُعد مدیریتی، فناوری، همکاری شبکه‌ای، فرآیندی و پایداری شناسایی شدند. نتایج تحلیل دیمتل بیانگر آن است که ابعاد مدیریتی و فناوری به‌عنوان عوامل علّی و اثرگذار اصلی شناخته می‌شوند. در مقابل، ابعاد فرآیندی و پایداری بیشترین میزان تأثیرپذیری را از سایر حوزه‌ها دارند. همچنین بعد همکاری شبکه‌ای با بالاترین مقدار ارتباط کلی، نقش واسطه‌ای کلیدی میان ابعاد مدیریتی و پایداری ایفا می‌کند. نتایج پژوهش منجر به ارائه یک چارچوب مفهومی تلفیقی شد که نشان می‌دهد ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی از طریق تقویت ابعاد مدیریتی، فناورانه و همکاری شبکه‌ای می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیندها، ارتقای پایداری و ایجاد زنجیره تأمین هوشمند و تاب‌آور منجر شود. این چارچوب، ارتباط علّی و ساختاری میان عوامل کلیدی موفقیت را تبیین کرده و مسیر تحقق توسعه پایدار و مزیت رقابتی پایدار را برای سازمان‌ها فراهم می‌سازد.

واژگان کلیدی: هوش مصنوعی، اقتصاد چرخشی، عوامل کلیدی موفقیت، زنجیره تأمین هوشمند و پایدار، صنعت ۴.۰

طبقه‌بندی موضوعی: O33; O32; M11; Q55; Q56; C44.

DOI: https://doi.org/10.22034/smajournal.2026.565578.1280

مقدمه

در دنیای معاصر، زنجیره تأمین به عنوان یک سیستم کلیدی در فرآیندهای تولید، توزیع و مصرف کالاها شناخته می‌شود که نقش بسزایی در موفقیت و رقابت‌پذیری سازمان‌ها ایفا می‌کند (Qiao et al., 2025). با تغییرات سریع فناوری و افزایش فشارهای زیست‌محیطی و اقتصادی، سازمان‌ها به دنبال راهکارهایی برای بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و پایداری بیشتر در زنجیره تأمین خود هستند (Vudugula, 2025). در این زمینه، مفهوم زنجیره تأمین هوشمند با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی (AI)، اینترنت اشیاء (IoT) و بلاکچین مطرح شده است که امکانات بی‌سابقه‌ای برای مدیریت بهینه و همزمان فرآیندهای پیچیده زنجیره تأمین فراهم آورده است (Xu et al., 2024).

هوش مصنوعی، با قابلیت تحلیل داده‌های بزرگ، ارائه پیش‌بینی‌های دقیق و بهینه‌سازی تصمیمات در زمان واقعی، یکی از ابزارهای کلیدی برای تحول زنجیره تأمین محسوب می‌شود (Zejjari et al., 2024). از سوی دیگر، اقتصاد چرخشی به عنوان یک رویکرد پایدار، با هدف کاهش ضایعات، بازیابی منابع و بهبود چرخه عمر محصولات مطرح شده است و به دنبال ایجاد زنجیره‌های تأمین سبز و با مسئولیت زیست‌محیطی است (Liu et al., 2022). ادغام هوش مصنوعی با اقتصاد چرخشی در چارچوب زنجیره تأمین هوشمند فرصتی بی‌نظیر برای ارتقاء عملکرد، افزایش بهره‌وری و تحقق توسعه پایدار ایجاد می‌کند (Raut et al., 2025).

با وجود این پتانسیل‌ها، چالش‌های متعددی در مسیر این ادغام وجود دارد که نیازمند شناخت دقیق عوامل حیاتی موفقیت (CSFs) است. این عوامل شامل مواردی مانند سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناورانه، حمایت رهبری سازمانی، توسعه فرهنگ نوآوری، همکاری میان ذینفعان، و مدیریت تغییرات سازمانی می‌شود. عدم توجه به این عوامل می‌تواند مانع تحقق کامل اقتصادی و زیست‌محیطی پروژه‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی شود (Huang et al., 2022; Yontar, 2023).

به دلیل تغییرات سریع فناوری و افزایش فشارهای زیست‌محیطی و اقتصادی، سازمان‌ها به دنبال راهکارهایی برای بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و پایداری بیشتر در زنجیره تأمین خود هستند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این مسیر، شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی موفقیت (CSFs) است که می‌تواند به شکل مؤثری در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین هوشمند و پایدار تأثیرگذار باشد. در این راستا، این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل این عوامل، از تکنیک دیمتل برای بررسی روابط علّی و اثرگذاری میان ابعاد مختلف این عوامل استفاده می‌کند. این تکنیک، با شناسایی ساختار درونی و تعاملات میان عوامل، امکان ارائه یک چارچوب تحلیلی دقیق را برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی در مسیر ادغام این دو حوزه فراهم می‌آورد.

این مطالعه قصد دارد تا ابعاد مختلف عوامل حیاتی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی را شناسایی و دسته‌بندی کند و راهکارهایی عملی برای ایجاد هماهنگی و بهبود عملکرد زنجیره تأمین در این زمینه ارائه دهد. به‌ویژه، این تحقیق بر آن است تا بررسی کند که کدام یک از ابعاد مدیریتی، فناوری، همکاری شبکه‌ای، فرآیندی و پایداری بیشترین تأثیر را در پیاده‌سازی موفق زنجیره تأمین هوشمند و پایدار دارند و چگونه می‌توان با استفاده از این عوامل، به بهینه‌سازی فرآیندها، ارتقای پایداری و ایجاد مزیت رقابتی پایدار کمک کرد.

در این راستا، سؤالات پژوهش به شرح زیر مطرح می‌شود:

- چه عواملی به‌عنوان عوامل حیاتی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین هوشمند شناخته می‌شوند؟
- روابط علّی و تأثیرگذاری میان ابعاد مدیریتی، فناوری، همکاری شبکه‌ای، فرآیندی و پایداری چگونه است؟
- چگونه می‌توان از تحلیل دیمتل برای تعیین ساختار و روابط علّی میان این عوامل بهره برد؟
- چه تأثیراتی از ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی بر پایداری و مزیت رقابتی سازمان‌ها مشاهده می‌شود؟

این تحقیق می‌تواند به مدیران، تصمیم‌گیرندگان و پژوهشگران حوزه‌های فناوری، پایداری و مدیریت زنجیره تأمین کمک کند تا سیاست‌ها و استراتژی‌های مؤثرتری برای کاربرد هوش مصنوعی در اقتصاد چرخشی تدوین کرده و به توسعه پایدار سازمان‌ها کمک نمایند. همچنین، این مقاله با تأکید بر جنبه‌های مدیریتی، فناوری، همکاری‌های شبکه‌ای، فرآیندی و اثرات مربوط به ابعاد پایداری، تصویر کاملی از چالش‌ها و فرصت‌های ادغام فراهم کرده و راهنمایی برای مسیر توسعه زنجیره تأمینی هوشمند و پایدار ارائه می‌کند که در نهایت نقش کلیدی در حفظ منابع طبیعی، بهبود کیفیت زندگی و تقویت مزیت رقابتی سازمان‌ها خواهد داشت.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

- **هوش مصنوعی در زنجیره تأمین**

هوش مصنوعی در زنجیره تأمین به به‌کارگیری فناوری‌ها و الگوریتم‌های پیشرفته مانند یادگیری ماشین، تحلیل داده‌های بزرگ و رباتیک برای بهینه‌سازی و اتوماسیون فرآیندهای زنجیره تأمین اشاره دارد. این فناوری امکان تحلیل پیش‌بینی تقاضا، مدیریت موجودی، برنامه‌ریزی حمل و نقل، و کنترل کیفیت را فراهم می‌کند. با به‌کارگیری هوش مصنوعی، شرکت‌ها قادر به کاهش خطاها، افزایش سرعت و دقت تصمیم‌گیری، و پاسخگویی بهتر به تغییرات بازار خواهند بود (Mohsen et al., 2024; Pandey et al., 2024). اتوماسیون فعالیت‌های تکراری و بهبود بهره‌وری منابع انسانی از دستاوردهای مهم این فناوری در مدیریت زنجیره تأمین است. همچنین، هوش مصنوعی قابلیت شناسایی ریسک‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم را نیز دارد. رشد سریع داده‌های دیجیتال و توسعه ابزارهای نوین، به فراگیر شدن کاربرد هوش مصنوعی در این حوزه کمک کرده است. نهایتا، هوش مصنوعی مسیر تحول سنتی به اکوسیستم‌های زنجیره تأمین پیش‌بینی‌کننده و هوشمند را هموار می‌سازد (Brintrup et al., 2024; Dey et al., 2024; Wei et al., 2023). پورنادرو همکاران (Pournader., et al. 2021) در یک مرور سیستماتیک، کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت زنجیره تأمین را بررسی کردند. این مطالعه با تحلیل ۱۵۰ مقاله منتشرشده بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰، وضعیت گذشته و حال این حوزه را ترسیم می‌کند. پژوهشگران با ارائه یک طبقه‌بندی سه‌گانه برای هوش مصنوعی شامل حس‌گری و تعامل، یادگیری و تصمیم‌گیری، نشان می‌دهند که روش‌های یادگیری در حال کسب محبوبیت بوده و روش‌های حس‌گری و تعامل، زمینه‌ای نوظهور برای تحقیقات آینده محسوب می‌شوند. در نهایت، این پژوهش اهمیت ملاحظات رفتاری در مطالعات آتی را نیز برجسته می‌کند. کلوت و همکاران (Culot., et al. 2024) در یک مرور سیستماتیک بر مقالات تجربی، کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت زنجیره تأمین را بررسی کردند. این پژوهش با هدف فاصله گرفتن از تبلیغات پر سر و صدا، به تحلیل فرصت‌ها و چالش‌های واقعی پیاده‌سازی هوش مصنوعی پرداخته است. یافته‌های این مرور، رویکردهای تکنولوژیک،

زمینه‌های کاربرد و چهار دسته کلیدی از مسائل پژوهشی، شامل الزامات داده‌ای و سیستمی، فرآیندهای استقرار فناوری، یکپارچه‌سازی درون‌سازمانی و بین‌سازمانی، و پیامدهای عملکردی را مشخص می‌کند. این مقاله با جمع‌آوری بینش‌های تحقیقاتی موجود، مبنای محکمی برای تحقیقات آینده در زمینه هوش مصنوعی در زنجیره‌های تأمین فراهم می‌آورد.زجاری و بنهایون (Zejjari & Benhayoun. 2024) در یک پژوهش کتاب‌سنجی، به بررسی وضعیت فعلی تحقیقات پیرامون کاربرد هوش مصنوعی در زنجیره تأمین پایدار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که پایداری به یک عامل حیاتی در معادلات زنجیره‌های تأمین مبتنی بر هوش مصنوعی تبدیل شده و زمینه را برای تحقیقات آکادمیک و نوآوری‌های مدیریتی فراهم می‌سازد.

راوت و همکاران (Raut., et al. 2025) در یک مرور سیستماتیک جامع، به بررسی نقش و کاربردهای هوش مصنوعی در اقتصاد چرخشی پرداختند. این پژوهش با استفاده از داده‌های ۸۲۱ مقاله از پایگاه اسکوپوس، روندهای موجود، موضوعات نوظهور و چگونگی تحول اقتصاد چرخشی توسط هوش مصنوعی را تحلیل کرده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد هوش مصنوعی در شش خوشه موضوعی اصلی شامل مدیریت پسماند، پایداری، لجستیک معکوس، بازیافت، استفاده مجدد و بازساخت متمرکز است. همچنین، این مقاله با ارائه چارچوب پیشنهادی PRISMA، به پیاده‌سازی ابزارهای هوش مصنوعی برای بهبود عملکرد اقتصاد چرخشی کمک می‌کند. این یافته‌ها می‌توانند راهنمای پژوهشگران، سیاست‌گذاران و متخصصان صنعت برای تحقیقات و اقدامات آینده باشند.

- **اقتصاد چرخشی**

اقتصاد چرخشی به مدلی اقتصادی اطلاق می‌شود که هدف آن حفظ ارزش مواد و منابع به مدت طولانی‌تر و کاهش ضایعات از طریق بازیافت، تعمیر، بازسازی و استفاده مجدد است. این رویکرد برخلاف اقتصاد خطی، چرخه کمتری از منابع را مصرف کرده و تأکید بیشتری بر حفظ محیط زیست و توسعه پایدار دارد. در اقتصاد چرخشی، محصولات طراحی می‌شوند تا عمر طولانی داشته باشند و پس از استفاده قابلیت بازگشت و تجدید داشته باشند. این مدل می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی منجر شود و مصرف انرژی و مواد اولیه را بهینه سازد. همچنین اقتصاد چرخشی باعث تشویق نوآوری در طراحی محصول و فرآیندهای تولید می‌شود. بهره‌گیری از این رویکرد منافع اقتصادی و زیست‌محیطی را در کنار هم به ارمغان می‌آورد و نقش مهمی در توسعه صنعتی پایدار ایفا می‌کند. چرخه‌های بسته زنجیره تأمین در این اقتصاد، به بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند (Lahane et al., 2020). گیسدورفر و همکاران (Geissdoerfer., et al. 2018) در پژوهشی با هدف بررسی عملکرد پایداری مدل‌های کسب‌وکار چرخشی و زنجیره‌های تأمین چرخشی ، به ارائه یک چارچوب پیشنهادی برای ادغام این دو مفهوم در جهت دستیابی به توسعه پایدار پرداختند. این چارچوب که بر پایه تحلیل ادبیات و چهار مطالعه موردی توسعه یافته، نشان می‌دهد که چگونه مدل‌های کسب‌وکار چرخشی در حلقه‌های مختلف زنجیره تأمین، از جمله حلقه‌های بسته‌شده، کندشده، فشرده‌سازی، باریک‌سازی و غیرمادی‌سازی، عمل می‌کنند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌های کسب‌وکار و زنجیره‌های تأمین چرخشی، ابزاری مؤثر برای تحقق اهداف پایداری در سطح سازمانی هستند.آکربی و همکاران (Acerbi., et al. 2021) در یک مرور سیستماتیک بر ادبیات موجود، به بررسی نقش هوش مصنوعی در اقتصاد چرخشی، به‌ویژه در حوزه تولید چرخشی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد هوش مصنوعی در سطح خرد، یعنی در سطح شرکت‌ها، پیشرفت چشمگیری داشته است. اما در مقابل، استفاده از هوش مصنوعی در سطح میانی شامل شبکه‌ای از شرکت‌ها و نیز در سطح کلان شامل شهرها و کشورها، و

همچنین بررسی هم‌افزایی میان این سه سطح، هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. بشینسکا و همکاران (Bashynska., et al. 2024) در مقاله‌ای به بررسی کاربردهای نوآورانه هوش مصنوعی در ارتقای شیوه‌های اقتصاد چرخشی پرداختند. این پژوهش نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند با بهینه‌سازی مصرف منابع، مدیریت زنجیره‌های تأمین پایدار، و ایجاد سیستم‌های تولید منطبق با اقتصاد چرخشی، کارایی در استفاده از منابع را به شکل قابل‌توجهی افزایش دهد. این مقاله با ارائه مطالعات موردی و مثال‌های عملی، نقش استراتژیک هوش مصنوعی در کاهش ضایعات و اثرات زیست‌محیطی را برجسته کرده و پتانسیل آن را برای تسهیل گذار به یک اقتصاد چرخشی و دستیابی به پایداری بلندمدت نشان می‌دهد.

- **زنجیره تأمین هوشمند و پایدار**

زنجیره تأمین هوشمند به سامانه‌های انعطاف‌پذیر و خودتنظیمی گفته می‌شود که با استفاده از فناوری‌های دیجیتال مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء، رباتیک و داده‌های بزرگ، توانایی مدیریت و هماهنگی بهینه کل فرآیندهای زنجیره تأمین را دارند. این نوع زنجیره‌ها قابلیت واکنش سریع به تغییرات محیطی و بازار را دارند و می‌توانند به صورت بلادرنگ تصمیمات بهینه را اتخاذ کنند (Saruchera et al., 2024). به کمک این فناوری‌ها، شفافیت و ردیابی بهتر در جریان کالاها و اطلاعات فراهم شده و فرآیندهای لجستیک بهینه می‌شوند. زنجیره تأمین هوشمند باعث افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و بهبود رضایت مشتری می‌شود. استفاده از اتوماسیون و فناوری‌های نوین نیز به کاهش خطاها و سرعت‌بخشی به عملیات کمک می‌کند. این نوع زنجیره‌ها نقش کلیدی در تحقق توسعه پایدار و اقتصاد دیجیتال ایفا می‌کنند (Movahed et al., 2024). زنجیره تأمین پایدار به‌عنوان رویکردی جامع تعریف می‌شود که در آن ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌صورت همزمان در تمامی فرآیندهای زنجیره از تأمین مواد اولیه تا تولید، توزیع، مصرف و بازیافت در نظر گرفته می‌شوند (Aladaileh et al., 2024). این مفهوم فراتر از بهینه‌سازی هزینه‌ها و کارایی عملیاتی است و بر مسئولیت‌پذیری سازمان در قبال ذینفعان، جامعه و محیط زیست تأکید دارد (Brandenburg et al., 2014). زنجیره تأمین پایدار با ادغام اصول توسعه پایدار در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و عملیاتی، به دنبال ایجاد ارزش بلندمدت برای کسب‌وکار، جامعه و سیاره است. این رویکرد ضمن حفظ رقابت‌پذیری اقتصادی، به کاهش ردپای کربن، مدیریت پسماند، رعایت حقوق کارگری و ارتقای شفافیت در روابط تجاری می‌پردازد (Caiado et al., 2022). در ادبیات معاصر، زنجیره تأمین پایدار اغلب با مفاهیمی همچون زنجیره سبز و زنجیره حلقه‌بسته همراه است و به‌عنوان یکی از ارکان کلیدی حکمرانی شرکتی مسئولانه شناخته می‌شود. این چشم انداز نه‌تنها به انطباق با مقررات جهانی کمک می‌کند، بلکه پایه‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری بلندمدت سازمان را در برابر شوک‌های اجتماعی و زیست‌محیطی تقویت می‌نماید (Chalmeta et al., 2020; Chen et al., 2024). رحمان و همکاران(Rehman., et al. 2025) در مطالعه‌ای تجربی با استفاده از داده‌های ۳۰۲ پرسشنامه از شرکت‌های چندملیتی فعال در کشورهای شورای همکاری خلیج فارس، به بررسی رابطه زنجیره تأمین هوشمند و عملکرد زنجیره تأمین پایدار پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که اگرچه SSC به‌طور مستقیم بر SSCP تأثیر معناداری ندارد، اما این تأثیر به‌صورت غیرمستقیم از طریق روش‌های مدیریت زنجیره تأمین سبز داخلی و خارجی و همچنین به‌صورت متوالی از طریق E-GSCM و سپس I-GSCM تحقق می‌یابد. همچنین، فشارهای نهادی رابطه بین SSC و روش‌های GSCM را تعدیل می‌کنند. این پژوهش بر اهمیت هماهنگی استراتژیک بین فناوری‌های هوشمند و اقدامات سبز داخلی و خارجی برای دستیابی به پایداری در زنجیره تأمین تأکید دارد. کریمی تکلو و همکاران (۲۰۲۴)در مطالعه‌ای کاربردی با استفاده از روش‌های ترکیبی DEMATEL و مدل‌سازی ساختاری تفسیری تخاصمی (AISM) به شناسایی و

تحلیل محرک‌های زنجیره تأمین هوشمند، پایدار و چرخشی در صنعت روغن خوراکی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که «صلاحیت سازمانی» و «صلاحیت منابع انسانی» بیشترین تأثیرگذاری را در بین محرک‌ها دارند، درحالی‌که ابعاد «پایداری اقتصادی» و «پایداری زیست‌محیطی» بیشترین میزان تأثیرپذیری را نشان می‌دهند. این پژوهش بر این نکته تأکید دارد که پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند تنها زمانی به پایداری و چرخشی منجر می‌شود که با توانمندی‌های داخلی سازمان هم‌راستا باشد. بنابراین، مدیران صنعت روغن خوراکی برای حرکت به سوی یک زنجیره تأمین هوشمند و پایدار، باید اولویت خود را بر تقویت صلاحیت‌های سازمانی و انسانی قرار دهند. قنبری(Ghanbari. 2023) در پژوهشی با رویکرد مرور سیستماتیک، ابعاد زنجیره تأمین هوشمند-پایدار مبتنی بر هوش مصنوعی را در چارچوبی پنج‌گانه تبیین می‌کند :بعد مدیریتی که بر بازتعریف مدیریت عملیات با محوریت اصول پایداری تأکید دارد؛ بعد فناوری که به‌کارگیری هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و راهکارهای اتوماسیون را در فرآیندهای زنجیره تأمین شامل می‌شود؛ بعد همکاری شبکه‌ای که از طریق اشتراک‌گذاری بلادرنگ اطلاعات و مدیریت هوشمند روابط با تأمین‌کنندگان، یکپارچگی زنجیره را تقویت می‌کند؛ بعد فرآیندی که خودکارسازی فرآیندهای کلیدی مانند خرید، انبارداری، لجستیک و کنترل کیفیت را پوشش می‌دهد؛ و بعد پایداری که سه‌گانه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را در تمام مراحل چرخه حیات زنجیره تأمین یکپارچه می‌سازد. این چارچوب جامع، زمینه‌ساز توسعه مدل‌های نوین، هوشمند و پایدار در عملیات زنجیره تأمین است. دمیر و همکاران (Demir., et al. 2023) در مطالعه‌ای نوین، مدلی با عنوان مدل آمادگی و بلوغ زنجیره تأمین هوشمند و پایدار (SCRM) ارائه کردند که به‌طور همزمان ابعاد هوشمندی و پایداری را در زنجیره تأمین ارزیابی می‌کند. این مدل بر پایه‌ی رویکرد سه‌گانه‌ی پایداری (اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی) و سه‌گانه‌ی هوشمندی (دسترسی‌پذیری، یکپارچگی و انطباق‌پذیری) طراحی شده است. آن‌ها با تلفیق شاخص‌های آمادگی و بلوغ صنعت ۴.۰ و معیارهای پایداری، شاخصی ترکیبی برای سنجش وضعیت کنونی سازمان‌ها توسعه دادند. این پژوهش با اجرای مطالعه موردی در صنعت خودروسازی، کاربردی و اعتبار مدل پیشنهادی را نشان داد. مریدهاو همکاران (Mridha., et al. 2023) در مطالعه‌ای یک مدل هوشمند سه‌سطحی زنجیره تأمین پایدار را برای کنترل انتشار کربن و بهبود کیفیت سوخت زیستی طراحی کردند که در آن یک تأمین‌کننده، یک تولیدکننده و چندین خرده‌فروش در نظر گرفته شده‌اند. آن‌ها سیاست بازرسی دو مرحله‌ای و نرخ تولید متغیر را به‌کار گرفتند تا میزان سوخت زیستی ناخالص که به‌عنوان ضایعات در نظر گرفته می‌شود کاهش یابد و فرآیند تولید انعطاف‌پذیرتر شود. تقاضا در این مدل وابسته به قیمت فروش متغیر است و انتشار کربن نیز در فعالیت‌های عملیاتی شامل راه‌اندازی، حمل‌ونقل و نگهداری موجودی در نظر گرفته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که این سیستم یکپارچه نه‌تنها سودآوری را بهینه می‌کند، بلکه به‌طور همزمان ضایعات و انتشار کربن را کاهش داده و تأثیر مثبتی بر ابعاد زیست‌محیطی و مالی زنجیره تأمین دارد. شکوهیار و همکاران (Shokouhyar., et al. 2019) با به‌کارگیری روش نقشه شناختی فازی، یک نقشه رابطه‌ای برای مدل‌سازی زنجیره تأمین هوشمند و پایدار طراحی کردند. آن‌ها وابستگی‌های میان روش‌های رابطه‌ای را در هفت گروه معنادار شامل اینترنت اشیا اقتصادی، اینترنت اشیای سبز، اینترنت اشیای اجتماعی، زنجیره تأمین اقتصادی، زنجیره تأمین سبز، زنجیره تأمین اجتماعی و سایر متغیرها تحلیل نمودند. یافته‌های این پژوهش راهنمای عملی برای مدیران در درک ارتباط میان فناوری‌های اینترنت اشیا و اهداف پایداری در زنجیره تأمین است. این مطالعه به‌عنوان نخستین تلاش برای شناسایی و ترسیم وابستگی‌های متقابل میان روش‌های رابطه‌ای در چارچوب زنجیره تأمین هوشمند و پایدار مطرح شده است. در جدول ۱خلاصه‌ای از پیشینه پژوهش ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه پیشینه های پژوهش

Table1. Summary of the Literature Review

محقق(ان)	سال	موضوع پژوهش	روش تحقیق	حوزه تحقیق/صنعت	یافته‌های کلیدی	شکاف پژوهشی
شکوهیار و همکاران	۲۰۱۹	زنجیره هوشمند-پایدار با رویکرد اینترنت اشیا	نقشه‌شناختی فازی	زنجیره تامین هوشمند-پایدار	اینترنت اشیا (سبز/اقتصادی/اجتماعی) ارتباط مستقیمی با اهداف پایداری دارد.	عدم در نظر گرفتن هوش مصنوعی؛ ماهیت کیفی و غیرساختاری تحلیل
گیسدورفر و همکاران	۲۰۱۸	مدل‌های کسب‌وکار چرخشی و زنجیره تأمین	تحلیل ادبیات + مطالعات موردی	چند صنعتی	ادغام مدل‌های چرخشی و زنجیره تأمین، راهکاری مؤثر برای پایداری سازمانی است.	عدم توجه به فناوری‌های دیجیتال و هوشمندسازی
پورنادر و همکاران	۲۰۲۱	هوش مصنوعی در زنجیره تأمین	مرور سیستماتیک	چندصنعتی	طبقه‌بندی AI: یادگیری (رو به رشد)، حس گری/تعامل (ناحیه نوظهور) نیاز به ملاحظات رفتاری	کمبود توجه به عوامل رفتاری و مدیریتی در پیاده‌سازی
آچربی و همکاران	۲۰۲۱	AI در اقتصاد چرخشی	مرور سیستماتیک	صنایع تولیدی	پیشرفت در پیاده سازی در سطح شرکت‌ها	کمبود پژوهش در سطوح شبکه‌ای و کلان
قنبری	۲۰۲۳	ابعاد زنجیره هوشمند-پایدار مبتنی بر AI	مرور سیستماتیک	سطح کلان(چارچوب نظری)	چارچوب پنج‌گانه: مدیریتی، فناوری، همکاری، فرآیند، پایداری.	عدم اعتبارسنجی تجربی چارچوب؛ محدودیت روش‌شناختی به مرور کتابخانه‌ای
دمیر و همکاران	۲۰۲۳	مدل بلوغ زنجیره هوشمند-پایدار (S3RM)	توسعه مدل + مطالعه موردی	صنعت خودروسازی	مدل ترکیبی برای سنجش همزمان هوشمندی و پایداری در سه بعد هر کدام	وابستگی به داده‌های یک صنعت؛ عدم تعمیم‌پذیری بالا
مریدها و همکاران	۲۰۲۳	مدل هوشمند کنترل کربن در زنجیره سوخت زیستی	مدل‌سازی ریاضی	زنجیره تامین هوشمند-پایدار	مدل پیشنهادی سودآوری را افزایش و ضایعات/کربن را کاهش می‌دهد.	عدم در نظر گرفتن ابعاد مدیریتی و رفتاری
زجاری و همکاران	۲۰۲۴	AIدر زنجیره تأمین پایدار	کتاب‌سنجی	چند صنعتی	پایداری هم‌اکنون هسته اصلی تحقیقات AI در زنجیره تأمین است.	عدم تحلیل عمقی محتوایی یا روابط علّی
کلوت و همکاران	۲۰۲۴	چالش‌های واقعی پیاده‌سازی AI	مرور سیستماتیک	اقتصاد دایره ای دیجیتال	چهار چالش کلیدی: داده/سیستم، استقرار، یکپارچه‌سازی، عملکرد	عدم اعتبارسنجی تجربی؛ سطح تحلیل کیفی-مفهومی
بشینسکا و همکاران	۲۰۲۴	کاربردهای نوآورانه AI در اقتصاد چرخشی	تحلیل مفهومی + مطالعات موردی	اقتصاد چرخشی - سطح سیستمی	AIمنابع را بهینه می‌کند، ضایعات را کاهش می‌دهد و گذار به اقتصاد چرخشی را تسهیل می‌کند.	عدم ارائه چارچوب ساختاری برای تعامل ابعاد؛ ماهیت کیفی-توصیفی
دوبودی و همکاران	۲۰۲۴	ادغام فناوری دیجیتال و زنجیره تأمین دایره‌ای	Grey DEMATEL	صنعت دایره‌ای دیجیتال	عوامل کلیدی موفقیت: تعهد سازمانی، حمایت مدیریت ارشد، الگوهای کسب‌وکار نوین	عدم تمایز در ابعاد ساختاری (علّی/معلولی)
کریمی تکلو و همکاران	۲۰۲۴	محرک‌های زنجیره هوشمند- پایدار- چرخشی	DEMATEL + AISM	صنعت روغن خوراکی	صلاحیت‌های سازمانی و انسانی، پیش‌نیاز اصلی	محدودیت جغرافیایی و صنعتی

					پیاده‌سازی موفق فناوری‌های هوشمند.	
رحمان و همکاران	۲۰۲۵	رابطه زنجیره هوشمند و پایدار	پرسشنامه	چندملیتی	تأثیر غیرمستقیم هوشمندسازی بر پایداری از طریق مدیریت زنجیره سبز	وابستگی به داده خودگزارشی؛ عدم استفاده از تحلیل علّی پویا
راوت و همکاران	۲۰۲۵	AI در اقتصاد چرخشی	مرور سیستماتیک	چند صنعتی	AI عمدتاً در مدیریت پسماند، بازیافت، لجستیک معکوس و استفاده مجدد کاربرد دارد.	نبود مطالعه موردی عملیاتی؛ تحلیل بیشتر توصیفی
پژوهش حاضر	۲۰۲۵	تحلیل علی عوامل کلیدی ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در زنجیره تامین هوشمند و پایدار	DEMATEL	چندصنعتی / سطح کلان (ایران)	عوامل فناوری و مدیریتی بیشترین نقش علی را دارند و عوامل مربوط به پایداری تاثیر پذیر هستند	-

با وجود مطالعات ارزشمند پیشین، کمتر پژوهشی به‌صورت سیستمی و چندبُعدی به ارائه یک مدل یکپارچه از عوامل حیاتی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی پرداخته است. این شکاف پژوهشی به‌ویژه در تعامل پیچیده بین ابعاد مدیریتی، فناورانه، شبکه‌ای، فرآیندی و پایداری مشهود است که هر یک نقشی کلیدی در تحقق چابکی، نوآوری و پایداری سیستم‌های اقتصادی آینده ایفا می‌کنند. مقاله حاضر با بهره‌گیری از رویکردی سیستمی و تلفیقی، در پی طراحی و اعتبارسنجی چارچوبی جامع است که این پنج بُعد را در تعامل پویا با یکدیگر تبیین می‌نماید. برای تحلیل روابط علّی میان مؤلفه‌ها، از روشی کمّی استفاده شده است که قادر است ساختار وابستگی‌های داخلی را شناسایی کرده، مؤلفه‌های کلیدی را بر اساس نقش علّی و اثرگذاری آن‌ها تمایز دهد و زیرساخت لازم برای اولویت‌بندی راهبردها را فراهم آورد. چنین رویکردی نه‌تنها امکان درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های زمینه‌ساز موفقیت را فراهم می‌آورد، بلکه راهگشای سیاست‌گذاری‌های هوشمند و استراتژی‌های اجرایی در سطح سازمانی و ملی خواهد بود.

روش پژوهش

هدف تدوین پژوهش حاضر تحلیل و رتبه‌بندی عوامل کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی برای تحقق زنجیره تأمین هوشمند و پایدار می‌باشد. همچنین از نظر هدف در زمره پژوهش‌های کاربردی و از نظر شیوه گردآوری داده‌ها، توصیفی-پیمایشی است. اطلاعات مورد نیاز برای پژوهش با استفاده از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی جمع‌آوری شد.در مرحله اول برای شناسایی عوامل کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی برای تحقق زنجیره تأمین هوشمند و پایدار مطالعه منابع و مقالات مرتبط با این موضوعات صورت گرفت؛ پس از شناسایی این عوامل برای اطمینان از اعتبار و درستی این عوامل، از خبرگان متخصص در حوزه های مرتبط با این پژوهش نظرخواهی و نظرات آن ها جمع‌آوری شد.خبرگان و جامعه هدف مورد نظر این پژوهش، متخصصان و مدیران و اساتید دانشگاه با تجربه در سه حوزه هوش مصنوعی و فناوری اطلاعات، زنجیره تأمین و لجستیک، پایداری و اقتصاد چرخشی بودند.برای نمونه‌گیری از روش هدفمند و گلوله برفی استفاده شد.معیارهای انتخاب خبرگان برای پژوهش شامل حداقل ۳ سال تجربه فعالیت و داشتن تخصص در حوزه های مذکور بودند. حجم نمونه بر اساس اصل اشباع نظری تعیین گردید و فرآیند گردآوری داده‌ها پس از انجام مصاحبه با ۱۲ خبره متخصص، با تأیید اشباع نظری پایان یافت.سپس برای تحلیل و رتبه‌بندی عوامل

کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی برای تحقق زنجیره تأمین هوشمند و پایدار از روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری (دیمتل) که یک روش تحلیل برای سیستم‌های پیچیده است استفاده شد .این روش رویکردی برای تعیین ویژگی‌های رابطه متقابل عوامل تأثیرگذار با ادغام مرکزیت و علیت ارائه می‌کند. گاور و همکاران (Gaur., et al. 2025) موانع کلیدی پیاده‌سازی زنجیره تأمین ۴.۰ در صنعت الکترونیک هند را بررسی کردند و با به‌کارگیری روش دیمتل، چالش‌های علّی و اثری را تفکیک نمودند. یافته‌های پژوهش نشان داد که «عدم همکاری بین اعضای زنجیره تأمین» مهم‌ترین مانع و «عدم تعهد مدیریت ارشد» دارای بیشترین قدرت تأثیرگذاری بر سایر چالش‌هاست. این مطالعه چارچوبی اولویت‌بندی‌شده و کاربردی ارائه می‌دهد که با تأکید بر تعهد رهبری، ارتقای مهارت‌های نیروی کار و ایجاد بستر همکاری‌های دانش‌محور، به سازمان‌ها در طراحی نقشه راه ساختاریافته برای پذیرش زنجیره تأمین ۴.۰ کمک می‌کند. پتیدار و همکاران (Patidar., et al. 2023) در پژوهشی، با هدف شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر زنجیره تأمین مواد غذایی در بافت هند و بررسی روابط علّی میان آن‌ها، از روش مبتنی بر دیمتل استفاده کردند. پس از مرور ادبیات و مشورت با خبرگان حوزه زنجیره غذایی، چهارده عامل کلیدی شناسایی شد و تحلیل‌های علّی-معلولی با بهره‌گیری از نمودار علت و معلول انجام گرفت. یافته‌ها نشان داد که سه عامل گرایش به سوی نظام غذایی پایدار، الزامات اجتماعی در قبال امنیت و ایمنی غذایی و توجه فزاینده به مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی در دوران همه‌گیری کووید-۱۹به‌ترتیب دارای بیشترین تأثیرگذاری و اهمیت بودند. تقوا (Taghva., et al. 2012) در پژوهشی، بیست عامل تسهیل‌کننده پذیرش فناوری بلاک‌چین در مدیریت پایدار زنجیره تأمین را شناسایی و با به‌کارگیری روش دیمتل تحلیل کرد. یافته‌های پژوهش نشان داد که تعهد و حمایت مدیریت ارشد نقشی محوری در پیاده‌سازی موفق بلاک‌چین در مدیریت پایدار زنجیره تأمین ایفا می‌کرد؛ همچنین، توسعه بیشتر فناوری، تدوین قواعد شفاف حاکمیتی برای بلاک‌چین و بهبود توانایی این فناوری در تعامل با سایر سامانه‌های فناوری اطلاعات به‌عنوان ضرورت‌های کلیدی شناسایی شدند. این مطالعه بینش‌های ارزشمندی را در اختیار سازمان‌های در حال پذیرش، صنعت و سیاست‌گذاران قرار داد تا تصمیمات آگاهانه‌تری در جهت گسترش بلاک‌چین در زنجیره تأمین پایدار اتخاذ کنند.

مراحل انجام پژوهش حاضر در شکل ۱ ارائه شده است.

شکل ۱. مراحل انجام پژوهش

Figure 1. Research steps

- **روش دیمتل**

روش آزمایشگاه ارزیابی و آزمون تصمیم‌گیری یا دیمتل ابزاری جامع برای ساختن و تحلیل مدل‌های ساختاری است که روابط علّی میان عوامل پیچیده را در بر می‌گیرد (Wu et al., 2007). این روش بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۱۹۷۶ توسط قابوس و فونتلا (Gabus & Fontela. 1973) در برنامه «علوم و امور انسانی» مؤسسه باتل[1] در ژنو توسعه یافت و برای پژوهش

[1] Battelle Memorial Institute

درباره و حل مجموعه‌ای از مسائل پیچیده و درهم‌تنیده به‌کار گرفته شده است. دیمتل بر این باور استوار است که استفاده نوآورانه و مناسب از روش‌های پژوهش علمی می‌تواند درک ما از خوشه خاصی از مسائل درهم‌تنیده را بهبود بخشد و بدین‌ترتیب به شناسایی راهکارهای عملی‌تر از طریق یک ساختار سلسله‌مراتبی کمک نماید. این روش‌شناسی، با توجه به ویژگی‌های عینی موضوع مورد مطالعه، قادر است وابستگی متقابل میان متغیرها یا ویژگی‌ها را تأیید کرده و روابطی را که ویژگی‌های ذاتی یک سیستم و روند توسعه آن را منعکس می‌کنند، مشخص سازد (Chiu et al., 2006; Hori et al., 1999). خروجی فرآیند دیمتل، یک نمایش بصری (به‌عنوان مثال، نقشه ذهنی فرد) است که پاسخ‌دهنده از آن برای سازماندهی اقدامات خود استفاده می‌کند.

فرآیند دیمتل را می‌توان در مراحل زیر خلاصه کرد:

✓ مرحله ۱: محاسبه ماتریس میانگین

فرض کنید در این پژوهش، H خبره و n عامل وجود دارد. از هر پاسخ‌دهنده خواسته می‌شود که میزان تأثیری را که به‌نظرش عامل i بر عامل j دارد، ارزیابی کند. این مقایسات زوجی بین هر دو عامل با نماد x_{ij}^{k} نشان داده می‌شوند و به‌صورت نمره‌های عددی صحیح در بازه ۰ تا ۴ امتیازدهی می‌شوند که به‌ترتیب بیانگر «بدون تأثیر (۰)»، «تأثیر پایین (۱)»، «تأثیر متوسط (۲)»، «تأثیر بالا (۳)» و «تأثیر بسیار بالا (۴)» هستند (Gabus et al., 1973). نمرات ارائه‌شده توسط هر پاسخ‌دهنده، یک ماتریس پاسخ $n\times n$ غیرمنفی به نام $xk=[x_{ij}^{k}]$ را تشکیل می‌دهد، که در آن $k=1,2,\ldots,H$ بنابراین، $x_1,x_2,\ldots,x_H$ ماتریس‌های پاسخ H خبره هستند و هر عنصر x_{ij}^{k} در ماتریس $xk=[x_{ij}^{k}]n\times n$ یک عدد صحیح است. عناصر روی قطر اصلی هر ماتریس پاسخ $xk=[x_{ij}^{k}]n\times n$ همگی برابر با صفر در نظر گرفته می‌شوند. سپس ماتریس میانگین A با ابعاد $n\times n$ برای تمام نظرات خبرگان با میانگین‌گیری از نمرات H خبره به‌صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$a=\frac{1}{H}\sum_{k=1}^{H}x_{ij}^{k}$$ رابطه (۱)

ماتریس میانگین $A=[a_{ij}]n\times n$ را همچنین «ماتریس میانگین اولیه» می‌نامند. این ماتریس، اثرات مستقیم آغازینی را نشان می‌دهد که یک عامل بر سایر عوامل وارد می‌کند و از آن‌ها دریافت می‌نماید.

✓ مرحله ۲: محاسبه ماتریس تأثیر مستقیم

ماتریس نرمال‌شده رابطه مستقیم اولیه، که با M نشان داده می‌شود، از طریق نرمال‌سازی ماتریس میانگین A به‌روش زیر به‌دست می‌آید:

$$s=\max\left(\max_{1\le i\le n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}\,,\max_{1\le j\le n}\sum_{i=1}^{n}a_{ij}\right)$$ رابطه (۲)

بنابراین:

$$M=\frac{A}{S}$$ رابطه (۳)

از آنجا که مجموع هر سطر i از ماتریس A نشان‌دهنده میزان تأثیر مستقیم عامل i بر سایر عوامل است، عبارت $max_{1\le i\le n}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}$ بیشترین تأثیر مستقیم یک عامل بر دیگر عوامل را مشخص می‌کند. به‌طور مشابه، چون مجموع هر ستون j از ماتریس A بیانگر میزان تأثیرات مستقیمی است که عامل j از سایر عوامل دریافت می‌کند، عبارت $max_{1\le j\le n}\sum_{i=1}^{n} a_{ij}$ نشان‌دهنده عاملی است که بیشترین تأثیر را از سوی دیگر عوامل پذیرفته است. کمّیت مثبت s برابر با بزرگ‌ترین مقدار از بین این دو مجموع افراطی (حداکثر سطری و حداکثر ستونی) در نظر گرفته می‌شود. ماتریس M با تقسیم هر عنصر از ماتریس A بر این اسکالر sبه‌دست می‌آید. توجه داشته باشید که هر عنصر d_{ij} از ماتریس M مقداری بین صفر و یک خواهد داشت.

✓ مرحله ۳: محاسبه ماتریس رابطه کلی

تأثیرات غیرمستقیم میان عوامل از طریق توان‌های ماتریس M اندازه‌گیری می‌شوند. کاهش پیوسته تأثیرات غیرمستقیم عوامل در طول توان‌های ماتریس M، یعنی $M_2,M_3,\dots,M_n$، همگرایی جواب‌ها را در محاسبه معکوس ماتریس تضمین می‌کند؛ این ویژگی مشابه رفتار یک ماتریس زنجیره مارکوف جاذب است. لازم به ذکر است که:

رابطه (۴)
$$\lim_{m\to\infty} M^m = [0]_{n\times n}$$
$$\lim_{m\to\infty} (I + M + M^2 + M^3 + \cdots + M^m) = (I - M)^{-1}$$

که در آن $0_{n\times n}$ ماتریس صفر n×n و I ماتریس همانی n×n است. ماتریس رابطه کلی T یک ماتریس n×n است و به‌صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

رابطه (۵)
$$T = [t_{ij}] = \sum_{i=1}^{\infty} M^i = M(I - M)^{-1} \quad i, j = 1,2,\dots,n$$

با توجه به اینکه $\lim_{k\to\infty} M^k = 0_{n\times n}$ و همچنین $M = [d_{ij}]_{n\times n}$ به گونه‌ای است که $0 \le \left(\sum i\, d_{ij}, \sum j\, d_{ij}\right) < 1$ و $0 \le d_{ij} < 1$، و حداقل یکی از مجموع‌های سطری یا ستونی برابر با ۱ باشد. همچنین، دو بردار ستونی R و J با ابعاد n×1 به‌ترتیب به‌عنوان مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس رابطه کلی T تعریف می‌شوند:

رابطه (۶)
$$R = [r_i]_{n\times 1} = \left(\sum_{j=1}^{n} t_{ij}\right)_{n\times 1}$$
$$J = [c_j]'_{n\times 1} = \left(\sum_{i=1}^{n} t_{ij}\right)'_{1\times n}$$

که در آن علامت بالانویس نشان‌دهنده ترانهاده است. مقدار r_i برابر با مجموع سطر i ام ماتریس T است و نشان‌دهنده مجموع تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم عامل i بر سایر عوامل در سیستم است. به‌طور مشابه، c_j مجموع ستون j ام ماتریس T است و بیانگر مجموع تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم دریافت‌شده توسط عامل j از سایر عوامل می‌باشد. بنابراین، مقدار $R + J$ شاخصی از اهمیت کلی عامل i در سیستم است؛ یعنی میزان کل تأثیراتی که این عامل هم اعمال می‌کند و هم دریافت می‌نماید. از سوی دیگر، تفاضل $R - J$ که رابطه خالص نامیده می‌شود، نشان‌دهنده نقش خالص عامل i در سیستم است.

اگر $R - J > 0$ باشد، عامل i به‌عنوان یک عامل علت طبقه‌بندی می‌شود؛ یعنی بیشتر تأثیر می‌گذارد تا تحت تأثیر قرار گیرد. در مقابل، اگر $R - J < 0$ باشد، عامل i یک عامل اثر محسوب می‌شود؛ یعنی بیشتر تحت تأثیر سایر عوامل است (Liou et al., 2007; Malekzadeh et al., 2016).

یافته‌ها

➢ شناسایی عوامل کلیدی موفقیت

پس از مطالعه ادبیات مربوط با موضوع پژوهش و تایید توسط خبرگان متخصص، تعداد ۳۱ عامل کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی برای تحقق زنجیره تأمین هوشمند و پایدار در ۵ دسته شناسایی گردید. فهرست این عوامل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول2 . عوامل کلیدی موفقیت

Table 1. Critical success factors

عوامل (اختصار)	متغیرها	منابع
مدیریتی (A)	تعهد و حمایت مدیریت عالی	(Al Maazmi et al., 2024; Idogawa et al., 2023)
	استراتژی‌های پایداری و تحول دیجیتال	(Al Maazmi et al., 2024; Toşa et al., 2024)
	فرهنگ سازمانی پذیرای نوآوری و یادگیری مستمر	(Al Maazmi et al., 2024; Leyh et al., 2021)
	رهبری مشارکتی و توانمندسازی تیم‌ها	(Al Maazmi et al., 2024; Bashynska., et al., 2024)
	سیاست‌های تشویقی برای اجرای پروژه‌های فناوری و اقتصاد چرخشی	(Toşa et al., 2024; Van Opstal et al., 2024)
	مدیریت تغییر و کاهش مقاومت سازمانی	(Asher et al., 2024; Idogawa et al., 2023)
	توانمندسازی منابع انسانی و آموزش تخصصی	(Toşa et al., 2024; Trevisan et al., 2025)
فناوری (B)	وجود زیرساخت‌های فناوری قوی	(Raut et al., 2025; Yontar, 2023)
	داده‌های با کیفیت و قابلیت تحلیل پیش‌بینی	(Raut et al., 2025; Yontar, 2023)
	توسعه و پیاده‌سازی الگوریتم‌های هوش مصنوعی مناسب	(Raut et al., 2025; Yontar, 2023)
	امنیت سایبری و حفاظت داده‌ها	(Al Maazmi et al., 2024; Raut et al., 2025)
	قابلیت یکپارچه‌سازی سیستم‌های مختلف	(Morshedi et al., 2025; Raut et al., 2025)
	استفاده از استانداردهای باز و معماری ماژولار فناوری	(Leyh et al., 2021; Panda et al., 2025)
	قابلیت به‌روزرسانی و انطباق با فناوری‌های نوین	(Al Maazmi et al., 2024; Wang, 2025)
همکاری و شبکه‌های تأمین (C)	اشتراک و تبادل داده‌ها بین ذینفعان	(Al Maazmi et al., 2024; Kemmner et al., 2025)
	ایجاد اعتماد و شفافیت در اکوسیستم زنجیره تأمین	(Al Maazmi et al., 2024; Huang et al., 2022)
	هماهنگی فرآیندها و یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین چرخشی	(Bimpizas-Pinis et al., 2022; Raut et al., 2025)
	روابط بلندمدت و مشارکت‌های استراتژیک	(Pathan et al., 2023; Raut et al., 2025)
	وجود سازوکارها و قرارداد حقوقی مستحکم	(Toşa et al., 2024; Zhou, 2025)

	مشارکت فعال بازیگران مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی	(Platon et al., 2024; Raut et al., 2025)
فرآیندی (D)	بهینه‌سازی چرخه عمر محصولات	(Raut et al., 2025; Zhou, 2025)
	استفاده از داده‌های لحظه‌ای برای تصمیم‌گیری بهینه	(Hernandez et al., 2025; Raut et al., 2025)
	مدیریت مؤثر لجستیک معکوس و زنجیره تأمین سبز	(Kazmi et al., 2025; Raut et al., 2025)
	قابلیت ردیابی و رهگیری مواد و محصولات	(Raut et al., 2025; Saberi et al., 2019)
	انعطاف‌پذیری در طراحی فرآیندها و پاسخ به تغییرات بازار	(Al Maazmi et al., 2024; Leyh et al., 2021)
پایداری (E)	تأثیرات محیط‌زیستی مثبت و کاهش ضایعات	(Oladapo et al., 2024; Raut et al., 2025)
	نگاه بلندمدت به توسعه پایدار و مسئولیت اجتماعی	(Falah et al., 2025; Redko, 2024)
	انطباق با مقررات محیط‌زیستی و کیفیت	(Goyal et al., 2024; Toșa et al., 2024)
	آگاهی‌بخشی و فرهنگ‌سازی در اقتصاد چرخشی	(Dwivedi et al., 2023; Toșa et al., 2024)
	بهره‌وری منابع	(Fatimah et al., 2024; Georgescu et al., 2025)
	حکمرانی داده-محور برای پایداری و انصاف	(Francisco et al., 2023; Sklavos et al., 2024)

ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در چارچوب زنجیره تأمین هوشمند و پایدار، مستلزم نگاهی نظام‌مند به تعامل میان عوامل مدیریتی، فناورانه، شبکه‌ای، فرآیندی و پایداری است. این ادغام تنها به استقرار فناوری‌های پیشرفته محدود نمی‌شود، بلکه به نوعی بازآفرینی سازمانی نیاز دارد که در آن رهبری تحول‌گرا، زیرساخت‌های فناورانه یکپارچه، همکاری میان ذی‌نفعان، فرآیندهای داده‌محور و تعهد به اصول پایداری به‌صورت هم‌زمان تقویت شوند. در سطح مدیریتی، تعهد و حمایت مدیریت عالی نقشی بنیادین در تضمین موفقیت پروژه‌های تحول دیجیتال و گذار به اقتصاد چرخشی دارد؛ زیرا این تعهد نه‌تنها منابع مالی و انسانی لازم را فراهم می‌کند، بلکه چشم‌انداز و مشروعیت راهبردی تحول را نیز تثبیت می‌نماید. رهبری مشارکتی و توانمندسازی تیم‌ها، بستر هم‌افزایی دانش، خلاقیت و یادگیری سازمانی را ایجاد کرده و مقاومت در برابر تغییر را کاهش می‌دهد. در همین راستا، فرهنگ سازمانی پذیرای نوآوری و یادگیری مستمر، نقش تسهیل‌کننده‌ای در پذیرش فناوری‌های نوین و بازآفرینی فرآیندهای سنتی دارد. استراتژی‌های تحول دیجیتال و پایداری، جهت‌گیری کلی سازمان را در مسیر هم‌گرایی فناوری و پایداری مشخص کرده و مدیریت تغییر و آموزش تخصصی نیروی انسانی، شرایط لازم برای انطباق ساختاری و رفتاری با الزامات هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی را فراهم می‌سازد. در بُعد فناورانه، زیرساخت‌های قوی و انعطاف‌پذیر فناوری به‌عنوان ستون فقرات زنجیره تأمین هوشمند عمل می‌کنند. وجود زیرساخت‌های محاسباتی و داده‌ای مطمئن، امکان توسعه و پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین و تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده را فراهم می‌آورد. امنیت سایبری و حفاظت از داده‌ها در این میان اهمیت مضاعفی دارند، زیرا اعتماد ذی‌نفعان و تداوم عملکرد سیستم‌ها وابسته به یک محیط داده‌ای امن و شفاف است. کیفیت داده‌ها و قابلیت اطمینان آنها، پیش‌شرط تصمیم‌گیری هوشمند و مدیریت مبتنی بر شواهد در تمام سطوح زنجیره است. علاوه بر این، یکپارچگی میان سیستم‌های مختلف و استفاده از استانداردهای باز و معماری‌های ماژولار، چابکی و قابلیت توسعه‌پذیری زیرساخت‌ها را افزایش می‌دهد و به سازمان اجازه می‌دهد تا با تغییرات سریع فناورانه هم‌سو بماند. به‌روزرسانی مداوم و انطباق‌پذیری

فناوری‌ها، پویایی سازمان را در مسیر گذار به سطوح بالاتر صنعتی و هوشمندی حفظ می‌کند.هم‌زمان با پیشرفت‌های فناورانه، همکاری شبکه‌ای میان بازیگران زنجیره تأمین به‌عنوان پیش‌شرط تحقق واقعی اقتصاد چرخشی مطرح می‌شود. ایجاد اعتماد و شفافیت در اکوسیستم زنجیره، شرط لازم برای تبادل آزادانه داده‌ها، همکاری فناورانه و اجرای پروژه‌های مشترک مبتنی بر هوش مصنوعی است. هماهنگی فرآیندها و یکپارچگی عملکردی میان تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و بازیافت‌کنندگان، از اتلاف منابع جلوگیری کرده و بهره‌وری شبکه را افزایش می‌دهد. روابط بلندمدت و مشارکت‌های استراتژیک، انگیزه لازم برای سرمایه‌گذاری مشترک در فناوری‌های پایدار را فراهم می‌کنند و سازوکارهای حقوقی و قراردادی مستحکم، تقسیم عادلانه منافع و ریسک‌ها را تضمین می‌نمایند. مشارکت فعال بازیگران اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی نیز پیوندی میان اهداف اقتصادی و اصول پایداری ایجاد کرده و موجب شکل‌گیری یک اکوسیستم نوآور و منعطف می‌شود.در سطح فرآیندی، استفاده از داده‌های لحظه‌ای و ابزارهای تحلیلی پیشرفته، تصمیم‌گیری بهینه و واکنش سریع به تغییرات محیطی را امکان‌پذیر می‌سازد. مدیریت لجستیک معکوس و زنجیره تأمین سبز از ارکان اساسی تحقق چرخه عمر بسته محصولات و کاهش ضایعات محسوب می‌شود. قابلیت رهگیری و ردیابی مواد و محصولات، شفافیت و قابلیت اطمینان فرآیندهای زنجیره را افزایش داده و سازمان را در انطباق با مقررات زیست‌محیطی یاری می‌کند. انعطاف‌پذیری در طراحی فرآیندها به سازمان اجازه می‌دهد تا با تغییرات بازار، فناوری یا مقررات به‌سرعت تطبیق یابد. کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف منابع نیز شاخص‌های کلیدی عملکرد در ارزیابی بلوغ فرآیندهای هوشمند و چرخشی به‌شمار می‌روند.در نهایت، بُعد پایداری به‌عنوان بُعد راهبردی و نهایی، تمامی ابعاد دیگر را در راستای تحقق توسعه پایدار یکپارچه می‌کند. نگاه بلندمدت به مسئولیت اجتماعی و زیست‌محیطی، سازمان را از تمرکز صرف بر بهره‌وری اقتصادی به سوی ارزش‌آفرینی جامع سوق می‌دهد. انطباق با مقررات و استانداردهای محیط‌زیستی، علاوه بر کاهش ریسک‌های قانونی، اعتبار سازمان را در بازارهای بین‌المللی تقویت می‌کند. آگاهی‌بخشی و فرهنگ‌سازی در زمینه اقتصاد چرخشی، رفتار مصرف‌کنندگان، کارکنان و شرکای تجاری را در راستای اهداف پایداری تغییر می‌دهد و بهره‌وری منابع، عامل کلیدی در افزایش کارایی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی است. در این میان، حکمرانی داده‌محور برای پایداری با فراهم‌سازی سازوکارهای ارزیابی و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد، امکان رصد، پیش‌بینی و بهینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی را فراهم می‌سازد.در مجموع، ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی زمانی به نتایجی پایدار و اثربخش منجر می‌شود که میان ابعاد مدیریتی، فناورانه، شبکه‌ای، فرآیندی و پایداری نوعی هم‌افزایی ساختاری و راهبردی برقرار شود. چنین هم‌افزایی نه‌تنها به افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین می‌انجامد، بلکه مسیر حرکت به‌سوی توسعه پایدار، عدالت زیست‌محیطی و تاب‌آوری فناورانه را هموار می‌سازد.

➢ نتایج روش دیمتل

پس از گردآوری پرسشنامه‌ها، داده‌های هر پرسشنامه به‌صورت جداگانه استخراج و با روش‌های تحلیلیِ دیمتل مورد پردازش قرار گرفت. در این روند، با استفاده از محاسبات ریاضیِ مبتنی بر ماتریس‌های رابطه‌ای و مراحل استاندارد این روش (شامل ماتریس میانگین نظر خبرگان، نرمال‌سازی ماتریس اولیه، محاسبه ماتریس رابطه مستقیم و غیرمستقیم، و

تعیین شاخص‌های علّی و معلولی)، ساختار روابط بین معیارها شناسایی و تحلیل شد. در ادامه، یافته‌های حاصل از این تحلیل ارائه می‌شود.

گام اول: میانگین نظر خبرگان

جدول3 . ماتریس میانگین نظرات خبرگان

Table 2. Expert Opinion Aggregation Matrix

ماتریس	عامل ۱(A)	عامل ۲(B)	عامل ۳(C)	عامل ۴(D)	عامل ۵(E)	مجموع
عامل ۱(A)	۰	۳/۰۸۳۳	۲/۹۱۶۷	۳/۲۵	۲/۰۸۳۳	۱۱/۳۳۳
عامل ۲(B)	۲/۷۵	۰	۳/۵	۳/۵۸۳۳	۲/۱۶۶۷	۱۲
عامل ۳(C)	۲/۰۸۳۳	۲/۴۱۶۷	۰	۲/۹۱۶۷	۱/۹۱۶۷	۹/۳۳۳
عامل ۴(D)	۱/۴۱۶۷	۲/۲۵	۲/۰۸۳۳	۰	۲/۸۳۳۳	۸/۵۸۳
عامل ۵(E)	۱/۱۶۶۷	۱/۱۶۶۷	۱/۵۸۳۳	۲	۰	۵/۹۱۶

که آلفا برابر است با ۰/۰۸۳۳ و نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان بالایی دارد.

گام دوم: نرمال‌سازی یا شدت نسبی روابط مستقیم

جدول4 . نرمال‌سازی یا شدت نسبی روابط مستقیم

Table 3. Normalization of the Direct Relation Matrix

ماتریس نرمال (M)	عامل ۱(A)	عامل ۲(B)	عامل ۳(C)	عامل ۴(D)	عامل ۵(E)
عامل ۱(A)	۰	۰/۲۵۶۹	۰/۲۴۳۱	۰/۲۷۰۸	۰/۱۷۳۶
عامل ۲(B)	۰/۲۲۹۲	۰	۰/۲۹۱۷	۰/۲۹۸۶	۰/۱۸۰۶
عامل ۳(C)	۰/۱۷۳۶	۰/۲۰۱۴	۰	۰/۲۴۳۱	۰/۱۵۹۷
عامل ۴(D)	۰/۱۱۸۱	۰/۱۸۷۵	۰/۱۷۳۶	۰	۰/۲۳۶۱
عامل ۵(E)	۰/۰۹۷۲	۰/۰۹۷۲	۰/۱۳۱۹	۰/۱۶۶۷	۰

در این گام آلفا در ماتریس روابط مستقیم ضرب می‌شود.

گام سوم: ماتریس شدت ممکن (معکوس)

جدول ۵. ماتریس شدت ممکن (معکوس)

Table 4. The Inverse Matrix

ماتریس معکوس	عامل ۱(A)	عامل ۲(B)	عامل ۳(C)	عامل ۴(D)	عامل ۵(E)
عامل ۱(A)	۱/۵۵۸	۰/۸۵۹	۰/۹۱۷۲	۱/۰۳۷۶	۰/۸۱۷۱
عامل ۲(B)	۰/۷۶۵۷	۱/۶۸۰۱	۰/۹۷۷۱	۱/۰۸۸۱	۰/۸۴۹۳
عامل ۳(C)	۰/۶۱۶۱	۰/۷۱۶۵	۱/۶۰۵۶	۰/۸۸۸۱	۰/۷۰۲۵
عامل ۴(D)	۰/۵۲۷۸	۰/۶۴۶۹	۰/۶۹۰۹	۱/۶۲۰۹	۰/۷۰۱۵
عامل ۵(E)	۰/۳۹۵۲	۰/۴۴۹۲	۰/۵۱۱۲	۰/۵۹۴	۱/۳۷۱۶

این مرحله محاسبه ماتریس شدت ممکن از روابط مستقیم و غیر مستقیم است که به صورت معکوس I-M بدست می‌آید.

گام چهارم: ماتریس روابط کل یا شدت روابط مستقیم و غیرمستقیم

جدول ۶. ماتریس روابط کل
Table 5. Total Relation Matrix

ماتریس روابط کل	عامل ۱(A)	عامل ۲(B)	عامل ۳(C)	عامل ۴(D)	عامل ۵(E)	جمع سطری (R)
عامل ۱(A)	۰/۵۵۸	۰/۸۵۹	۰/۹۱۷۲	۱/۰۳۷۶	۰/۸۱۷۱	۴/۱۸۸۸
عامل ۲(B)	۰/۷۶۵۷	۰/۶۸۰۱	۰/۹۷۷۱	۱/۰۸۸۱	۰/۸۴۹۳	۴/۳۶۰۲
عامل ۳(C)	۰/۶۱۶۱	۰/۷۱۶۵	۰/۶۰۵۶	۰/۸۸۸۱	۰/۷۰۲۵	۳/۵۲۸۷
عامل ۴(D)	۰/۵۲۷۸	۰/۶۴۶۹	۰/۶۹۰۹	۰/۶۲۰۹	۰/۷۰۱۵	۳/۱۸۸
عامل ۵(E)	۰/۳۹۵۲	۰/۴۴۹۲	۰/۵۱۱۲	۰/۵۹۴	۰/۳۷۱۶	۲/۳۲۱۱
جمع ستونی (J)	۲/۸۶۲۷	۳/۳۵۱۷	۳/۷۰۱۹	۴/۲۲۸۷	۳/۴۴۱۹	-

این مرحله محاسبه ماتریس شدت نسبی از روابط مستقیم و غیرمستقیم (روابط کل) است که به صورت معکوس M(I-M) بدست می‌آید.

گام پنجم : ماتریس شدت روابط غیرمستقیم

جدول5 . ماتریس شدت روابط غیر مستقیم
Table 6. Indirect Influence Matrix

ماتریس شدت غیرمستقیم	عامل ۱(A)	عامل ۲(B)	عامل ۳(C)	عامل ۴(D)	عامل ۵(E)
عامل ۱(A)	۰/۵۵۸	۰/۶۰۲۱	۰/۶۷۴۱	۰/۷۶۶۷	۰/۶۴۳۵
عامل ۲(B)	۰/۵۳۶۵	۰/۶۸۰۱	۰/۶۸۵۴	۰/۷۸۹۵	۰/۶۶۸۷
عامل ۳(C)	۰/۴۴۲۵	۰/۵۱۵۱	۰/۶۰۵۶	۰/۶۴۵۱	۰/۵۴۲۷
عامل ۴(D)	۰/۴۰۹۷	۰/۴۵۹۴	۰/۵۱۷۳	۰/۶۲۰۹	۰/۴۶۵۴
عامل ۵(E)	۰/۲۹۷۹	۰/۳۵۲	۰/۳۷۹۲	۰/۴۲۷۳	۰/۳۷۱۶

این مرحله محاسبه ماتریس شدت نسبی از غیرمستقیم است که به صورت معکوس M^2(I-M) بدست می‌آید.

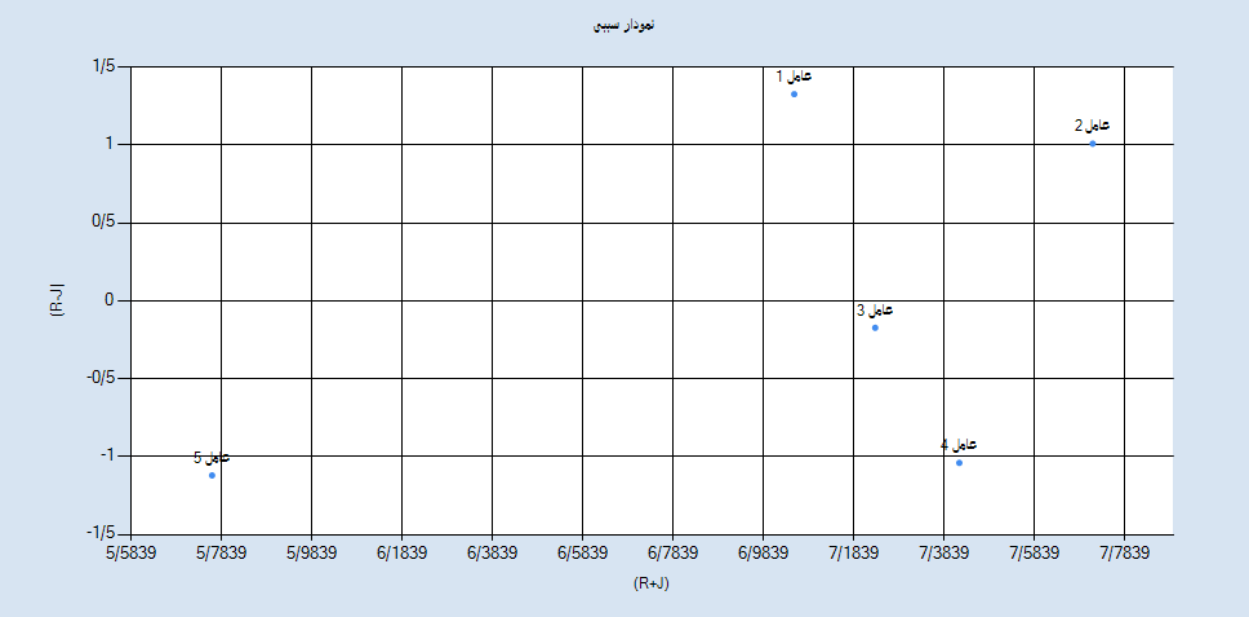
گام ششم: *روابط علت-معلولی عوامل در مدل دیمتل*

جدول ۸. روابط علت-معلولی عوامل در مدل دیمتل
Table 7. Cause-effect relationships of factors in the DEMATEL model

نتیجه	R	J	R+J	R-J
عامل ۲(B)	۴/۳۶۰۲	۳/۳۵۱۷	۷/۷۱۱۹	۱/۰۰۸۶
عامل ۱(A)	۴/۱۸۸۸	۲/۸۶۲۷	۷/۰۵۱۵	۱/۳۲۶۱
عامل ۳(C)	۳/۵۲۸۷	۳/۷۰۱۹	۷/۲۳۰۶	-۰/۱۷۳۲
عامل ۴(D)	۳/۱۸۸	۴/۲۲۸۷	۷/۴۱۶۸	-۱/۰۴۰۷
عامل ۵(E)	۲/۳۲۱۱	۳/۴۴۱۹	۵/۷۶۳	-۱/۱۲۰۷

بر اساس نتایج نهایی به دست آمده از **جدول ۸** مشخص می‌شود که عوامل فناوری و مدیریتی از عوامل کلیدی موفقیت هستند که از نظر خبرگان دارای بیشترین تاثیر در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی برای تحقق زنجیره تأمین هوشمند

و پایدار می‌باشند. همچنین عوامل همکاری و شبکه های تأمین، فرآیندی و پایداری در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نمودار علت و معلولی مدل پژوهش نیز به صورت زیر ارائه شده است.



شکل ۲. مدل اثرگذاری و اثر پذیری عوامل کلیدی موفقیت

Figure 2. Influence-Dependence Model of Key Success Factors

نتایج دیمتل نشان می‌دهد که عامل ۲ (فناوری) با بالاترین مقدار R+J در جایگاه محوری‌ترین و پرتعامل‌ترین عامل قرار دارد؛ یعنی بیشترین نقش را در ایجاد پیوند میان سایر عوامل و اثرگذاری بر کل سیستم ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی دارد. در مقابل، عامل ۵ (پایداری) کمترین R+J را داشته و بیانگر این است که این عامل بیشتر متکی بر سایر عوامل است و پیشران اصلی تغییر نیست. از سوی دیگر، مقادیر R–J نشان می‌دهد که عامل ۱ (مدیریتی) و عامل ۲ (فناوری) در ناحیهٔ علّی قرار می‌گیرند و نقش پیشران دارند، درحالی‌که عامل‌های ۳، ۴ و ۵ در ناحیهٔ معلولی قرار گرفته و بیشتر از سایر عوامل تأثیر می‌پذیرند. این الگو تأکید می‌کند که بدون بلوغ مدیریتی و زیرساخت‌های فناورانه، همکاری شبکه، بهبود فرآیندها و تحقق اهداف پایداری در زنجیره تأمین هوشمند امکان‌پذیر نخواهد بود.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش، ضمن هم‌پوشانی با بخشی از نتایج مطالعات پیشین، رویکرد تحلیلی متفاوتی را در بررسی گذار به زنجیره‌های تأمین هوشمند–پایدار ارائه می‌دهد. به‌جای تمرکز بر شناسایی ایستای عوامل موفقیت، این مطالعه با بهره‌گیری از تحلیل علّی دیمتل، الگوی پویایی از روابط علّی میان ابعاد کلیدی ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی ترسیم می‌کند. این رویکرد امکان درک عمیق‌تری از نحوه شکل‌گیری و انتقال اثرات راهبردی در مسیر تحقق پایداری زنجیره تأمین فراهم می‌سازد و نشان می‌دهد که موفقیت در این مسیر، ماهیتی سیستمی و چندبعدی دارد.

نتایج حاصل از تحلیل دیمتل بیانگر آن است که ابعاد مدیریتی و فناورانه در جایگاه عوامل علّی و محرک‌های اصلی سیستم قرار دارند، در حالی که ابعاد فرآیندی، همکاری شبکه‌ای و پایداری عمدتاً متأثر از سایر مؤلفه‌ها هستند. این الگوی ساختاری، از یک سو با یافته‌های

پژوهشی نظیر گاور و همکاران (Gaur., et al. 2025) که بر نقش مدیریت ارشد در پیاده‌سازی فناوری‌های نوین زنجیره تأمین تأکید دارند، هم‌خوانی دارد؛ اما از سوی دیگر، با توسعه دامنه تحلیل، مفهوم مدیریت را فراتر از حمایت نمادین یا تخصیص منابع مالی تبیین می‌کند. در این پژوهش، مدیریت به‌عنوان مجموعه‌ای یکپارچه از رهبری تحول‌آفرین، فرهنگ نوآوری، مدیریت تغییر، نظام‌های انگیزشی و ارتقای مهارت‌های تخصصی در نظر گرفته شده است که در تعامل پویا با سایر ابعاد، جهت‌گیری کل سیستم را تعیین می‌کند. استقرار بعد مدیریتی در ناحیه علّی نشان می‌دهد که فقدان ظرفیت‌های نرم سازمانی می‌تواند حتی پیشرفته‌ترین راهکارهای هوش مصنوعی را از دستیابی به ارزش پایدار بازدارد؛ امری که توضیح مناسبی برای ناکامی بسیاری از پروژه‌های دیجیتال در عمل فراهم می‌آورد.

در بعد فناورانه، یافته‌ها حاکی از آن است که عواملی نظیر بلوغ زیرساخت‌های داده‌ای، قابلیت یکپارچه‌سازی سامانه‌ها، کیفیت داده و امنیت سایبری، بیشترین نقش را در اثرگذاری بر سایر ابعاد ایفا می‌کنند. اگرچه این نتایج با مطالعاتی مانند راوت و همکاران (Raut., et al. 2025) و زجاری و بنهایون (Zejjari, I., & Benhayoun. 2024) هم‌راستاست، اما تفسیر ارائه‌شده در این پژوهش بر تمایز مهمی تأکید دارد: هوش مصنوعی در زنجیره تأمین هوشمند نه به‌عنوان یک فناوری مستقل، بلکه به‌منزله یک بستر توانمندساز کل‌نگر عمل می‌کند که اثربخشی آن به سطح انسجام معماری دیجیتال سازمان وابسته است. از این منظر، فناوری نقش یک تسهیل‌گر ساختاری را بر عهده دارد که بدون آن، هم‌افزایی میان مدیریت، شبکه تأمین و فرآیندهای عملیاتی امکان‌پذیر نخواهد بود.

یکی از یافته‌های متمایز این پژوهش، جایگاه بعد همکاری شبکه‌ای به‌عنوان مؤلفه‌ای با بالاترین میزان مرکزیت در شبکه علّی و در عین حال، قرارگیری در محدوده‌ای نزدیک به تعادل علّی–معلولی است. این الگو نشان می‌دهد که همکاری شبکه‌ای نه نقطه آغاز تحول و نه نتیجه نهایی آن، بلکه یک سازوکار انتقالی است که اثرات ابعاد مدیریتی و فناورانه را به سطوح عملیاتی و پیامدهای پایداری منتقل می‌کند. برخلاف مطالعاتی نظیر رحمان و همکاران (Rehman., et al. 2025) و بشینسکا و پروکوپنکو (Bashynska & Prokopenko. 2024) که همکاری را عمدتاً به‌صورت یک متغیر هم‌سطح یا توصیفی بررسی کرده‌اند، این پژوهش نقش آن را به‌عنوان حلقه واسط ساختاری در نظام زنجیره تأمین بازتعریف می‌کند. این یافته تأکید می‌کند که اثربخشی همکاری شبکه‌ای به فراهم بودن پیش‌نیازهای مدیریتی و فناورانه وابسته است.

در ادامه، نتایج پژوهش با بازنگری محدودیت‌های مطرح‌شده در ادبیات پیرامون پذیرش هوش مصنوعی در سطوح بین‌سازمانی و کلان نظیر آکربی و همکاران (Acerbi., et al. 2021) اهمیت مؤلفه‌هایی نظیر سازوکارهای حقوقی و نهادی را برجسته می‌سازد. تمرکز بر این عوامل نشان می‌دهد که عبور از سطح سازمانی به سطوح شبکه‌ای، مستلزم وجود چارچوب‌های حکمرانی شفاف، هماهنگی نهادی و اعتماد متقابل میان بازیگران زنجیره تأمین است. در غیاب این زیرساخت‌ها، اجرای پروژه‌های مشترک داده‌محور و بهره‌گیری از ظرفیت‌های هوش مصنوعی با موانع ساختاری مواجه خواهد شد.

در ارتباط با بعد پایداری، یافته‌ها نشان می‌دهد که این بعد بیشترین میزان اثرپذیری را در میان ابعاد مورد بررسی داراست .این نتیجه با رویکردهایی که پایداری را نقطه شروع تحول و محصول مستقیم الزامات قانونی یا فشارهای محیط‌زیستی می‌دانند، هم‌سو نیست. بر اساس نتایج این پژوهش، پایداری حاصل برهم‌کنش تدریجی و هم‌افزای ابعاد مدیریتی، فناورانه، همکاری شبکه‌ای و بهبود فرآیندهاست. از این منظر، سیاست‌های محیط‌زیستی و مقررات الزام‌آور تنها زمانی به نتایج ملموس منجر می‌شوند که با توسعه ظرفیت‌های فناورانه و توانمندسازی سازمانی همراه شوند؛ نکته‌ای که پیامدهای مهمی برای سیاست‌گذاران و مدیران اجرایی در بر دارد.

در مجموع، ساختار علّی استخراج‌شده از تحلیل دیمتل نشان می‌دهد که گذار به زنجیره‌های تأمین هوشمند–پایدار، فرآیندی تدریجی، نهادی و چندسطحی است که از لایه‌های راهبردی تصمیم‌گیری آغاز شده و از طریق فناوری و همکاری شبکه‌ای، به ارتقای عملکرد

فرآیندها و تحقق اهداف پایداری منتهی می‌شود. این چارچوب تحلیلی، ضمن غنی‌سازی ادبیات ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی، مبنایی مفهومی برای طراحی راهبردهای تحول دیجیتال و سیاست‌های پایداری در سطوح سازمانی و کلان فراهم می‌آورد.

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تحلیل جامع عوامل کلیدی موفقیت در ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در بستر زنجیره تأمین هوشمند و پایدار انجام شد و با به‌کارگیری روش دیمتل، ساختار علّی و شدت وابستگی میان ابعاد مدیریتی، فناورانه، همکاری شبکه‌ای، فرآیندی و پایداری تبیین گردید. تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد که موفقیت ادغام این دو رویکردِ تحول‌گرای معاصر، عمدتاً وابسته به عواملی است که ماهیتاً در سطوح مدیریتی و فناورانه ریشه دارند؛ عواملی که نه‌تنها نقش پیشران در معماری کل سیستم ایفا می‌کنند، بلکه مسیر تحول و بلوغ سایر ابعاد را نیز جهت می‌دهند. این امر نشان‌دهنده شکاف بالقوه میان ظرفیت‌های تکنولوژیک و توانمندی‌های سازمانی است؛ شکافی که بدون حضور رهبری تحول‌گرا، فرهنگ نوآورانه و مدیریت تغییر ساختاری، نمی‌توان انتظار عملکرد مطلوب از فناوری‌های هوش مصنوعی را در تحقق اهداف چرخشی و پایداری داشت.در سوی دیگر، یافته‌ها نشان می‌دهد که ابعاد فرآیندی و پایداری با وجود اهمیت بنیادین، بیش از آن‌که نقش محرک داشته باشند، متأثر از توانمندی‌های مدیریتی و زیرساخت‌های فناورانه هستند. این موضوع بیانگر آن است که پایداری و چرخشی‌بودن، ماهیتی وابسته به تصمیم‌های راهبردی و سرمایه‌گذاری‌های فناورانه دارد و نمی‌تواند بدون هم‌افزایی این دو حوزه شکل گیرد. همچنین نقش همکاری شبکه‌ای در این میان به‌عنوان یک عنصر میانجی و تقویت‌کننده، اهمیت ویژه‌ای دارد. داده‌های به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که همکاری شبکه‌ای با بیشترین شدت ارتباطات داخلی، حلقه واسط ایجاد شفافیت داده، هم‌راستایی راهبردی و هماهنگی عملیاتی میان بازیگران زنجیره است؛ نقشی که در زنجیره‌های مدرن، جایگزین‌ناپذیر بوده و بدون آن تحقق چرخه‌های بسته و پایدار امکان‌پذیر نخواهد بود.همچنین نتایج پژوهش نشان می‌دهد که هوش مصنوعی با فراهم‌سازی بستر تحلیل داده‌های لحظه‌ای، پیش‌بینی رفتار سیستم، شناسایی الگوهای پنهان و اجرای خودکار تصمیم‌ها، نقشی فراتر از یک ابزار صرفاً عملیاتی ایفا می‌کند و به‌عنوان یک عامل توانمندساز تحول ساختاری، پیشران اصلی گذار به زنجیره‌های تأمین چرخشی و تاب‌آور محسوب می‌شود. این ظرفیت هنگامی به حداکثر می‌رسد که با اصول اقتصاد چرخشی از جمله طولانی‌سازی چرخه عمر محصول، بازیافت پیشرفته، استفاده مجدد و طراحی مبتنی بر چرخش—ترکیب شود. هم‌افزایی میان این دو حوزه می‌تواند نه‌تنها به کاهش ضایعات و افزایش کارایی منابع منجر شود، بلکه شکل‌گیری مزیت رقابتی بلندمدت، تاب‌آوری فناورانه و کاهش ریسک‌های اکولوژیک را برای سازمان‌ها تضمین کند.در مجموع، یافته‌های این تحقیق تأکید می‌کنند که ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی یک پدیده تک‌بعدی یا صرفاً تکنیکی نیست، بلکه فرآیندی پیچیده، چندسطحی و مبتنی بر هم‌کنشی میان ساختارهای مدیریتی، قابلیت‌های فناورانه، شبکه‌های همکاری، فرآیندهای عملیاتی و سازوکارهای پایداری است. چارچوب مفهومی به‌دست‌آمده از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مرجع نظری و کاربردی برای طراحی سیاست‌های سازمانی، برنامه‌ریزی تحول دیجیتال، توسعه پلتفرم‌های هوشمند، و ارزیابی بلوغ چرخشی زنجیره‌های تأمین مورد استفاده قرار گیرد. افزون بر این، نتایج به‌صورت ضمنی نشان می‌دهند که پایداری در عصر هوشمندسازی تنها در صورتی محقق می‌شود که فناوری و چرخش در چارچوبی یکپارچه، هماهنگ و آینده‌نگرانه مورد تحلیل و اجرا قرار گیرند؛ چارچوبی که این پژوهش تلاش کرد ابعاد بنیادین آن را روشن سازد.

- محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش همانند هر مطالعه علمی دیگر با محدودیت‌هایی مواجه بوده است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست آنکه جامعه خبرگان مورد بررسی محدود و بر اساس رویکرد هدفمند انتخاب شده است. در نتیجه، دیدگاه‌های ارائه‌شده ممکن است تمامی ابعاد تخصصی موجود در حوزه هوش مصنوعی، اقتصاد چرخشی و زنجیره‌های تأمین را به‌طور کامل پوشش ندهد و تعمیم‌پذیری نتایج را کاهش دهد. افزون بر این، اتکای پژوهش به نظرات خبرگان داخلی ممکن است موجب شود که تحلیل‌ها متأثر از شرایط زیرساختی، فرهنگی و مدیریتی خاص ایران باشد و قابلیت انطباق آن در محیط‌های صنعتی و اقتصادی دیگر کشورها نیازمند تعدیل و بازنگری باشد.از نظر روش‌شناختی نیز استفاده از دیمتل به‌عنوان تنها ابزار تحلیل، اگرچه امکان شناسایی روابط علّی میان عوامل را فراهم می‌سازد، اما نمی‌تواند شدت اثرات را در محیط‌های پیچیده و پویا به‌طور کامل بازتاب دهد. به همین دلیل، درک عمیق‌تر از پویایی‌های میان عوامل نیازمند بهره‌گیری از مدل‌های ترکیبی و چندگانه است.

از محدودیت‌های پژوهشگر می‌توان به دسترسی محدود به خبرگان دارای تجربه عملی در پیاده‌سازی هم‌زمان هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در زنجیره‌های تأمین هوشمند اشاره کرد. همچنین ماهیت میان‌رشته‌ای پژوهش ایجاب می‌کرد تسلط هم‌زمان بر حوزه‌های مدیریتی، فناورانه و پایداری وجود داشته باشد که می‌تواند بر عمق تحلیل برخی ابعاد فنی اثر گذاشته باشد. محدودیت‌های زمانی، امکان انجام مصاحبه‌های عمیق‌تر و چندمرحله‌ای را کاهش داد. افزون بر این، نقش اجتناب‌ناپذیر پژوهشگر در تفسیر داده‌های مبتنی بر قضاوت خبرگان می‌تواند با سوگیری‌های شناختی همراه باشد. با این حال، تلاش شد این اثر از طریق مرور نظام‌مند ادبیات و بازبینی نتایج توسط خبرگان مستقل به حداقل برسد.

- پیشنهادهای کاربردی

نتایج تحقیق حاضر مجموعه‌ای از توصیه‌های عملی برای مدیران، سیاست‌گذاران و سازمان‌هایی که قصد دارند هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی را در زنجیره تأمین خود ادغام کنند ارائه می‌دهد. نخست آنکه سازمان‌ها باید به ایجاد نظام مدیریتی آینده‌نگر متکی باشند و چشم‌اندازی روشن برای ادغام فناوری و پایداری تدوین کنند. حمایت مدیریت عالی، همراه با رهبری مشارکتی و فرهنگ سازمانی پذیرای نوآوری، می‌تواند زمینه لازم برای رفع مقاومت‌های احتمالی و افزایش انگیزش کارکنان را فراهم آورد. طراحی برنامه‌های آموزشی تخصصی نیز نقش مهمی در ارتقای مهارت‌های دیجیتال و چرخشی کارکنان خواهد داشت.در حوزه فناوری، ضروری است که سازمان‌ها زیرساخت‌های داده‌ای و دیجیتالی خود را تقویت کنند؛ به نحوی که داده‌های معتبر، قابل‌تحلیل و یکپارچه در دسترس باشد و امنیت سایبری به‌طور جدی تضمین شود. استفاده از استانداردهای باز و معماری‌های ماژولار می‌تواند انعطاف‌پذیری سیستم‌ها را افزایش دهد و امکان انطباق سریع با تغییرات فناورانه را فراهم کند. همچنین بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی، تحلیل داده‌های لحظه‌ای و سیستم‌های پیش‌بینی، می‌تواند کارایی تصمیم‌گیری را در حوزه‌هایی مانند مدیریت موجودی، برنامه‌ریزی تولید، لجستیک و بازیافت ارتقا دهد.در سطح همکاری شبکه‌ای، سازمان‌ها باید سازوکارهایی مبتنی بر اعتماد و شفافیت ایجاد کنند، زیرا تبادل داده میان شرکا و هماهنگی فرآیندهای چرخشی، پیش‌نیاز اصلی تحقق یک زنجیره تأمین هوشمند و پایدار است. قراردادهای شفاف، سازوکارهای مشارکت بلندمدت، و پلتفرم‌های دیجیتال مشترک می‌توانند نقش مهمی

در این زمینه ایفا کنند. همچنین بازمهندسی فرآیندها و حرکت به سوی فرآیندهای چابک و داده‌محور، همراه با سیستم‌های ردیابی هوشمند، امکان کاهش ضایعات، بهبود بهره‌وری منابع و انطباق مؤثر با مقررات زیست‌محیطی را فراهم می‌سازد. در نهایت، سازمان‌ها باید توسعه رویکردهای پایدار را به‌عنوان بخشی از برنامه‌ریزی راهبردی خود در نظر گیرند و از طریق ترویج فرهنگ مصرف مسئولانه، ارتقای شاخص‌های زیست‌محیطی و بهره‌گیری از تحلیل‌های داده‌محور، مسیر تحقق پایداری بلندمدت را هموار کنند.

- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

با توجه به این‌که ادغام هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی در زنجیره‌های تأمین هوشمند و پایدار هنوز در مرحله بلوغ اولیه قرار دارد و بسیاری از پویایی‌های آن به‌صورت عملی و مدل‌سازی‌شده بررسی نشده است، پژوهش‌های آینده باید از چارچوب‌های سنتی فاصله گرفته و به‌سوی بهره‌گیری از روش‌های نوین و پیشرفته حرکت کنند. یکی از مسیرهای مهم برای توسعه دانش در این حوزه، استفاده از مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده مانند مدل‌سازی مبتنی بر عامل، پویایی‌شناسی سیستم‌ها و چارچوب‌های تحلیل شبکه‌های پیچیده است. این رویکردها می‌توانند تعاملات غیرخطی، رفتارهای نوظهور و تغییرات تدریجی در شبکه‌های تأمین هوشمند-چرخشی را با دقت بیشتری نمایش دهند و امکان بررسی سناریوهای مختلف را در شرایط عدم‌قطعیت بالا فراهم کنند.افزون بر این، پژوهش‌های آتی می‌توانند از مدل‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره بهره بگیرند که با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین تلفیق می‌شوند. نمونه‌هایی از این مدل‌ها شامل دیمتل فازی عمیق، مدل‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی برای اولویت‌بندی عوامل پیچیده، یا روش‌های تلفیقی دیمتل با ANP شبکه‌های عصبی تبیینی است. این نوع مدل‌سازی می‌تواند ساختار علّی و شدت اثرگذاری عوامل موفقیت را در شرایط واقعی‌تری نمایش دهد و محدودیت‌های تحلیل‌های ایستا و ذهنی را کاهش دهد. از نظر تجربی نیز پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده به‌جای اتکا بر تحلیل‌های مفهومی یا نظر خبرگان، به سمت مطالعات داده‌محور مبتنی بر اطلاعات واقعی سازمان‌ها حرکت کنند. به‌ویژه، طراحی و توسعه دوقلوی دیجیتال زنجیره تأمین برای شبیه‌سازی فرآیندهای چرخشی، ارزیابی چرخه عمر محصول و پیش‌بینی رفتار شبکه تحت تغییرات محیطی، می‌تواند یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های پژوهشی در این حوزه باشد. ادغام دوقلوهای دیجیتال با الگوریتم‌های هوش مصنوعی، نه‌تنها می‌تواند امکان تصمیم‌گیری هوشمند و پیش‌بینانه را فراهم کند، بلکه شکاف میان تحلیل‌های نظری و داده‌های عملی را کاهش خواهد داد.در سطح سیاست‌گذاری نیز لازم است پژوهش‌هایی با رویکرد شبیه‌سازی سیاستی انجام شود تا اثر سیاست‌های تشویقی، مقررات محیط‌زیستی، مالیات‌های سبز یا الزامات حکمرانی داده در بلندمدت بر سازوکارهای زنجیره‌های تأمین بررسی شود. مدل‌های اقتصاد داده‌محور و مدل‌های تعادل عمومی محاسباتی می‌توانند تصویر دقیق‌تری از پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی هم‌گرایی هوش مصنوعی و اقتصاد چرخشی ارائه دهند.در نهایت، پژوهش‌های آینده باید رویکردی دقیق‌تر برای اندازه‌گیری اثرات زیست‌محیطی ادغام هوش مصنوعی اتخاذ کنند. استفاده از ارزیابی چرخه عمر دیجیتال‌شده، مدل‌های ترکیبی LCA- هوش مصنوعی، و تحلیل ردپای کربنی مبتنی بر داده‌های لحظه‌ای می‌تواند کمک کند تا مشخص شود فناوری‌های هوشمند واقعاً تا چه اندازه در تحقق اهداف پایداری مؤثر هستند. به‌طور کلی، حرکت آینده پژوهش در

این حوزه باید از مدل‌های نظری و توصیفی به سمت مدل‌های پویا، داده‌محور، شبیه‌سازی‌شونده و سیاست‌محور جهت‌گیری کند تا تصویری واقع‌گرایانه و قابل‌پیاده‌سازی از زنجیره‌های تأمین هوشمند و چرخشی ارائه شود.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در کلیه مراحل پژوهش به‌طور مساوی مشارکت داشته‌اند.

ملاحظات اخلاقی

این پژوهش با رعایت اصول اخلاق پژوهش و رضایت آگاهانه پاسخ‌دهندگان انجام‌شده است.

حامی مالی

نویسندگان اعلام می‌کنند که در طول تهیه این نسخه خطی، هیچ بودجه، کمک هزینه یا حمایت دیگری دریافت نکرده‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان صمیمانه از اعضای هیئت متخصص که در این مطالعه شرکت کردند و سخاوتمندانه وقت و تخصص خود را در اختیار ما قرار دادند، تشکر می‌کنند. بینش‌های ارزشمند آنها به طور قابل توجهی به کیفیت و عمق این تحقیق کمک کرده است.

References

Acerbi, F., Forterre, D. A., & Taisch, M. (2021). Role of Artificial Intelligence in Circular Manufacturing: A Systematic Literature Review. *IFAC-PapersOnLine*, *54*(1), 367–372. doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.040

Agi, M. A. N. (2022). Understanding the Enablers of Blockchain Technology Adoption in Sustainable Supply Chains: A DEMATEL-Based Analysis. *IFAC-PapersOnLine*, *55*(10), 1962–1967. doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.686

Al Maazmi, A., Piya, S., & Araci, Z. C. (2024). Exploring the Critical Success Factors Influencing the Outcome of Digital Transformation Initiatives in Government Organizations. *Systems*, *12*(12), 524. https://doi.org/10.3390/systems12120524

Aladaileh, M. J., Lahuerta-Otero, E., & Aladayleh, K. J. (2024). Mapping sustainable supply chain innovation: A comprehensive bibliometric analysis. *Heliyon*, *10*(7), e29157. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e29157 https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2405-8440%2824%2905188-0

Asher, S., Nafees, M., & Syeda, T. (2024). Exploring the change management framework: An in-depth investigation. *MethodsX*, *13*, 102978. doi:https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102978

Bashynska, I., Malynovska, Y., Kolinko, N., Bielialov, T., Järvis, M., Kovalska, K., & Saiensus, M. (2024). Performance Assessment of Sustainable Leadership of Enterprise's Circular Economy-Driven Innovative Activities. *Sustainability*, *16*(2), 558. Retrieved from https://www.mdpi.com/2071-1050/16/2/558

Bashynska, I., & Prokopenko, O. (2024). Leveraging Artificial Intelligence for Circular Economy: Transforming Resource Management, Supply Chains, and Manufacturing Practices. *Scientific Journal of Bielsko-Biala School of Finance and Law*, *28*(2), 85–91. file:///C:/Users/SabaNet/Downloads/wsfip.sj2.2024.13.pdf doi:10.19192/wsfip.sj2.2024.13

Bimpizas-Pinis, M., Calzolari, T., & Genovese, A. (2022). Exploring the transition towards circular supply chains through the arcs of integration. *International Journal of Production Economics*, *250*, 108666. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108666

Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, *233*(2), 299–312. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032

Brintrup, A., Kosasih, E., Schaffer, P., Zheng, G., Demirel, G., & MacCarthy, B. L. (2024). Digital supply chain surveillance using artificial intelligence: definitions, opportunities and risks. *International Journal of Production Research*, *62*(13), 4674–4695. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2270719

Caiado, R. G., Scavarda, L. F., Azevedo, B. D., de Mattos Nascimento, D. L., & Quelhas, O. L. (2022). Challenges and Benefits of Sustainable Industry 4.0 for Operations and Supply Chain Management—A Framework Headed toward the 2030 Agenda. *Sustainability*, *14*(2). https://doi.org/10.3390/su14020830

Chalmeta, R., & Santos-deLeón, N. (2020). Sustainable Supply Chain in the Era of Industry 4.0 and Big Data: A Systematic Analysis of Literature and Research. *Sustainability*, *12*, 4108. https://doi.org/10.3390/su12104108

Chen, L., Shen, Q., Yu, X., & Chen, X. (2024). Knowledge spillovers along the sustainable supply chain of China's listed companies: The role of long-term orientation. *Journal of Innovation and Knowledge*, *9*(2). https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100478

Chiu, Y.-J., Chen, H.-C., Tzeng, G.-H., Shyu, J., & Shyu, G. H. (2006). Marketing strategy based on customer behaviour for the LCD-TV. *Int. J. Management and Decision Making J.Z. Int. J. Management and Decision Making*, *7*, 143–165.

doi:10.1504/IJMDM.2006.009140 https://www.researchgate.net/profile/Gwo-Hshiung-Tzeng 2/publication/228633301_Marketing_strategy_based_on_customer_behaviour_for_the_LCD-TV/links/0f3175316c66fb957d000000/Marketing-strategy-based-on-customer-behaviour-for-the-LCD-TV.pdf

Culot, G., Podrecca, M., & Nassimbeni, G. (2024). Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review of empirical studies and research directions. *Computers in Industry, 162*, 104132. doi: https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104132

Demir, S., Gunduz, M. A., Kayikci, Y., & Paksoy, T. (2023). Readiness and Maturity of Smart and Sustainable Supply Chains: A Model Proposal. *Engineering Management Journal, 35*(2), 181–206. https://shura.shu.ac.uk/29993/1/Kayikci-ReadinessMaturitySmart%28AM%29.pdf https://shura.shu.ac.uk/29993/

Dey, P. K., Chowdhury, S., Abadie, A., Vann Yaroson, E., & Sarkar, S. (2024). Artificial intelligence-driven supply chain resilience in Vietnamese manufacturing small- and medium-sized enterprises. *International Journal of Production Research, 62*(15), 5417–5456. https://pure.hud.ac.uk/ws/files/56281974/Accepted_manuscript.pdf doi:10.1080/00207543.2023.2179859

Dwivedi, A., Sassanelli, C., Agrawal, D., Moktadir, M. A., & D'Adamo, I. (2023). Drivers to mitigate climate change in context of manufacturing industry: An emerging economy study. *Business Strategy and the Environment, 32*(7), 4467–4484. doi:https://doi.org/10.1002/bse.3376

Falah, N., Falah, N., Solis-Guzman, J., & Meléndez, M. M. (2025). Contribution of circular economy levels to sustainable development goals: Literature review based on natural language processing techniques. *Sustainable Futures, 10*, 101011. doi:https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101011

Fatimah, Y. A., Govindan, K., Sasongko, N. A & ,.Hasibuan, Z. A. (2024). The critical success factors for sustainable resource management in circular economy: Assessment of urban mining maturity level. *Journal of Cleaner Production, 469*, 143084. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143084

Francisco, M., & Linnér, B.-O. (2023). AI and the governance of sustainable development. An idea analysis of the European Union, the United Nations, and the World Economic Forum. *Environmental Science & Policy, 150*, 103590. doi:https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023,103590

Gabus, A., & Fontela, E. (1973). *Perceptions of the world problematique: communication procedure, communicating with those bearing collective responsibility*. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1429249

Gaur, T. S., Yadav, V., Prakash, S., & Mittal, S. (2025). Investigating the key challenges in adopting Supply Chain 4.0 in the context of Indian electronics industry: a DEMATEL approach. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*. https://doi.org/10.1108/JGOSS-02-2025-0010 doi:10.1108/jgoss-02-2025-0010

Geissdoerfer, M., Morioka, S. N., de Carvalho, M. M., & Evans, S. (2018). Business models and supply chains for the circular economy. *Journal of Cleaner Production, 190*, 712–721. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159

Georgescu, L. P., Fortea, C., Antohi, V. M., Balsalobre-Lorente, D., Zlati, M. L., & Barbuta–Misu, N. (2025). Economic, technological and environmental drivers of the circular economy in the European Union: a panel data analysis. *Environmental Sciences Europe, 37*(1), 76. https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s12302-025-01119-4.pdf doi:10.1186/s12302-025-01119-4

Ghanbari, M. (2023). Presenting the smart- sustainable supply chain model based on artificial intelligence. *International Journal of Innovation in Management, Economics and Social Sciences, 3*, 61–70. https://doi.org/10.59615/ijimes.3.4.61

Goyal, S., & Gupta, S. (2024). A comprehensive review of current techniques ,issues, and technological advancements in sustainable E-waste management. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 9*, 100702. doi:https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100702

Hernandez, J. C. R., Villa-Enciso, E., Cardona-Acevedo, S., Valencia, J., & Velasquez Salas, S. (2025). Smart Innovation for a Circular Economy: A Systematic Review of Emerging Trends and the Future of AI in the Sustainable Economy. *Sustainability, 17*(13), 5793. https://www.mdpi.com/2071-15793/13/17/050

Hori, S., & Shimizu, Y. (1999). Designing methods of human interface for supervisory control systems. *Control Engineering Practice, 7*(11), 1413–1419. doi:https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00112-4

Huang, L., Zhen, L., Wang, J., & Zhang ,X. (2022). Blockchain implementation for circular supply chain management: Evaluating critical success factors. *Industrial Marketing Management, 102*, 451–464. doi: https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2022.02.009

Idogawa, J., Bizarrias, F., & Camara, R. (2023). Critical success factors for change management in business process management. *Business Process Management Journal, 29*. doi:10.1108/BPMJ-11-2022-0625

Karimi Takalo, S., Sharifi, H., & Bakhshi Khorde Blagh, E. (2024). Analyzing the drivers of the Smart sustainable circular supply chain using the combined methods of Dematel and adversarial interpretative structural modeling. *Industrial Management Studies*, 22(73), 241–285. doi: 10.22054/jims.2024.77945.2899 (in Persian)

Kazmi, S., Sarfraz, H., Bukhari, S., & Javed, I. (2025). Reverse Logistics in the Circular Economy Context. *The Asian Bulletin of Big Data Management, 5*, 104–125. doi:10.62019/qegey841

Kemmner, F.-A., Legenvre, H., & Hameri, A.-P. (2025). Sharing data to implement the circular economy: the case of digital product passports. *Industrial Management & Data Systems*, 1–20. doi:10.1108/imds-04-2024-0403

Lahane, S., Kant, R., & Shankar, R. (2020). Circular supply chain management: A state-of-art review and future opportunities. *Journal of Cleaner Production, 258*, 120859. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020,120859

Leyh, C., Köppel, K., Neuschl, S., & Pentrack, M. (2021). *Critical Success Factors for Digitalization Projects*.

Liou, J. J. H., Tzeng, G.-H., & Chang, H.-C. (2007). Airline safety measurement using a hybrid model. *Journal of Air Transport Management, 13*(4), 243–249. doi:https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2007.04.008

Liu, J., Quddoos, M. U., Akhtar, M. H., Amin, M. S., Tariq, M., & Lamar, A. (2022). Digital technologies and circular economy in supply chain management: in the era of COVID-19 pandemic. *Operations Management Research, 15*, 326–341. doi:https://doi.org/10.1007/s12063-021-00227-7

Malekzadeh, G., Kazemi, M., Lagzian, M., & Mortazavi, S. (2016). Modeling organizational intelligence using DEMATEL method in Iranian public universities. *Journal of Modelling in Management, 11*(1), 134-153. doi;10.1108/jm2-12-2013-0062

Mohsen, S. E., Hamdan, A., & Shoaib, H. M. (2024). Digital transformation and integration of artificial intelligence in financial institutions. *Journal of Financial Reporting and Accounting*. doi:10.1108/JFRA-09-2023-0544

Morshedi, M., Hargaden, V., Papakostas, N., & Ghadimi, P. (2025). Integrating Circular Economy and Industry 4.0 within Circular Supply Chains: A Literature Review and

Network Analysis Insights. *Procedia CIRP, 135*, 768–773. doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.12.073

Movahed, A. B., Movahed, A. B., & Nozari, H. (2024). Opportunities and Challenges of Smart Supply Chain in Industry 5.0. In H. Nozari (Ed.), *Information Logistics for Organizational Empowerment and Effective Supply Chain Management* (pp. 1). Hershey, PA, USA: IGI Global. doi: https://doi.org/ 10.4018/979-8-3693-0159-3.ch006

Mridha, B., Pareek, S., Goswami, A., & Sarkar, B. (2023). Joint effects of production quality improvement of biofuel and carbon emissions towards a smart sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production, 386*, 135629. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135629

Oladapo, B. I., Olawumi, M. A., & Omigbodun, F. T. (2024). AI-Driven Circular Economy of Enhancing Sustainability and Efficiency in Industrial Operations. *Sustainability, 16*(23), 10358 .Retrieved from https://www.mdpi.com/2071-1050/16/23/10358

Panda, D., Haque, S., Frishammar, J., & Parida, V. (2025). Modularity for circular economy: Four circularity pathways for industrial firms. *Journal of Cleaner Production, 519*, 146001. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146001

Pandey, D., Nassa, V. K., Pandey, B. K., Thankachan, B., Dadheech, P., Mahajan, D. A., & George, A. S. (2024). Artificial intelligence and machine learning and its application in the field of computational visual analysis. In *Emerging Engineering Technologies and Industrial Applications* (pp. 36–57). DOI:10.4018/979-8-3693-1335-0.ch003

Pathan, M. S., Richardson, E., Galvan, E., & Mooney, P. (2023). The Role of Artificial Intelligence within Circular Economy Activities—A View from Ireland. *Sustainability. 9451, 12(15)*, Retrieved from https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/9451

Patidar, S., Sukhwani, V. K., & Shukla, A. C. (2023). Modeling of Critical Food Supply Chain Drivers Using DEMATEL Method and Blockchain Technology. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 104*(3), 541–552. doi:10.1007/s40032-023-00941-0

Platon, V., Pavelescu, F.-M., Antonescu, D., Constantinescu, A., Frone, S., Surugiu, M., . . . Popa, F. (2024). New evidence about artificial intelligence and eco-investment as boosters of the circular economy. *Environmental Technology & Innovation, 35*, 103685. doi:https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103685

Pournader, M., Ghaderi, H., Hassanzadegan, A., & Fahimnia, B. (2021). Artificial intelligence applications in supply chain management. *International Journal of Production Economics, 241*, 108250. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108250

Qiao, D., Jiao, J., Khalid, N., & Ali, M. H. (2025). Supply chain concentration and corporate green innovation: Evidence from China. *Innovation and Green Development, 4*(2), 100202. doi: https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100202

Raut, S., Hossain, N. U. I., Kouhizadeh, M., & Fazio, S. A. (2025). Application of artificial intelligence in circular economy: A critical analysis of the current research .*Sustainable Futures, 9*, 100784. doi: https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100784

Redko, K. (2024). Circular economy and AI empowerment in social entrepreneurship: a path to sustainability. *International Science Journal of Management, Economics & Finance. 27-35, 3*, doi: 10.46299/j.isjmef.20240303.04

Rehman, S., Mahmood, R., Abidi, N., & Yusoff, W. (2025). Integrating Smart Supply Chain with Green Practices to Enhance Sustainable Supply Chain Performance. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 1–18. doi:10.31387/oscm0600460

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of*

Production Research, 57(7), 2117–2135. doi: https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261

Saruchera, F., Salimi-Zaviyeh, S.-G., & Raeesi Vanani, I. (2024). Smart Supply Chain Management. In (pp. 152–178). doi:https://doi.org/10.4324/9781032719870-11

Shokouhyar, S., Pahlevani, N., & Mir Mohammad Sadeghi, F. (2019). Scenario analysis of smart, sustainable supply chain on the basis of a fuzzy cognitive map. *Management Research Review*, *43*(4), 463–496. doi: 10.1108/mrr-01-2019-0002

Sklavos, G., Theodossiou, G., Papanikolaou, Z., Karelakis, C., & Ragazou, K. (2024). Environmental, Social, and Governance-Based Artificial Intelligence Governance: Digitalizing Firms' Leadership and Human Resources Management. *Sustainability*, *16*(16), 7154. Retrieved from https://www.mdpi.com/2071-1050/16/16/7154

Taghva, M. R. , Naghizadeh, M. and Naghizadeh, R. (2012). Identifying and Prioritizing Important necessities for formulation of Open Source Software Roadmap in Iran. *Business Intelligence Management Studies*, *1*(1), 1-28. https://ims.atu.ac.ir/article_1126.html?lang=en

Toșa, C., Paneru ,C. P., Joudavi, A., & Tarigan, A. K. M. (2024). Digital transformation, incentives, and pro-environmental behaviour: Assessing the uptake of sustainability in companies' transition towards circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, *47*, 63. 643-2. doi: https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.04.032

Trevisan, A. H., Boscarato, A., Acerbi, F., Terzi, S., & Sassanelli, C. (2025). Enhancing Circular Economy education and training for the manufacturing sector: A holistic skills framework. *Journal of Environmental Management*, *380*, 124982. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124982

Van Opstal, W., Smeets, A., & Pals, E. (2024). Aligning incentives for implementing reversible bonding as a circular economy innovation. *Business Strategy and the Environment*, *33*(8), 8017–8036. doi: https://doi.org/10.1002/bse.3904

Vudugula, S. (2025). *Sustainable smart supply chains: a review of green technologies and their impact on logisticS* (Vol. 4). doi:https://doi.org/10.63125/1fehce37

Wang, K.-H. (2025). From fear to adaptation: The dynamic impact of AI on worker behavior and technological well-being. *Social Sciences & Humanities Open*, *12*, 101951. doi:https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101951

Wei, S., Liu, W., Lin, Y., Wang, J., & Liu, T. (2023). Smart supply chain innovation model selection: exploitative or exploratory innovation? *International Journal of Logistics Research and Applications*, *26*(4), 478–497. doi: 10.1080/13675567.2021.1965104

Wu, W.-W., & Lee, Y.-T. (2007). Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method. *Expert Systems with Applications*, *32*(2), 499–507. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.12.005

Xu, T., Wang, H., Feng, L., & Zhu, Y. (2024). Risk Factors Assessment of Smart Supply Chain in Intelligent Manufacturing Services Using DEMATEL Method With Linguistic q-ROF Information. *Journal of Operations Intelligence*, *2*(1), 129–152. doi:10.31181/jopi21202417

Yontar, E. (2023). Critical success factor analysis of blockchain technology in agri-food supply chain management: A circular economy perspective. *Journal of Environmental Management*, *330*, 117173. doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117173

Zejjari, I., & Benhayoun, I. (2024). The use of artificial intelligence to advance sustainable supply chain: retrospective and future avenues explored through bibliometric analysis. *Discover Sustainability*, *5*. doi: 10.1007/s43621-024-00364-6

Zhou, Y. (2025). AI-driven digital circular economy with material and energy sustainability for industry 4.0. *Energy and AI*, *20*, 100508. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025,100508