KMANPUB | Decision Science and Intelligent Systems Vol. 2 No. 4 (2025): 1-22

Article history:
Received 01 August 2025
Revised 03 January 2026
Accepted 10 January 2026
Published online 20 February 2026

Developing a Comprehensive Interpretive-Structural Model for Circular Supply Chain Risks in the Context of Industry 4.0

Seyed Davoud Mirghaderi[1], Mahmoud Modiri[1*], Nowrouz Nourollahzade[2], Gholamreza Hashemzadeh Khorasegani[1]

[1] Department of Industrial Management, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2] Department of Accounting and Finance, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

*** Corresponding author email address**: Ma.modiri@iau.ac.ir

A r t i c l e I n f o

Article type:
Original Research

How to cite this article:
Mirghaderi, S. D., Modiri, M., Nourollahzade, N., & Hashemzadeh Khorasegani, G. (2025). Developing a Comprehensive Interpretive-Structural Model for Circular Supply Chain Risks in the Context of Industry 4.0. *Decision Science and Intelligent Systems. 2(4), 1-22.*

© 2025 the authors. Published by KMAN Publication Inc. (KMANPUB), Ontario, Canada. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

A B S T R A C T

Managing the risks associated with smart technologies in Industry 4.0 within the circular supply chain is important for preventing organizational failure. This study aimed to identify the cause-and-effect relationships among circular supply chain risks in the context of Industry 4.0 in the petrochemical industry using the Total Interpretive Structural Modeling method. The qualitative findings, obtained through content analysis based on a systematic review of the theoretical literature and semi-structured interviews with 18 experts, including senior and middle managers of petrochemical companies, researchers, and university professors, showed that the risks included "organizational risk," "employee risk," "technological infrastructure risk," "circular framework risk," "financial and economic risk," "policy and regulatory risk," and "operations and supply risk." The causal findings of Total Interpretive Structural Modeling in the quantitative phase indicated that "policy and regulatory risk" was the most influential factor and the main driver of other risks, affecting "organizational risk." "Financial and economic risk" and "technological infrastructure risk" played mediating roles in the model and had a fundamental role in system complexity. "Circular framework risk," "employee risk," and "supply and operations risk" were respectively the most dependent risks and influenced system performance. The results indicate that the lack of governmental support is highly important and influential in creating legal and regulatory risks and disruptions. On the other hand, as supply and operations risk increases, the supply chain shifts from a closed-loop state back to a linear state.

Keywords: *Risk, Circular Supply Chain, Industry 4.0, Total Interpretive Structural Modeling.*

Extended Abstract

Introduction

The circular economy has become a strategic paradigm for redesigning supply chains around reduction, reuse, repair, remanufacturing, and recycling, with the purpose of minimizing environmental burden while improving resource productivity and long-term economic performance. In circular supply chains, value is not terminated at the point of consumption; instead, products, materials, information, and resources are redirected into reverse flows, recovery systems, and closed-loop processes. Prior research has shown that circular supply chain practices can improve end-of-life product management, create environmental and economic opportunities, and reshape supply chain activities such as design, production, distribution, consumption, repair, and remanufacturing (Agudo et al., 2020; Gebhardt et al., 2022; Kazancoglu et al., 2023). However, the movement from linear to circular systems also increases structural and operational complexity because firms must coordinate forward and reverse flows, track materials across the life cycle, manage uncertainty in recovered inputs, and maintain collaboration among multiple stakeholders.

The emergence of Industry 4.0 has intensified the possibility of implementing circular supply chains through digital connectivity, real-time monitoring, automation, and data-driven decision-making. Technologies such as artificial intelligence, cyber-physical systems, the Internet of Things, cloud computing, additive manufacturing, big data analytics, augmented and virtual reality, and blockchain can support information exchange, predictive decision-making, traceability, and responsiveness across supply chain networks (Agudo et al., 2020; Araújo et al., 2026). These technologies can strengthen circularity by improving coordination among supply chain actors, enabling product tracking, reducing waste, supporting reverse logistics, and enhancing the integration of recycling, remanufacturing, and sustainable production processes (Challouf et al., 2025; Dwivedi & Paul, 2022; Ghobakhloo et al., 2025).

Despite these advantages, the integration of Industry 4.0 into circular supply chains is accompanied by considerable risk. The literature indicates that digital transformation may produce risks related to data security, interoperability, technological immaturity, infrastructure readiness, high investment costs, human resource capability, energy consumption, and organizational resistance (Govardhan et al., 2025; Ivanov & Dolgui, 2021; Pandey et al., 2023; Tupa et al., 2017). In circular systems, these risks become more critical because any disruption in digital technologies may interrupt material tracking, reverse logistics, recycling operations, inventory planning, and coordination between supply and demand. Previous studies have identified operational, financial, infrastructural, organizational, environmental, and policy-related risks in Industry 4.0 and circular economy contexts (Caiado et al., 2022; Fuchs et al., 2025; Heidari et al., 2026; Ismail et al., 2025; Nagwal et al., 2025). Nevertheless, the causal structure among these risks remains insufficiently clarified, particularly in petrochemical supply chains, where technological failure, regulatory uncertainty, and operational disruption may generate severe economic and environmental consequences. Therefore, this study aimed to identify and model the cause-and-effect relationships among circular supply chain risks in the context of Industry 4.0 in the petrochemical industry using Total Interpretive Structural Modeling.

Methods and Materials

This study was conducted using a mixed-methods, cross-sectional design. The qualitative phase was based on multiple content analysis through both deductive and inductive approaches. In the deductive

stage, a systematic literature review was conducted using the PRISMA protocol. Scientific databases and reputable domestic and international sources were searched using keywords related to Industry 4.0 risks, circular supply chain risks, and Industry 4.0 risks associated with circular supply chains. The search covered studies published from 2011 to 2026. In the inductive stage, semi-structured interviews were conducted with experts from the petrochemical industry and academia. The participants included senior and middle managers in information technology, production, material supply, planning, research and development, finance, warehousing, human resources, and environmental management, as well as researchers and university faculty members familiar with the subject. Participants were selected through purposive non-probability sampling, and interviews continued until theoretical saturation was achieved. In total, 18 experts participated in the qualitative phase.

The qualitative data were analyzed through open, axial, and selective coding using MAXQDA 2020. The validity of the qualitative phase was examined through reference adequacy and epoche, and the reliability of the identified risks was assessed using the content validity ratio. In the quantitative phase, Total Interpretive Structural Modeling was applied to determine causal relationships among the identified main risks. Data were collected through a pairwise comparison questionnaire completed by the same expert panel. Experts evaluated the influence of each risk on the others using a five-point scale ranging from no influence to very high influence. The aggregated responses were used to construct the structural self-interaction matrix, the initial reachability matrix, the final reachability matrix, hierarchical levels, the Total Interpretive Structural Model, and MICMAC analysis.

Findings

The qualitative results showed that the systematic review initially identified 87 articles. After screening the studies based on relevance and quality of findings, 12 articles remained for coding. The deductive codes extracted from the literature were combined with inductive codes obtained from 18 expert interviews. This process led to the identification of 68 circular supply chain risks in the context of Industry 4.0. Through axial coding, these risks were grouped into 14 sub-risks, and through selective coding, they were consolidated into seven main risks. The content validity ratio was then calculated for the identified indicators. Based on the threshold value of 0.45 for 18 experts, eight risks were removed and 60 risk indicators were confirmed.

The seven main risks identified in the study were organizational risk, employee risk, technological infrastructure risk, circular framework risk, financial and economic risk, policy and regulatory risk, and supply and operations risk. Organizational risk included management and decision-making risk as well as organizational collaboration risk. Employee risk included knowledge gap, culture, and resistance. Technological infrastructure risk consisted of technology application risk and data and information risk. Circular framework risk included circular cycle and environmental risks. Financial and economic risk consisted of cost, finance, and investment risks. Policy and regulatory risk included government support as well as laws and regulations. Supply and operations risk included production and operations risk as well as supply disruption risk.

The results of Total Interpretive Structural Modeling showed a hierarchical causal structure among the risks. Policy and regulatory risk was placed at the deepest level of the model and was identified as the strongest driving risk. This risk influenced organizational risk and acted as the primary trigger for the emergence of other risks. Organizational risk was positioned at the next level and affected financial and

economic risk. Financial and economic risk played a mediating role by influencing technological infrastructure risk through limitations in access to financial resources for implementing Industry 4.0 technologies. Technological infrastructure risk was a central linking risk in the model and affected circular framework risk, employee risk, and supply and operations risk. Circular framework risk and employee risk subsequently influenced supply and operations risk. Supply and operations risk, circular framework risk, and employee risk were the most dependent risks and represented the final outcomes of the causal chain.

The MICMAC analysis showed that no risk was located in the autonomous cluster, indicating that all identified risks were relevant to the system. Policy and regulatory risk, organizational risk, and financial and economic risk were classified as independent risks because they had high driving power and relatively low dependence. Technological infrastructure risk was classified as a linkage risk because it had both high driving power and high dependence, meaning that any change in this risk could strongly affect the entire system. Employee risk, circular framework risk, and supply and operations risk were classified as dependent risks because their dependence was greater than their driving power. These risks were highly influenced by upstream risks and reflected the operational and functional consequences of the risk system.

Discussion and Conclusion

The findings indicate that circular supply chain risk in the context of Industry 4.0 is not a set of isolated threats but a structured and interdependent system. The central insight of the study is that policy and regulatory risk forms the foundation of the risk hierarchy. Weak government support, inadequate standards, insufficient legal protection, and unclear regulatory frameworks can reduce managerial commitment, weaken organizational readiness, and delay digital investment in circular supply chains. In the petrochemical industry, where circularity depends on advanced technologies, regulatory ambiguity may prevent firms from developing a clear digital vision, allocating resources, or building long-term collaborative mechanisms with supply chain partners.

The model also shows that organizational risk plays a key role in translating external regulatory uncertainty into internal financial and technological constraints. When senior management lacks commitment, digital strategy, decision-making capacity, or stakeholder coordination, investment in Industry 4.0 technologies becomes uncertain. This uncertainty increases financial and economic risk, particularly in relation to high technology deployment costs, redesign costs, equipment costs, and insufficient financing for advanced recycling and circular operations. Therefore, financial risk is not merely an economic barrier; it is also the result of weak organizational commitment and unclear strategic direction.

Technological infrastructure risk emerged as the most sensitive linkage risk in the system. This means that the maturity, reliability, integration, and security of digital infrastructure determine whether circular supply chain processes can function effectively. Weaknesses in Internet of Things systems, big data analytics, blockchain, cloud computing, automation, or data integration may disrupt the flow of information required for material tracking, reverse logistics, recycling, inventory control, and end-of-life product management. Because this risk connects upstream strategic and financial conditions to downstream operational consequences, it should be treated as a critical intervention point in risk management.

The dependent risks—employee risk, circular framework risk, and supply and operations risk—represent the most visible consequences of deficiencies in policy, organization, finance, and infrastructure.

Employee risk arises when technological change is not supported by training, knowledge transfer, job security, and human–machine interaction standards. Circular framework risk emerges when technological failures prevent the supply chain from maintaining sustainable design, product tracking, recycling, and closed-loop material flows. Supply and operations risk is the final operational manifestation of the system and includes production stoppage, supply disruption, poor access to circular resources, reduced resilience, increased waste, and lower operational reliability.

Overall, the study concludes that managing circular supply chain risks in the petrochemical industry requires a systemic, hierarchical, and preventive approach. The most effective risk reduction strategy should begin with strengthening policy and regulatory support, followed by improving organizational commitment, securing financial resources, developing technological infrastructure, training employees, and stabilizing circular supply and operations. If these risks are not managed coherently, the circular supply chain may lose its closed-loop character and return to a linear model. Thus, the proposed Total Interpretive Structural Model provides a practical decision-support framework for petrochemical managers and policymakers seeking to prevent organizational failure, reduce environmental consequences, and enhance the resilience of circular supply chains in the Industry 4.0 era.

علم تصمیم گیری و سیستم های هوشمند دوره ۲، شماره ۴ (۱۴۰۴): ۲۲-۱

تاریخچه مقاله
دریافت شده در تاریخ ۱۰ مرداد ۱۴۰۴
اصلاح شده در تاریخ ۱۳ دی ۱۴۰۴
پذیرفته شده در تاریخ ۲۰ دی ۱۴۰۴
منتشر شده در تاریخ ۱ اسفند ۱۴۰۴

ارائه مدل تفسیری-ساختاری جامع برای ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت نسل چهارم

سید داود میرقادری[۱]، محمود مدیری[۱*]، نوروز نوراله زاده[۲]، غلام رضا هاشم زاده خوراسگانی[۱]

۱. گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. گروه حسابداری و مالی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[*] ایمیل نویسنده مسئول: Ma.modiri@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
پژوهشی اصیل

نحوه استناد به این مقاله:
میرقادری، سید داود.، مدیری، محمود.، نوراله زاده، نوروز.، و هاشم زاده خوراسگانی، غلام رضا. (۱۴۰۴). ارائه مدل تفسیری-ساختاری جامع برای ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت نسل چهارم. *علم تصمیم گیری و سیستم های هوشمند، ۲(۴)*، ۲۲-۱.

© ۱۴۰۴ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

چکیده

مدیریت ریسک‌های فناوری‌های هوشمند صنعت نسل چهارم در زنجیره تامین مدور جهت دستیابی برای پیشگیری از شکست سازمان‌ها دارای اهمیت می‌باشد. این پژوهش با هدف شناسایی روابط علی-معلولی ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت نسل چهارم پتروشیمی با روش مدلسازی تفسیری-ساختاری جامع انجام شد. یافته‌های بخش کیفی که با رویکرد تحلیل محتوا بر اساس مرور نظام مند ادبیات نظری و مصاحبه نیمه ساختار یافته با ۱۸ خبره از مدیران ارشد و میانی شرکت پتروشیمی، پژوهشگران و اساتید دانشگاهی بود، نشان داد که ریسک‌ها شامل «ریسک سازمانی»، «ریسک کارکنان»، «ریسک زیرساخت فناوری»، «ریسک چارچوب مدور»، «ریسک مالی و اقتصادی»، «ریسک سیاست‌ها و قوانین» و «ریسک عملیات و تامین» بود. یافته‌های علت-معلولی مدلسازی تفسیری-ساختاری جامع در بخش کمی نشان داد که «ریسک سیاست‌ها و قوانین» تاثیرگذارترین و محرک ایجاد سایر ریسک‌ها بود که بر «ریسک سازمانی» تاثیر می‌گذارد. «ریسک مالی و اقتصادی» و «ریسک زیرساخت فناوری» به عنوان نقش میانجی در مدل در پیچیدگی سیستم نقش اساسی دارند. «ریسک چارچوب مدور»، «ریسک کارکنان» و «ریسک تامین و عملیات» به ترتیب تاثیرپذیرترین هستند که بر عملکرد سیستم تاثیر می‌گذارند. نتیجه نشان می‌دهد که کمبود حمایت دولت در ایجاد ریسک‌ها و اختلال‌های قانونی و حقوقی بسیار مهم و تاثیرگذار هستند. از طرفی دیگر، با افزایش ریسک تامین و عملیات، زنجیره تامین از حالت بسته به خطی بر می‌گردد.

کلیدواژگان: *ریسک، زنجیره تامین مدور، صنعت نسل چهارم، مدلسازی تفسیری-ساختاری جامع.*

مقدمه

اصول اقتصاد مدور شامل کاهش، استفاده مجدد، تعمیر، بازسازی و بازیافت است که هدف آن کاهش اثرات زیست محیطی و افزایش اثربخشی استفاده از منابع، کاهش آلودگی زیست محیطی است (Kazancoglu et al., 2023)، تا خواسته‌های مصرف‌کننده را به صورت پایدار برآورده کند (Agudo et al., 2020). همچنین، این رویکرد توانسته است نقشه پایان عمر محصول را در زنجیره تامین بهبود دهد و فرصت‌های زیست محیطی و اقتصادی گسترده‌ای را برای زنجیره تامین ایجاد کند(Gebhardt et al., 2021). رویکرد اقتصاد مدور در فرآیندهای زنجیره تامین طراحی، تولید، توزیع، مصرف، تعمیر و ساخت مجدد و همچنین زیرساخت کل زنجیره تامین تأثیر می‌گذارد و عملکرد مالی را بهبود دهد (Kazancoglu et al., 2023).

از طرفی دیگر با معرفی و رشد صنعت نسل چهارم در سال‌های اخیر، نوآوری‌های تکنولوژی این صنعت توانسته است فرصت‌های رویکرد مدور مانند کاهش هزینه‌های اثرات زیست محیطی و افزایش بهره وری را از طریق ایجاد ارتباط، هماهنگی و کنترل در فعالیت‌های زنجیره تامین چندین برابر کند (Araújo et al., 2026). در واقع صنعت نسل چهارم که شامل طیف وسیعی از فناوری‌ها مانند هوش مصنوعی، سیستم‌های فیزیکی سایبری، اینترنت اشیا، رایانش ابری، چاپ سه بعدی، تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ، واقعیت افزوده و مجازی و بلاکچین است توانسته است تبادل اطلاعات، دقت در تصمیم گیری و تمایز در نحوه پاسخگویی به درخواست‌های مشتری در زنجیره تامین را بهبود دهد (Agudo et al., 2020)

علارغم مزیت‌های صنعت نسل چهارم در زنجیره تامین مدور، صنایع در این حوزه با چالش‌هایی به دلیل رویکردهای جدید، چارچوب‌های اصلاح‌شده، زیرساخت‌های پیچیده‌تر فناوری اطلاعات و غیره مواجه هستند (Tupa et al., 2017)، که بکارگیری آن با مشکل مواجه است. این چالش‌ها بیشتر عملیاتی، فنی، ساختاری و مدیریتی می‌باشد (Pandey et al., 2023). عدم قطعیت‌ها و رویدادهای برنامه ریزی نشده و غیرطبیعی در بکارگیری فناوری‌های هوشمند مانند اینترنت اشیاء، داده بزرگ، هوش مصنوعی و غیره می‌تواند زنجیره تامین مدور را دچار اختلال یا حتی توقف کند و صنایع را متحمل هزینه گزاف، شکست و نابودی می‌کند (Ivanov & Dolgui, 2021). بنابراین پیش بینی وقوع و شدت وقایع غیر منتظره که تحت عنوان ریسک شناخته می‌شوند، برای پیشگیری از فروپاشی کل سیستم حیاتی است و در این حوزه، مدیریت و ارزیابی ریسک ضروری است (Chhimwal et al., 2021).

مطالعات نشان داده اند که صنعت نسل چهارم با ریسک‌هایی مانند مدیریت داده‌های حجیم، قابلیت همکاری، حساسیت و امنیت داده‌ها، شفافیت، قدرت پردازش بالای داده‌ها و اطلاعات، و مصرف انرژی مواجه هستند که می‌تواند به طور مستقیم در چرخه عمر کامل محصول موثر باشد (Ismail et al., 2025; Ghobakhloo et al., 2025). علاوه بر این، ریسک‌های عدم قطعیت در بازدهی، کیفیت متغیر مواد بازیابی شده و پیچیدگی هماهنگی در جریان‌های معکوس در زنجیره تامین مدور مشاهده شده است (Heidari et al., 2026). این ریسک‌ها در نهایت می‌تواند هم‌افزایی‌ها، تضادها یا وابستگی‌های بین اصول زنجیره تامین مدور و اجرای فناوری‌های صنعت نسل چهارم در صنایع را کاهش داده (Nagwal et al., 2025) و آلایندگی افزایش یابد (Satapathy & Mishra, 2026).

به طور کلی، مدیریت ریسک باید در زنجیره تامین دیجیتال اهمیت داده شود تا از ضرر و ورشکستگی در زنجیره تامین پیشگیری شود (Yang et al., 2021)؛ و این نیازمند یک برنامه ریزی صحیح شامل تلاش‌های جمعی و هماهنگ همه شرکای تأمین برای شناسایی، نظارت، تجزیه و تحلیل و کاهش ریسک‌ها برای مدیریت ریسک‌ها نیاز است (Ghobakhloo et al., 2025). طبق مطالعه صدری[1] و همکاران

[1] Sadri

(۲۰۲۴)، مدیریت ریسک زنجیره تامین، نتایج تسریع در جریان، کسب رضایت و نفع ذینفعان و در نهایت کاهش اثرات زیست محیطی در پی خواهد داشت.

مطالعات ریسک‌های زنجیره تامین مدور و صنعت نسل چهارم را برجسته کرده اند. در یافته‌های مطالعه دباغ و همکاران (۱۴۰۴) مشخص شد که کمبود آگاهی از صنعت ۴.۰، کمبود زیرساخت مبتنی بر فناوری اطلاعات، کمبود نیروی کارآزمودهٔ مرتبط، پایین‌بودن آگاهی از سیاست‌های صنعت ۴.۰ و پشتیبانی پایین مدیریت از چالش‌های اصلی فناوری‌های صنعت ۴.۰ برای عملیات پایدار است. در مطالعه کریمی شیرازی و وکیل الرعایا (۱۴۰۴)، ریسک‌های در دسترس نبودن استانداردها و حمایت‌های دولت، ریسک‌های سرمایه گذاری و بازده مالی و کمبود سیاست‌های مدور از طرف مدیران از چالش‌های مهم بکارگیری صنعت نسل چهارم در زنجیره تامین مدور بود. شریفیان جزی و همکاران (۱۴۰۳)، چالش‌های موثر بر پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ۴.۰ در مدیریت زنجیره تامین را شامل ابعاد فرهنگی – آموزشی، مالی – قانونی، زیرساختی – تکنولوژیکی، سازمانی- استراتژیک دسته‌بندی کردند. علاوه بر این، ریسک‌های اقتصادی، زیرساختی، منابع انسانی، سازمانی ـ مدیریتی و فنی ـ قانونی نیز در مطالعه کیانی و همکاران (۱۴۰۲) نیز مطرح شده است.

در مطالعات خارجی، (Lahane et al., 2026) ریسک مدیریت ارشد را در پیاده‌سازی انقلاب صنعتی چهارم برای سیستم لجستیک معکوس برجسته کرد. (Patil et al., 2025) ریسک‌های کنترل و نظارت محدود بر محصولات، ریسک‌های کیفی و اخلاقی و فشار زمانی برای تسریع انجام کار را به عنوان چالش‌های صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور مطرح کرد. همچنین چالش‌های نگرانی‌های امنیت داده‌ها و در دسترس نبودن استعدادهای ماهر، کمبود بلوغ و آمادگی زیرساخت‌های فناوری از مهم ترین ریسک‌های پذیرش صنعت ۴.۰ در صنعت زنجیره تامین مدور بود (Govardhan et al., 2025). (Tang et al., 2024) نیز امنیت داده و نگرانی‌های مرتبط با حفاظت از حریم خصوصی را چالش‌های صنعت چهارم را مطرح کرد. در مطالعه (Sahu et al., 2023) ریسک‌های سازمانی، امنیت داده‌ها و حریم خصوصی، توسعه فناوری و کلان‌داده و تجزیه و تحلیل به عنوان ریسک‌های صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین مدور بودند. همچنین ریسک‌های تکنولوژی، اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی، دانش و حمایت از مهم ترین ریسک‌های نسل چهارم برای زنجیره تامین در مطالعه (Caiado et al., 2022) بود. (Pandey et al., 2021) نیز ریسک‌های عملیاتی و فرآیند تولید، ریسک رفتاری، ریسک تقاضا، ریسک دولتی و سازمانی، ریسک سیستم، ریسک مالی، ریسک بازیابی محصول، ریسک اجتماعی و زیست محیطی، ریسک عرضه، ریسک اختلال، امنیت سایبری و ریسک ایمنی در محیط صنعت نسل چهارم زنجیره تامین برجسته کرد.

به طور کلی، یافته‌های مطالعات پیشین نشان داده است که ریسک‌های مالی و اقتصادی در صنعت نسل چهارم یکی از عوامل شکست سازمان‌ها است. ریسک‌های مالی در زمینه پیاده‌سازی فناوری صنعت نسل چهارم شامل عدم قطعیت‌های مالی و زیان‌های بالقوه مانند سرمایه‌گذاری‌های کلان و چالش‌های تأمین بودجه کافی و همچنین قطع ارتباط جریان پردازش اطلاعات مالی، فقدان اطلاعات درباره وضعیت جاری مالی، در دسترس بودن و مکان دارایی‌های در زنجیره تامین مدور است(Fuchs et al., 2025). دیگر ریسک شامل ریسک عملیاتی می‌باشد که شامل اختلالات و ناکارآمدی‌های ناشی از منسوخ شدن فناوری، ادغام ناکافی سیستم‌های دیجیتال و آسیب‌پذیری‌های امنیت داده‌ها در چرخه مدور هستند (El Baz et al., 2023). اختلال در فناوری‌های هوشمند موجب قطع ارتباط، هماهنگی و رصد بین عملیات بازیافت، دارایی‌ها، سطوح موجودی و شرایط پایان عمر محصول در اقتصاد مدور می‌شود (Challouf et al., 2025). ریسک‌های زیست‌محیطی بر تأثیرات اکولوژیکی ناشی از افزایش مصرف منابع، نیازهای انرژی یا تولید زباله مرتبط با فناوری‌های صنعت نسل چهارم تمرکز دارند و این مسئله می‌تواند اقتصاد مدور را با مشکل جدی اثرات زیست محیطی مواجه کند (Challouf et al., 2025). علاوه بر این، نقص در فناوری‌های هوشمند می‌تواند خود چرخه مدور را به خصوص در هماهنگی میان تقاضا و عرضه با مشکل مواجه کند. این ریسک می‌تواند

قابلیت مشاهده و کنترل در زمان واقعی برای کاهش ضایعات، بازیافت و تولید مجدد هوشمند را متوقف کند (Challouf et al., 2025). همچنین این ریسک‌ها بر شبیه‌سازی فرآیندهای لجستیک معکوس شامل سیاست برنامه‌ریزی موجودی و تولید مدور اثرات منفی می‌گذارد (Kamble & Gunasekaran, 2022). در سطح ریسک زیرساخت ها، چالش‌های استقرار نابالغ زیرساخت در خصوص ردیابی مؤثر مواد و بازیافت قوی است. تحقیقات اخیر، فقدان زیرساخت سازمانی برای پشتیبانی از ابتکارات زنجیره تأمین مدور و نبود سیستم‌های ضروری ردیابی محصول را به‌عنوان بحرانی‌ترین موانع شناسایی کرده‌اند(Farzadnia et al., 2025). ناکافی بودن سامانه‌های اطلاعاتی قادر به پردازش حجم عظیم اطلاعات مورد نیاز برای ردیابی چرخه عمر مواد نیستند (Das et al., 2024). علاوه بر این، در حوزه مدیریتی نیز ریسک‌ها پررنگتر هستند. مهم‌ترین ریسک‌ها شامل مشکلات کنترل کیفیت، دشواری‌های مدیریت عملکرد، ناهماهنگی میان ذینفعان و تداخل در سیستم‌های تصمیم‌گیری پشتیبانی است (Kazancoglu et al., 2023; Charnley et al., 2019).

همانگونه که یافته‌ها نشان می‌دهد، پیشینه تجربی قبلی ریسک‌های مختلف از صنعت نسل چهارم و زنجیره تامین مدور به صورت مجزا ارائه داده اند (Lahane et al., 2026; Patil et al., 2025) ، اما نقش ریسک‌های صنعت نسل چهارم و تاثیرات آن در زنجیره تامین مدور هنوز مشخص نشده است و این مسئله می‌تواند صنایع را با ورشکستگی مواجه کند. ادبیات مشخص کرده است که اختلال در فناوری‌های هوشمند می‌تواند چرخه مدور را مختل و یا متوقف کند (Fuchs et al., 2025; Challouf et al., 2025)؛ اما به صورت عملیاتی این ریسک‌ها در صنایع تعیین نشده اند. در حالی که همگرایی بین هر دو حوزه، صنعت نسل چهارم و اقتصاد مدور، اجتناب‌ناپذیر و برای تکامل آینده صنایع هوشمند توسعه پایدارضروری است. با توجه به اهمیت روزافزون مدیریت ریسک در سازمان‌ها، مدیریت ریسک یک مسئله استراتژیک است، زیرا بر تصمیم‌گیری در سطح مدیریتی، بهینه‌سازی منابع و پاسخگویی به تغییرات محیطی تأثیر می‌گذارد. در این راستا، برای جلوگیری از پیامدهای منفی، ضروری است که ریسک‌های فناوری‌های نوظهور در زنجیره تامین مدور ارزیابی شود. به خصوص اینکه صنعت پتروشیمی به عنوان صنعت پایه برای بسیاری از صنایع دیگر می‌باشد و از فناوری‌های هوشمند برای کنترل فعالیت‌های خود استفاده می‌کند و هر گونه اختلال در فناوری‌های هوشمند می‌تواند فرآیند زنجیره تامین را متوقف و یا اثرات منفی زیست محیطی را افزایش دهد. اگرچه زنجیره تامین از مزایای فناوری نوظهور اطلاع دارند، اما ریسک‌ها و چالش‌ها برای زنجیره تامین مدور صنعت پتروشیمی مبهم است که می‌تواند منجر به قطع ارتباط با ذینفعان چرخه مدور، افزایش هزینه‌ها و از دست دادن مشتریان شود. هدف اصلی انجام مدیریت ریسک، کمک به تصمیم‌گیری صنعت پتروشیمی است. بنابراین مسئله اصلی این است که ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت نسل چهارم کدام اند و ارتباطات آن‌ها چگونه می‌باشد؟

روش شناسی

پژوهش حاضر برحسب نوع داده به صورت آمیخته (کیفی-کمی) و مقطعی انجام شده است. روش گردآوری اطلاعات کتابخانه‌ای و جستجو در پایگاه‌های علمی معتبر داخلی همچون پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی، پورتال جامع علوم انسانی، پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران و پایگاه‌های خارجی مانند اشپرینگر[1]، ساینس دایرکت[2]، تیلور و فرانسیس[3] و امرالد[4] و همچنین روش میدانی و جستجو در سناد و مدارک شرکت پتروشیمی می‌باشد.

[1] springer
[2] sciencedirect
[3] tandfonline
[4] emerald

پژوهش در ماهیت کیفی به روش تحلیل محتوا چندگانه شامل قیاسی و استقرائی همراه با تکنیک کدگذاری داده‌ها در سه مرحله کدگذاری باز، محوری و انتخابی است. تجزیه‌وتحلیل محتوا بر این فرض استوار است که متون منبع داده‌ای غنی با پتانسیل فراوان برای آشکار کردن اطلاعات ارزشمند در مورد پدیده‌های خاص هستند. هدف تحلیل محتوا، شناسایی و استخراج متغیرها، مولفه‌ها و ریسک‌های زنجیره‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت نسل چهارم صنعت پتروشیمی از طریق مرور نظام مند ادبیات نظری با پروتکل پریسما[1] (قیاسی) و مصاحبه نیمه ساختار یافته با مشارکت کنندگان پژوهش (استقرائی) است. جامعه آماری یک شرکت پتروشیمی متخصص در تولید مواد استیک پلی بوتادین و استیک استایرین بوتادین می‌باشد. مشارکت کنندگان بخش کیفی شامل مدیران ارشد شرکت، مدیران بخش میانی از جمله فناوری اطلاعات، تولید، تامین مواد، برنامه ریزی، تحقیق و توسعه، مالی، انبار، منابع انسانی، محیط زیست دارای حداقل ۱۰ سال تجربه و همچنین پژوهشگران صنعت و اساتید دانشگاهی دارای تحصیلات تکمیلی و دانشیار، آگاه به موضوع و دارای کتب و مقاله‌های مرتبط که به صورت نمونه گیری غیر احتمالی هدفمند و بر اساس معیار اشباع نظری به تعداد ۱۸ نفر بودند.

برای روایی بخش کیفی، کفایت مراجع و اپوخه بررسی شد. در این بخش پس از گردآوری داده‌ها از طریق مشاهده و مصاحبه، برخی از داده‌های تحلیل شده با داده‌های خام اولیه توسط خبرگان مقایسه شد و مشاهده شد که داده‌های تحلیل شده و خام اولیه مشابه یکدیگر هستند و در این هنگام نتیجه گرفته شد که محقق اندیشه‌های خود را ابقاء نکرده است و اپوخه به خوبی انجام شده بود و کفایت مراجع رخ داده است. همچنین برای پایایی بخش کیفی از شاخص CVR برای ارزیابی پایایی ریسک‌ها استفاده شد.

ماهیت پژوهش در بخش کمی به دلیل فاقد فرضیه یا پیش‌بینی‌ها در مطالعات قبل، به صورت علت-معلولی می‌باشد. در این بخش از روش مدلسازی تفسیری-ساختاری جامع برای تعیین روابط علت-معلولی ریسک‌ها استفاده شده است. مدلسازی تفسیری-ساختاری برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های پیچیده پیشنهاد شده است که در آن روابط بین متغیرها را پیدا و چگونگی تأثیرات علت-معلولی را کشف می‌کند و در نهایت روابط به صورت سلسله مراتبی به نمایش در می‌آید (Bakhtari et al., 2020). مزیت مدلسازی تفسیری-ساختاری جامع نسبت به مدلسازی تفسیری-ساختاری این است که علاوه بر اینکه روابط غیر مستقیم را در نمودار سلسله مراتبی مشخص می‌کند، بلکه منطق پشت وابستگی متقابل بین متغیرها را هم عنوان می‌کند (Lin et al., 2019)، که این امر قدرت تفسیر را بالا می‌برد.

ابزار گردآوری داده‌ها در بخش مدلسازی تفسیری-ساختاری جامع، پرسش نامه مقایسات زوجی می‌باشد که در آن خبرگان میزان اثرگذاری هر یک از ریسک‌ها بر یکدیگر را بر اساس تأثیر ندارد (۰)، تأثیر کم (۱)، تأثیر متوسط (۲)، تأثیر زیاد (۳) و تأثیر خیلی زیاد (۴) پاسخ دادند.

یافته‌ها

اولین بخش از یافته‌های پژوهش مربوط به یافته‌های تحلیل محتوا چندگانه برای شناسایی ریسک‌ها می‌باشد. در بخش قیاسی، مرور نظام مند ادبیات نظری به صورت پروتکل پریسما صورت گرفت. بر طبق این پروتکل، کلید واژه‌های «ریسک‌های صنعت نسل چهارم»، «ریسک‌های زنجیره تامین مدور»، «ریسک‌های صنعت نسل چهارم مرتبط با زنجیره تامین مدور» در پایگاه داده‌های معتبر داخلی مانند مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران، مرکز اسناد و کتابخانه ملی ایران، پایگاه اطلاعات نشریات کشور، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی و نورمگز و خارجی مانند ساینس دایرکت، اشپرینگر، امرالد، فرانک و تیلور و ویلی در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۶ جستجو شد و تعداد ۸۷ مقاله شناسایی شدند. سپس مقاله‌ها بر اساس کیفیت یافته‌های مرتبط با موضوع پژوهش فیلتر شدند و در نهایت ۱۲ مقاله باقی ماند و کدهای باز استخراج

[1] PRISMA

شدند. سپس در بخش استقرائی، مصاحبه نیمه ساختار یافته با ۱۸ نفر از مشارکت کنندگان تحقیق صورت گرفت و تا اشباع نظری ادامه یافت. سپس کدهای باز استخراج شده در بخش قیاسی و استقرائی با هم ترکیب شدند و ۶۸ ریسک زنجیره تامین مدور در صنعت نسل چهارم شناسایی شدند. سپس ۱۴ ریسک فرعی در مرحله کدگذاری محوری از تجمیع و طبقه بندی ریسک‌های متجانس و هماهنگ با یکدیگر به دست آمد. در نهایت ۷ ریسک اصلی از طریق کدگذاری انتخابی در مراحل تحلیل محتوا کشف شدند. تمامی کدگذاری‌ها در نرم افزار MAXQDA 2020 انجام شد. سپس ضریب CVR برای ارزیابی شاخص‌ها بکار گرفته شد. خبرگان میزان «ضروری»، «مفید، اما غیرضروری» یا «غیرضروری» ریسک‌ها را مشخص کردند و ریسک‌هایی که میانگین امتیاز آن‌ها از مقدار ۰/۴۵ –ضریب لاوشه برای ۱۸ خبره- بیشتر بودند، انتخاب شدند. ۸ ریسک حذف شد و ۶۰ ریسک تایید شدند. یافته‌های بخش کیفی در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱. یافته‌های بخش کیفی در خصوص ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت نسل چهارم در صنعت پتروشیمی

ریسک اصلی	ریسک فرعی	شاخص‌های ریسک	
ریسک سازمانی	ریسک مدیریت و تصمیم گیری	ریسک تعهد مدیریت ارشد به استفاده از صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک فرآیندهای تصمیم‌گیری در زنجیره تامین مدور به دلیل نقص در اتوماسیون صنعت ۴.۰-ریسک از دست رفتن مشروعیت اجتماعی به دلیل نقص صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور- ریسک نقص چشم‌انداز و استراتژی دیجیتال ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک مهارت‌های مدیریت در هماهنگی صنعت ۴.۰ با زنجیره تامین مدور-ریسک ضعف در تحقیق و توسعه صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک آماده نبودن زنجیره تامین مدور برای پذیرش صنعت ۴.۰	(Bag et al., ۲۰۲۱) (Özkanlıso & Akkartal, ۲۰۱۹) خبرگان
	ریسک همکاری سازمانی	ریسک هماهنگی و همکاری بکارگیری صنعت ۴.۰ در میان ذی‌نفعان زنجیره تامین مدور پتروشیمی- ریسک تاخیر در پروژه‌های مدور پتروشیمی به دلیل ضعف همکاری و پشتیبانی ۴.۰ و زنجیره تامین مدور- ریسک بی علاقگی ذینفعان پتروشیمی برای استفاده از صنعت ۴.۰ در زنجیره ازش مدور- ریسک بی‌اعتمادی به محرمانگی اطلاعات زنجیره تامین مدور میان شرکا پتروشیمی به دلایل نقص ۴.۰ مانند بلاکچین	(Chauhan et al, ۲۰۲۲) خبرگان
ریسک کارکنان	ریسک شکاف دانش	ریسک دانش فنی ضعیف کارکنان در بکارگیری صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک مدیریت دانش چرخه مدور در انتقال دانش صنعت ۴.۰-ریسک نقص صنعت ۴.۰ در آموزش نیروی انسانی مدور-ریسک کمبود صنعت ۴.۰ در پشتیبانی از دانش مدور کارکنان	(Afroozi et al., ۲۰۲۴) (Roshan et al., ۲۰۲۴)
	ریسک فرهنگ و مقاومت	ریسک فرهنگ دیجیتال و کمبود مشارکت کارکنان به دلیل عدم اطمینان به صنعت ۴.۰-ریسک از دست دادن شغل ناشی بکارگیری صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک تعامل انسان-ماشین صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک ضعف استانداردهای بکارگیری منابع انسانی صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور	(Das et al., ۲۰۲۴) خبرگان
ریسک زیرساخت فناوری	ریسک کاربرد فناوری	ریسک نابالغ بودن برخی فناوری‌ها (به‌ویژه تحلیل داده‌های بزرگ) صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک اتصال، هماهنگی و ارتباط دستگاه‌های چرخه مدور با یکدیگر به دلایل نقص در اینترنت اشیا-ریسک کوتاه شدن چرخه عمر فناوری‌های اثرگذار در چرخه مدور-ریسک وابستگی به صنعت ۴.۰ و ارائه دهندگان آن-ریسک به روز رسانی فناوری‌های ۴.۰ مطابق با اهداف زنجیره تامین مدور	(Pandey et al., ۲۰۲۱) خبرگان

	ریسک داده و اطلاعات	ریسک امنیت داده‌های زنجیره تامین مدور به دلایل هک و نفوذ به صنعت ۴.۰-ریسک یکپارچه‌سازی داده‌ها در زنجیره تأمین مدور به دلایل اختلال در فناوری‌های ۴.۰-ریسک کاهش هماهنگی به دلیل کیفیت پایین یا ناقص بودن داده‌های به‌اشتراک‌گذاشته‌شده از طرق صنعت ۴.۰-ریسک جمع آوری و قطع مدیریت داده‌های چرخه مدور به دلایل اختلال در فناوری‌های ۴.۰-ریسک ناهمخوانی داده‌های چرخه مدور به دلیل جریان ناکافی اطلاعات	(Ivanov & Dolgui, ۲۰۲۱) (Chauhan et al, ۲۰۲۲)
ریسک چارچوب مدور	ریسک چرخه مدور	ریسک ضعف در طراحی مشترک پایدار به دلیل نقص تبادل داده ها-ریسک ردیابی کامل مواد و محصول در طول چرخه عمر به دلایل ضعف در مدیریت داده صنعت ۴.۰ (به خصوص اینترنت اشیاء)-ریسک کاهش بازیافت به دلایل نقص در پایداری ۴.۰-ریسک تاخیر و توقف چرخه مدور به دلیل نقص یا ناکافی بودن فناوری‌های ۴.۰	خبرگان
	محیط زیست	نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از بکارگیری و بقایای فناوری‌های ۴.۰-ریسک افزایش آلایندگی‌های زیست محیطی به دلایل نقص در صنعت ۴.۰-ریسک افزایش مصرف انرژی به دلایل نقص در پایداری ۴.۰	خبرگان
ریسک مالی و اقتصادی	ریسک هزینه	ریسک هزینه‌های بالای استقرار صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک هزینه‌های بازطراحی برنامه‌های چرخه مدور به دلیل نقص ۴.۰-ریسک هزینه بالای تجهیزات صنعت ۴.۰-ریسک بالای قیمت تمام شده محصولات به دلیل مفید نبودن صنعت ۴.۰	(Afroozi et al., ۲۰۲۴), (Hobusch & Mißler-Behr, ۲۰۱۷)
	مالی و سرمایه گذاری	ریسک تامین مالی برای تجهیزات بازیافت پیشرفته-ریسک‌های سرمایه گذاری پایین در فناوری‌های پیشرفته-ریسک‌های پرداخت‌ها ی فاکتورهای زنجیره تامین مدور به دلیل نقص بلاکچین-ریسک تخصیص بودجه برای بکارگیری صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور	(Bag et al., ۲۰۲۱) (Özkanlıso & Akkartal, ۲۰۱۹)
ریسک سیاست‌ها و قوانین	ریسک حمایت‌های دولت	ریسک پاداش و مشوق‌های بکارگیری صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور- ریسک سیاست‌های ناکارامد بازیافت بر اساس صنعت ۴.۰- ریسک نقص تطابق بین چشم انداز قانونی اقتصاد مدرو و صنعت ۴.۰	(Silva & Sehnem, ۲۰۲۲) خبرگان
	ریسک قوانین و مقررات	ریسک اجرایی نشدن قوانین اقتصاد مدور مبتنی بر صنعت ۴.۰-ریسک کاهش حمایت حقوقی از صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور-ریسک ضعف در استانداردهای بکارگیری فناورهای ۴.۰ در زنجیره تامین مدور	(Ivanov & Dolgui, ۲۰۲۱)
ریسک تامین و عملیات	ریسک تولید و عملیات	ریسک افزایش ضایعات و بهینه‌سازی نگهداری به دلایل نقص تولید افزودنی -ریسک افزایش توقف تولید به دلایل نقص ۴.۰-ریسک اختلال در تولید به دلایل اختلال در ربات‌های خودمختار-ریسک کیفیت مدور به دلیل نقص در سامانه‌های صنعت ۴.۰ در تصمین کیفیت -ریسک مدیریت منابع و مواد در زنجیره‌های تأمین مدور ناشی از نقص ۴.۰	خبرگان
	ریسک اختلال تامین	ریسک نقص در پیش بینی اختلال‌های چرخه‌ای ناشی از ۴.۰-کاهش مقاومت زنجیره تامین در اختلال‌ها به دلایل نقص در پایداری ۴.۰-ریسک دسترسی مشتریان به منابع چرخه مدور به دلایل نقص در رایانش ابری-ریسک اختلال در تامین چرخه مدور به دلیل نقص پیش بینی صنعت ۴.۰-ریسک دسترسی ضعیف به تامین کنندگان چرخه مدور صنعت پتروشیمی به دلیل تغییرات سریع صنعت ۴.۰	خبرگان

بخش دوم یافته‌ها مربوط به مدلسازی تفسیری-ساختاری جامع می‌باشد. اولین گام آن تشکیل ماتریس ساختاری روابط درونی است که از طریق پرسش نامه مقایسات زوجی و مشخص شدن میزان اثرگذاری هر یک از ریسک‌ها به صورت بدون تأثیر (۰)، تأثیر کم (۱)، تأثیر متوسط (۲)، تأثیر زیاد (۳) و تأثیر خیلی زیاد (۴)، توسط ۱۸ خبره تشکیل و پاسخ‌های تجمیع شد. جدول ۲ ماتریس ساختاری روابط درونی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ماتریس ساختاری روابط درونی

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
ریسک سازمانی	۰	۵۵	۶۸	۶۰	۶۳	۴۸	۵۵
ریسک کارکنان	۴۸	۰	۳۸	۵۲	۴۹	۳۳	۴۵
ریسک زیرساخت فناوری	۳۸	۵۷	۰	۵۵	۵۲	۳۸	۶۵
ریسک چارچوب مدور	۵۱	۳۶	۴۴	۰	۴۳	۴۸	۷۰
ریسک مالی و اقتصادی	۴۳	۵۹	۵۷	۶۲	۰	۵۰	۶۱
ریسک سیاست‌ها و قوانین	۶۶	۶۴	۵۱	۶۸	۶۹	۰	۶۳
ریسک تامین و عملیات	۴۴	۳۹	۳۷	۶۰	۴۱	۴۸	۰

گام دوم، تشکیل ماتریس دستیابی اولیه است که به صورت ۰ (اثر ندارد) و ۱ (اثر دارد) می‌باشد. بدین منظور از روابط مطرح شده توسط بولانوس و همکاران (۲۰۰۵) استفاده شد. سپس ماتریس دستیابی نهایی پس از سازگاری به دست آمد. در این قسمت، اگر ریسک ۱ منجر به ریسک ۲ شود و ریسک ۲ هم منجر به ریسک ۳ شود، آنگاه ریسک ۱ منجر به ریسک ۳ می‌شود. جدول ۳ ماتریس دستیابی پس از سازگاری را نشان می‌دهد:

جدول ۳. ماتریس دستیابی پس از سازگاری

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	اثرپذیری
ریسک سازمانی	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۶
ریسک کارکنان	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱
ریسک زیرساخت فناوری	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۴
ریسک چارچوب مدور	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۲
ریسک مالی و اقتصادی	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۵
ریسک سیاست‌ها و قوانین	۱	۱	۱*	۱	۱	۱	۱	۷
ریسک تامین و عملیات	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۲
اثرگذاری	۲	۵	۴	۶	۳	۱	۶	

در گام بعدی، سطح بندی ریسک‌ها بر اساس مطالعه کریمی شیرازی و همکاران (۲۰۱۷) به دست آمد. در این بخش مجموعه قابل دستیابی شامل قدرت تاثیرگذاری و مجموعه مقدم شامل قدرت اثرپذیری بر اساس ماتریس پس از سازگاری است که به صورت نزولی مرب شدند و سطحو را تشکیل دادند. جدول ۴ یافته‌های سطح بندی را نشان می‌دهد.

جدول ۴. سطح بندی ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت ۴.۰ پتروشیمی

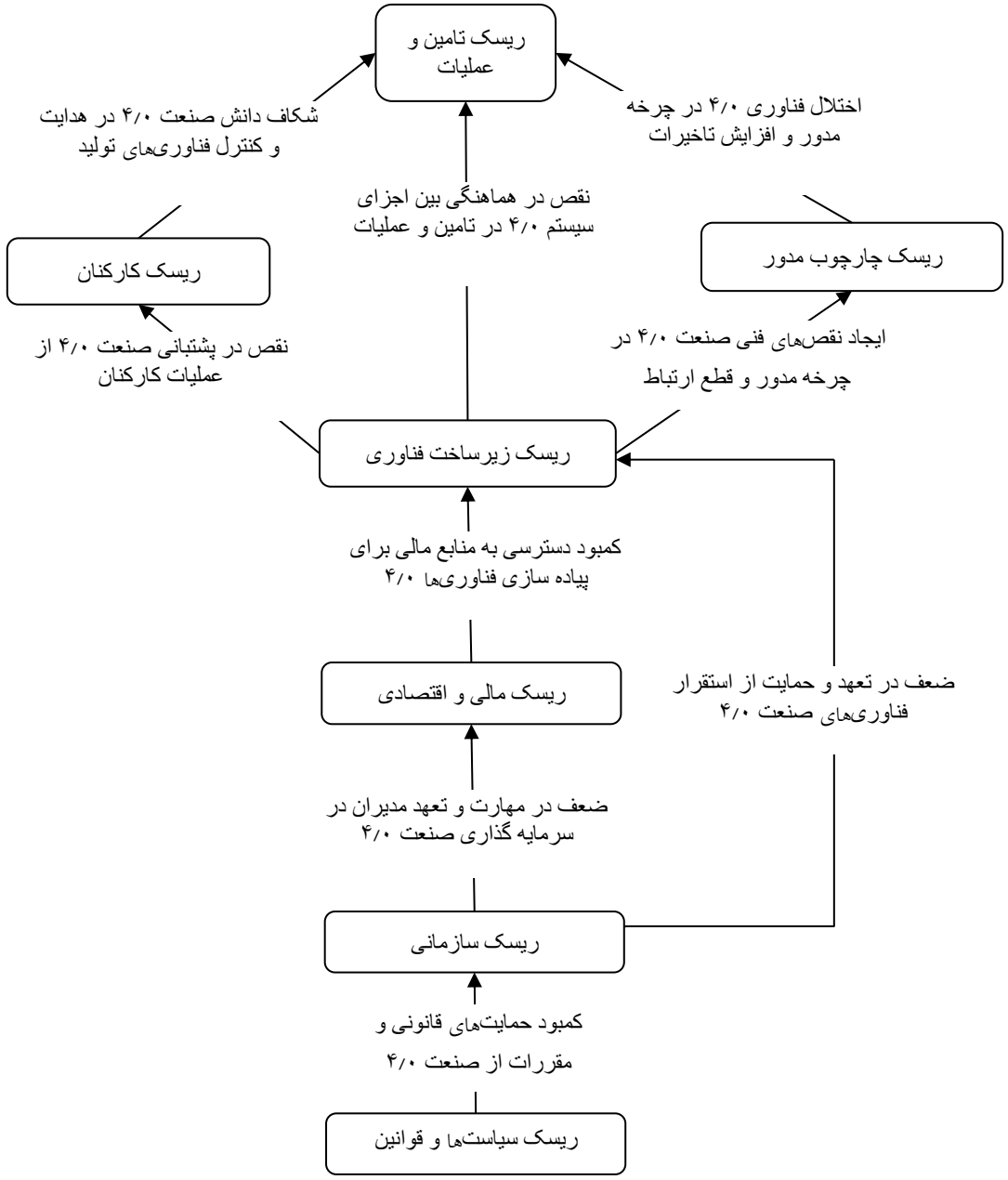
متغیرها	D (هدایت)	R (وابستگی)	D-R	سطح	نتیجه
ریسک کارکنان	۱	۵	-۴	اول	وابسته
ریسک چارچوب مدور	۲	۶	-۴	اول	وابسته
ریسک تامین و عملیات	۲	۶	-۴	اول	وابسته
ریسک زیرساخت فناوری	۴	۴	۰	دوم	متصل
ریسک مالی و اقتصادی	۵	۳	۲	سوم	متصل
ریسک سازمانی	۶	۲	۴	چهارم	مستقل
ریسک سیاست‌ها و قوانین	۷	۱	۶	پنجم	مستقل

در پایان، بر اساس سطح بندی و اطلاعات جدول ۴ ریسک‌ها به صورت سلسله مراتبی مشخص شدند. در ادامه به منظور تفسیر بیشتر رابطه از نظر تفکر علّی، ماتریس تعاملی باینری تشکیل شد و سپس از طریق پایگاه دانش خبرگان در قالب ماتریس تفسیری، رابطه‌های غیر مستقیم و همچنین دلایل منطقی آن برای ریسک‌ها شناسایی شد که به صورت ۱ ایتالیک در ماتریس جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. ماتریس تعاملی باینری

	ریسک سازمانی	ریسک کارکنان	ریسک زیرساخت فناوری	ریسک چارچوب مدور	ریسک مالی و اقتصادی	ریسک سیاست‌ها و قوانین	ریسک تامین و عملیات
ریسک سازمانی			*۱*		۱		
ریسک کارکنان							*۱*
ریسک زیرساخت فناوری		۱		۱			۱
ریسک چارچوب مدور							۱
ریسک مالی و اقتصادی			۱				
ریسک سیاست‌ها و قوانین	۱						
ریسک تامین و عملیات							

اطلاعات به دست آمده از ماتریس تعاملی جدول ۵ برای استخراج مدلسازی تفسیری-ساختاری جامع استفاده شد که در شکل ۱ آمده است.

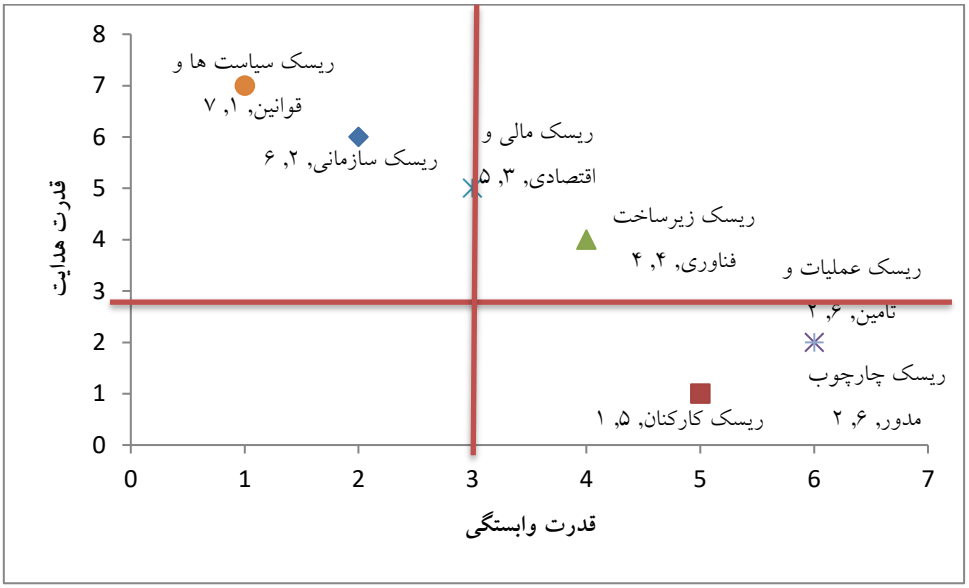


شکل ۱. مدل تفسیری-ساختاری ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت ۴.۰ پتروشیمی

همانگونه که مدل تفسیری-ساختاری جامع نشان می‌دهد، «ریسک‌های سیاست‌ها و قوانین»، قرار گرفته است که محرک اصلی در ایجاد سایر ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت ۴.۰ است. این ریسک بر نقص در حمایت‌های دولت و ضعف قوانین و مقررات در بکارگیری صنعت ۴.۰ در طول زنجیره تامین مدور پتروشیمی اشاره دارد. در سطح بعدی، «ریسک سازمانی» قرار دارد که بر سطح بعدی خود موثر می‌باشد. «ریسک سازمانی» به صورت غیرمستقیم از طریق ضعف در تعهد و حمایت مدیران صنعت پتروشیمی از استقرار فناوری‌های صنعت ۴.۰ بر «ریسک زیرساخت فناوری» اثر می‌گذارد در حالی که این تاثیر غیرمستقیم در مدلسازی تفسیری-ساختاری مشخص نبود. در سطح چهارم، «ریسک مالی و اقتصادی» قرار دارد که از طریق کمبود دسترسی به منابع مالی برای پیاده سازی فناوری‌ها ۴.۰ می‌تواند «ریسک زیرساخت فناوری» ایجاد کند. مشکل در بوجه و تامین مالی می‌تواند بر ریسک استقرار تجهیزات و فناوری‌های صنعت چهارم در زنجیره تامین مدور صنعت پتروشیمی تاثیر بگذارد. در سطح سوم، «ریسک زیرساخت فناوری» قرار دارد که با ایجاد نقص‌های فنی صنعت ۴.۰ می‌تواند

ارتباط در چرخه مدور را قطع کند. کمبود فناوری‌ها نمی‌تواند از چرخه مدور که نیاز به فناوری‌های پیشرفته برای جمع آوری، جداسازی، انبار و حمل و نقل و انتقال صنعت پتروشیمی پشتیبانی کند. همچنین این ریسک بر «ریسک تامین و عملیات» با واسطه نقص در هماهنگی بین اجزای سیستم ۴.۰ در تامین و عملیات تاثیر می‌گذارد. با نقص در زیرساخت ها، فناوری‌های هوشمند نمی‌توانند وظایف خود را به صورت بی نقص و با قابلیت اطمینان بالا برای بخش تامین و عملیات انجام دهد. علاوه بر این، «ریسک زیرساخت فناوری» از طریق نقص در پشتبانی صنعت ۴.۰ از عملیات کارکنان می‌تواند منجر به افزایش «ریسک کارکنان» و در رفتارهای کارکنان مختل ایجاد کند. «ریسک کارکنان» با ایجاد شکاف دانش صنعت ۴.۰ در هدایت و کنترل فناوری‌های تولید توسط نیروی انسانی می‌تواند بر «ریسک تامین و عملیات» در زنجیره تامین مدور صنعت پتروشیمی موثر باشد. بخش تامین و تولید پتروشیمی بسیار پیچیده است و مهارت و دانش کارکنان برای هدایت فرآیند تولید ضروری است. «ریسک چارچوب مدور» با ایجاد اختلال فناوری صنعت ۴.۰ در چرخه زنجیره تامین مدور و افزایش تاخیرات می‌تواند بر «ریسک تامین و عملیات» اثرگذار باشد. هنگامی که طراحی پایدار به کمک صنعت ۴.۰ دچار اختلال شوند، انتظار می‌رود که مواد و کالاها توسط فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء و RFID در صنعت پتروشیمی ردیابی نشود و این مسئله می‌تواند موجب تاخیر و یا حتی توقف در تولید شود. بنابراین پیامد ریسک‌ها می‌تواند تامین و عملیات چرخه مدور صنعت پتروشیمی را با اختلال مواجه کند.

گام آخر مدلسازی-تفسیری جامع، تحلیل میک مک و مشخص شدن نوع ریسک‌ها بود. ریسک‌ها در چهار دسته خودگردان، مستقل، متصل و وابسته قرار گرفتند که قدرت هدایت و وابستگی آن‌ها را نشان می‌دهد. تحلیل میک مک در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲. تحلیل میک مک ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر صنعت ۴.۰ پتروشیمی

همانگونه که شکل ۲ نشان می‌دهد، هیچ یک از ریسک‌ها دارای قدرت هدایت ضعیف و وابستگی ضعیف نیستند و بنابراین ریسک در دسته خودگردان وجود نداشت. اما «ریسک سیاست‌ها و قوانین»، «ریسک سازمانی» و «ریسک مالی و اقتصادی» دارای قدرت هدایت بالا ولی وابستگی ضعیف هستند که نشان دهنده محرک بودن این ریسک‌ها هستند و در نتیجه در دسته مستقل قرار گرفتند. دسته سوم ریسک‌های متصل هستند که «ریسک زیرساخت فناوری» در این دسته قرار دارد که دارای قدرت هدایت بالا و وابستگی بالا بود. بنابراین هر گونه تحول در آن می‌تواند کل سیستم را تحت تاثیر قرار دهد. در نهایت دسته چهارم ریسک‌های وابسته هستند که شامل «ریسک کارکنان»، «ریسک چارچوب مدور» و «ریسک تامین و عملیات» بود که قدرت وابستگی ان‌ها بیشتر از هدایت بود و در نتیجه این ریسک‌ها به شدت تحت تاثیر ریسک‌های وابسته هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج مهم این تحقیق شناسایی ریسک‌های سازمانی، کارکنان، زیرساخت ها، چارچوب مدور، مالی و اقتصادی، سیاست و قوانین و ریسک‌های تامین و عملیات برای زنجیره تامین مدور صنعت پتروشیمی در بستر صنعت نسل چهارم بود. این تحقیق به دلیل پوشش شکاف مربوط به نامشخص بودن تاثیرات اختلال‌های صنعت ۴.۰ بر زنجیره تامین مدور منحصر به فرد بود و نتایج نشان داد که ریسک‌های چرخه مدور و ریسک‌های تامین مدور مانند ریسک ردیابی کامل مواد و محصول در طول چرخه عمر به دلایل ضعف در مدیریت داده صنعت ۴.۰ (به خصوص اینترنت اشیاء)، ریسک کاهش بازیافت به دلایل نقص در پایداری ۴.۰، و ریسک ناهمخوانی داده‌های چرخه مدور به دلیل جریان ناکافی اطلاعات مهم می‌باشد که در ادبیات‌های قبل مشخص نبودند. در این خصوص، (Afroozi et al., 2024) تاکید دارد که اختلال در فناوری‌های هوشمند موجب پیچیدگی اقتصاد مدور می‌شود که پیامد آن آلودگی زیست‌محیطی است. همچنین در خصوص ریسک تامین و عملیات، مشخص شد که هر گونه اختلال در صنعت نسل چهارم می‌تواند زنجیره تأمین مدور صنعت پتروشیمی را در منبع‌یابی، موجودی، توزیع، خرده‌فروشی، تجربه مشتری، لجستیک معکوس تحت تاثیر قرار دهد. نقص در فناوری‌های هوشمند موجب کاهش شفافیت، نقص در یکپارچگی، افزایش تغییرناپذیری، از دست رفتن حریم خصوصی، کاهش قابلیت اطمینان و تطبیق ناپذیری در بین ذینفعان زنجیره تامین مدور می‌شود و این برای صنعت پتروشیمی می‌تواند مشکلات اساسی در سفارش ایجاد کند. در راستای این نتایج، (Majumder et al., 2024) نشان دادند که نقص در صنعت ۴.۰ می‌تواند مدورسازی در یک زنجیره تأمین را با بستن حلقه‌های مواد، استفاده مجدد از آنها را کاهش داده و تقاضای مواد با مختل مواجه می‌شود که این امر منجر به افزایش قیمت مواد می‌گردد. (Nacchiero et al., 2024) نیز تاکید کردند که نقص در صنعت ۴.۰ می‌تواند بازیابی، استفاده مجدد، بازیافت و ارزش‌گذاری منابع ضایعات را تحت تاثیر قرار دهد.

نتایج مدلسازی تفسیری-ساختاری جامعه نشان داد که پتروشیمی ریسک‌های سیاست‌ها و قوانین اساس شکل دهی ریسک‌های زنجیره تامین مدور در بستر ۴.۰ صنعت پتروشیمی می‌باشد. ریسک‌های سیاست‌ها و قوانین از طریق کمبود حمایت‌های قانونی و مقررات از صنعت ۴.۰ می‌تواند بر ریسک‌های سازمانی زنجیره تامین مدور اثرگذار باشد. در حال حاضر، سیستم‌های قانونی برای به کارگیری واضح فناوری‌های صنعت ۴.۰ در صنعت پتروشیمی با مشکل مواجه است و حمایت‌های مالی مانند تشویق‌های مالی و مالیاتی از طرف دولت برای ایجاد انگیزه مدیران در ایجاد و ترسیم چشم‌انداز و استراتژی دیجیتال ۴.۰ در زنجیره تامین مدور ضعیف می‌باشد. ریسک کمبود توجه دولت در بکارگیری صنعت ۴.۰ اقتصاد مدور به خصوص ضعف در استانداردها و کاهش حمایت حقوقی می‌تواند بر ریسک عدم پذیرش صنعت ۴.۰، ضعف در تحقیق و توسعه و ضعف در مهارت‌های مدیریت در هماهنگی صنعت ۴.۰ با زنجیره تامین مدور موثر باشد. افروزی و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که محدودیت‌های مقرراتی و چارچوب‌های سیاستی ناکافی که امکان اقتصادی برنامه‌های بازیافت را کاهش می‌دهند، پذیرش صنعت نسل چهارم را در اقتصاد مدور، پیچیده‌تر می‌سازند. فقدان الزامات شفاف در مورد مسئولیت گسترده تولیدکننده، استانداردهای بازیافت و گزارش‌دهی کربن، باعث می‌شود موجب می‌شود که مدیران برنامه‌ریزی بلندمدت را اولویت قرار ندهند و استراتژی مشخص برای سرمایه‌گذاری، همکاری‌های راهبردی و تقویت قابلیت‌های دیجیتال خودوجود نداشته باشد (Kannan et al., 2024).

نتیجه دیگر این پژوهش، نقش مهم و اثرگذار ریسک سازمانی بر ریسک مالی و سرمایه گذاری است. بر این اساس، ریسک کمبود تعهد مدیران، ریسک‌های چشم انداز نادرست استراتژیک برای تصمیم گیری‌های مدیریتی و ریسک کمبود همکاری سازمانی در صنعت پتروشیمی می‌تواند همکاری بکارگیری صنعت ۴.۰ در میان ذی‌نفعان و اعضاء زنجیره تامین مدور را تضعیف و علاقه و حمایت آن‌ها را برای سرمایه گذاری در فناوری‌های پیشرفته از دست داد. علاوه بر این، کمبود حمایت‌های مدیریت، بی علاقگی ذینفعان پتروشیمی و بی‌اعتمادی

به محرمانگی اطلاعات زنجیره تامین مدور میان شرکا منجر به کاهش سرمایه گذاری در صنعت ۴.۰ می‌شود در حالی که بکارگیری صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور نیازمند به سرمایه گذاری بالا است. با کاهش حمایت‌های مدیریت انتظار می‌ورد که ریسک هزینه‌های بالای استقرار، ریسک هزینه‌های بازطراحی برنامه‌های چرخه مدور و ریسک بالای قیمت تمام شده محصولات افزایش یابد. عدم اطمینان سازمانی، توجیه سرمایه‌گذاری در شیوه‌های مدور را برای سازمان‌ها دشوار می‌سازد؛ زیرا نتایج مالی قابل پیش‌بینی نیستند (Charnley et al., 2019). در این خصوص (Chhimwal et al., 2021) تاکید دارد که تامین منابع مالی به منظور استقرار فناوری‌های هوشمند در زنجیره تأمین مدور الزامی است. همچنین مطالعه (Raj et al., 2020) نشان داد که مدیریت ارشد شرکت‌ها در مورد پذیرش فناوری‌های صنعت ۴.۰ به دلیل محدودیت منابع، محتاط تر هستند. (Agarwal & Seth, 2021) نشان دادند که ماهیت غیرمسئولانه و غیر متعهد مدیریت ارشد می‌تواند منجر به از دست داده سرمایه گذاری‌ها شود.

نتایج نقشه روابط علی-معلولی مدل پژوهش نشان داد که اختلال در زیرساخت‌های فناوری‌های صنعت ۴.۰ مانند نقص‌های کارکردی ، داده و اطلاعات فناوری‌ها می‌تواند رویدادهای نامطلوب و تهدیدات کارکنان را افزایش دهد. هنگامی که در استقرار صنعت ۴.۰ مسائل مربوط به امنیت شغلی، شکاف دانش، کمبود آموزش‌های مرتبط با کارکنان در نظر گرفته نشود، کارکنان برای پیاده سازی صنعت نسل چهارم همکاری نخواهند کرد و انگیزه کارکنان برای انجام فعالیت‌های مدور از بین خواهد رفت. ریسک نابالغ بودن برخی فناوری‌ها (به‌ویژه تحلیل داده‌های بزرگ) صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مدور و در نظر نگرفتن آموزش‌ها به منابع انسانی می‌تواند ریسک دانش کارکنان را افزایش دهد. همچنین ریسک امنیت داده‌های زنجیره تامین مدور به دلایل هک و نفوذ به صنعت ۴.۰ نگرانی‌های اخلاقی در خصوص به نشر گذاشتن اطلاعت شخصی و عدم رعایت حریم خصوصی کارکنان صنعت پتروشیمی را افزایش می‌دهد. اضطراب و نگرانی‌ها در خصوص عدم تطابق زیرساخت هیا فناوری هوشمند و عملکرد شغلی کارکنان می‌تواند چالش‌های زنجیره تامین مدور را افزایش دهد. در این خصوص، (Dwivedi & Paul, 2022) در مطالعه خود تاکید کردند که نقص در فناوری‌های هوشمند و شکل گیری مسائل اشتراک‌گذاری اطلاعات منجر به تصمیم‌گیری‌های ناقص کارکنان در سراسر زنجیره تأمین مدور می‌شود. همچنین (Ozkan-Ozen et al., 2020) نیز نشان داده است که درک نکردن تعامل بین انسان و ماشین مسئله‌ای است که شرکت‌ها در طول فرآیند انطباق با صنعت نسل چهارم با آن مواجه می‌شوند.

همچنین، ایجاد ریسک زیرساخت فناوری می‌تواند ریسک‌های چرخه مدور را ایجاد کند. زیرساخت فناوری ناقص در زنجیره تامین مدور مانند نابالغ بودن برخی فناوری‌ها، اتصال، هماهنگی و ارتباط ضعیف دستگاه‌ها و ریسک به روز رسانی فناوری‌ها نمی‌تواند اهداف چرخه مدور مانند ردیابی مواد و محصولات، لجستیک معکوس و پیش بینی‌های دقیق را برآورده کند که پیامد آن اختلال در چرخه مدور است. با افزایش ریسک کاهش کیفیت پایین یا ناقص بودن داده‌های به‌اشتراک‌گذاشته‌شده از طرق صنعت ۴.۰، ریسک جمع آوری و قطع مدیریت داده‌های چرخه مدور افزایش می‌یابد که پیامد آن افزایش ریسک طراحی مشترک پایدار است. در این راستا، (Nacchiero et al., 2024) نیز بین کرده بود که از دست دادن جریان‌های مواد و انرژی کارآمد یکی از پیامدهای اختلال در ساختار و عملکرد فناوری‌های هوشمند است. در واقع شکاف جریان ناکافی اطلاعات و ناهمخوانی داده‌ها به دلیل نقض در فناوری‌های هوشمند می‌تواند خلأ در ردیابی مواد و بی‌اعتمادی به محرمانگی اطلاعات میان شرکاء مدور افزایش دهد (Rossi et al., 2020).

نتیجه دیگر تحقیق این بود که تاثیر ریسک چارچوب مدور بر ریسک تامین و عملیات را برجسته کرد. با شکل گیری ریسک ضعف در طراحی مشترک پایدار و ریسک ردیابی ناقص مواد و محصول در طول چرخه عمر به دلیل نقص تبادل داده‌های تجزیه و تحلیل کلان داده‌ها در بخش چرخه مدور، ریسک توقف تامین مواد و همچنین تولید محصولات با مشکل و تاخیر مواجه خواهد شد. ریسک تاخیر و توقف چرخه مدور به دلیل نقص یا ناکافی بودن فناوری‌های ۴.۰ و همچنین افزایش ریسک کاهش بازیافت به دلایل نقص در پایداری ۴.۰ می‌تواند ریسک

دسترسی ضعیف به تامین کنندگان چرخه مدور صنعت پتروشیمی افزایش دهد. (Giudice et al., 2021) مشخص کردند که عدم دسترسی به داده‌های سریع در بخش‌های اصلی چرخه مدور می‌تواند ریسک‌های شفافیت، همکاری و چابکی را در زنجیره‌های تأمین مدور افزایش دهد و در نتیجه تولید با افزایش ضایعات و هزینه ساز خواهد بود. ناهماهنگی در اصول چرخه مدور ناهمخوانی میان تقاضای متغیر و عرضه، عدم اطمینان درباره تولید و موجودی و بازگشت سرمایه را به دنبال دارد (Charnley et al., 2019).

به طور کلی انتظار می‌رود که دولت و تصمیم گیرندگان با قوانین و مقررات مناسب در خصوص استانداردها، مشوق‌ها و سیاست‌های حقوقی بکارگیری فناوری‌های هوشمند در اقتصاد مدور، بتواند مدیران را برای پیاده سازی صنعت نسل چهارم در زنجیره تامین مدور هدایت کند. مدیران هم با آگاهی و تهعد، اقدامات مناسب برای سرمایه گذاری و جذب منابع مالی از طریق ذینفعان زنجیره تامین مدور انجام دهند. با وجود منابع مالی، انتظار می‌رود که مدیران راه پیاده سازی فناوری‌های هوشمند در زنجیره تامین مدور را تسریع ببخشند. با وجود زیرساخت‌های مناسب، انتظار می‌رود که همکاری و هماهنگی بین بخش‌های چرخه مدور و تامین و عملیات در زنجیره تامین مدور بیشتر گردد و در این بین کارکنان هم با کسب دانش و مهارت بالا می‌توانند فرآیند استقرار را تسهیل کنند. در نهایت صنعت نسل چهارم می‌تاوند به زنجیره تامین مدور در رسیدن به اهدافش کمک کند.

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی روبرو بوده است که می‌توان به سوء گیری پاسخ دهندگان و محقق در خصوص ارائه، جمع آوری و تجزیه و تحلیل داده ها، پیمایش مقطعی انجام پژوهش حاضر و تعمیم این یافته‌ها از لحاظ زمانی و همچنین سایر سازمان‌های دیگر اشاره کرد.

با توجه به محدودیت‌های پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود این تحقیق برای تعمیم یافته‌ها و ارائه مدل جامع در سایر سازمان‌ها انجام شود. همچنین بر اساس نتایج مدل، ریسک تامین و عملیات تاثیرپذیرترین است و یک مسئله می‌باشد که بررسی عوامل کلیدی در هماهنگی بین بخشی شرکاء زنجیره تامین مدور می‌تواند کمک کننده باشد. همچنین روش‌های تامین مالی برای پیاده سازی صنعت نسل چهارم در زنجیره تامین مدور نیز می‌تواند به گسترش موضوع حاضر کمک کند.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازین اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازین و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

Afroozi, A., Humble, M., & Khalili, H. (2024). Barriers and enablers for smart and sustainable circular economy in the automotive industry. *Sustainability*, *16*(2), Article 660. https://doi.org/10.3390/su16020660

Agarwal, N., & Seth, N. (2021). Analysis of supply chain resilience barriers in Indian automotive company using total interpretive structural modelling. *Journal of Advances in Management Research*, *18*(5), 758–781.

Agudo, F. L., Gobbo Júnior, J. A., & Oliveira Gobbo, S. C. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Integrated or disarticulated concepts? A research agenda. *GEPROS*, *15*(4), 48–77.

Araújo, I. M. C. N., Gohr, C. F., & Santos, L. C. (2026). Exploring the integration between Industry 4.0 technologies and circular economy practices: A systematic literature review and ISM/MICMAC approach. *Circular Economy and Sustainability*, *6*, Article 135.

Bag, S., Gupta, S., & Kumar, S. (2021). Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. *International Journal of Production Economics*, *231*, Article 107844.

Bakhtari, A. R., Kumar, V., Waris, M. M., Sanin, C., & Szczerbicki, E. (2020). Industry 4.0 implementation challenges in manufacturing industries: An interpretive structural modelling approach. *Procedia Computer Science*, *176*, 2384–2393.

Caiado, R. G. G., Scavarda, L. F., Azevedo, B. D., de Mattos Nascimento, D. L., & Quelhas, O. L. G. (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), Article 830. https://doi.org/10.3390/su14020830

Challouf, K., Alhloul, A., & Nemeth, N. (2025). Mapping the role of Industry 4.0 technologies in green supply chain management: A bibliometric and structured text analysis. *Discover Sustainability*, *6*(1), Article 949.

Charnley, F., Tiwari, D., Hutabarat, W., Moreno, M., Okorie, O., & Tiwari, A. (2019). Simulation to enable a data-driven circular economy. *Sustainability*, *11*(12), Article 3379.

Chauhan, S., Singh, R., Gehlot, A., Akram, S. V., Twala, B., & Priyadarshi, N. (2022). Digitalization of supply chain management with Industry 4.0 enabling technologies: A sustainable perspective. *Processes*, *11*(1), Article 96.

Chhimwal, M., Agrawal, S., & Kumar, G. (2021). Measuring circular supply chain risk: A Bayesian network methodology. *Sustainability*, *13*(15), Article 8448.

Dabbagh, R., Farzan, M., & Mohseni, B. (2025). Identifying the challenges of Industry 4.0 technologies for sustainable operations in small and medium-sized enterprises. *Research in Production and Operations Management*, *16*(1), 1–24.

Das, S. K., Bressanelli, G., & Saccani, N. (2024). Clustering the research at the intersection of Industry 4.0 technologies, environmental sustainability and circular economy: Evidence from literature and future research directions. *Circular Economy and Sustainability*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s43615-024-00332-z

Dwivedi, A., & Paul, S. K. (2022). A framework for digital supply chains in the era of circular economy: Implications on environmental sustainability. *Business Strategy and the Environment*, *31*(4), 1249–1274.

El Baz, J., Cherrafi, A., Benabdellah, A. C., Zekhnini, K., Beka Be Nguema, J. N., & Derrouiche, R. (2023). Environmental supply chain risk management for Industry 4.0: A data mining framework and research agenda. *Systems*, *11*(1), Article 46.

Farzadnia, R., Shojaei, P., & Mirghaderi, S. H. (2025). Implementation of circularity in food supply chain based on big data techniques using Einstein's fuzzy methods. *Scientific Reports*, *15*(1), Article 31957.

Fuchs, D., Kuys, B., Eisenbart, B., & Gericke, K. (2025). A systematic literature review on emerging technology risks in Industry 4.0/5.0: Identification, clustering and developing mitigation strategies. *Proceedings of the Design Society*, *5*, 299–308.

Gebhardt, M., Kopyto, M., Birkel, H., & Hartmann, E. (2022). Industry 4.0 technologies as enablers of collaboration in circular supply chains: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, *60*(23), 6967–6995.

Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Foroughi, B., Tseng, M.-L., Nikbin, D., & Khanfar, A. (2025). Industry 4.0 digital transformation and opportunities for supply chain resilience: A comprehensive review and a strategic roadmap. *Production Planning & Control*, *36*(1), 61–91.

Giudice, M., Chierici, R., Mazzucchelli, A., & Fiano, F. (2021). Supply chain management in the era of circular economy: The moderating effect of big data. *The International Journal of Logistics Management*, *32*(2), 337–356.

Govardhan, S., Narkhede, B. E., Raut, R., & Ghoshal, G. H. (2025). Industry 4.0 adoption barriers in manufacturing supply chain industry: A case study from a developing economy. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *25*(4), 1665–1685.

Heidari, M., Aliakabarnia Omran, M., Modiri, M., & Darvish Motavali, M. H. (2026). Developing a resilient supply chain model based on Industry 4.0 in the circular printing industry. *AI and Tech in Behavioral and Social Sciences*, *4*(1), 1–15.

Hobusch, K., & Misler-Behr, M. (2017). Reduction of supply chain risks due to Industry 4.0 implementation. *The EUrASEANs: Journal on Global Socio-Economic Dynamics, 5*, 40–47.

Hobusch, K., & Mißler-Behr, M. (2017). Reducing of supply chain risks due to Industry 4.0 implementation. *Journal on Global Socio-Economic Dynamics, 5*(6), 40–47.

Ismail, K. H., Nikookar, E., Pepper, M., & Stevenson, M. (2025). The implications of Industry 4.0 for managing supply chain disruption and enhancing supply chain resilience: A systematic literature review. *International Journal of Production Research, 63*(19), 7278–7304.

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control, 32*(9), 775–788.

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Parekh, H., Mani, V., Belhadi, A., & Sharma, R. (2022). Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework. *Technological Forecasting and Social Change, 176*, Article 121448.

Kannan, D., Amiri, A. S., Shaayesteh, M. T., Nasr, A. K., & Mina, H. (2024). Unveiling barriers to the integration of blockchain-based circular economy and Industry 5.0 in manufacturing industries: A strategic prioritization approach. *Business Strategy and the Environment, 33*(8), 7855–7886.

Karimi Shirazi, H., Modiri, M., Pourhabibi, Z., & Gilevaee, A. R. (2017). Improving the quality of clinical dental services using the importance-performance analysis approach and interpretive-structural modeling. *Journal of Dentomaxillofacial Radiology, Pathology and Surgery, 6*, 1–14.

Kazancoglu, Y., Ozkan-Ozen, Y. D., Sagnak, M., Kazancoglu, I., & Dora, M. (2023). Framework for a sustainable supply chain to overcome risks in transition to a circular economy through Industry 4.0. *Production Planning & Control, 34*(10), 902–917.

Kiani, M., Andalib Ardakani, D., Mirfakhradini, S. H., & Zare Ahmadabadi, H. (2023). An analysis of barriers to implementing circular economy and Industry 4.0 in the supply chain: A meta-synthesis and fuzzy DANP approach. *Industrial Management Perspective, 13*(4), 9–45.

Lahane, S., Patel, B., Kant, R., & Malviya, R. K. (2026). Evaluating Industry 4.0 implementation obstacles and solutions for the medical waste reverse logistics system. *International Journal of Logistics Research and Applications, 18*(3), 22–45.

Lin, X., Cui, S., Han, Y., Geng, Z., & Zhong, Y. (2019). An improved ISM method based on GRA for hierarchical analyzing the influencing factors of food safety. *Food Control, 99*, 48–56.

Majumder, S., & Dey, N. (2024). Industry 4.0 challenges and risks. In *A notion of enterprise risk management: Enhancing strategies and wellbeing programs* (pp. 81–107). Emerald Publishing Limited.

Nacchiero, R., Massari, G. F., & Giannoccaro, I. (2024). Supply chain transformative capabilities and their microfoundations for circular economy transition: A qualitative study in Made in Italy sectors. *Business Strategy and the Environment, 33*(8), 8695–8715.

Nagwal, R., Kumar, R., & Pathak, R. (2025). Insights from circular supply chain implementation prospects employing Industry 4.0 technologies: A study based on applied methodologies of SLR and content analysis. *Operations Management Research, 18*, 461–474.

Özkanlısoy, R. A. Ö., & Akkartal, E. (2019). Risk assessment in digital supply chains. *Journal of Economics and Social Research / Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 15*, 20–20.

Ozkan-Ozen, Y. D., Kazancoglu, Y., & Mangla, S. K. (2020). Synchronized barriers for circular supply chains in Industry 3.5/Industry 4.0 transition for sustainable resource management. *Resources, Conservation and Recycling, 161*, Article 104986.

Pandey, S., Singh, R. K., & Gunasekaran, A. (2023). Supply chain risks in Industry 4.0 environment: Review and analysis framework. *Production Planning & Control, 34*(13), 1275–1302.

Patil, A., Dwivedi, A., Paul, S. K., & Agrawal, D. (2025). Challenges to Industry 4.0 for circular business models in pharmaceutical supply chains. *Environment, Development and Sustainability*. Advance online publication.

Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., Jabbour, A. B. L. de S., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of Industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics, 224*.

Roshan, R., Balodi, K. C., Datta, S., Kumar, A., & Upadhyay, A. (2024). Circular economy startups and digital entrepreneurial ecosystems. *Business Strategy and the Environment, 33*(5), 4843–4860.

Rossi, J., Bianchini, A., & Guarnieri, P. (2020). Circular economy model enhanced by intelligent assets from Industry 4.0: The proposition of an innovative tool to analyze case studies. *Sustainability, 12*(17), Article 7147.

Sadri, N., Modiri, M., Hafashjani, K. F., & Valmohammadi, C. (2024). Supply chain risk management analysis based on resilience capabilities: Comprehensive structural interpretive modeling approach. *Journal of System Management, 10*(3).

Sahu, A., Agrawal, S., & Kumar, G. (2023). Challenges of implementing Industry 4.0 in achieving sustainable development goals: A case of Indian manufacturing organization. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45*(3), 8125–8139.

Satapathy, S., & Mishra, M. (2026). Industry 5.0 and supply chain risk. In *Industry 5.0 for occupational health and safety and risk mitigation* (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 647). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-11866-0_7

Sharifian Jozi, S., Mohammadi, A., Abbasi, A., & Ali Mohammadloo, M. (2024). Identifying challenges affecting the implementation of circular economy and Industry 4.0 in supply chain management. *Management Research in Iran, 28*(2), 146–183.

Shirazi, H. K., & Alroaia, Y. V. (2024). Identification of the challenges of using Industry 4.0 technology in the circular supply chain of sustainable agriculture. *Journal of Public Service Marketing, 2*(5), 19–35.

Silva, T., & Sehnem, S. (2022). Industry 4.0 and the circular economy: Integration opportunities generated by startups. *Logistics, 6*(4), Article 74. https://doi.org/10.3390/logistics6040074

Tang, Z., Zeng, C. H., & Zeng, Y. (2024). Research on data security in Industry 4.0 manufacturing industry against the background of privacy protection challenges. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 38*(5), 636–648.

Tupa, J., Simota, J., & Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing, 11*, 1223–1230.

Yang, J., Kumar, V., Ekren, B., & Kuzmin, E. (2021). Understanding the role of digital technologies in supply chain risks management. In *Digital transformation in industry: Trends, management, strategies* (pp. 133–146). Springer International Publishing.