

Evaluation of Strategies for Transitioning toward a Smart and Sustainable Supply Chain in the Home Appliance Industry

Hafez. Hosseinzadeh¹, Hossein. Amoozad Khalili^{2*}, Mohammad. Akhshabi³, Mohamad Ebrahim. Tayebi Araghi⁴

¹ Department of Management, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran

² Department of Industrial Engineering, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran

³ Department of Industrial Engineering, To.C., Islamic Azad University, Tonekabon, Iran

⁴ Department of Industrial Engineering, Arv.C., Islamic Azad University, Abadan, Iran

* Corresponding author email address: ho.amoozad@iau.ac.ir

Article Info

Article type:

Original Research

How to cite this article:

Hosseinzadeh, H., Amoozad Khalili, H., Akhshabi, M., & Tayebi Araghi, M. E. (2026). Evaluation of Strategies for Transitioning toward a Smart and Sustainable Supply Chain in the Home Appliance Industry. *Decision Science and Intelligent Systems*. 3(2), 1-24.



© 2026 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.

ABSTRACT

In today's highly competitive business environment, integrating smart transformation objectives—such as the adoption of the Internet of Things and artificial intelligence—with environmental, social, and economic sustainability goals is essential for achieving sustainable competitive advantage. The literature indicates that previous studies have often examined these dimensions separately or have exhibited considerable methodological gaps in addressing uncertainty and prioritizing strategies. Against this background, the present study aims to identify and evaluate key strategies for transitioning toward a smart and sustainable supply chain in the home appliance industry. Using fuzzy-stochastic multi-criteria decision-making methods, the study identifies and assesses a set of influential strategies and criteria. First, the principal criteria associated with the research problem were weighted using the fuzzy-stochastic Best-Worst Method. Subsequently, the identified strategies were ranked under different uncertainty scenarios—pessimistic, most likely, and optimistic—using the fuzzy-stochastic Complex Proportional Assessment method. The required data were collected through a survey of five groups of experts with relevant expertise in the field under investigation. The study was conducted as a case study in the home appliance industry. The findings indicate that flexibility, operational feasibility, investment cost, safety, scalability, and global warming were identified as the most important criteria. Furthermore, the results showed that smart circular economy and the application of advanced technologies in production processes were the highest-ranked strategies. These findings provide valuable managerial insights that can assist managers in allocating resources more effectively and making more informed strategic decisions to achieve smart transformation and sustainability objectives.

Keywords: supply chain management, smart supply chain, sustainable supply chain, home appliance industry.

Extended Abstract

Introduction

Supply chain management has become a strategic organizational capability because business competitiveness increasingly depends on coordination among suppliers, manufacturing units, distributors, retailers, and customers. Effective supply chain integration can improve logistics performance, reduce operating costs, increase responsiveness, and strengthen competitive advantage, particularly in markets characterized by demand volatility and operational complexity (Dağdeviren & Erturgut, 2024; Jahed et al., 2022). Nevertheless, conventional supply chains often lack the visibility, flexibility, and analytical capacity required to respond effectively to product diversity, rapidly changing customer expectations, technological disruptions, and unexpected interruptions.

The emergence of Industry 4.0 has accelerated the transition toward smart supply chains. In such systems, technologies including the Internet of Things, artificial intelligence, big-data analytics, blockchain, and cyber-physical systems support real-time monitoring, predictive decision-making, process automation, and interorganizational coordination (Baj-Rogowska & Nozari, 2024; Zhang et al., 2023). These technologies can enhance transparency, resource efficiency, agility, and responsiveness throughout the supply chain. Digital technologies can also facilitate circular supply chain practices by enabling product tracking, lifecycle monitoring, reverse logistics, recovery planning, and the intelligent management of returned products and materials (Morshedi et al., 2026). In the home appliance sector, the application of the Internet of Things in reverse logistics can improve information flows and increase the value recovered from collected products (Cortés-Pellicer et al., 2025).

At the same time, environmental degradation, resource scarcity, social expectations, and regulatory pressures have transformed sustainable supply chain management from an operational concern into a strategic priority. A sustainable supply chain seeks to maintain economic viability while reducing environmental impacts and supporting social responsibility. Sustainability performance can be strengthened when green practices, governance mechanisms, service innovation, and Industry 4.0 capabilities are implemented in an integrated rather than fragmented manner (Alkaraan et al., 2025). Previous research in the home appliance industry has similarly emphasized the importance of resilient, agile, low-carbon, and closed-loop supply chain networks and has identified insufficient managerial commitment and limited research and development capacity as major barriers to sustainability (Dehkordi & Ardali, 2025; Pathak et al., 2025).

Despite these advances, smart supply chain development and sustainability have frequently been investigated as separate domains. Moreover, many available evaluation approaches rely on deterministic information and cannot adequately represent the ambiguity of expert judgments and the stochastic nature of environmental conditions. Accordingly, the present study aimed to identify and prioritize strategies for transitioning toward a smart and sustainable supply chain in the home appliance industry. The study integrated the fuzzy-stochastic Best–Worst Method with the fuzzy-stochastic Complex Proportional Assessment method to determine the relative importance of evaluation criteria and rank strategic alternatives under pessimistic, most-likely, and optimistic scenarios.

Materials and Methods

This applied research was conducted as a case study in the home appliance industry using a multi-criteria decision-making framework. The research procedure consisted of four principal stages: identifying

potential evaluation criteria and strategies, validating the identified factors through expert judgment, calculating the relative weights of the criteria, and ranking the strategic alternatives under uncertainty.

The initial criteria and strategies were extracted through a structured review of studies on smart supply chains, sustainable supply chains, circular economy practices, digital transformation, and supply chain strategy. The preliminary factors were subsequently reviewed by experts to ensure their compatibility with the specific characteristics of the home appliance industry. These characteristics included substantial product diversity, relatively short product lifecycles, changing customer preferences, the need for flexible production, considerable energy consumption, environmental requirements, complex supplier networks, and the increasing importance of digitalization.

Because of the specialized nature of the research, purposive sampling was used to select five expert-group leaders representing academic, technical, and executive perspectives. The panel included a home appliance supply chain consultant, an information technology specialist, two university academics in industrial management and industrial engineering, and a production manager from the home appliance industry. The experts had between 7 and 12 years of relevant professional or research experience.

Ten evaluation criteria were retained: investment cost, global warming, pollution control and prevention, local development, social acceptance, operational feasibility, safety, smart information management, scalability, and flexibility. Four strategic alternatives were evaluated: the application of advanced technologies in production processes (A1), blockchain-based supply chain transparency and traceability (A2), green and smart warehousing (A3), and smart circular economy practices (A4).

Criterion weights were calculated using the fuzzy-stochastic Best–Worst Method. Expert comparisons were represented by triangular fuzzy numbers. Three scenarios were defined: pessimistic, most likely, and optimistic, with occurrence probabilities of 0.25, 0.50, and 0.25, respectively. Defuzzification was performed using the graded mean integration representation approach, and the consistency of expert comparisons was examined.

The strategies were then evaluated using fuzzy-stochastic Complex Proportional Assessment. A fuzzy decision matrix was developed for each scenario using linguistic assessments ranging from very low to very high. The decision matrices were normalized and multiplied by the calculated criterion weights. Beneficial and non-beneficial criterion values were aggregated separately, and the scenario-specific performance values were defuzzified. The expected performance criterion was subsequently calculated by combining scenario performance with the probability of each scenario. The robustness of the findings was assessed by comparing criterion weights with fuzzy analytic hierarchy process results and comparing strategy rankings with fuzzy-stochastic TOPSIS and fuzzy-stochastic VIKOR results.

Findings

The fuzzy-stochastic Best–Worst Method produced a relatively balanced distribution of weights across the ten evaluation criteria. The criterion weights ranged from 0.09852 to 0.10135, indicating that all economic, operational, environmental, technological, and social dimensions contributed meaningfully to the assessment.

Flexibility received the highest weight, at 0.10135. Investment cost ranked second with a weight of 0.10109, followed by operational feasibility at 0.10096, scalability at 0.10092, safety at 0.10075, and global warming at 0.10038. These results identified flexibility, financial requirements, implementation

capability, expansion potential, safety, and climate-related impacts as the most influential considerations in selecting smart and sustainable supply chain strategies.

Smart information management received a weight of 0.09886, while social acceptance obtained a weight of 0.09865. Pollution control and prevention and local development each received a weight of 0.09852. Although these criteria were ranked below the other dimensions, their weights remained close to those of the highest-ranked criteria. The limited variation among the weights demonstrated that the transition toward a smart and sustainable supply chain requires a multidimensional evaluation rather than an exclusive focus on technology, cost, or environmental performance.

The fuzzy-stochastic Complex Proportional Assessment results clearly differentiated the four strategic alternatives. Smart circular economy practices achieved the highest expected performance criterion score, at 112.90, and were ranked first. The application of advanced technologies in production processes received a score of 108.50 and ranked second. Blockchain-based supply chain transparency and traceability ranked third with a score of 95.27, while green and smart warehousing ranked fourth with a score of 92.17.

The scenario-specific proportional performance values further supported the superiority of smart circular economy practices. This strategy obtained performance scores of 100.00 under the pessimistic scenario, 106.80 under the most-likely scenario, and 137.80 under the optimistic scenario. Advanced production technologies obtained corresponding values of 87.31, 107.00, and 132.90. Although the performance of the alternatives varied across scenarios, the aggregation of scenario probabilities resulted in stable first- and second-place rankings.

The validation analysis supported the robustness of the findings. Criterion weights obtained through the fuzzy-stochastic Best–Worst Method were broadly consistent with those generated through the fuzzy analytic hierarchy process. However, the fuzzy-stochastic Best–Worst Method demonstrated a lower inconsistency rate. Furthermore, fuzzy-stochastic COPRAS, TOPSIS, and VIKOR produced identical results for the two highest-ranked strategies. Smart circular economy practices ranked first, and advanced production technologies ranked second across all three methods. Only the third and fourth positions differed between blockchain-based traceability and green and smart warehousing.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that transitioning toward a smart and sustainable supply chain in the home appliance industry requires simultaneous attention to adaptability, affordability, implementation capability, scalability, safety, and environmental performance. Flexibility emerged as the most important criterion because home appliance manufacturers operate in an environment characterized by substantial product diversity, fluctuating demand, rapidly changing consumer preferences, and continuous technological development. Nevertheless, the weight of flexibility was only slightly higher than those of the other criteria. Therefore, technological transformation cannot be successful unless it is also financially feasible, operationally implementable, scalable, safe, and environmentally responsible.

The first-place ranking of smart circular economy practices indicates that the most desirable strategy is one that integrates digital intelligence with product and material circularity. Smart circular economy initiatives can combine lifecycle data, connected products, predictive analytics, reverse logistics, repair, reuse, remanufacturing, recycling, and intelligent waste separation. Such a strategy can reduce raw-material consumption and environmental impacts while creating opportunities for cost recovery, after-sales services, and improved control over products after their initial use.

The second-place ranking of advanced production technologies highlights the strategic importance of automation, intelligent machinery, data-driven production control, and digitally integrated manufacturing. These technologies can improve productivity, reduce defects and waste, enhance energy management, and enable faster responses to market changes. Smart circular economy practices and advanced manufacturing technologies should therefore not be considered competing alternatives. Advanced manufacturing infrastructure can generate the data, traceability, and process control required for effective circular economy implementation.

Blockchain-based traceability and green and smart warehousing remained valuable strategies despite their lower rankings. Their positions do not indicate that they are unnecessary. Rather, these strategies may generate greater value when implemented as enabling components of a broader supply chain transformation program. Blockchain implementation requires digital maturity, standardized data, partner participation, and appropriate governance mechanisms. Similarly, smart warehousing can improve inventory visibility, energy efficiency, storage operations, and material handling, but its organizational impact may remain limited unless it is integrated with procurement, production, distribution, and reverse logistics.

Managers should adopt a phased resource-allocation approach. Smart circular economy initiatives and advanced production technologies should receive priority, while blockchain and smart warehousing capabilities should be introduced according to organizational readiness and operational requirements. Strategic decisions should also be evaluated under multiple uncertainty scenarios rather than being based on a single forecast.

In conclusion, the study provides an integrated and uncertainty-sensitive framework for evaluating smart and sustainable supply chain strategies in the home appliance industry. Smart circular economy practices were identified as the most desirable strategic direction, followed by advanced technologies in production processes. The balanced distribution of criterion weights further confirms that successful transformation depends on coordinated economic, operational, environmental, technological, and social decisions. A phased and portfolio-based implementation of these strategies can improve resource efficiency, adaptability, competitiveness, and long-term sustainability while reducing the risks associated with fragmented or poorly prioritized investments.

ارزیابی استراتژی های حرکت به سمت زنجیره تامین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی

حافظ حسین زاده^۱، حسین عموزاد خلیلی^{۲*}، محمد اخشابی^۳، محمد ابراهیم طیبی عراقی^۴

۱. گروه مدیریت، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
۲. گروه مهندسی صنایع، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران
۳. گروه مهندسی صنایع، واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی، تنکابن، ایران
۴. گروه مهندسی صنایع، واحد بین المللی اروند، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: ho.amoozad@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله

پژوهشی/اصیل

نحوه استناد به این مقاله:

حسین زاده، حافظ، عموزاد خلیلی، حسین، اخشابی، محمد، و طیبی عراقی، محمد ابراهیم. (۱۴۰۵). ارزیابی استراتژی های حرکت به سمت زنجیره تامین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی. علم تصمیم گیری و سیستم های هوشمند، ۳(۲)، ۱-۲۴.



© ۱۴۰۵ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

در دنیای رقابتی امروز، یکپارچه سازی اهداف هوشمندسازی (مانند استفاده از اینترنت اشیا و هوش مصنوعی) و پایداری (زیست محیطی، اجتماعی، اقتصادی) برای دستیابی به مزیت رقابتی پایدار امری ضروری است. ادبیات تحقیق نشان می دهد که پژوهش های پیشین اغلب به صورت مجزا به این ابعاد پرداخته و یا شکاف های روش شناختی قابل توجهی در تحلیل عدم قطعیت ها و اولویت بندی استراتژی ها نشان داده اند. در این زمینه، این پژوهش به شناسایی و ارزیابی استراتژی های کلیدی در جهت حرکت به سمت یک زنجیره تامین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی می پردازد. این تحقیق مجموعه ای از استراتژی ها و معیارهای مؤثر را با استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره فازی-تصادفی شناسایی و ارزیابی می کند. ابتدا، با به کارگیری روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی، معیارهای اصلی مساله تحقیق وزن دهی شده اند. سپس، با استفاده از روش کوپراس فازی-تصادفی، استراتژی های شناسایی شده بر اساس سناریوهای مختلف عدم قطعیت (بدبینانه، محتمل، خوشبینانه) رتبه بندی شده اند. در این پژوهش، داده های مورد نیاز از طریق نظرسنجی از ۵ گروه از خبرگان دارای تخصص در حوزه مرتبط با این تحقیق گردآوری شد. مطالعه حاضر به صورت موردی در صنعت لوازم خانگی انجام شده است. نتایج نشان می دهد معیارهای انعطاف پذیری، امکان پذیری عملیاتی، هزینه سرمایه گذاری، ایمنی، قابلیت توسعه و گرمایش جهانی به عنوان مهمترین موارد انتخاب شدند. همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، استراتژی های اقتصاد چرخشی هوشمند و استفاده از تکنولوژی های پیشرفته در فرآیند تولید به عنوان موارد برتر انتخاب شده اند. این یافته ها بینش های مدیریتی ارزشمندی را برای مدیران فراهم می آورد تا بتوانند منابع خود را به طور مؤثرتری تخصیص داده و تصمیمات استراتژیک آگاهانه تری در راستای دستیابی به اهداف هوشمندسازی و پایداری اتخاذ نمایند.

کلیدواژگان: مدیریت زنجیره تامین، زنجیره تامین هوشمند، زنجیره تامین پایدار، صنعت لوازم خانگی.

۱. مقدمه

امروزه زنجیره تأمین به عنوان یکی از ارکان اساسی فعالیت های تولیدی و خدماتی، نقش مهمی در بهبود عملکرد سازمان ها، کاهش هزینه ها، افزایش سطح خدمت رسانی و ایجاد مزیت رقابتی ایفا می کند [۱]. در واقع، مدیریت زنجیره تأمین یکی از ابزارهای راهبردی مهم برای رقابت در بازارهای پویا و تقویت موقعیت سازمان ها به شمار می رود [۲]. در شرایط رقابتی کنونی، موفقیت سازمان ها تنها به توانمندی های داخلی وابسته نیست، بلکه میزان هماهنگی، یکپارچگی و کارایی اجزای مختلف زنجیره تأمین به عنوان یک سیستم یکپارچه اهمیت فزاینده ای یافته است [۳]. از این رو، مدیریت اثربخش زنجیره تأمین با تضمین عملیات کارآمد و پاسخگو در برابر نیازهای بازار، به یکی از دغدغه های اصلی مدیران و پژوهشگران تبدیل شده است [۴].

در این میان، استراتژی های زنجیره تأمین نقش مهمی در جهت دهی به تصمیمات عملیاتی و راهبردی سازمان ها دارند. گسترش تجارت فرامرزی و افزایش تعداد بازیگران، موجب پراکندگی فعالیت ها و پیچیده تر شدن ساختار زنجیره های تأمین شده است. در چنین شرایطی، رقابت با رویکردهای سنتی دشوار بوده و سازمان ها ناگزیر به تدوین استراتژی هایی متناسب با ویژگی های محصول، اهداف سازمان و ساختار بازار هدف هستند [۵]. این استراتژی ها نحوه هماهنگی اعضای زنجیره برای تولید و توزیع به موقع محصولات با کیفیت مناسب، مدیریت ریسک، تخصیص بهینه منابع و بهبود عملکرد کلی زنجیره را مشخص می کنند [۶]. این حال، تنوع و پیچیدگی این استراتژی ها، ضرورت ارزیابی و اولویت بندی نظام مند آن ها را بیش از پیش آشکار می سازد.

از سوی دیگر، افزایش پیچیدگی محیط کسب و کار و تنوع تقاضای مشتریان نشان داده است که زنجیره های تأمین سنتی توان پاسخگویی کامل به تقاضاهای متغیر، بازارهای ناپایدار و وقفه های تجاری را ندارند [۷]. همزمان با پیشرفت فناوری های دیجیتال و ظهور انقلاب صنعتی چهارم، مفهوم زنجیره تأمین هوشمند به عنوان رویکردی نوین مطرح شده است [۸]. این زنجیره ها با بهره گیری از فناوری هایی نظیر اینترنت اشیا، کلان داده ها، هوش مصنوعی و سیستم های سایبر-فیزیکی امکان پایش لحظه ای جریان اطلاعات و مواد، بهبود بهره وری منابع، کاهش ضایعات، تصمیم گیری هوشمند و افزایش چابکی و انعطاف پذیری را فراهم می کنند [۹]. با این وجود، تحقق این مزایا مستلزم تدوین استراتژی های متناسب با بستر سازمانی است.

همچنین، افزایش دغدغه های زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی، توجه به پایداری در زنجیره تأمین را به یک ضرورت تبدیل کرده است. زنجیره تأمین پایدار با هدف کاهش اثرات زیست محیطی، ارتقای مسئولیت پذیری اجتماعی و حفظ توجه پذیری اقتصادی، به دنبال ایجاد تعادل میان منافع کوتاه مدت و پایداری بلندمدت است [۱۰]. با این وجود، تحقق پایداری در زنجیره های تأمین همچنان با چالش هایی روبه روست؛ به ویژه در شرایطی که تحولات سریع فناوری و پویایی های بازار بر پیچیدگی محیط کسب و کار افزوده اند. این چالش زمانی تشدید می شود که اقدامات پایداری در بسیاری از سازمان ها به صورت جداگانه و بدون هم راستایی با فرایندهای هوشمندسازی اجرا می شوند؛ امری که از ایجاد هم افزایی میان ابتکارات نوین جلوگیری کرده و اثربخشی تلاش های پایداری را کاهش می دهد [۱۱]. از این رو، یکپارچه سازی اهداف هوشمندسازی و پایداری از طریق استراتژی های مناسب اهمیت ویژه ای دارد.

اهمیت این موضوع در صنعت لوازم خانگی نیز برجسته است؛ به گونه ای که عدم بهره گیری از زنجیره تأمین هوشمند و پایدار می تواند به افزایش هزینه ها، کاهش انعطاف پذیری و تضعیف جایگاه رقابتی شرکت ها منجر شود. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف شناسایی معیارها و ارزیابی استراتژی های مؤثر بر استقرار زنجیره تأمین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی انجام شده است. در این راستا، معیارها و استراتژی های بالقوه با استفاده از مرور ادبیات و نظرات خبرگان شناسایی شده و وزن دهی معیارها با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی و

رتبه‌بندی استراتژی‌ها با روش کوپراس فازی-تصادفی انجام می‌شود. با توجه به اهمیت روزافزون توسعه زنجیره‌های تأمین هوشمند و پایدار در صنایع تولیدی و ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، این پژوهش با هدف شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی استراتژی‌های مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی انجام شده است. در این راستا، اهداف اصلی پژوهش عبارت‌اند از:

- شناسایی معیارهای مؤثر بر ارزیابی استراتژی‌های زنجیره تأمین هوشمند و پایدار؛
 - تعیین اهمیت نسبی معیارهای ارزیابی با استفاده از رویکرد بهترین-بدترین فازی-تصادفی؛
 - ارزیابی و اولویت‌بندی استراتژی‌های منتخب در شرایط عدم قطعیت با استفاده از روش کوپراس فازی-تصادفی؛
 - ارائه بینش‌های مدیریتی جهت توسعه زنجیره تأمین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی.
- بر این اساس، پژوهش حاضر به دنبال پاسخگویی به سؤالات زیر است:
۱. مهم‌ترین معیارهای مؤثر در ارزیابی استراتژی‌های زنجیره تأمین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی کدام‌اند؟
 ۲. اهمیت نسبی هر یک از معیارهای شناسایی شده چگونه است؟
 ۳. استراتژی‌های منتخب توسعه زنجیره تأمین هوشمند و پایدار چه اولویتی نسبت به یکدیگر دارند؟
 ۴. کدام استراتژی در شرایط عدم قطعیت از بیشترین مطلوبیت برای پیاده‌سازی در صنعت لوازم خانگی برخوردار است؟

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش، مروری بر برخی از پژوهش‌های پیشین در حوزه استراتژی‌های زنجیره تأمین، زنجیره تأمین پایدار و زنجیره تأمین هوشمند ارائه می‌شود.

۲-۱- استراتژی‌های زنجیره تأمین

در سال‌های اخیر، استراتژی‌های زنجیره تأمین نقش مهمی در بهبود کارایی سیستم‌های توزیع در بازارهای رقابتی داشته‌اند. واحیودی و همکاران [۱۲] استراتژی‌های انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین قهوه ممتاز اندونزی را با روش آنتروپی-تاپسیس اولویت‌بندی کردند و هشت استراتژی کلیدی را شناسایی نمودند. اوتاما و همکاران [۱۳]، با ترکیب فازی روش‌های دلفی، بهترین-بدترین و ارزیابی پیچیده، موانع زنجیره تأمین چرخشی برنج در اندونزی را تحلیل کردند. صالحی و همکاران [۱۴]، بهره‌گیری ترکیبی از هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و دوقلوهای دیجیتال را به‌عنوان استراتژی‌های ضروری برای ارتقای هوشمندی و تاب‌آوری زنجیره تأمین در شرایط بحرانی معرفی کردند. کامروزامان و همکاران [۱۵]، با ترکیبی از روش‌های دلفی، $FAHP^1$ و $EXPROM2^2$ نشان دادند در زنجیره تأمین پایدار دارویی، "سرمایه‌گذاری" بزرگ‌ترین چالش و "حمایت دولتی" برترین راهکار است. نیری و همکاران [۱۶] با استفاده از $LFBWM^3$ و ویکور فازی، استراتژی‌های مدیریت پسماند مبتنی بر انقلاب صنعتی پنجم در استانبول را ارزیابی کردند کولاشلو و عشقی [۱۷]، در برنامه‌ریزی انرژی، با ترکیب AHP ، تاپسیس فازی و بهینه‌سازی چندهدفه سناریومحور، استراتژی‌های پاسخگویی به تقاضا را اولویت‌بندی کردند. راج و همکاران [۱۸]، با استفاده از تحلیل پارتو و $MULTIMOORA^4$ ، استراتژی‌های مدیریت زنجیره تأمین و منبع‌یابی جهانی را اولویت‌بندی کردند. افتخاری و همکاران [۱۹]، با $FUCOM$ فازی و $VIKOR$ فازی، استراتژی‌های اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین پسماند کشاورزی را ارزیابی و مدیریت و تفکیک

¹ Fuzzy Analytic hierarchy process

² Extended PROMETHEE II

³ Lexicographic Fuzzy Best-Worst Method

⁴ Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis plus the Full Multiplicative Form

هوشمند پسماند را برترین استراتژی‌ها معرفی کردند. گورسون و همکاران [۲۰]، با مدل تصمیم‌گیری فازی یکپارچه، توسعه مدل‌های کسب‌وکار فناوریانه را مؤثرترین استراتژی تحول دیجیتال در صنعت خودروسازی معرفی کردند.

۲-۲- زنجیره تامین هوشمند

جهانی‌شدن بازارها و تغییر سریع تقاضا، پیچیدگی زنجیره‌های تامین را افزایش داده و سازمان‌ها را به سوی زنجیره‌های تامین هوشمند مبتنی بر فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و بلاکچین سوق داده است [۲۱]. آن و همکاران [۲۲]، با استفاده از مدل معادلات ساختاری در صنعت مد چین نشان دادند که فناوری‌ها و استراتژی‌های دیجیتال، شفافیت زنجیره تامین را افزایش می‌دهند. مرشدی و همکاران [۲۳]، با مرور نظام‌مند، نقش فناوری‌های دیجیتال در زنجیره تامین چرخشی را بررسی کرده و اینترنت اشیا، بلاکچین و هوش مصنوعی را مهم‌ترین فناوری‌ها معرفی کردند. چهره و همکاران [۲۴]، مدل MILP چنددوره‌ای چندمحصولی برای طراحی زنجیره تامین حلقه‌بسته مبتنی بر اینترنت اشیا و بلاکچین با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضای فازی ارائه کردند. باراتی و همکاران [۲۵]، با استفاده از دلفی و AHP، محرک‌های پیاده‌سازی مدیریت زنجیره تامین هوشمند در صنایع هند را شناسایی و اولویت‌بندی کردند. فیروزیان حاجی و همکاران [۲۶]، مدل دوهدفه طراحی زنجیره تامین حلقه‌بسته مبتنی بر بلاکچین و قراردادهای هوشمند را با الگوریتم NSGA-III^۱ ارائه و در صنعت شیشه همدان پیاده‌سازی کردند. کورتس پلیسر و همکاران [۲۷]، با شبیه‌سازی پویایی سیستم، به کارگیری IoT در لجستیک معکوس لوازم خانگی را عامل بهبود جریان اطلاعات و افزایش ارزش محصولات جمع‌آوری شده معرفی کردند. یوسفی و همکاران [۲۸]، مدل برنامه‌ریزی چندهدفه استوار برای طراحی استراتژی‌های منبع‌یابی مبتنی بر بلاکچین با اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های هماهنگی، اقلام معیوب و تأخیر تحویل و بیشینه‌سازی کارایی منبع‌یابی پایدار ارائه کردند که با DEA بازی‌نش و روش اپسیلون-محدودیت حل شد. خان و همکاران [۲۹]، موانع پذیرش اینترنت اشیا در زنجیره تامین حلقه‌بسته را با ISM^۲، DEMATEL^۳ فازی و تحلیل MICMAC^۴ فازی تحلیل کردند. لی [۳۰]، نیز با مدل AHP-آنتروپی مکانیزم هماهنگی زنجیره تامین مبتنی بر اینترنت اشیا را ارائه کرد که به بهبود کارایی، شفافیت و کاهش ریسک منجر شد.

۲-۳- زنجیره تامین پایدار

مدیریت زنجیره تامین پایدار با تلفیق ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی، از ضرورتی عملیاتی به اولویتی استراتژیک و شاخص کلیدی موفقیت سازمان‌ها تبدیل شده است [۳۱]. سربوآستاوا و همکاران [۳۲]، با استفاده از ISM و DEMATEL، مدیریت منابع، ظرفیت و ارتباط با تامین‌کنندگان را عوامل کلیدی پایداری زنجیره تامین در صنعت تجهیزات پزشکی معرفی کردند. تورنگ و همکاران [۳۳]، با ترکیب روش‌های FBWM و FCM^۵ در زنجیره تامین ذخیره‌سازی انرژی، دیجیتالی‌سازی مدیریت تقاضا و سیستم‌های هوشمند را به‌عنوان مهم‌ترین محرک‌های پایداری مبتنی بر بلاکچین معرفی کردند. امین و همکاران [۳۴]، یک چارچوب تصادفی دومرحله‌ای برای طراحی زنجیره تامین حلقه‌بسته پایدار لوازم خانگی ارائه کردند. مدل با ترکیب RSL^۶، MFA^۷ و MOMILP^۸ و حل با روش اپسیلون محدودیت، عدم قطعیت تقاضا را مدیریت کرد. دهکردی و همکاران [۳۵]، مدلی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار، چابک و تاب‌آور ارائه کردند که در

^۱ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III

^۲ Interpretive Structural Modeling

^۳ Decision Making Trial and Evaluation Laboratory

^۴ Matrice d'Impacts Croisés Multiplication Appliquée à un Classement

^۵ Fuzzy Cognitive Map

^۶ Regime-Switching Lattice

^۷ Material Flow Analysis

^۸ Multi-Objective Mixed-Integer Linear Programming

صنعت لوازم خانگی به بهبود کارایی و کاهش انتشار کربن منجر شد. ژیاو و همکاران [۳۶]، مدلی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار در صنعت لوازم خانگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت فازی و حل با NSGA-II ارائه کردند که هزینه، انتشار کربن و منافع اجتماعی را بهینه می‌کند. پاساک و همکاران [۳۷]، با تحلیل پارتو و AHP در صنعت لوازم خانگی هند، "عدم تعهد مدیریت ارشد" و "کمبود تحقیق و توسعه" را موانع اصلی پایداری معرفی کردند. آتیا و همکاران [۳۸]، با مدل MILP و الگوریتم شاخه و برش (CBC^۱)، به طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین پایدار پتروشیمی پرداختند. گلی و همکاران [۳۹]، نیز با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی و بهینه‌سازی استوار، مدل MILP چندهدفه زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور مبتنی بر اینترنت اشیا را توسعه دادند.

۲-۴- شکاف تحقیق

با وجود گسترش قابل توجه مطالعات در حوزه زنجیره تأمین هوشمند و پایدار، بسیاری از پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر بررسی مفهومی فناوری‌های هوشمند، دیجیتالی‌سازی زنجیره تأمین یا ابعاد پایداری شامل ملاحظات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به صورت جداگانه تمرکز داشته‌اند و کمتر به رویکردی جامع برای شناسایی و ارزیابی همزمان معیارهای مؤثر در حرکت به سمت یک زنجیره تأمین هوشمند و پایدار پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر توجه به تلفیق هوشمندسازی با اهداف پایداری افزایش یافته است؛ با این حال، در بسیاری از مطالعات این دو بعد به صورت یکپارچه و در قالب چارچوبی تصمیم‌گیری برای انتخاب استراتژی‌های اجرایی بررسی نشده‌اند. از سوی دیگر، بسیاری از مطالعات موجود بیشتر به ارائه مدل‌های مفهومی، تحلیل‌های کیفی یا بررسی اثرات فناوری‌های نوین در زنجیره تأمین پرداخته‌اند و توجه کمتری به شناسایی نظام‌مند معیارهای کلیدی و ارزیابی استراتژی‌های عملی برای حرکت به سمت زنجیره تأمین هوشمند و پایدار داشته‌اند. این مسئله به‌ویژه در صنایع تولیدی مانند صنعت لوازم خانگی که با رقابت شدید، تنوع محصولات و پیچیدگی شبکه تأمین مواجه هستند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و نیازمند رویکردهای تحلیلی دقیق‌تر برای تصمیم‌گیری راهبردی است. علاوه بر این، تصمیم‌گیری در حوزه زنجیره تأمین معمولاً با عدم قطعیت، ابهام و نوسانات محیطی همراه است، در حالی که بسیاری از روش‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین مبتنی بر داده‌های قطعی بوده و توانایی کافی برای مدل‌سازی همزمان عدم قطعیت و تصادفی بودن اطلاعات را ندارند. به همین دلیل، استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر محیط فازی-تصادفی می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از معیارها و گزینه‌های راهبردی فراهم کند. در این راستا، تاکنون کاربرد همزمان روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی برای تعیین وزن معیارها و روش کوپراس فازی-تصادفی برای رتبه‌بندی استراتژی‌های حرکت به سمت زنجیره تأمین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر تلاش می‌کند با پر کردن این شکاف، چارچوبی نظام‌مند برای شناسایی معیارها و ارزیابی استراتژی‌های حرکت به سمت یک زنجیره تأمین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی ارائه دهد.

۳- روش تحقیق

در این بخش، رویکردهای مورد استفاده در این پژوهش معرفی می‌شوند. در این زمینه، پژوهش حاضر ابتدا معیارها و استراتژی‌های مساله را با توجه به ادبیات تحقیق و نظر کارشناسان مربوطه استخراج و شناسایی می‌شوند. در گام بعدی، به منظور محاسبه وزن معیارهای شناسایی شده، از روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی استفاده می‌گردد. سپس، جهت ارزیابی استراتژی‌های بالقوه، از روش کوپراس فازی-تصادفی استفاده می‌شود. در ادامه، به تشریح روش‌های مذکور پرداخته می‌شود.

¹ Coin-OR branch-and-cut

با توجه به ماهیت تخصصی پژوهش، از روش نمونه‌گیری هدفمند برای انتخاب خبرگان استفاده شد. خبرگان مشارکت‌کننده از پنج گروه تخصصی مرتبط با موضوع پژوهش انتخاب شدند تا دیدگاه‌های مختلف علمی، فنی و اجرایی در فرآیند ارزیابی لحاظ گردد. معیارهای انتخاب خبرگان شامل آشنایی با مفاهیم زنجیره تأمین هوشمند و پایدار، تجربه حرفه‌ای یا پژوهشی مرتبط و آگاهی از شرایط و چالش‌های صنعت لوازم خانگی بود. به منظور افزایش اعتبار نتایج، تلاش شد ۵ گروه از خبرگان (جدول ۱ را ببینید) از حوزه‌های مختلف مرتبط با پژوهش انتخاب شوند تا ارزیابی استراتژی‌ها صرفاً مبتنی بر یک دیدگاه خاص نباشد. ترکیب و ویژگی‌های خبرگان در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پروفایل رهبران گروه‌های کارشناسی در نظر گرفته شده

تحصیلات	سابقه کار	موقعیت شغلی	رهبر گروه
کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع	۱۰ سال	مشاور حوزه زنجیره تأمین لوازم خانگی	رهبر گروه ۱
دکتری، مهندسی فناوری اطلاعات	۸ سال	کارشناس حوزه فناوری اطلاعات	رهبر گروه ۲
دکتری، مدیریت صنعتی	۱۲ سال	استاد دانشگاه	رهبر گروه ۳
مهندسی صنایع	۷ سال	استاد دانشگاه	رهبر گروه ۴
کارشناسی ارشد، مدیریت صنعتی	۱۰	مدیر تولید در حوزه صنعت لوازم خانگی	رهبر گروه ۵

۳-۱- شناسایی معیارها

این بخش به شناسایی معیارهای مساله تحقیق تخصیص داده شده است. بدین منظور، ابتدا معیارهای بالقوه با توجه به ادبیات تحقیق استخراج شده و سپس کارشناسان مرتبط‌ترین معیارها را انتخاب می‌کنند. جدول ۲ نشان دهنده معیارهای مربوطه می‌باشد. شایان ذکر است که معیارها و استراتژی‌های اولیه این پژوهش از طریق بررسی نظام‌مند مطالعات پیشین در حوزه زنجیره تأمین هوشمند و پایدار استخراج شدند. سپس به منظور افزایش انطباق با شرایط صنعت لوازم خانگی، فهرست اولیه در اختیار خبرگان دانشگاهی و مدیران صنعتی فعال در این حوزه قرار گرفت. خبرگان با توجه به ویژگی‌های خاص صنعت لوازم خانگی شامل تنوع بالای محصولات، چرخه عمر نسبتاً کوتاه محصولات، نیاز به انعطاف‌پذیری تولید، اهمیت مصرف انرژی، الزامات زیست‌محیطی و روند رو به رشد دیجیتالی‌سازی، معیارها و استراتژی‌های پیشنهادی را مورد بررسی قرار داده و تناسب آن‌ها را تأیید نمودند. بر این اساس، معیارها و استراتژی‌های نهایی مورد استفاده در پژوهش حاضر علاوه بر پشتوانه نظری، از انطباق مناسبی با شرایط صنعت لوازم خانگی برخوردار هستند.

جدول ۲. معیارهای مساله تحقیق

دلیل ارتباط با صنعت لوازم خانگی	مرجع	تعریف	معیار
نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجه برای نوسازی تجهیزات، استقرار فناوری‌های هوشمند، اتوماسیون و زیرساخت‌های دیجیتال.	[۴۰] و [۴۱]	این معیار در رابطه با هزینه‌های مرتبط با زیرساخت‌های مربوطه می‌باشد	هزینه سرمایه‌گذاری
تأثیر فرآیندهای تولید، مصرف انرژی و فعالیت‌های لجستیکی صنعت لوازم خانگی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و رد پای کربن.	[۴۲] و [۴۳]	این معیار به تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اقلیم مربوط می‌شود.	گرمایش جهانی
با توجه به مصرف بالای مواد اولیه و تولید پسماند در این صنعت، کاهش آلاینده‌ها از الزامات مهم تولید پایدار است	[۴۱] و [۴۳]	قابلیت سیستم برای کاهش و کنترل پسماندها و آلاینده‌ها	کنترل و جلوگیری از آلودگی
نقش صنعت لوازم خانگی در ایجاد اشتغال، بهبود شرایط کاری، مسئولیت اجتماعی و ارتقای رفاه ذی‌نفعان.	[۴۰] و [۴۳]	توسعه محلی (برای مثال ایجاد فرصت‌های شغلی) یک عامل اجتماعی مهم است که می‌تواند با بهبود شرایط اجتماعی (مانند جلوگیری از مهاجرت‌های ناخواسته) پایداری را افزایش دهد.	توسعه محلی

پذیرش محصولات و فناوری‌های هوشمند و پایدار توسط مشتریان، نقش مهمی در موفقیت بازار لوازم خانگی دارد.	[۴۰] و [۴۳]	این معیار به میزان تمایل جامعه برای پذیرش سامانه پذیرش اجتماعی مورد استفاده مربوط می‌شود.
سهولت پیاده‌سازی استراتژی‌ها در خطوط تولید، شبکه تأمین و ساختار عملیاتی شرکت‌های تولیدکننده لوازم خانگی.	[۴۴] و [۴۵]	این معیار به توانایی سیستم مستقر شده در رابطه با امکان‌پذیری عملیاتی زیرساخت هوشمند مربوط می‌شود.
ضرورت تأمین ایمنی کارکنان در محیط تولید و همچنین اطمینان از ایمنی محصولات نهایی برای مصرف‌کنندگان.	[۴۶]	این معیار در رابطه با ایمنی و امنیت سیستم مستقر ایمنی شده است
به دلیل گستردگی شبکه تأمین، تولید و توزیع، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین ضروری است.	[۴۶]	استفاده از داده‌های دیجیتال برای تصمیم‌گیری هوشمند و بهینه‌سازی عملیاتی
امکان توسعه ظرفیت تولید، تنوع محصولات و گسترش فناوری‌های نوین متناسب با رشد بازار و افزایش تقاضا.	[۴۷] و [۴۸]	این معیار مربوط به امکان‌پذیری سیستم مستقر شده قابلیت توسعه جهت توسعه و بهبود در صورت نیاز می‌باشد.
توانایی پاسخگویی به تنوع بالای محصولات، تغییرات سریع سلیقه مشتریان و نوسانات تقاضا در بازار لوازم خانگی.	[۴۹] و [۵۰]	این معیار به انعطاف‌پذیری سیستم برقرار شده برای جمع‌آوری و تصفیه انواع مختلف پسماند مربوط می‌شود.

۳-۲- استراتژی‌های مساله تحقیق

در این بخش، استراتژی‌های موجود برای مساله تحقیق با توجه به ادبیات پژوهش و نظر کارشناسان شناسایی می‌شود. در این زمینه، جدول ۳ نشان دهنده استراتژی‌های شناسایی شده است. شایان ذکر است که استراتژی‌های مورد بررسی در این پژوهش الزاماً ماهیتی متقابل یا ناسازگار ندارند و در عمل می‌توانند به صورت همزمان و مکمل در زنجیره تأمین سازمان‌ها به کار گرفته شوند. با این حال، به دلیل محدودیت‌های مالی، فنی و اجرایی، معمولاً امکان سرمایه‌گذاری و پیاده‌سازی همزمان تمامی استراتژی‌ها در کوتاه‌مدت وجود ندارد. از این رو، در پژوهش حاضر این استراتژی‌ها به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده‌اند تا اولویت نسبی آن‌ها برای تخصیص منابع و برنامه‌ریزی اجرایی مشخص گردد.

جدول ۳. استراتژی‌های مساله تحقیق

مرجع	توصیف	استراتژی
[۵۱]، [۵۲] و [۵۳]	به کارگیری تکنولوژی‌های پیشرفته می‌تواند منجر به حرکت زنجیره تامین به سوی توسعه پایدار و هوشمندسازی بصورت توامان گردد	استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته در فرآیند تولید (A۱)
[۵۴] و [۵۵]	افزایش شفافیت در مورد منشأ مواد اولیه و شرایط تولید، امکان تأیید ادعاهای زیست‌محیطی و اجتماعی توسط ذینفعان می‌تواند منجر به بهبود پایداری از طریق هوشمندسازی گردد	شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره تامین با استفاده از بلاکچین (A۲)
[۶۱] و [۵۶]	استفاده از انبار سبز و هوشمند که در آن محصولات و مواد اولیه ذخیره می‌شوند که در آن از رایانه و ماشین استفاده می‌شود می‌تواند در بهبود هوشمندسازی و پایداری شبکه زنجیره تامین موثر باشد.	انبارداری سبز و هوشمند (A۳)
[۴۶] و کارشناسان این پژوهش	استفاده از مفهوم اقتصاد چرخشی بصورت هوشمند (برای مثال استفاده از تکنولوژی‌های نوظهور به منظور پیاده‌سازی ابعاد اقتصاد چرخشی)	اقتصاد چرخشی هوشمند (A۴)

۳-۳- روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی

رویکرد "بهترین-بدترین فازی تصادفی"، که حاصل پژوهش نیری و همکاران [۵۷] است، راهکاری جدید در حوزه بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری محسوب می‌شود. از ویژگی‌های برجسته این متد می‌توان به چهار مورد کلیدی اشاره کرد: اولاً، افزایش چشمگیر قابلیت اطمینان؛

ثانیاً، کاهش قابل ملاحظه هزینه های محاسباتی؛ ثالثاً، توانایی بالا در مواجهه با ابهامات و عدم قطعیت های تصادفی؛ و چهارماً، انعطاف پذیری در ترکیب با سایر تکنیک ها. مراحل آن شرح زیر می باشد.

(۱) تعیین سناریوهای مورد نظر برای مساله $(s=1, \dots, S)$. لازم به ذکر است که PS_s نشان دهنده احتمال رخداد هر سناریو می باشد که $\sum_s PS_s = 1$

(۲) انتخاب مطلوب ترین و غیرمطلوب ترین معیار بر اساس نظر خبرگان

(۳) تشکیل بردارهای مقایسات زوجی فازی در هر سناریو بصورتی که $\tilde{a}_{Bjs} = (l_{Bjs}, m_{Bjs}, u_{Bjs})$ نشان دهنده بردار مقایسه بهترین معیار با سایر معیارها و $\tilde{a}_{jws} = (l_{jws}, m_{jws}, u_{jws})$ نمایانگر بردار مقایسه میان بدترین معیار و سایر معیارها است. به منظور انجام مقایسه فازی در هر سناریو، جدول ۴ در زیر قابل استفاده می باشد. در این پژوهش، به منظور مدل سازی عدم قطعیت موجود در قضاوت های خبرگان از اعداد فازی مثلثی (TFNs) استفاده شده است. اعداد فازی مثلثی به دلیل سادگی، قابلیت انعکاس قضاوت های ذهنی خبرگان و کاربرد گسترده در مسائل تصمیم گیری چندمعیاره، یکی از رایج ترین ابزارهای مدل سازی ابهام محسوب می شوند.

جدول ۴. متغیرهای زبانی و معادل فازی آنها برای مقایسات زوجی

معادل فازی	متغیر زبانی
(۳.۵, ۴, ۴.۵)	کاملاً مهمتری
(۲.۵, ۳, ۳.۵)	خیلی مهمتر
(۱.۵, ۲, ۲.۵)	نسبتاً مهمتر
(۰.۶۶۶۷, ۱, ۱.۵)	اندکی مهمتر
(۱, ۱, ۱)	اهمیت یکسان

(۴) در چهارمین گام، وزن معیارها با پیاده سازی مدل ریاضی ارائه شده در عبارت (۱) محاسبه می شود. در این مدل، $\tilde{w}s_j = (l_{js}^w, m_{js}^w, u_{js}^w)$ بیانگر وزن فازی معیارها در سناریو s و w_j نشان دهنده وزن نهایی معیار می باشد. لازم به ذکر است که $R(\tilde{a}) = \frac{l+4m+u}{6}$ در مرحله تعیین اوزان معیارها با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی، فرآیند دیفازی سازی بر مبنای رویکرد میانگین یکپارچه رتبه ای (GMIR) انجام شد. این رویکرد مطابق رابطه $R(\tilde{a}) = \frac{l+4m+u}{6}$ مقدار محتمل تر (m) را با وزن بیشتری در نظر گرفته و بنابراین برآورد دقیق تری از ترجیحات خبرگان ارائه می دهد.

$$\text{minimize } \sum_s PS_s \tilde{\xi}_s^*$$

subject to

$$\begin{aligned} & \left| \frac{(l_{Bs}^w, m_{Bs}^w, u_{Bs}^w)}{(l_{js}^w, m_{js}^w, u_{js}^w)} - (l_{Bjs}, m_{Bjs}, u_{Bjs}) \right| \leq (k_s^*, k_s^*, k_s^*) \quad \forall j, s, \\ & \left| \frac{(l_{js}^w, m_{js}^w, u_{js}^w)}{(l_{ws}^w, m_{ws}^w, u_{ws}^w)} - (l_{jws}, m_{jws}, u_{jws}) \right| \leq (k_s^*, k_s^*, k_s^*) \quad \forall j, s, \\ & \sum_{j=1}^n R(\tilde{w}s_{js}) = 1 \quad \forall s, \\ & l_{js}^w \leq m_{js}^w \leq u_{js}^w \quad \forall j, s, \end{aligned} \quad (1)$$

$$w_j = \sum_s PS_s R(\bar{w}s_{js}) \quad \forall j,$$

$$l_{js}^w \geq 0 \quad \forall j, s.$$

در مدل فوق، S شاخص سناریوها بوده، $(l_{BS}^w, m_{BS}^w, u_{BS}^w)$ نشان دهنده وزن فازی بهترین معیار هستند، $(l_{js}^w, m_{js}^w, u_{js}^w)$ بیانگر وزن فازی معیار j می‌باشند، $(l_{WS}^w, m_{WS}^w, u_{WS}^w)$ نماد وزن فازی بدترین معیار است، $(l_{Bjs}, m_{Bjs}, u_{Bjs})$ نشان دهنده بردار مقایسات زوجی فازی میان بهترین معیار و سایر معیارها بوده، $(l_{js}^w, m_{js}^w, u_{js}^w)$ نشان دهنده بردار مقایسات زوجی فازی میان بدترین معیار و سایر معیارها بوده، PS_s نشان دهنده احتمال رخداد سناریو S می‌باشد و $R(\tilde{a}) = \frac{l+4m+u}{6}$ است.

(۵) در انتها، نرخ سازگاری (CR) می‌بایست بررسی شود که برای آن از فرمول $CR = \xi^*/CI$ استفاده می‌شود که مقدار CI از جدول ۵ استخراج می‌گردد. هرچه میزان CR کمتر باشد، قابلیت اطمینان و اعتبار پاسخ‌های به دست آمده بیشتر است.

جدول ۵. نحوه محاسبه CI

کاملاً مهمتر	خیلی مهمتر	نسبتاً مهمتر	اندکی مهمتر	اهمیت یکسان
(۳.۵, ۴, ۴.۵)	(۲.۵, ۳, ۳.۵)	(۱.۵, ۲, ۲.۵)	(۰.۶۶۷, ۱, ۱.۵)	(۱, ۱, ۱)
۸.۰۴	۶.۶۹	۵.۲۹	۳.۸۰	۳.۰۰
CI				

۳-۴- روش کوپراس فازی-تصادفی

با توجه به آنچه پیشتر گفته شد، این مطالعه به منظور ارزیابی استراتژی‌های شناسایی شده از یک رویکرد جدید (به تازگی توسعه داده شده) به نام کوپراس فازی-تصادفی استفاده کرده‌است. دلایل استفاده از این روش به شرح زیر است [۵۸]: (الف) این روش قادر به حذف افزونگی‌های ناشی از داده‌های مبهم است، (ب) این روش می‌تواند با عدم قطعیت ترکیبی از نوع فازی-تصادفی مقابله کند، و (ج) روش کوپراس در مقالات پیشین عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. در ادامه، مراحل این روش را ارائه می‌دهیم. ابتدا، فرض کنید S سناریو با اندیس s ، N شاخص با اندیس j ، و M گزینه با اندیس i وجود دارند. لازم به ذکر است که احتمال هر سناریو با P_s نمایش داده می‌شود. اکنون، مراحل زیر را مشاهده کنید.

مرحله اول) تشکیل ماتریس تصمیم فازی-تصادفی

مرحله اول به منظور ایجاد ماتریس تصمیم این روش است (جدول ۶ را ببینید). در این ماتریس، $\tilde{x}_{ijs} = \{x_{ijs}^l, x_{ijs}^m, x_{ijs}^u\}$ نشان‌دهنده امتیاز سناریوی فازی گزینه i بر اساس شاخص j تحت سناریوی S است. لازم به ذکر است که می‌توان از جدول ۷ برای تشکیل ماتریس تصمیم استفاده کرد.

جدول ۶. ماتریس تصمیم روش کوپراس فازی-تصادفی

	c_1			c_2			...	c_j		
	s_1	...	s_s	s_1	...	s_s		s_1	...	s_s
a_1	$\tilde{x}_{111}$	...	$\tilde{x}_{11s}$	$\tilde{x}_{121}$	...	$\tilde{x}_{12s}$	...	$\tilde{x}_{1i1}$	...	$\tilde{x}_{1js}$
a_2	$\tilde{x}_{211}$	...	$\tilde{x}_{21s}$	$\tilde{x}_{221}$	...	$\tilde{x}_{22s}$	...	$\tilde{x}_{2i1}$	...	$\tilde{x}_{2js}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
a_i	$\tilde{x}_{i11}$	...	$\tilde{x}_{i1s}$	$\tilde{x}_{i21}$	...	$\tilde{x}_{i2s}$	...	$\tilde{x}_{ij1}$	...	$\tilde{x}_{ijs}$

جدول ۷. طیف فازی مورد استفاده برای روش کوپراس فازی-تصادفی [۵۸]

خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	متغیر زبانی
(۱, ۱, ۳)	(۱, ۳, ۵)	(۳, ۵, ۷)	(۵, ۷, ۹)	(۷, ۹, ۹)	عدد فازی

مرحله دوم) محاسبه ماتریس تصمیم نرمال شده (D) با عناصر $\tilde{z}_{ijs}$ با استفاده از معادلات (۲) و (۳):

$$\text{if indicator is a positive one } \tilde{z}_{ijs} = \left(\frac{l_{ijs}}{u_{js}^+}, \frac{m_{ijs}}{u_{js}^+}, \frac{u_{ijs}}{u_{js}^+} \right); u_{js}^+ = \max\{u_{ijs}\} \quad (2)$$

$$\text{if indicator is a negative one } \tilde{z}_{ijs} = \left(\frac{l_{js}^-}{u_{ijs}^-}, \frac{l_{js}^-}{m_{ijs}^-}, \frac{l_{js}^-}{l_{ijs}^-} \right); l_{js}^- = \max\{l_{ijs}\} \quad (3)$$

در این معادلات، l_{ijs} ، m_{ijs} و u_{ijs} نشان دهنده امتیاز فازی گزینه تحت سناریو S هستند

مرحله سوم) تشکیل ماتریس تصمیم نرمال شده وزن دار (H) با عناصر $\tilde{h}_{ijs}$ با استفاده از معادله (۴)، که در آن وزن معیار j است.

$$H = [\tilde{h}_{ijs}] = \tilde{z}_{ijs} \times w_j, \quad (4)$$

مرحله چهارم) محاسبه شاخص های تجمعی مفید و غیرمفید تحت هر سناریو (T_{is}^+ و T_{is}^-) با استفاده از معادلات (۵) و (۶). در این

معادلات، $j = 1, \dots, t$ نشان دهنده شاخص های مثبت و $j = t + 1, \dots, N$ نشان دهنده شاخص های منفی است.

$$\tilde{T}_{is}^+ = \left\{ \sum_{j=1}^t hh_{ijs}^l, \sum_{j=1}^t hh_{ijs}^m, \sum_{j=1}^t hh_{ijs}^u \right\}, \quad (5)$$

$$\tilde{T}_{is}^- = \left\{ \sum_{j=t+1}^N hh_{ijs}^l, \sum_{j=t+1}^N hh_{ijs}^m, \sum_{j=t+1}^N hh_{ijs}^u \right\}. \quad (6)$$

مرحله پنجم) محاسبه مقدار دیفازی شده برای هر گزینه در هر سناریو $V_s(\tilde{A})$ با استفاده از معادله (۷) که در آن $\alpha \in [0, 1]$

است. در روش کوپراس فازی-تصادفی، دیفازی سازی مطابق رویکرد ارائه شده در ادبیات این روش و بر اساس سطح اطمینان α انجام شد. این رویکرد ضمن حفظ اطلاعات عدم قطعیت موجود در اعداد فازی، امکان ارزیابی و رتبه بندی گزینه ها را در سطوح مختلف اطمینان فراهم می سازد و از این رو برای محیط های تصمیم گیری همراه با ریسک و عدم قطعیت مناسب است.

$$V_s(\tilde{A}) = 2l_s(1 - \alpha) + \left(\frac{u_s - m_s}{2} \right) \times (1 - \alpha)^2 \quad (7)$$

مرحله ششم. محاسبه امتیاز هر گزینه در هر سناریو با استفاده از معادله (۸) PC_{is} نشان دهنده امتیاز گزینه i تحت سناریو S

است.

$$PC_{is} = \frac{V_{is}}{V_s^{max}} \times 100 \quad (8)$$

در این معادله، V_{is} و V_s^{max} به ترتیب نشان دهنده مقدار دیفازی شده و حداکثر مقدار دیفازی شده برای هر گزینه در هر سناریو

است.

مرحله هفتم. محاسبه ارزش مورد انتظار امتیازات عملکرد برای هر گزینه بر اساس معادله (۹) و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس این معیار (PS_s نشان دهنده احتمال رخداد سناریو S است).

$$EPC_i = \sum_s PS_s \times PC_{is}. \quad (9)$$

۴- نتایج محاسباتی

۴-۱- نتایج روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی

این بخش به محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها از طریق روش فازی-تصادفی بهترین-بدترین اختصاص دارد. در این راستا، سه سناریوی از پیش تعیین شده (بدبینانه، محتمل، خوشبینانه) با احتمالات ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۲۵، بر اساس مطالعات پیشین، لحاظ گردیده‌اند. پس از انجام مقایسه‌های زوجی با مشارکت کارشناسان، روش فازی-تصادفی بهترین-بدترین پیاده‌سازی شد. نتایج نهایی در جدول ۸ قابل مشاهده است. مطابق با این جدول، معیارهای انعطاف‌پذیری، امکان‌پذیری عملیاتی، هزینه سرمایه‌گذاری، ایمنی، قابلیت توسعه و گرمایش جهانی به عنوان مهمترین موارد انتخاب شدند.

جدول ۸. وزن معیارها

وزن	معیار
۰.۱۰۱۰۹	هزینه سرمایه‌گذاری
۰.۱۰۰۳۸	گرمایش جهانی
۰.۰۹۸۵۲	کنترل و جلوگیری از آلودگی
۰.۰۹۸۵۲	توسعه محلی
۰.۰۹۸۶۵	پذیرش اجتماعی
۰.۱۰۰۹۶	امکان‌پذیری عملیاتی
۰.۱۰۰۷۵	ایمنی
۰.۰۹۸۸۶	مدیریت اطلاعات هوشمند
۰.۱۰۰۹۲	قابلیت توسعه
۰.۱۰۱۳۵	انعطاف‌پذیری

۴-۲- نتایج روش کوپراس فازی-تصادفی

در این بخش، نتایج پیاده‌سازی روش کوپراس فازی تصادفی ارائه می‌گردد. در این رابطه، ابتدا سه سناریو به شرح بدبینانه، محتمل و خوشبینانه تعریف شده و سپس ماتریس تصمیم مطابق با نظر کارشناسان به شرح جدول ۹ تشکیل شده است. با توجه به این جدول، مقدار شاخص V برای هر گزینه به شرح جدول ۱۰ است. همچنین، میزان شاخص PC نیز برای هر گزینه در جدول ۱۱ آورده شده است. همچنین، جدول ۱۲ شاخص EPC و رتبه‌بندی گزینه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل شده، استراتژی‌های اقتصاد چرخشی هوشمند و استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته در فرآیند تولید به عنوان موارد برتر انتخاب شده‌اند. لازم به ذکر است که برتری استراتژی اقتصاد چرخشی هوشمند به معنای بی‌نیازی از سایر استراتژی‌ها نیست؛ بلکه نتایج نشان می‌دهد این استراتژی در شرایط مورد مطالعه از اولویت بالاتری برخوردار بوده و می‌تواند در کنار سایر استراتژی‌های هوشمندسازی و پایداری به صورت مکمل مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۹. ماتریس تصمیم روش کوپراس فازی تصادفی

کنترل و جلوگیری از آلودگی									گرمایش جهانی									هزینه سرمایه‌گذاری									
S3			S2			S1			S3			S2			S1			S3			S2			S1			
u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	
9	7	5	9	7	5	7	5	3	7	5	3	7	5	3	5	3	1	9	9	7	9	7	5	7	5	3	A1
9	7	5	9	7	5	7	5	3	7	5	3	7	5	3	5	3	1	7	5	3	7	5	3	3	1	1	A2
9	9	7	9	7	5	7	5	3	9	7	5	9	7	5	7	5	3	7	5	3	7	5	3	3	1	1	A3
9	7	5	9	7	5	9	7	5	9	7	5	9	7	5	9	7	5	9	9	7	9	7	5	7	5	3	A4
امکان‌پذیری عملیاتی									پذیرش اجتماعی									توسعه محلی									
S3			S2			S1			S3			S2			S1			S3			S2			S1			
u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	
9	7	5	9	7	5	9	7	5	9	7	5	7	5	3	5	3	1	9	9	7	9	7	5	7	5	3	A1
7	5	3	5	3	1	5	3	1	9	7	5	7	5	3	5	3	1	9	7	5	5	3	1	3	1	1	A2
9	7	5	7	5	3	5	3	1	9	7	5	7	5	3	5	3	1	9	7	5	5	3	1	3	1	1	A3
9	7	5	9	7	5	9	7	5	9	9	7	9	7	5	7	5	3	9	9	7	9	7	5	7	5	3	A4
قابلیت توسعه									مدیریت اطلاعات هوشمند									ایمنی									
S3			S2			S1			S3			S2			S1			S3			S2			S1			
u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	u	m	l	
9	7	5	9	7	5	7	5	3	9	7	5	7	5	3	7	5	3	9	9	7	9	7	5	7	5	3	A1
9	9	7	9	7	5	7	5	3	9	9	7	9	7	5	7	5	3	9	9	7	9	7	5	7	5	3	A2
9	9	7	9	7	5	7	5	3	9	7	5	5	3	1	3	1	1	9	9	7	9	7	5	7	5	3	A3
9	7	5	7	5	3	7	5	3	9	7	5	7	5	3	7	5	3	9	9	7	9	7	5	7	5	3	A4
																		انعطاف‌پذیری									
																		S3			S2			S1			
																		u	m	l	u	m	l	u	m	l	
																		9	9	7	9	7	5	7	5	3	A1
																		9	9	7	9	7	5	7	5	3	A2
																		9	9	7	9	7	5	7	5	3	A3
																		9	9	7	9	7	5	7	5	3	A4

جدول ۱۰. مقدار شاخص V

گزینه	S1	S2	V(A)
A1	۰.۰۴۵	۰.۰۸۴	۰.۰۸۳
A2	۰.۰۶۲	۰.۰۹۶	۰.۰۹۶
A3	۰.۰۰۵	۰.۰۸۴	۰.۰۸۴
A4	۰.۰۲۸	۰.۰۷۱	۰.۰۷۱

جدول ۱۱. مقدار شاخص PC

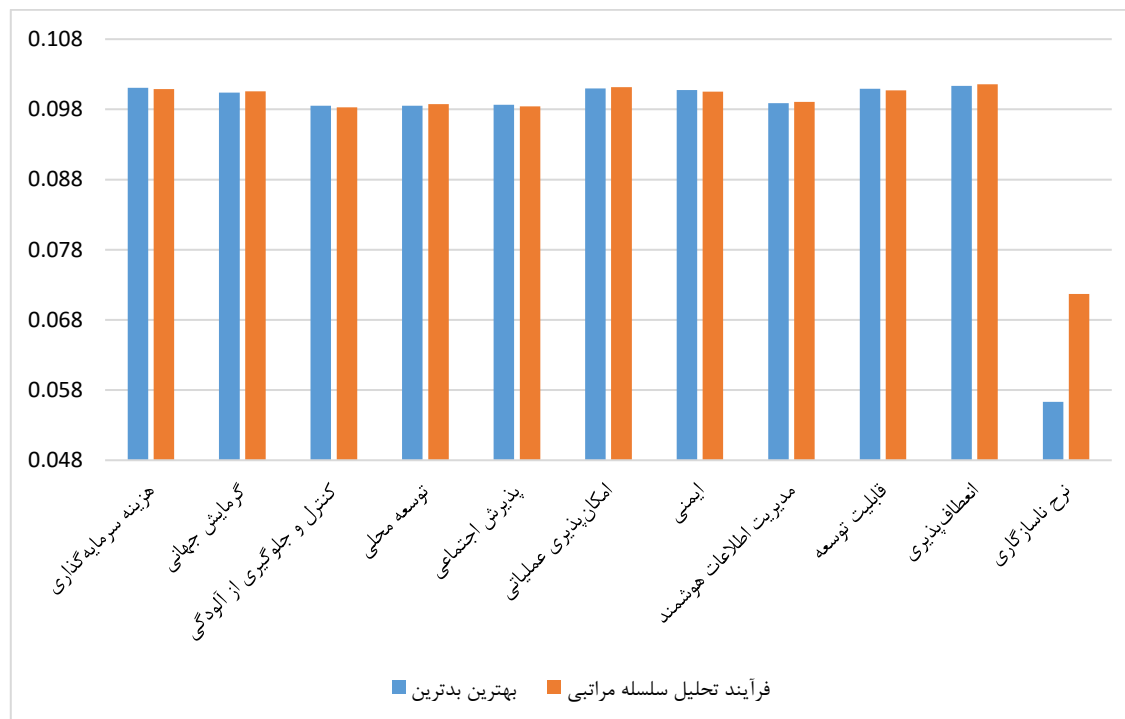
گزینه	PC	
	S ₁	S ₂
A ₁	۸۷.۳۱	۱۰۷
A ₂	۶۸.۸	۹۰.۰۵
A ₃	۶۱.۶۴	۸۴.۶
A ₄	۱۰۰	۱۰۶.۸

جدول ۱۲. مقدار شاخص EPC و رتبه بندی نهایی

رتبه	EPC	گزینه
۲	۱۰۸.۵	A ₁
۳	۹۵.۲۷	A ₂
۴	۹۲.۱۷	A ₃
۱	۱۱۲.۹	A ₄

۳-۴- بررسی عملکرد روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی

به منظور بررسی کارایی روش مورد استفاده به منظور محاسبه وزن معیارها، در این بخش عملکرد این روش با روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در این زمینه، شکل ۱ نشان دهنده وزن‌های بدست آمده توسط این دو روش و همچنین میزان نرخ ناسازگاری این دو روش می‌باشد. مشاهده می‌گردد که وزن‌های به دست آمده در بسیاری از موارد مشابه هستند که نشان دهنده صحت و اعتبار نتایج این تحقیق می‌باشد. از سوی دیگر، شکل ۱ نشان می‌دهد که روش مورد استفاده در این پژوهش دارای نرخ ناسازگاری کمتری است که قابلیت اطمینان بالاتر آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقایسه روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی و روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی

۴-۴- بررسی عملکرد روش کوپراس فازی-تصادفی

این بخش به بررسی عملکرد روش کوپراس فازی تصادفی تخصیص داده شده است. بدین منظور، نتایج حاصل شده از این روش با رویکردهای تاپسیس فازی-تصادفی و ویکور فازی-تصادفی مورد مقایسه قرار گرفته است (جدول ۱۳ را ببینید). همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که روش مورد استفاده از صحت و اعتبار قابل قبولی برخوردار است چراکه در تمامی موارد گزینه‌های اول و دوم یکسان می‌باشند.

جدول ۱۳. مقایسه روش‌های رتبه‌بندی گزینه‌ها

گزینه	رتبه	کوپراس فازی-تصادفی	ویکور فازی-تصادفی	تاپسیس فازی-تصادفی
A ₁	۲	۲	۲	۲
A ₂	۳	۳	۴	۳
A ₃	۴	۴	۳	۴
A ₄	۱	۱	۱	۱

۴-۵- بحث و یافته‌ها

تحقیق حاضر، به شناسایی معیارها و ارزیابی استراتژی‌های حرکت به سمت یک زنجیره تامین هوشمند و پایدار در صنعت لوازم خانگی می‌پردازد. در این راستا، ابتدا مجموعه‌ای جامع از معیارها به همراه استراتژی‌های نهایی با مرور ادبیات و مصاحبه با خبرگان استخراج گردید. سپس وزن ده معیار با رویکرد بهترین-بدترین فازی-تصادفی تعیین شد. در ادامه از روش کوپراس فازی-تصادفی برای ارزیابی چهار گزینه نهایی استفاده شد. نتایج وزن‌دهی معیارها نشان می‌دهد که تمامی معیارهای مورد بررسی از اهمیت نسبتاً نزدیکی برخوردارند و اختلاف وزن‌ها بسیار محدود است؛ این امر بیانگر اهمیت نسبتاً متوازن معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و عملیاتی در حرکت به سمت زنجیره تامین هوشمند و پایدار است. در میان معیارها، "انعطاف‌پذیری" بیشترین وزن را کسب کرده که نشان‌دهنده اهمیت توانایی سازگاری زنجیره تامین با تغییرات تقاضا، نوسانات بازار و تحولات فناوری در صنعت لوازم خانگی است. پس از آن، معیارهای "هزینه سرمایه‌گذاری"، "امکان‌پذیری عملیاتی" و "قابلیت توسعه" در رتبه‌های بعدی قرار دارند که بیانگر نقش مهم ملاحظات اقتصادی و اجرایی در پیاده‌سازی راهکارهای هوشمند و پایدار است. همچنین معیارهای "ایمنی" و "گرمایش جهانی" نشان‌دهنده توجه به جنبه‌های ایمنی و زیست‌محیطی در تصمیم‌گیری‌ها هستند. در مقابل، معیارهای "مدیریت اطلاعات هوشمند"، "پذیرش اجتماعی"، "کنترل و جلوگیری از آلودگی" و "توسعه محلی" وزن کمتری کسب کرده‌اند، هرچند همچنان از اهمیت قابل توجهی برخوردارند. پایین‌تر بودن وزن آن‌ها نشان می‌دهد که از دید خبرگان، در شرایط فعلی صنعت لوازم خانگی، عوامل عملیاتی و اقتصادی نسبت به ابعاد اجتماعی، اطلاعاتی و برخی ملاحظات زیست‌محیطی در اولویت بالاتری قرار دارند. با این حال، نزدیکی وزن این معیارها به سایر معیارها بیانگر آن است که این عوامل نیز در ایجاد یک رویکرد جامع و پایدار در زنجیره تامین نقش مکمل و ضروری ایفا می‌کنند. نتایج رتبه‌بندی استراتژی‌ها نشان می‌دهد "اقتصاد چرخشی هوشمند" در رتبه اول قرار گرفته که بیانگر نقش کلیدی بازیافت، استفاده مجدد از منابع و مدیریت چرخه عمر محصولات در تحقق زنجیره تامین پایدار است. "استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته در فرآیند تولید" رتبه دوم را کسب کرده و نشان‌دهنده اهمیت فناوری‌های نوین در افزایش بهره‌وری و هوشمندسازی تولید است. همچنین "شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره تامین با استفاده از بلاکچین" و "انبارداری سبز و هوشمند" به ترتیب در رتبه‌های سوم و چهارم قرار گرفته‌اند که بیانگر اولویت کمتر آن‌ها نسبت به دو استراتژی نخست در شرایط فعلی صنعت لوازم خانگی است. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، وزن معیارها با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی

مقایسه شد. نتایج نشان داد وزن‌های به‌دست‌آمده در بسیاری موارد مشابه بوده و بیانگر اعتبار نتایج تحقیق است. همچنین روش پیشنهادی از نرخ ناسازگاری کمتری برخوردار است که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بیشتر آن می‌باشد. همچنین نتایج روش کوپراس فازی-تصادفی با روش‌های تاپسیس فازی-تصادفی و ویکور فازی-تصادفی مقایسه شد. نتایج نشان داد این روش از اعتبار قابل قبولی برخوردار است، زیرا در هر سه روش گزینه‌های اول و دوم یکسان به دست آمده‌اند.

۴-۶- بینش‌های مدیریتی

این پژوهش با تمرکز بر صنعت لوازم خانگی، راهکارهای عملی و مبتنی بر داده برای مدیران جهت حرکت به سمت یک زنجیره تأمین همزمان هوشمند و پایدار ارائه می‌دهد. یافته‌های کلیدی این تحقیق می‌تواند به مدیران در اتخاذ تصمیمات استراتژیک و عملیاتی کمک شایانی نماید. در وهله اول، اهمیت یکپارچه‌سازی هوشمندسازی و پایداری نمایان می‌باشد. مدیران باید درک کنند که هوشمندسازی و پایداری دو روی یک سکه در زنجیره تأمین مدرن هستند. استراتژی‌هایی که هر دو بعد را در بر می‌گیرند، نه تنها به بهبود عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی کمک می‌کنند، بلکه مزایای رقابتی قابل توجهی مانند کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و بهبود تصویر برند را نیز به همراه دارند. تمرکز صرف بر یکی از این ابعاد، فرصت‌های بالقوه را از بین می‌برد. همچنین، اولویت‌بندی استراتژی‌های اجرایی کمک شایان توجهی به مدیران خواهد کرد. پژوهش حاضر با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری پیشرفته، استراتژی‌های کلیدی را اولویت‌بندی کرده است. مدیران باید نتایج به دست آمده را به عنوان راهنمایی برای تخصیص منابع و تمرکز تلاش‌های سازمانی خود در نظر بگیرند. استراتژی‌هایی مانند "اقتصاد چرخشی هوشمند" و "استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته در فرآیند تولید" باید در صدر برنامه‌های اجرایی قرار گیرند. از سوی دیگر، این تحقیق بر مدیریت عدم قطعیت در تصمیم‌گیری تمرکز داشته که می‌تواند به مدیران کمک کند. در این رابطه، پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های محیطی (مانند نوسانات بازار، تغییرات مقرراتی، یا اختلالات پیش‌بینی نشده) نیازمند رویکردهای تصمیم‌گیری قوی است. استفاده از روش‌های فازی-تصادفی، همانطور که در این تحقیق به کار رفته، به مدیران امکان می‌دهد تا با در نظر گرفتن طیف وسیعی از احتمالات (سناریوهای بدبینانه، محتمل، خوشبینانه)، تصمیماتی اتخاذ کنند که در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم‌تر باشند. این امر به ویژه در ارزیابی استراتژی‌ها و وزن‌دهی معیارها اهمیت دارد. همچنین، شناسایی و وزن‌دهی معیارهای کلیدی دیگر موردی است که برای مدیران مفید خواهد بود. نتایج نشان می‌دهد که معیارهایی نظیر "انعطاف‌پذیری"، "امکان‌پذیری عملیاتی"، "هزینه سرمایه‌گذاری"، "ایمنی"، "قابلیت توسعه" و "گرمایش جهانی" از اهمیت بالایی برخوردارند. مدیران باید این معیارها را در فرآیندهای ارزیابی و انتخاب پروژه‌ها و استراتژی‌های زنجیره تأمین خود لحاظ کرده و به آن‌ها وزن مناسبی بدهند. پایش مستمر این معیارها می‌تواند به شناسایی زودهنگام ریسک‌ها و فرصت‌ها کمک کند. بصورت کلی، این پژوهش با ارائه یک چارچوب روش‌شناختی و نتایج ملموس، مدیران صنعت لوازم خانگی را قادر می‌سازد تا با اطمینان بیشتری در مسیر تحول دیجیتال و پایداری گام بردارند و زنجیره تأمین خود را به یک مزیت رقابتی پایدار تبدیل کنند.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در سال‌های اخیر، تغییرات سریع فناوری و افزایش دغدغه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی باعث شده‌اند که مفهوم زنجیره تأمین هوشمند و پایدار به یکی از محورهای اصلی رقابت و رشد در صنایع تولیدی تبدیل شود. صنعت لوازم خانگی نیز از این جریان مستثنا نیست و برای پاسخ به نیازهای بازار و ارتقای عملکرد خود، باید میان استفاده از فناوری‌های نوین و رعایت اصول پایداری تعادل برقرار کند. در این راستا، با بهره‌گیری از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی-تصادفی، مجموعه‌ای از معیارها و استراتژی‌های کلیدی در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفتند تا شرایط واقعی تصمیم‌گیری که با عدم قطعیت همراه است بهتر منعکس شود. نتایج وزن‌دهی معیارها با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی نشان داد که عواملی مانند انعطاف‌پذیری، امکان‌پذیری عملیاتی، هزینه سرمایه‌گذاری، ایمنی، قابلیت توسعه و گرمایش

جهانی از مهم ترین ملاحظات در انتخاب استراتژی های مناسب به شمار می آیند. همچنین نتایج رتبه بندی استراتژی ها در سناریوهای مختلف عدم قطعیت با رویکرد کوپراس فازی-تصادفی نشان داد که استراتژی اقتصاد چرخشی هوشمند و استفاده از فناوری های پیشرفته در فرآیند تولید نسبت به سایر گزینه ها از اولویت بالاتری برخوردارند. این موضوع نشان می دهد که ترکیب رویکردهای نوین فناورانه با ملاحظات پایداری می تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد و رقابت پذیری زنجیره تأمین ایفا کند. به طور کلی، نتایج این مطالعه می تواند به مدیران و تصمیم گیران کمک کند تا با درک بهتر معیارهای اثرگذار، تصمیمات آگاهانه تری در مسیر توسعه زنجیره تأمین هوشمند و پایدار اتخاذ کنند. در تحقیقات آینده می توان دامنه مطالعه را به سایر صنایع تولیدی تعمیم داد تا امکان مقایسه نتایج در صنایع مختلف (خودروسازی، الکترونیک، غذایی و...) فراهم شود. همچنین پیشنهاد می شود در پژوهش های بعدی از سایر روش های تصمیم گیری چندمعیاره نظیر تکنیک های داده محور و یادگیری ماشین و غیره برای ارزیابی استراتژی های زنجیره تأمین هوشمند و پایدار استفاده شود. علاوه بر این، در نظر گرفتن معیارهای دیگر به ویژه معیارهای تاب آوری، چابکی و بهره گیری از داده های تجربی در سطح بنگاه های صنعتی می تواند به افزایش دقت و کاربردپذیری نتایج کمک کند. در نهایت، بررسی روابط علی میان معیارها با استفاده از روش هایی مانند دیمتل یا مدل سازی ساختاری می تواند درک عمیق تری از عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین هوشمند و پایدار ارائه دهد.

۵-۱- محدودیت ها و پیشنهادهای پژوهشی

با وجود دستاوردهای پژوهش حاضر، این مطالعه دارای محدودیتهایی است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرند. نخست، نتایج پژوهش مبتنی بر نظرات و قضاوت های خبرگان حوزه زنجیره تأمین، پایداری و صنعت لوازم خانگی است؛ بنابراین نتایج ممکن است تحت تأثیر دیدگاه ها و تجربیات افراد مشارکت کننده قرار گیرد. دوم، پژوهش حاضر بر صنعت لوازم خانگی متمرکز بوده است؛ از این رو تعمیم مستقیم نتایج به سایر صنایع باید با احتیاط صورت گیرد. سوم، ارزیابی استراتژی ها در یک مقطع زمانی مشخص انجام شده است، در حالی که تحولات فناوری و شرایط بازار می تواند بر اولویت استراتژی ها در طول زمان تأثیرگذار باشد.

پیشنهاد می شود در تحقیقات آینده، مدل ارائه شده در سایر صنایع تولیدی و خدماتی مورد آزمون قرار گیرد و نتایج حاصل با یافته های این پژوهش مقایسه شود. همچنین استفاده از روش های تصمیم گیری دیگر و به کارگیری داده های واقعی عملکردی در کنار قضاوت های خبرگان می تواند به افزایش دقت و اعتبار نتایج کمک نماید. علاوه بر این، بررسی پویایی اولویت استراتژی ها در بازه های زمانی مختلف و در شرایط عدم قطعیت متفاوت می تواند زمینه مناسبی برای پژوهش های آتی فراهم آورد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ گونه تضاد منافی 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

- [1] Dağdeviren, I. E., & Erturgut, R. (2024). The mediating role of supply chain integration in the relationship between supply chain strategy and logistics performance. *Sustainability*, 16(21), 9514.
- [2] Chowdhury, A. Y., & Islam, N. (2021). Supply chain management and operational performance: a critical evaluation of available literatures. *Int J Appl Bus Manag Sci*, 2, 233-51.
- [3] Jahed, M. A., Quaddus, M., Suresh, N. C., Salam, M. A., & Khan, E. A. (2022). Direct and indirect influences of supply chain management practices on competitive advantage in fast fashion manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(3), 598-617.
- [4] Fallahi, A., Pourghazi, A., & Mokhtari, H. (2024). A multi-product humanitarian supply chain network design problem: a fuzzy multi-objective and robust optimization approach.
- [5] Abdan, E. B. K., & Çetindaş, A. (2023). The Impact of Supply Chain Strategies on Logistics Performance: A Study in the Post Covid-19 Pandemic Period. *Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(4), 1380-1393.
- [6] Koçak, A. B., Almarestani, A., & Tirkolaee, E. B. (2025). A decision-making approach to establish a sustainable-circular waste management system: a case study of istinye university. *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*, 2(1), 204-218.
- [7] Ada, E., Sezer, M., Kazançoğlu, Y., & Khaleel, R. (2023). Towards the smart sustainable and circular food supply chains through digital technologies. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 8)3.(
- [8] Zhang, G., Yang, Y., & Yang, G. (2023). Smart supply chain management in Industry 4.0: the review, research agenda and strategies in North America. *Annals of operations research*, 322(2), 1075-1117.
- [9] Arora, M., Kumar, R., & Arora, Y. Sustainable Supply Chain Management through Smart Technology. In *A Circular Economy for Manufacturing Waste Management* (pp. 195-210). River Publishers.
- [10] Wu, K., Tavasszy, L., Rezaei, J., & De Schutter, B. (2025). Game-theoretic models for sustainable supply chains with asymmetric information: a review. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 12(1), 2520619.
- [11] Alkaraan, F., Elmarzouky, M., de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., & Gulko, N. (2025). Maximising sustainable performance: Integrating servitisation innovation into green sustainable supply chain management under the influence of governance and Industry 4.0. *Journal of Business Research*, 186, 115029.
- [12] Wahyudi, A., Sujianto, S., Wulandari, S., Mardiharini, M., Ardana, I. K., Indrawanto, C., ... & Yusuf, E. S. (2026). Enhancing flexibility in sustainable supply chains: strategies for Indonesian premium coffee. *Cogent Business & Management*, 13(1), 2606471.
- [13] Utama, D. M., Amallynda, I., Wardana, R. W., Rosiani, T. Y., Anggriani, R., & Wijaya, D. S. (2026). A new hybrid fuzzy decision model for barrier identification and strategy prioritization in circular rice supply chains: A case study in Indonesia. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 11(2), 293-320.
- [14] Salehi, A., Babaei, A., & Hamidi, H. (2026). AI-Driven Strategies for Supply Chain Resilience: A Review of Challenges and Solutions During Pandemics. *Int. J. Eng*, 39(3), 585-605.
- [15] Kamruzzaman, M., Karmakar, A., & Kibria, M. G. (2025). A hybrid framework for prioritizing the solutions to mitigate sustainable supply chain barriers in industry 5.0. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 100268.
- [16] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Tirkolaee, E. B. (2025). Towards waste management 5.0: A nexus between circular economy and industry 5.0 dimensions. *Waste Management*, 203, 114830.
- [17] Kolashlou, H. J., & Eshghi, F. (2025). Multi-Criteria Decision-Making Framework for Sustainable Energy Scheduling and Demand Response Strategies in Smart Grids: An Economic, Environmental, and Technical Perspective. *International journal of sustainable applied science and engineering*, 2(2), 53-65.
- [18] Raj, R., Kumar, V., Mittal, A., Verma, P., Lai, K. K., & Singh, A. (2025). Practices and strategies for global sourcing and supply chain management: a Pareto analysis and MOORA a mixed method approach. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 18(3), 447-470.
- [19] Eftekhari, Y., Paydar, M. M., & Nayeri, S. (2026). Towards a Circular Economy-Based Viable Agricultural Waste Management: a Hybrid Fuzzy Decision Framework. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1-22.

- [20] Görçün, Ö. F., Mishra, A. R., Aytakin, A., Simic, V., & Korucuk, S. (2024). Evaluation of Industry 4.0 strategies for digital transformation in the automotive manufacturing industry using an integrated fuzzy decision-making model. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 922-948.
- [21] Baj-Rogowska, A., & Nozari, H. (2024). Multi objective Machine Learning for Real-Time Decision Making in Smart Supply Chains. *Journal of Business and Future Economy*, 1(3), 47-62.
- [22] An, J., Li, S., Qiao, J., & Yang, Q. (2026). The impact of smart supply chain management on supply chain transparency: a dynamic resource-based view. *Operations Management Research*, 19(1), 1-24.
- [23] Morshedi, M., Hargaden, V., Papakostas, N., & Ghadimi, P. (2026). The Adoption of Digital Technologies in Circular Supply Chains: From Theoretical Developments to Practical Applications. *Logistics*, 10(1), 18.
- [24] Chehreh, S., Rezaei, M., & Salmasnia, A. (2026). Optimization of a Virtual Sustainable Closed-Loop Supply Chain Based on the Internet of Things and Blockchain under Uncertainty.
- [25] Barathi, G., Murugesan, R., & Murugesan, S. (2025). Analysing the drivers for implementing smart supply chain management in Indian industries by using the analytic hierarchy process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-16.
- [26] Firouzian-Haji, S., Eshghollahi, S. E., Ziari, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rezaei, P. (2025). A blockchain-based approach to enhance transparency and sustainability in a joint pricing and closed-loop supply chain network design problem. *Journal of Environmental Management*, 394, 127463.
- [27] Cortés-Pellicer, P., Alarcón, F., & Pérez-Perales, D. (2025). A system dynamics model for improving the reverse supply chain using the IoT in the household appliances sector. *Annals of Operations Research*, 1-29.
- [28] Yousefi, S., Khodoomi, M. R., & Tosarkani, B. M. (2025). Data-driven robust strategic sourcing considering supply-side competition: Insights into blockchain adoption for coordination. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 197, 103977.
- [29] Khan, S., Qazi, A., Siddiqui, M. S., & Singh, R. (2025). Decoding the causal relationship of IoT barriers adoption in closed-loop supply chains: an ISM-DEMATEL-fuzzy MICMAC approach. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 1-17.
- [30] Li, C. (2025). Internet of Things (IoT) Driven Logistics Supply Chain Management Coordinated Response Mechanism. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 16(1).
- [31] Oubrahim, I., & Sefiani, N. (2025). An integrated multi-criteria decision-making approach for sustainable supply chain performance evaluation from a manufacturing perspective. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 74(1), 304-339.
- [32] Srivastava, D. K., Agrawal, N., Kumar, V., Khurana, S., & Duong, L. (2026). Strategic enablers of sustainability in the Indian medical device supply chain: an ISM-DEMATEL approach. *Strategy & Leadership*, 54(1), 42-60.
- [33] Tourang, S. K., Toufighi, S. P., Masoomi, B., Sahebi, I. G., Alizadeh, R., & Vang, J. (2026). Blockchain-enabled framework for decision-making in renewable energy storage and sustainable supply chains. *Journal of Energy Storage*, 148, 120014.
- [34] Amin, S. H., Restrepo Diaz, J. D., & Husna, A. Designing and Optimizing a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Under Stochastic Uncertainty for Microwaves. Available at SSRN 6072309.
- [35] Dehkordi, E. K., & Ardali, A. A. (2025). A Supply Chain Network Design by Considering Resiliency, Sustainability and Agility Approach in Home Appliances. *International journal of industrial engineering and operational research*, 7(1), 46-61.
- [36] Xiao, Q., Shi, W., & Wang, J. (2025). The design of a sustainable closed-loop supply chain network optimisation considering the emergency response capability of manufacturers under emergencies. *International Journal of Production Research*, 63(15), 5723-5748.
- [37] Pathak, D. K., Verma, A., & Kumar, V. (2025). Analysing barriers to sustainable supply chain management: a home appliances manufacturing case study. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 52(3), 387-409.
- [38] Attia, A. M., Alanbar, N. S., Alsawafy, O. G., & Akbar, C. (2026). Optimization of a Sustainable Petrochemical Supply Chain: A MILP Framework for Integrated Economic and Environmental Performance. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1-15.
- [39] Goli, A., Babae Tirkolaee, E., Golmohammadi, A. M., Atan, Z., Weber, G. W., & Ali, S. S. (2025). A robust optimization model to design an IoT-based sustainable supply chain network with flexibility: A. Goli et al. *Central European Journal of Operations Research*, 33(3), 1025-1046.
- [40] Milutinović, B., Stefanović, G., Dassisti, M., Marković, D., & Vučković, G. (2014). Multi-criteria analysis as a tool for sustainability assessment of a waste management model. *Energy*, 74, 190-201.
- [41] Sagnak, M., Berberoglu, Y., Memis, İ., & Yazgan, O. (2021). Sustainable collection center location selection in emerging economy for electronic waste with fuzzy Best-Worst and fuzzy TOPSIS. *Waste Management*, 127, 37-47.
- [42] Kheybari, S., Kazemi, M., & Rezaei, J. (2019). Bioethanol facility location selection using best-worst method. *Applied energy*, 242, 612-623.
- [43] Torkayesh, A. E., Malmir, B., & Asadabadi, M. R. (2021). Sustainable waste disposal technology selection: The stratified best-worst multi-criteria decision-making method. *Waste Management*, 122, 100-112.

- [44] Demircan, B. G., & Yetilmezsoy, K. (2023). A Hybrid Fuzzy AHP-TOPSIS Approach for Implementation of Smart Sustainable Waste Management Strategies. *Sustainability*, 15(8), 6526.
- [45] Xu, Y., Liu, C.-C., Schneider, K. P., & Ton, D. T. (2015). Toward a resilient distribution system. In *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting* (pp. 1–5). IEEE.
- [46] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2023a). Towards a responsive supply chain based on the industry 5.0 dimensions: A novel decision-making method. *Expert Systems with Applications*, 213, 119267.
- [47] Agrebi, M., & Abed, M. (2021). Decision-making from multiple uncertain experts: case of distribution center location selection. *Soft Computing*, 25(6), 4525–4544.
- [48] Nong, T. N.-M. (2022). A hybrid model for distribution center location selection. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 38(1), 40–49.
- [49] Mamashli, Z., Nayeri, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Sazvar, Z., & Javadian, N. (2021). Designing a sustainable–resilient disaster waste management system under hybrid uncertainty: A case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 106, 104459.
- [50] Sun, Y., Garrido-Baserba, M., Molinos-Senante, M., Donikian, N. A., Poch, M., & Rosso, D. (2020). A composite indicator approach to assess the sustainability and resilience of wastewater management alternatives. *Science of The Total Environment*, 725, 138286.
- [51] Chauhan, C., Akram, M. U., & Gaur, D. (2021). Technology-Driven Responsiveness in Times of COVID-19: A Fuzzy Delphi and Fuzzy AHP-Based Approach. *International Journal of Global Business and Competitiveness*, 1–14.
- [52] Díaz-Reza, J. R., Morales-García, A. S., & García-Alcaraz, J. L. (2021). Effect of Advanced Manufacturing Technology on Responsive Supply Chain Strategy, Pull System and Responsiveness to Market. *Trends in Industrial Engineering Applications to Manufacturing Process*, 133–156.
- [53] Moyano-Fuentes, J., Sacristán-Díaz, M., & Garrido-Vega, P. (2016). Improving supply chain responsiveness through advanced manufacturing technology: the mediating role of internal and external integration. *Production Planning & Control*, 27(9), 686–697.
- [54] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2023b). Designing an IoT-enabled supply chain network considering the perspective of the Fifth Industrial Revolution: Application in the medical devices industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 122, 106113.
- [55] Subramanian, N., Chaudhuri, A., & Kayıkcı, Y. (2020). *Blockchain and Supply Chain Logistics: Evolutionary Case Studies*. Springer Nature.
- [56] Mahroof, K. (2019). A human-centric perspective exploring the readiness towards smart warehousing: The case of a large retail distribution warehouse. *International Journal of Information Management*, 45, 176–190.
- [57] Nayeri, S., Khoei, M. A., Rouhani-Tazangi, M. R., GhanavatiNejad, M., Rahmani, M., & Tirkolaee, E. B. (2023). A data-driven model for sustainable and resilient supplier selection and order allocation problem in a responsive supply chain: A case study of healthcare system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 124, 106511.
- [58] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Babae Tirkolaee, E. (2025). Viable supplier selection problem based on Industry 5.0 and circular economy aspects: a hybrid decision-making approach. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 12(1), 2469117