System Engineering and Productivity/ 2025/ Vol.5/ No.4/ 191-215

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2066007.1355

Evaluation and Selection of Suppliers in a Viable Closed-Loop Supply Chain under Mixed Uncertainty

Fariborz Kalashi [1], Iraj Mahdavi [2*], Ali Tajdin [3], Javad Rezaeian [3]

[1] Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

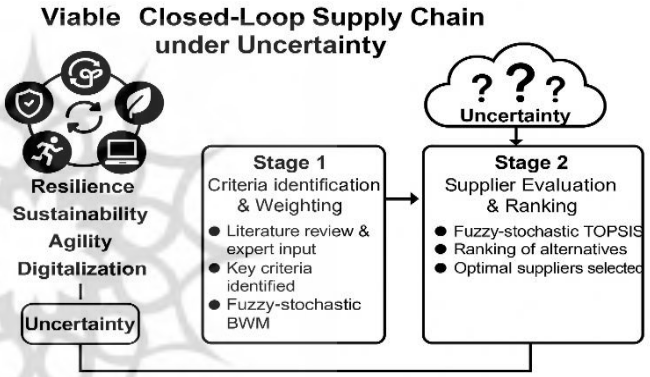
[2] Professor, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

[3] Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

HIGHLIGHTS

- Development of a novel two-stage model for supplier selection in a viable closed-loop supply chain considering uncertainty.
- Identification of key criteria for evaluating sustainable suppliers and weighting them using the SFBWM.
- Application of the SFTOPSIS method for ranking and selecting optimal suppliers under complex conditions.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 14 July 2025
Revised: 16 August 2025
Accepted: 17 August 2025
Available online: 20 August 2025
*Correspondence:
irajarash@ustmb.ac.ir
How to cite this article:
Kalashi, F., Mahdavi, I., Tajdin, A. & Rezaeian, J. (2025). Evaluation and selection of suppliers in a viable closed-loop supply chain under mixed uncertainty. *System Engineering and Productivity*, 5 (4), 191-215.

Keywords:
Supplier selection
Supply Chain Management
Viable supply chain
Stochastic Fuzzy Best-Worst Method
Stochastic Fuzzy TOPSIS

ABSTRACT

In recent years, advances in technology, increased business complexity, and crises such as COVID-19 have highlighted the need to rethink supply chain management. The resilient supply chain approach—emphasizing resilience, sustainability, agility, and digitalization—offers a modern pathway to long-term organizational efficiency. This study evaluates and selects suppliers for a closed-loop supply chain under uncertainty. Key criteria were identified through literature review and expert consultation, then weighted using the fuzzy–stochastic Best–Worst Method (BWM). Suppliers were subsequently assessed and ranked via the fuzzy–stochastic TOPSIS method. Findings reveal that beyond traditional factors such as cost and quality, aspects like backup supplier availability, waste management, and fair labor compliance are critical. A medical equipment industry case study validated the model's effectiveness in identifying top suppliers and enhancing supply chain performance, underscoring the importance of sustainability-focused, long-term strategies over purely economic ones. The study's novelty lies in a two-stage decision-making framework that integrates resilient supply chain principles, closed-loop structures, and dual uncertainties (fuzzy and stochastic), offering a robust tool for managing complex, ambiguous procurement environments.

2538-2195/© 2026 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

The recent growth in technology, business complexity, and crises like the COVID-19 pandemic have made it important to rethink supply chain management. Traditional methods based on cost, delivery time, and quality are not sufficient enough to address new challenges like environmental concerns, global disruptions, and sustainability needs. This has led to the development of such ideas as sustainable supply chains that emphasize minimizing waste, judicious usage of resources, greenhouse gas emissions, and product recycling. These concepts have evolved into closed-loop supply chains (CLSC), where reverse and forward logistics are merged together to create end-to-end, integrated, sustainable systems that add value while fulfilling environmental and social responsibilities.

The COVID-19 pandemic greatly impacted global supply chains, causing disruptions across multiple industries and even the closure of businesses in other sectors. It highlighted the importance of robust organizational, informational, technological, financial, and operational structures in preventing market failure and ensuring operational stability. In response to this, the idea of "viable supply chain" (VSC) has grown more prominent with focus on the ability of supply chains to maintain performance, adapt to changing conditions, and remain effective in spite of disruptions. VSC blends ideas of sustainability, resilience, flexibility, and digitalization to ensure long-term viability even in volatile environments.

The medical equipment industry is a strategic and key element in healthcare networks that involves the prevention of diseases, diagnosis, and treatment. Its supply chain is hard to manage due to the fact that products are delicate, they have quality requirements, legal frameworks, and safety measures. Supplier analysis and selection within sustainable CLSC under fuzzy-stochastic (hybrid) uncertainty is examined here in the industry. Based on literature review and experts' views, the most significant criteria are obtained and weighed by the stochastic-fuzzy Best-Worst Method (SFBWM). The suppliers are then ranked using the stochastic-fuzzy TOPSIS (SFTOPSIS). The contribution entails a two-stage decision model that exploits VSC dimensions, CLSC structures, and dual uncertainties simultaneously, thus providing an efficient tool for fuzzy procurement contexts (Zahari et al., 2023; Zekhnini et al., 2023).

The research aims: (1) Coordinate CLSC networks based on viability criteria under uncertainty conditions; (2) Identify and prioritize primary viable supplier choosing criteria; (3) Rank suppliers based on an empirical case study of medical equipment according to VSC criteria. This provides theoretical and practical contribution by bridging gaps concerning overall models of viability, circularity, and combined uncertainty.

2. Methodology

The method applies a two-stage multi-criteria decision-making (MCDM) method to evaluate and rank the suppliers in a sustainable CLSC with mixed uncertainty.

Stage 1 requires the identification of criteria and sub-criteria through the systematic literature review and expert interviews. There are five main dimensions created: general (cost reduction, delivery time, quality level, service level); sustainability (fair labor conditions, green design, waste management, financial reliability, employee safety and health); resilience (strategic reserves, risk management, backup suppliers, robustness, information sharing); agility (trust-building, response speed, service flexibility, production flexibility, raw material flexibility); and digitalization (smart warehousing, digital competency, cybersecurity, technology compatibility, digital relationships). These are tailored to the medical equipment industry, emphasizing sensitivity to disruptions and regulatory compliance. Weights are calculated on the basis of SFBWM, an extension of Best-Worst Method (BWM) using fuzzy numbers to reflect cognitive uncertainty and stochastic scenarios in order to reflect random uncertainty. Most preferred and least preferred criteria are identified by the experts who then perform pairwise comparisons using fuzzy linguistic descriptors (very important: (3.5, 4, 4.5)) in optimistic, likely, and pessimistic cases. The model minimizes inconsistency rates via scenario-based mathematical programming:

Suppliers are ranked in Stage 2 with the assistance of SFTOPSIS, an extension of TOPSIS to solve fuzzy-stochastic data. A three-dimensional fuzzy decision matrix (M × N × S) is formed with M as alternatives, N as criteria, and S as scenarios. The matrix is normalized relative to benefit/cost criteria, weighted, and combined using expected values. Ideal positive/negative solutions are obtained and calculated distances with Euclidean fuzzy metrics. Relative closeness (Ci) ranks suppliers. The approach is validated using comparison against standard BWM, fuzzy BWM, fuzzy AHP for weights, and fuzzy TOPSIS, VIKOR fuzzy, stochastic VIKOR for ranking, on the basis of inconsistency rates and aggregate deviation as criteria. Information collection was through questionnaires from 10 case firm experts, optimized in MATLAB.

3. Results and Discussion

The case study focuses on "Ebtekar Teb Yekta," a leading Iranian medical device manufacturer. Five main suppliers and three spares are examined.

With SFBWM, resilience is the most critical criterion (weight 0.216), with the focus placed on risk management in risky surroundings. The significant sub-criteria include backup suppliers (0.04579), emphasizing redundancy needs; information sharing (0.04384) and strategic reserves (0.04276) come

next and third, respectively, with a concern for cooperation and preparedness. Sustainability is ranked second (0.204), where waste management (0.0444) takes the lead to signify environmental concerns; fair labor (0.0426) highlights social responsiveness. General criteria (0.201) give priority to cost savings (0.04442), evidencing economic constraint. Agility (0.194) stresses flexibility in service (0.04171) and speed in response (0.0403) for demand fluctuation adjustments. Digitalization (0.185) identifies technology compatibility (0.03903), pointing to integration possibilities.
SFTOPSIS ranks the top suppliers: Supplier 2 (Ci=0.5), best in resilience and sustainability, first; Supplier 1 (0.48) second; Supplier 4 (0.43) third; Supplier 3 (0.3) fourth. As standby: Supplier 3 (0.62), best in agility and digitalization, first; Supplier 1 (0.49) second; Supplier 2 (0.38) third. Validation shows SFBWM having lowest total deviation (1.614) compared to fuzzy BWM (1.989), classical BWM (1.725), and fuzzy AHP (2.217), implying greater consistency under uncertainty. Inconsistency rate (0.047) is also competitive, outperforming fuzzy AHP (0.080). For ranking, SFTOPSIS is consistent with alternatives in highest ranks with lower computational complexity for large datasets. Findings validate the model's effectiveness in determining strong, sustainable suppliers, shifting focus from cost-alone to long-term sustainability. In medical equipment, resilience withstands pandemics as disturbances and sustainability ensures compliance. The innovation in the framework for coping with mixed uncertainty generates resilient choices better than single-uncertainty methods.

4. Conclusion

The research develops a new two-stage MCDM model for supplier selection in viable CLSCs with mixed uncertainty, and applies it to medical devices. Main conclusions indicate resilience to be of primary concern, then sustainability, and recommend backup suppliers, waste treatment, and fair labor. Rankings identify the optimal first-choice (Supplier 2) and second-choice (Supplier 3) suppliers, which also enhance chain performance. The approach merges VSC principles (digitalization, agility, sustainability, resilience) with CLSC and double uncertainties, offering an instrument for complex settings. Confirmation ensures excellence in consistency and deviation. Backup and sharing to promote resilience should be emphasized by managers, waste avoidance for sustainability and ethics, response to agility, and integration to digitalize. Policymakers can use results to enact standards facilitating viable chains. Sector-specific focus; reliance on expert opinions; un-integrated emerging technology. Future studies: Validate industry-wise; add AI/blockchain; incorporate real-time data; look at organizational drivers.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions to the article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Zahari, M. K., Zakuan, N., Yusoff, M. E., Mat Saman, M. Z., Ali Khan, M. N. A., Muharam, F. M., & Yaacob, T. Z. (2023). Viable supply chain management toward company sustainability during COVID-19 pandemic in Malaysia. *Sustainability, 15*(5), 3989. https://doi.org/10.3390/su15053989

Zekhnini, K., Chaouni Benabdellah, A., & Cherrafi, A. (2023). A multi-agent based big data analytics system for viable supplier selection. *Journal of Intelligent Manufacturing*. https://doi.org/10.1007/s10845-023-02253-7

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۵/ شماره ۴/ صفحه ۱۹۱-۲۱۵

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2066007.1355

ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه بسته بادوام تحت عدم‌قطعیت ترکیبی

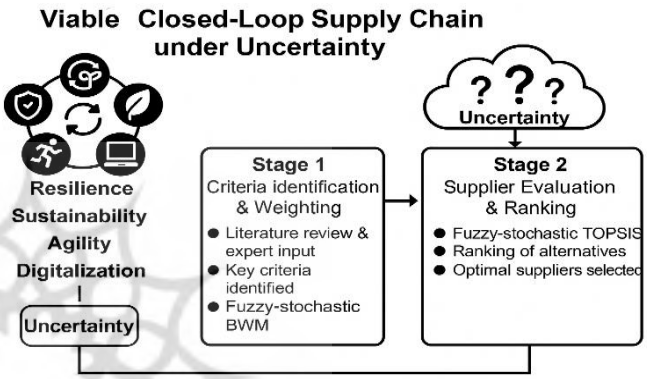
فریبرز کالاشی [۱]، ایرج مهدوی [۲*]، علی تاجدین [۳]، جواد رضائیان [۳]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

[۲] استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

[۳] دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- توسعه مدل دومرحله‌ای نوین برای انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت.
- شناسایی معیارهای کلیدی در ارزیابی تأمین‌کنندگان بادوام و وزن دهی با استفاده از روش بهترین بدترین فازی
- استفاده از روش تاپسیس فازی-تصادفی برای رتبه‌بندی و انتخاب تأمین‌کنندگان بهینه در شرایط پیچیده

چکیده

در سال‌های اخیر، پیشرفت فناوری، پیچیدگی محیط کسب‌وکار و بحران‌هایی مانند همه‌گیری کرونا، لزوم بازنگری در مدیریت زنجیره تأمین را افزایش داده است. رویکرد «زنجیره تأمین بادوام» با تمرکز بر تاب‌آوری، پایداری، چابکی و دیجیتالی‌سازی، راهکاری نوین برای بهبود کارایی بلندمدت سازمان‌هاست. در این پژوهش، با هدف ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت عدم‌قطعیت، ابتدا معیارهای کلیدی با مرور ادبیات و نظرات خبرگان شناسایی و با روش بهترین–بدترین فازی–تصادفی وزن‌دهی شدند. سپس تأمین‌کنندگان با استفاده از روش تاپسیس فازی–تصادفی ارزیابی و رتبه‌بندی گردیدند. نتایج نشان داد علاوه بر معیارهای سنتی مانند هزینه و کیفیت، شاخص‌هایی نظیر وجود تأمین‌کنندگان پشتیبان، مدیریت ضایعات و رعایت شرایط منصفانه کاری اهمیت بالایی دارند. مطالعه موردی در صنعت تجهیزات پزشکی، اثربخشی مدل را در شناسایی تأمین‌کنندگان برتر و ارتقای عملکرد زنجیره تأمین تأیید کرد و بر ضرورت تمرکز مدیران بر معیارهای پایداری و بلندمدت به‌جای رویکردهای صرفاً اقتصادی تأکید نمود. نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه یک چارچوب تصمیم‌گیری دومرحله‌ای نوین است که به‌طور هم‌زمان ابعاد زنجیره تأمین بادوام، ساختار حلقه‌بسته و دو نوع عدم‌قطعیت فازی و تصادفی را در ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان ادغام می‌کند. استفاده هم‌زمان از روش بهترین–بدترین فازی–تصادفی برای وزن‌دهی معیارها و روش تاپسیس فازی–تصادفی برای رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان، قابلیت مدل را در مدیریت شرایط پیچیده و پر ابهام افزایش داده و آن را از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

*نویسنده مسئول:

irajarash@ustmb.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

انتخاب تأمین‌کننده

مدیریت زنجیره تأمین

زنجیره تأمین بادوام

بهترین-بدترین فازی تصادفی

تاپسیس فازی تصادفی

©۲۰۲۶ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

در دنیای پیچیده و رقابتی امروز، مدیریت زنجیره تأمین به یکی از محورهای اصلی در موفقیت سازمان‌ها تبدیل شده است (Mozafari & Savari, 2025). زنجیره تأمین مجموعه‌ای از فعالیت‌ها و فرآیندهایی را شامل می‌شود که از تأمین مواد اولیه آغاز شده و تا تحویل محصول نهایی به مشتری ادامه می‌یابد. هدف اصلی این سیستم، ارائه محصولات و خدمات باکیفیت، در زمان مناسب و با هزینه‌ای بهینه است (Gholamian, 2024). دستیابی به این هدف از طریق مدیریت مؤثر جریان مواد، اطلاعات و منابع در سراسر شبکه تأمین صورت می‌پذیرد و نقش مهمی در افزایش بهره‌وری و کسب مزیت رقابتی برای سازمان‌ها ایفا می‌کند (Babaei et al., 2023; Marques et al., 2024).

با گسترش دامنه رقابت، پیشرفت فناوری، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و وقوع اختلالات گسترده مانند بحران‌های جهانی، نگاه سنتی به زنجیره تأمین که تنها بر معیارهایی نظیر هزینه، زمان تحویل و کیفیت متمرکز بود، دیگر پاسخگوی نیازهای کنونی نیست (Sherafati et al., 2019). درنتیجه، معیارهایی نظیر پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی به‌عنوان ابعاد نوین زنجیره تأمین موردتوجه پژوهشگران و مدیران قرارگرفته‌اند. پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده که نشان‌دهنده ضرورت بازنگری در ساختارهای زنجیره تأمین برای پاسخ‌گویی به چالش‌های نوظهور است.

در این میان، یکی از مفاهیم کلیدی که در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای یافته، «زنجیره تأمین پایدار» است که به‌طور خاص به موضوعاتی چون کاهش ضایعات، مدیریت بهینه منابع طبیعی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بازیافت محصولات می‌پردازد (Tao et al., 2023). این نگرش، زمینه‌ساز شکل‌گیری شبکه‌های جدیدی از زنجیره تأمین‌شده که در آن‌ها نه‌تنها جریان رفت کالاها از تأمین‌کننده به مصرف‌کننده مدیریت می‌شود، بلکه جریان معکوس شامل بازگشت، بازیافت و بازفرآوری کالاهای مصرف‌شده یا معیوب نیز مدنظر قرار می‌گیرد (Asif & Albherat, 2024).

درنتیجه این تحول، مفهومی به نام زنجیره تأمین حلقه بسته شکل گرفته است. این رویکرد، با ادغام زنجیره تأمین روبه‌جلو و معکوس، ساختاری جامع و پایدار را ایجاد می‌کند که علاوه بر افزایش ارزش‌افزوده برای سازمان‌ها، در تحقق مسئولیت‌های زیست‌محیطی و اجتماعی نیز نقش‌آفرین است. چنین شبکه‌هایی با کاهش مصرف منابع، ارتقای بهره‌وری و پشتیبانی از اهداف پایداری، پاسخی راهبردی به الزامات جدید کسب‌وکارها در عصر کنونی محسوب می‌شوند (Lotfi et al., 2023).

از سویی دیگر، شیوع ویروس کرونا تأثیرات عمیق و چندبعدی بر زنجیره‌های تأمین جهانی بر جای گذاشت؛ به‌طوری‌که موجب اختلال در صنایع مختلف در سراسر جهان گردید و چالش‌های قابل‌توجهی را در شرایط عملیاتی حال و آینده ایجاد کرد. در برخی موارد، این بحران حتی منجر به تعطیلی کامل کسب‌وکارها شد. همه‌گیری کرونا بیش‌ازپیش بر اهمیت برخورداری از ساختارهای سازمانی، اطلاعاتی، فناورانه، مالی و عملکردیِ قدرتمند تأکید داشت؛ ساختارهایی که بتوانند از فروپاشی بازارها جلوگیری کرده و ثبات عملیاتی سازمان‌ها را تضمین نمایند. نمونه بارز این وضعیت را می‌توان در بحران ناشی از قرنطینه و اعمال محدودیت‌ها در شهر ووهان چین ـ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز صنعتی و تجاری جهان ـ مشاهده کرد؛ بحرانی که باعث ایجاد اختلالات گسترده در زنجیره‌های تأمین جهانی وابسته به این منطقه شد (Forouzeshnejad, 2023).

در واکنش به چنین اختلالاتی، پژوهشگران مفهومی جدید با عنوان «دوام زنجیره تأمین» را مطرح نموده‌اند. این مفهوم بر ضرورت توانمندی زنجیره‌های تأمین در مقابله با اختلالات، سازگاری با شرایط متغیر و درعین‌حال حفظ کارایی و اثربخشی تأکید دارد. زنجیره‌های تأمین بادوام با تلفیق اصولی همچون پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی، در تلاش‌اند تا حتی در مواجهه با بحران‌ها و شرایط پیش‌بینی‌نشده نیز تداوم ارائه کالا و خدمات را حفظ کنند (Ivanov, 2023)؛ بنابراین، مفهوم بادوام بودن به‌عنوان رویکردی راهبردی برای تحلیل و ارزیابی تاب‌آوری و پایداری بلندمدت زنجیره‌های تأمین مطرح‌شده و بر ضرورت باز ساختاردهی و بازنگری عملکرد آن‌ها در مواجهه با بحران‌های جهانی تأکید دارد، به‌گونه‌ای که این زنجیره‌ها بتوانند در محیطی پویا نه‌تنها دوام بیاورند، بلکه مسیر رشد و توسعه را نیز طی کنند (Ivanov, 2023; Zahari et al., 2023).

از سویی دیگر، صنعت تجهیزات پزشکی یکی از بخش‌های راهبردی و حیاتی در نظام‌های سلامت محسوب می‌شود که نقش اساسی در پیشگیری، تشخیص و درمان بیماری‌ها ایفا می‌کند. این صنعت با تولید و تأمین مجموعه‌ای گسترده از ابزارها و دستگاه‌های تخصصی، نقشی کلیدی در ارتقای کیفیت خدمات درمانی و تسهیل فرآیندهای مراقبت از بیماران دارد. توسعه فناوری‌های نوین، افزایش نیازهای جمعیتی، و رشد تقاضا برای خدمات بهداشتی موجب شده‌اند تا صنعت تجهیزات پزشکی به‌عنوان یکی از محورهای اصلی پیشرفت و پایداری نظام‌های بهداشتی در سطح ملی و بین‌المللی شناخته شود (Ala et al., 2024; Matli et al., 2022).

با توجه به گستردگی و تنوع محصولات این صنعت، مدیریت کارآمد زنجیره تأمین آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پیچیدگی در فرآیند تأمین مواد اولیه، حساسیت‌های کیفی، الزامات قانونی و استانداردهای ایمنی، همگی موجب شده‌اند که تصمیم‌گیری در این حوزه نیازمند رویکردهای دقیق و مدل‌های علمی مبتنی بر داده باشد. در همین راستا، پژوهش حاضر با تمرکز بر یک مطالعه موردی واقعی در صنعت تجهیزات پزشکی، تلاش می‌کند مدلی کاربردی برای ارتقای عملکرد زنجیره تأمین ارائه دهد و بدین‌وسیله سهمی در بهبود کارایی و پایداری این بخش کلیدی از نظام سلامت کشور ایفا نماید.

با توجه به اهمیت فزاینده مفاهیم مطرح‌شده در حوزه زنجیره تأمین و در راستای پر کردن شکاف‌های شناسایی‌شده در ادبیات پژوهش که در بخش بعدی به‌تفصیل ارائه خواهد شد، این پژوهش با هدف بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین، به ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن استراتژی‌های بادوام بودن و در شرایط عدم‌قطعیت اختصاص یافته است. برای دستیابی به این هدف، یک مدل تصمیم‌گیری دومرحله‌ای طراحی شده است. در مرحله نخست، با بهره‌گیری از مرور نظام‌مند ادبیات نظری و نظرات خبرگان، مجموعه‌ای از معیارهای مؤثر در انتخاب تأمین‌کنندگان شناسایی می‌شود. در ادامه، با به‌کارگیری روش بهترین-بدترین سناریو محور، وزن و اهمیت نسبی این معیارها تعیین می‌گردد.

در مرحله دوم، تأمین‌کنندگان بالقوه به‌عنوان گزینه‌های تصمیم معرفی‌شده و بر اساس معیارهای استخراج‌شده مورد ارزیابی و رتبه‌بندی قرار می‌گیرند. این فرآیند امکان شناسایی و انتخاب تأمین‌کنندگانی را فراهم می‌آورد که علاوه بر پاسخ‌گویی به الزامات عملیاتی، با رویکردهای پایداری، تاب‌آوری و بهره‌وری در چارچوب زنجیره تأمین حلقه بسته نیز هم‌راستا باشند. درنهایت، خروجی مدل می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در طراحی ساختاری کارآمدتر، انعطاف‌پذیرتر و متناسب با چالش‌های محیطی و اقتصادی کمک نماید.

به‌طورکلی، در این پژوهش، با هدف ارتقای دانش نظری و کاربردی در زمینه زنجیره تأمین بادوام، تلاش شده است به پرسش‌های کلیدی زیر پاسخ داده شود که هر یک ابعادی مهم از مسئله بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم‌قطعیت را پوشش می‌دهند:

۱) چگونه می‌توان شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته را با در نظر گرفتن اصول بادوام بودن و در شرایط عدم‌قطعیت به‌صورت بهینه مدیریت نمود؟

۲) مهم‌ترین معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در انتخاب تأمین‌کننده از منظر ابعاد زنجیره تأمین بادوام شامل چه مواردی هستند و چگونه می‌توان آن‌ها را شناسایی و اولویت‌بندی کرد؟

۳) در چارچوب یک زنجیره تأمین حلقه بسته، کدام‌یک از تأمین‌کنندگان موردبررسی در مطالعه موردی، بر اساس شاخص‌های زنجیره تأمین بادوام، به‌عنوان گزینه‌های برتر قابل انتخاب هستند؟

پاسخ به این پرسش‌ها می‌تواند زمینه‌ساز توسعه مدل‌هایی تصمیم‌یار برای انتخاب تأمین‌کنندگان در صنایع حساس و پیچیده باشد و درعین‌حال، به مدیران کمک کند تا در مسیر تحقق اهداف پایداری و تاب‌آوری گام بردارند.

نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه و به‌کارگیری یک چارچوب سناریومحور بر پایه روش بهترین–بدترین فازی–تصادفی برای ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام است. برخلاف اغلب مطالعات پیشین که عمدتاً بر معیارهای سنتی همچون هزینه و کیفیت تمرکز داشته‌اند، این تحقیق مجموعه‌ای جامع از ابعاد کلیدی شامل تاب‌آوری، پایداری، چابکی و دیجیتال‌سازی را به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته و با ترکیب داده‌های کیفی خبرگان و عدم‌قطعیت‌های دوگانه (شناختی و تصادفی) به مدلی با قابلیت انطباق بالا در

شرایط متغیر محیطی دست یافته است. همچنین، در این پژوهش تحلیل مقایسه‌ای با چندین روش تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شده تا پایداری و اعتبار مدل پیشنهادی تأیید شود. به‌کارگیری این رویکرد در صنعت تجهیزات پزشکی و ارائه پیامدهای مدیریتی عملی، تفاوت آشکار این مطالعه را با تحقیقات پیشین رقم می‌زند و ضرورت اجرای آن را از منظر علمی و کاربردی توجیه می‌کند.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش، به مرور مطالعات پیشین مرتبط با موضوع تحقیق پرداخته می‌شود. با توجه به ماهیت مسئله تحقیق و به‌منظور تحلیل دقیق‌تر پیشینه پژوهش، مطالب این فصل در سه بخش مجزا ساماندهی شده است. ابتدا مطالعات انجام‌شده در حوزه زنجیره تأمین بادوام موردبررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، پژوهش‌هایی که به بررسی چالش‌ها و تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین در شرایط عدم‌قطعیت پرداخته‌اند، ارائه می‌گردد. درنهایت، با تحلیل شکاف‌های موجود در ادبیات، جایگاه و نوآوری پژوهش حاضر تبیین خواهد شد.

۲-۱- زنجیره تأمین بادوام

همان‌طور که در بخش پیشین اشاره شد، در پی افزایش ناپایداری‌های محیطی و اقتصادی، ازجمله نوسانات تقاضا و بحران‌هایی مانند همه‌گیری کرونا، ضرورت بازنگری در شیوه‌های سنتی مدیریت زنجیره تأمین آشکار شد. در این راستا، مفهوم «زنجیره تأمین بادوام» به‌عنوان رویکردی نوین مطرح شده است که بر توانایی زنجیره در حفظ عملکرد و تداوم ارائه خدمات در مواجهه با اختلالات تأکید دارد (Zahari et al., 2023; Zekhnini et al., 2023). این رویکرد، به‌جای تمرکز صرف بر کارایی، به دنبال تقویت مقاومت و پایداری زنجیره در برابر بحران‌های پیش‌بینی‌ناپذیر است. در همین راستا، طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه زنجیره تأمین بادوام صورت گرفته است که در ادامه به‌طور تفصیلی موردبررسی قرار خواهند گرفت. ایوانف (۲۰۲۱)، به تحلیل عملکرد زنجیره‌های تأمین در دوران بحران ناشی از همه‌گیری ویروس کرونا پرداخته است. وی با بهره‌گیری از مرور نظام‌مند مطالعات پیشین، تحلیل داده‌های موردی و روش‌های کمی، چارچوبی یکپارچه متشکل از چهار راهبرد کلیدی شامل پایداری، تاب‌آوری، دیجیتال‌سازی و چابکی را ارائه داده است. این چارچوب می‌تواند به ارتقاء توان تطبیق‌پذیری زنجیره‌های تأمین در مواجهه با بحران‌های جهانی کمک کند و عملکرد آن‌ها را در شرایط بحرانی حفظ نماید (Ivanov, 2021). در پژوهشی دیگر لطفی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی کاربرد فناوری بلاک‌چین در طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار پرداختند. آنان یک مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای را توسعه دادند که در آن ابتدا مکان‌یابی تسهیلات و تصمیم‌گیری در خصوص پیاده‌سازی بلاک‌چین صورت گرفت و سپس جریان مواد میان اجزای شبکه تعیین گردید. مدل مذکور با استفاده از نرم‌افزار گمز حل و تحلیل شد. نتایج نشان داد که به‌کارگیری فناوری بلاک‌چین می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها تا حدود ۰/۹۹ درصد شود و به‌ویژه در شرایط تقاضای بالا، ازنظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه خواهد بود (Lotfi et al., 2021). کومار و همکاران (۲۰۲۱) نیز به طراحی شبکه‌ای بادوام برای زنجیره تأمین در صنعت خودروسازی هند پرداختند. آنان مدلی دومرحله‌ای ارائه نمودند که در مرحله نخست از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب بهترین معیارها بهره گرفتند و در مرحله دوم، از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای بهینه‌سازی تخصیص منابع و سفارش‌دهی استفاده کردند. مدل پیشنهادی با داده‌های یک مطالعه موردی اعتبارسنجی شد و با نرم‌افزار گمز به اجرا درآمد (Kumar et al., 2022).

مهدی و احمد (۲۰۲۲) نیز در تحقیق خود، مدلی چندمرحله‌ای برای طراحی شبکه زنجیره تأمین بادوام در حوزه سلامت توسعه دادند. این مدل شامل سطوح مختلفی از مراکز درمانی ازجمله مراکز سلامت، دستگاه‌های سی‌تی‌اسکن، بیمارستان‌ها و کلینیک‌ها بود و با هدف هدایت بیماران در مسیرهای گوناگون بهبود، قرنطینه خانگی یا بازگشت به زندگی عادی طراحی شد. سه هدف کلیدی این مدل شامل افزایش نرخ بهبودی، کاهش هزینه‌های کلی شبکه، و کاهش میزان مرگ‌ومیر ناشی از ویروس کرونا بود. در ادامه نیز عملکرد مدل پیشنهادی در مقایسه با وضعیت عادی تحلیل گردید (Matli et al., 2022). در مطالعه‌ای دیگر، لطفی و همکاران (۲۰۲۲) با هدف کاهش هزینه‌ها، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی برای زنجیره تأمین حلقه بسته با رویکرد بادوام

بودن و اقتصاد چرخشی ارائه دادند. نتایج حاصل از تحلیل یک مطالعه موردی در صنعت خودروسازی نشان داد که بهره‌گیری از این استراتژی‌ها می‌تواند هزینه‌ها را تا حدود ۴۴ درصد کاهش دهد (Lotfi et al., 2022).

زهیری و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی تجربی با داده‌های گردآوری‌شده از ۱۹۷ شرکت تولیدی در مالزی، به تحلیل تأثیر زنجیره تأمین بادوام بر پایداری سازمانی در دوران کرونا پرداختند. این تحلیل با بهره‌گیری از مدل‌سازی معادلات ساختاری و روش حداقل مربعات جزئی انجام شد. یافته‌ها حاکی از آن بود که استراتژی‌های بادوام زنجیره تأمین تأثیر مثبت و معناداری بر پایداری بنگاه‌های تولیدی دارد و می‌تواند به آن‌ها در پاسخگویی مؤثر به بحران‌ها کمک کند (Zahari et al., 2023). در مطالعه‌ای مرتبط، آجایی و لاسیند (۲۰۲۳) به بررسی زنجیره تأمین بادوام در بخش کشاورزی نیجریه و نقش فناوری‌های مبتنی بر اینترنت اشیا پرداختند. نتایج نشان داد که این فناوری‌ها، با کاهش ضایعات و ارتقاء تأمین بلندمدت نیازهای مصرف‌کنندگان، تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود عملکرد زنجیره تأمین کشاورزی در کشورهای درحال‌توسعه دارند (Ajayi & Laseinde, 2023). ژو و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌سازی مبتنی بر عامل، به شبیه‌سازی واکنش زنجیره‌های تأمین ناهمگن به اختلالات ناشی از کرونا پرداختند. در این مدل، سه راهبرد کلیدی شامل «ایجاد همکاری»، «برد-برد بودن مشارکت‌ها» و «اولویت‌بخشی به همکاری» بررسی شد. یافته‌ها نشان داد که همکاری میان تولیدکنندگان بزرگ و واحدهای کوچک‌تر، به افزایش دوام شبکه منجر می‌شود و تنظیم ظرفیت تولید یکی از مؤلفه‌های کلیدی موفقیت در دوران پس از بحران محسوب می‌شود (Zhu et al., 2024). لطفی و همکاران (۲۰۲۴) چارچوبی نوین برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین بادوام با تلفیق نوآوری باز و فناوری بلاک‌چین پیشنهاد کردند. این مدل با محوریت پاسخگویی به ترجیحات مشتری، از بلاک‌چین برای مدیریت شفاف تراکنش‌ها و از نوآوری باز برای توسعه محصولات بهره می‌برد. نتایج مدل نشان‌دهنده کاهش ۰/۲ درصدی در هزینه‌های کلی زنجیره تأمین بوده است (Lotfi et al., 2024).

پادووانو و ایوانف (۲۰۲۵) به بررسی اهمیت روزافزون تاب‌آوری و دوام زنجیره تأمین در مواجهه با اختلالات ناشی از تغییرات اقلیمی، تنش‌های ژئوپلیتیکی و تحولات ساختاری پرداختند. بدین منظور، یک چارچوب سه‌بعدی جامع برای سنجش تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین از منظر محصول، فرآیند، فناوری و نیروی انسانی ارائه و با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری بر اساس داده‌های ۶۵ خبره زنجیره تأمین اعتبارسنجی شد. همچنین، مطالعه موردی در زنجیره تأمین غلات در منطقه مدیترانه کاربرد چارچوب پیشنهادی را به‌صورت عملی نشان داد و راهکارهایی کاربردی برای تصمیم‌گیران و ذی‌نفعان ارائه کرد (Padovano & Ivanov, 2025). در پژوهشی دیگر، نیری و همکاران (۲۰۲۵) به مسئله انتخاب تأمین‌کننده با در نظر گرفتن ابعاد اقتصاد چرخشی، بادوام بودن و صنعت پنج پرداخته و یک مدل تصمیم‌گیری نوین برای ارزیابی عملکرد تأمین‌کنندگان ارائه کردند. در این پژوهش برای وزن‌دهی شاخص‌ها از روش بهترین-بدترین فازی تصادفی و برای ارزیابی نهایی از روش اصلاح‌شده کپراس فازی تصادفی استفاده شده است. مطالعه موردی در صنعت خودروسازی نشان داد شاخص‌هایی مانند پاسخ‌گویی، قابلیت اطمینان، هزینه، کیفیت، مدیریت پسماند، گازهای گلخانه‌ای، سیستم‌های اطلاعاتی و ایمنی شغلی از اهمیت بالایی برخوردارند (Nayeri et al., 2025).

۲-۲- عدم‌قطعیت در زنجیره تأمین

در محیط ناپایدار و پویای کسب‌وکار امروزی، یکی از چالش‌های اساسی در طراحی و مدیریت زنجیره تأمین، مقابله مؤثر با انواع مختلف عدم‌قطعیت است. بر اساس دسته‌بندی‌های رایج در ادبیات پژوهش، عدم‌قطعیت به سه نوع کلی شامل تصادفی، شناختی و عمیق تقسیم می‌شود. عدم‌قطعیت تصادفی در شرایطی رخ می‌دهد که داده‌های تاریخی کافی برای تخمین توزیع احتمالی وجود دارد، اما خروجی‌ها همچنان ماهیتی تصادفی دارند؛ به‌عنوان نمونه می‌توان به وقوع اختلالات ناگهانی در زنجیره تأمین اشاره کرد. در مقابل، عدم‌قطعیت شناختی زمانی مطرح می‌شود که اطلاعات موجود ناکامل است و برای تحلیل آن معمولاً از قضاوت کارشناسانه یا روش‌هایی نظیر منطق فازی بهره گرفته می‌شود. نوع سوم، عدم‌قطعیت عمیق، مربوط به شرایطی است که در آن اطلاعات بسیار محدود بوده و تنها حدود تقریبی برای پارامترها قابل‌تعیین است (Asadi et al., 2022; Babaei et al., 2024). هریک از این انواع عدم‌قطعیت مستلزم به‌کارگیری روش‌ها و

مدل‌سازی‌های خاصی است تا زنجیره تأمین بتواند در برابر ناپایداری‌ها، اختلالات و تغییرات پیش‌بینی‌نشده عملکرد خود را حفظ کند. در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به تحلیل و مدیریت این مسئله افزایش یافته و مطالعات متعددی با هدف ارتقاء تاب‌آوری و بهینه‌سازی عملکرد زنجیره تأمین در شرایط عدم‌قطعیت ارائه شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

در پژوهشی همایونی و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه لجستیکی چند دوره‌ای با رویکرد پایداری تحت شرایط عدم‌قطعیت تصادفی ارائه نمودند. در این مدل، عدم‌قطعیت از طریق برنامه‌ریزی استوار مدیریت گردید و برای حل آن، رویکردی ترکیبی متشکل از برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای و الگوریتم ابتکاری به کار گرفته شد (Homayouni et al., 2023).

گووینداندان و قلی زاده (۲۰۲۱) مدلی به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس در صنعت خودروسازی ارائه نمودند که در آن، ابعاد پایداری و تاب‌آوری در شرایط عدم‌قطعیت تصادفی موردتوجه قرار گرفته است. برای مدیریت عدم‌قطعیت‌ها، از رویکرد برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شد. همچنین، جهت حل مدل پیشنهادی، نسخه پیشرفته‌ای از الگوریتم کراس آنتروپی به کار گرفته شد تا کارایی و دقت نتایج افزایش یابد (Govindan & Gholizadeh, 2021). در پژوهشی دیگر، حبیب و همکاران (۲۰۲۲) مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین تاب‌آور در شرایط عدم‌قطعیت شناختی ارائه دادند. در این مدل، تصمیمات استراتژیک نظیر مکان‌یابی تسهیلات و ظرفیت آن‌ها هم‌زمان با تعیین مقادیر بهینه تولید و توزیع، در نظر گرفته شده است. جهت مدیریت عدم‌قطعیت، رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی به‌کاررفته و برای حل مدل نیز از روش تعاملی استفاده شده است (Habib et al., 2022).

دی لیما و سیورینگ (۲۰۲۳) به شناسایی ریسک‌ها و عدم‌قطعیت‌هایی پرداخته‌اند که مانع اجرای مؤثر زنجیره‌های تأمین چرخشی می‌شوند. نوع عدم‌قطعیت در نظر گرفته‌شده شامل ابعاد شناختی، عملیاتی، فناورانه و اقتصادی است. برای این منظور، از روش دلفی سه‌مرحله‌ای با مشارکت متخصصان صنعتی، دولتی، غیردولتی و دانشگاهی از ۱۸ کشور استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ریسک‌هایی نظیر هزینه‌های مالی نامشخص، کمبود دانش، نوسانات منابع ثانویه، رقابت با شرکت‌های خطی و نبود چارچوب‌های قانونی مناسب وجود دارند. برای مدیریت این چالش‌ها، راهبردهای کاهشی (همکاری بین‌سازمانی، طراحی چرخشی) و راهبردهای مقابله‌ای (اشتراک اطلاعات، انعطاف‌پذیری، مدیریت ریسک مالی) پیشنهاد شده‌اند (De Lima & Seuring, 2023). بل هادی و همکاران (۲۰۲۴)، به بررسی چگونگی بهره‌گیری شرکت‌های کشاورزی آفریقایی از فناوری‌های دیجیتال برای طراحی راهبردهای تاب‌آوری در برابر عدم‌قطعیت‌های ناشی از رویدادهای ژئوپلیتیکی، مانند تهاجم روسیه به اوکراین، پرداختند. درنهایت، محققین یک چارچوب مفهومی برای مدیریت عدم‌قطعیت شناختی در زنجیره‌های تأمین آسیب‌پذیر ارائه کردند (Belhadi et al., 2024).

دهشیری و امیری (۲۰۲۴) محققین به بررسی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با هدف تحقق اصول اقتصاد چرخشی پرداخته‌اند. با توجه به ماهیت بلندمدت تصمیمات، پژوهش به‌صورت هم‌زمان به عدم‌قطعیت‌های تصادفی و شناختی پرداخته و برای مدیریت آن‌ها یک رویکرد سناریومحور ترکیبی فازی-تصادفی ارائه داده است. نوآوری‌های اصلی شامل در نظر گرفتن هم‌زمان دو نوع عدم‌قطعیت، توسعه معیار تصمیم‌گیری با استفاده از نظرات خبرگان و ارائه شاخصی برای سنجش انحراف فازی است. مطالعه موردی در صنعت کاغذ نشان داد که مدل پیشنهادی از دقت و پایداری بالایی برخوردار بوده و قادر است راه‌حل‌هایی انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر شرایط مختلف عدم‌قطعیت ارائه دهد (Dehshiri & Amiri, 2024).

لیو و همکاران (۲۰۲۵) به مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین در شرایط اختلال و عدم‌قطعیت پرداخته‌اند. نوع عدم‌قطعیت در نظر گرفته‌شده در این پژوهش، ترکیبی از عدم‌قطعیت تصادفی و شناختی است که در آن تقاضا به تصمیمات مکان‌یابی و وقوع اختلالات وابسته فرض شده است. محققین یک مدل تصمیم‌گیری دومرحله‌ای تصادفی استوار بر پایه سناریوها و مجموعه عدم‌قطعیت جعبه‌ای ارائه کرده‌اند. نتایج پژوهش حاکی از اثربخشی و پایداری بالای این مدل در مواجهه با شرایط بحرانی است. چن و همکاران (۲۰۲۵) به بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه‌بسته غذایی با اقلام حمل‌ونقل بازگشت‌پذیر در شرایط فسادپذیری محصول، مکان‌یابی و تقاضای غیرقطعی با اطلاعات محدود

پرداخته‌اند. نوع عدم‌قطعیت، تصادفی با اطلاعات ناکامل است. یک مدل غیرخطی با محدودیت‌های احتمالی ارائه و با دو روش آماری به مدل خطی تبدیل شده است. برای مسائل بزرگ‌مقیاس نیز الگوریتم لاگرانژ بهبودیافته پیشنهادشده که نسبت به روش‌های رایج، دقت و سرعت بالاتری دارد. نتایج نشان می‌دهد افزایش ماندگاری و ظرفیت تولید می‌تواند هزینه و ریسک را کاهش دهد، اما سرمایه‌گذاری بیش‌ازحد بازده بیشتری ندارد (Chen et al., 2025).

۲-۳- شکاف پژوهش و سهم پژوهش حاضر

با بررسی و مرور پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه زنجیره تأمین مشخص گردید که علی‌رغم رشد قابل‌توجه ادبیات علمی، همچنان خلأهای پژوهشی متعددی وجود دارند که نیازمند مطالعه عمیق‌تر و دقیق‌تر هستند. بیشتر مطالعات پیشین معمولاً بر یکی از ابعاد در نظر گرفته شده در این پژوهش تأکید کرده و کمتر به ارائه مدلی جامع و یکپارچه پرداخته‌اند که هم‌زمان اصول زنجیره تأمین بادوام و ساختار حلقه‌بسته را لحاظ کند.

علاوه بر این، بررسی ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین اغلب تنها به یکی از انواع عدم‌قطعیت موجود در زنجیره تأمین (مانند عدم‌قطعیت تصادفی یا عدم‌قطعیت شناختی) توجه کرده‌اند و به‌ندرت به ترکیب این دو نوع عدم‌قطعیت در یک مدل واحد پرداخته‌اند. در واقع، فقدان مطالعاتی که هم‌زمان دو نوع عدم‌قطعیت فازی (شناختی) و تصادفی را به‌منظور ارزیابی جامع‌تر و واقعی‌تر تأمین‌کنندگان در ساختار زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام در نظر بگیرند، یکی از مهم‌ترین شکاف‌های موجود در پژوهش‌های کنونی محسوب می‌شود.

از طرف دیگر، روش‌ها و مدل‌هایی که تاکنون برای ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان در این حوزه به کار گرفته شده‌اند، معمولاً محدود به مدل‌های تصمیم‌گیری ساده یا با یک نوع عدم‌قطعیت بوده و توانایی کافی برای ارائه راهکارهایی جامع و کاربردی در محیط‌های پیچیده و چندبعدی را ندارند.

در این راستا، پژوهش حاضر در راستای رفع شکاف‌های ذکرشده، یک مدل تصمیم‌گیری دومرحله‌ای نوآورانه ارائه کرده است که به‌صورت هم‌زمان ابعاد مختلف زنجیره تأمین بادوام و حلقه‌بسته و نیز دو نوع عدم‌قطعیت فازی (شناختی) و تصادفی را در مسئله ارزیابی تأمین‌کنندگان ادغام می‌کند. سهم این پژوهش به‌طور مشخص در موارد زیر خلاصه می‌شود:

- توسعه یک مدل تصمیم‌گیری دومرحله‌ای: در مرحله اول با مرور نظام‌مند ادبیات نظری و با بهره‌گیری از نظرات خبرگان، مجموعه کاملی از معیارهای مؤثر در انتخاب تأمین‌کنندگان متناسب با اصول بادوام بودن و حلقه بسته بودن زنجیره تأمین شناسایی و استخراج‌شده‌اند.
- بهره‌گیری از روش‌های نوین وزن‌دهی و ارزیابی در شرایط عدم‌قطعیت: پژوهش حاضر با ترکیب دو رویکرد عدم‌قطعیت فازی و تصادفی، از روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی به‌منظور تعیین وزن و اهمیت نسبی معیارهای انتخاب تأمین‌کنندگان استفاده کرده است. همچنین برای ارزیابی و رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان بالقوه، از روش تاپسیس فازی-تصادفی بهره برده که توانایی بیشتری برای مواجهه با شرایط پیچیده و مبهم دارد.
- ارائه چارچوب یکپارچه برای ارزیابی جامع تأمین‌کنندگان: مدل پیشنهادی در این تحقیق، علاوه بر پاسخگویی به الزامات عملیاتی و اقتصادی متداول، توانسته است الزامات زیست‌محیطی، اجتماعی و استراتژیک را نیز به‌طور کامل پوشش دهد و به مدیران زنجیره تأمین ابزاری کاربردی و دقیق برای انتخاب تأمین‌کنندگان متناسب با اهداف بلندمدت و استراتژیک سازمان ارائه کند.
- اعتبارسنجی مدل با مطالعه موردی واقعی: برای اثبات قابلیت اجرا و کاربردی بودن مدل ارائه‌شده، مطالعه موردی در صنعت تجهیزات پزشکی انجام‌شده که نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده اثربخشی، دقت و کارایی بالای مدل در تصمیم‌گیری عملیاتی و استراتژیک است.

به‌طورکلی، پژوهش حاضر با ارائه این چارچوب یکپارچه و نوآورانه، به دانش نظری و کاربردی در حوزه مدیریت زنجیره تأمین بادوام و حلقه‌بسته کمک کرده و مبنایی ارزشمند برای پژوهش‌های آتی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در این زمینه فراهم آورده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از مطالعات پیشین

Table 1. Summary of previous studies

نویسندگان	مساله تحقیق			بادوام بودن				عدم‌قطعیت	
	تأمین‌کنندگان	ارزیابی	سایر زنجیره مسائل	پایداری	تاب‌آوری	چابکی	دیجیتال‌سازی	تصادفی	شناختی
ایوانف و همکاران (۲۰۲۱)	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–
لطفی و همکاران (۲۰۲۱)	–	✓	✓	✓	–	–	✓	–	–
کومار و همکاران (۲۰۲۲)	–	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–
مهدوی و احمد (۲۰۲۲)	–	✓	✓	–	✓	✓	✓	–	–
لطفی و همکاران (۲۰۲۲)	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–
زهیری و همکاران (۲۰۲۳)	–	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–
آجایی و لاسینده (۲۰۲۳)	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–
ژو و همکاران (۲۰۲۴)	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–
لطفی و همکاران (۲۰۲۴)	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–
نیری و همکاران (۲۰۲۵)	✓	–	✓	✓	✓	–	–	✓	✓
گووییندان و همکاران (۲۰۲۰)	✓	–	✓	✓	✓	–	–	✓	–
همایونی و همکاران (۲۰۲۱)	–	✓	✓	✓	–	✓	✓	–	–
گووییندان و قلی زاده (۲۰۲۱)	–	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	✓
دلیما و همکاران (۲۰۲۳)	–	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓
لیو و همکاران (۲۰۲۵)	–	✓	✓	✓	-	-	–	✓	✓
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

۳- روش تحقیق

گام نخست شناسایی و استخراج جامع معیارها و زیرمعیارهای کلیدی مسئله از طریق مرور عمیق ادبیات نظری و مصاحبه با خبرگان است. در مرحله بعد، جهت تعیین اهمیت نسبی و وزن‌دهی دقیق به این معیارها و زیرمعیارها، از تصمیم‌گیری بهترین-بدترین در شرایط فازی-تصادفی استفاده شد. سپس برای ارزیابی و اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان بالقوه به‌عنوان گزینه‌های نهایی، روش تصمیم‌گیری تاپسیس تحت شرایط عدم‌قطعیت فازی-تصادفی به کار گرفته شد تا تأمین‌کنندگان برتر شناسایی و معرفی گردند. چارچوب کلی و مراحل اجرایی در شکل ۱ ارائه شده است.

۳-۱- روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی

یکی از روش‌های رایج در وزن‌دهی معیارها در تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش بهترین-بدترین است. این روش مبتنی بر مقایسات زوجی بوده و برخلاف روش تحلیل سلسله مراتبی که تمامی معیارها به‌صورت دوبه‌دو مقایسه می‌شوند، تنها بهترین و بدترین معیار شناسایی‌شده و سایر معیارها فقط با این دو مقایسه می‌گردند (Avazpoor et al., 2025). این امر موجب کاهش قابل‌توجه در تعداد مقایسات موردنیاز می‌شود که علاوه بر افزایش سهولت و دقت جمع‌آوری داده‌ها، به کاهش ناسازگاری در قضاوت‌های خبرگان نیز کمک می‌کند (Bayatzadeh & Talaie, 2024). روش کلاسیک بهترین-بدترین مبتنی بر قضاوت‌ها و مقایسات زوجی قطعی است که نمی‌تواند به‌خوبی در محیط‌هایی با نوسانات و عدم‌قطعیت بالا عملکرد مطلوبی داشته باشد. به همین دلیل، پژوهشگران روش بهترین-بدترین را به حالت‌های گوناگونی همچون فازی، خاکستری و راف تعمیم داده‌اند تا بتواند با شرایط عدم‌قطعیت به نحو مؤثرتری مواجه شود (Avazpoor et al., 2025). همچنین، انواع دیگری از این روش مانند بهترین-بدترین تصادفی و

بهترین-بدترین فازی-تصادفی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف توسط محققین توسعه داده شده است.

شکل ۱. چارچوب کلی تحقیق حاضر.

Figure 1. General framework of the present research.

جدول ۲. متغیرهای زبانی روش بهترین-بدترین فازی

Table 2. Linguistic variables of the best-worst fuzzy method

متغیر زبانی	اهمیت برابر (EI)	اهمیت کم (WI)	نسبتاً مهم (FI)	خیلی مهم (VI)	کاملاً مهم (AI)
تابع عضویت	(۱، ۱، ۱)	(۰/۶۷، ۱، ۱/۵)	(۱/۵، ۲، ۲/۵)	(۲/۵، ۳، ۳/۵)	(۳/۵، ۴، ۴/۵)

جدول ۳. شاخص سازگاری روش بهترین-بدترین فازی

Table 3. Best-Worst Fuzzy Method Compatibility Index

مقایسات	شاخص سازگاری (CI)
(AI)	۸/۰۴
(VI)	۶/۶۹
(FI)	۵/۲۹
(WI)	۳/۸
(EI)	۳

در این مقاله، برای محاسبه وزن معیارها از روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی استفاده شده که در واقع نسخه‌ای توسعه‌یافته و مبتنی بر سناریو از روش بهترین-بدترین فازی است. در این مدل، ابتدا بهترین و بدترین معیار شناسایی شده و سپس مقایسات زوجی بین هر معیار با معیار بهترین و بدترین، به‌صورت اعداد فازی و در قالب سناریوهای مختلف (نظیر خوش‌بینانه، بدبینانه و محتمل) و بر اساس طیف زبانی معینی که در جدول **۲** آمده است، انجام می‌شود. به‌صورت کلی، انتخاب روش «بهترین–بدترین فازی–تصادفی» در این پژوهش به دلایل متعددی صورت گرفته است. نخست، این روش در مقایسه با روش‌های متداول مانند «فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی» و «بهترین–بدترین» کلاسیک، به تعداد مقایسات زوجی کمتری نیاز دارد و ازاین‌رو، بار شناختی پاسخ‌دهندگان را کاهش داده و نرخ ناسازگاری را بهبود می‌بخشد. دوم، نسخه فازی–تصادفی این روش امکان ترکیب هم‌زمان دو نوع عدم‌قطعیت، یعنی عدم‌قطعیت شناختی و عدم‌قطعیت تصادفی را فراهم می‌کند، درحالی‌که روش‌های کلاسیک عمدتاً تنها یکی از این دو نوع را پوشش می‌دهند. سوم، استفاده از سناریوهای مختلف شامل خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه در این روش باعث می‌شود وزن‌دهی معیارها منعکس‌کننده شرایط متغیر و پویای محیط تصمیم‌گیری باشد. درنتیجه، روش بهترین–بدترین فازی–تصادفی نه‌تنها دقت و پایداری بیشتری در نتایج ایجاد می‌کند، بلکه نسبت به روش‌های جایگزین، توانایی بالاتری در مدل‌سازی شرایط پیچیده و پر نوسان زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام دارد. این ویژگی‌ها، انتخاب این روش را برای مسئله حاضر موجه و کارآمد می‌سازد. در گام بعدی، وزن هر معیار در هر سناریو به شکل یک عدد فازی محاسبه شده و نهایتاً وزن نهایی هر معیار از طریق یک مدل ریاضی سناریومحور با هدف کمینه کردن نرخ ناسازگاری انتظاری به دست می‌آید. برای ارزیابی میزان سازگاری مدل نیز از نرخ ناسازگاری بهینه به‌دست‌آمده و شاخص سازگاری مربوط در جدول **۳**، استفاده می‌شود. مدل ریاضی مربوط به این روش به‌صورت زیر ارائه می‌گردد (Nayeri et al., 2023).

$$\min \sum_{s} PS_s . \tilde{\xi}_s^* \qquad (۱)$$

S.t:

$$\left| \frac{(l_{Bs}^w, m_{Bs}^w, u_{Bs}^w)}{(l_{js}^w, m_{js}^w, u_{js}^w)} - (l_{Bjs}, m_{Bjs}, u_{Bjs}) \right| \leq (k_s{}^*, k_s{}^*, k_s{}^*) \qquad \forall j, s$$

$$\left|\frac{(l_{js}^{w}, m_{js}^{w}, u_{js}^{w})}{(l_{Ws}^{w}, m_{Ws}^{w}, u_{Ws}^{w})} - (l_{jWs}, m_{jWs}, u_{jWs})\right| \le (k_s^{*}, k_s^{*}, k_s^{*}) \quad \forall j,s$$

$$\sum_{j=1}^{n} R(\tilde{w}s_{js}) = 1, \quad \forall s$$

$$l_{js}^{w} \le m_{js}^{w} \le u_{js}^{w} \quad \forall j,s$$

$$w_j = \sum_{s} PS_s R(\tilde{w}s_{js}) \quad \forall j$$

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

در مدل بالا، PS_s و $\tilde{\xi}_s^{*}$ به ترتیب احتمال وقوع سناریو s و میزان نرخ ناسازگاری در سناریو s می‌باشد. همچنین $(l_{Bjs}, m_{Bjs}, u_{Bjs})$ و نیز به ترتیب مقایسه زوجی فازی بهترین $(l_{jWs}, m_{jWs}, u_{jWs})$ معیار با سایر معیارها و مقایسه زوجی سایر معیارها با بدترین معیار در سناریو s می‌باشد. وزن نهایی به‌دست‌آمده برای هر معیار نیز با $(l_{js}^{w}, m_{js}^{w}, u_{js}^{w})$ نشان داده می‌شود.

۲-۳- روش تاپسیس فازی-تصادفی

در گام دوم چارچوب پژوهش، برای ارزیابی تأمین‌کنندگان بر مبنای معیارهای پژوهش، از نسخه توسعه‌یافته‌ای از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس استفاده شده است. این روش به دلیل سادگی مفهومی و توانایی در کار با شاخص‌های کمی و کیفی با ماهیت مثبت و منفی، کاربرد گسترده‌ای در رتبه‌بندی گزینه‌ها دارد (Kashanian Monfared et al., 2025) و (Yazdani Hoshyar & Keshvari, 2023).

با توجه به اینکه تصمیم‌گیری در دنیای واقعی همواره با نوعی از عدم‌قطعیت همراه است، نسخه‌های مختلفی از این روش مانند تاپسیس فازی و تاپسیس خاکستری برای لحاظ کردن عدم‌قطعیت توسعه یافته‌اند. بااین‌حال، این نسخه‌ها عمدتاً از در نظر گرفتن دیدگاه‌های متغیر تصمیم‌گیرندگان در شرایط مختلف، نظیر سناریوهای خوش‌بینانه یا بحرانی، غافل مانده‌اند. برای مثال، معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان در دوران پیش از همه‌گیری کووید-۱۹ ممکن است با دوران پس‌ازآن متفاوت باشد (Sun et al., 2024)، (Dursun & Ogunclu, 2021) و (Leong et al., 2022).

ازآنجاکه مسئله تحقیق حاضر با دو نوع عدم‌قطعیت تصادفی و شناختی روبروست، از روش «تاپسیس فازی تصادفی» بهره گرفته شده است. انتخاب روش «تاپسیس فازی–تصادفی» در این پژوهش بر اساس ملاحظات علمی و عملی صورت گرفته است. نخست، این روش قابلیت مدل‌سازی هم‌زمان دو نوع عدم‌قطعیت را دارد: عدم‌قطعیت شناختی که ناشی از ابهام و قضاوت‌های ذهنی خبرگان است، و عدم‌قطعیت تصادفی که از نوسانات و تغییرات احتمالی در داده‌ها ناشی می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود مدل پیشنهادی بتواند شرایط واقعی و پویا را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند. دوم، تاپسیس فازی–تصادفی امکان رتبه‌بندی گزینه‌ها را بر اساس فاصله آن‌ها از ایده‌آل مثبت و منفی فراهم می‌کند که این امر وضوح و تفسیرپذیری نتایج را افزایش می‌دهد. سوم، استفاده از این روش در کنار تحلیل سناریومحور، انعطاف‌پذیری تصمیم‌گیری را بالا برده و به مدیران کمک می‌کند در مواجهه با تغییرات محیطی، انتخاب‌های پایدارتری داشته باشند. این مزایا، تاپسیس فازی–تصادفی را به گزینه‌ای مناسب برای حل مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام تحت شرایط عدم‌قطعیت تبدیل کرده است (Asadi et al., 2025). در ادامه، ساختار ریاضی و مراحل اجرای این روش معرفی می‌گردد.

فرض کنید که در مسئله تصمیم‌گیری S سناریو محتمل در نظر گرفته شده که با اندیس s مشخص می‌گردد. همچنین، مجموعه‌ای شامل N معیار (j) و M گزینه (i) وجود دارد که باید بر اساس آن‌ها ارزیابی انجام شود. در نخستین گام از فرایند تحلیل، لازم است ماتریس تصمیم فازی سه‌بعدی با ابعاد $M \times N \times S$ تشکیل گردد که آن را با $D_{M\times N\times S}$ نمایش می‌دهیم. این ماتریس بر پایه ارزیابی خبرگان و در چارچوب یک طیف فازی تعریف‌شده در جدول **۴**، تکمیل می‌شود. هر عنصر این ماتریس با $\tilde{x}_{ijs} = (x_{ijs}^{l}, x_{ijs}^{m}, x_{ijs}^{u})$ نمایش داده می‌شود، که نشان‌دهنده مقدار فازی تخصیص‌یافته به گزینه i بر اساس معیار j در سناریوی s است. در اینجا، مقادیر x^{l}, x^{m}, x^{u} به ترتیب بیانگر کران پایین، مقدار محتمل و کران بالای ارزیابی فازی هستند.

در مرحله بعد، به‌منظور یکسان‌سازی مقیاس معیارها، ماتریس تصمیم فازی نرمال‌سازی می‌شود. این فرآیند با استفاده از روابط زیر و متناسب با نوع معیار (مثبت یا منفی) انجام می‌گیرد تا امکان مقایسه مستقیم گزینه‌ها فراهم شود.

$$\tilde{n}_{ijs} = \left(\frac{x^l_{ijs}}{u^*_{js}}, \frac{x^m_{ijs}}{u^*_{js}}, \frac{x^u_{ijs}}{u^*_{js}}\right) where\ u^*_{js} = \max_s\{x^u_{ijs}\}\ if\ the\ indicator\ is\ a\ posotive \quad (۲)$$

$$\tilde{n}_{ijs} = \left(\frac{l^-_{js}}{x^u_{ijs}}, \frac{l^-_{js}}{x^m_{ijs}}, \frac{l^-_{js}}{x^l_{ijs}}\right) where\ l^-_{js} = \min_s\{x^l_{ijs}\}\ if\ the\ indicator\ is\ a\ negative$$

در مرحله بعد، ماتریس تصمیم نرمال‌سازی‌شده با وزن معیارها ترکیب می‌شود تا ماتریس بی‌مقیاس‌شده وزنی حاصل گردد. برای این منظور، هر عنصر نرمال‌سازی‌شده در وزن معیار متناظر خود ضرب می‌شود ($\tilde{V}_{ijs} = w_j \times \tilde{N}_{ijs}$). سپس با در نظر گرفتن PS_s به‌عنوان احتمال وقوع سناریوی S، و استفاده از امید ریاضی، می‌توان ماتریس تلفیقی $\tilde{Q}_{ij}$ را محاسبه نمود که تأثیر تمام سناریوها را به‌صورت تجمیعی در بر دارد.

جدول ۴. متغیرهای زبانی روش تاپسیس فازی

Table 4. Linguistic variables of the fuzzy TOPSIS method

درجه اهمیت	اعداد فازی
بسیار ضعیف	(۰/۰، ۰/۰، ۰/۰)
ضعیف	(۰/۰، ۰/۲، ۰/۳۵)
نسبتاً ضعیف	(۰/۰، ۰/۳۵، ۰/۵)
متوسط	(۰/۳۵، ۰/۵، ۰/۶۵)
نسبتاً خوب	(۰/۵، ۰/۶۵، ۰/۸)
خوب	(۰/۶۵، ۰/۸، ۰/۹۵)
بسیار خوب	(۰/۸، ۱، ۱)

در گام بعد، راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی با استفاده از روابط (۳) و (۴) تعیین می‌شوند. پس‌ازآن، فاصله هر گزینه از این راه‌حل‌های ایده‌آل، به‌صورت تجمیعی و با استفاده از روابط (۵) تا (۷) محاسبه می‌گردد تا مبنایی برای ارزیابی نهایی فراهم شود.

$$A^+ = (\tilde{q}^+_1, \tilde{q}^+_2, \dots, \tilde{q}^+_i)\ where\ \tilde{q}^+_j = \max_i\{q^u_{ij}\} \quad (۳)$$

$$A^- = (\tilde{q}^-_1, \tilde{q}^-_2, \dots, \tilde{q}^-_i)\ where\ \tilde{q}^-_j = \min_i\{q^l_{ij}\} \quad (۴)$$

$$d^+_i = \sum_j Dv(\tilde{q}_{ij}, \tilde{q}^+_j) \quad (۵)$$

$$d^-_i = \sum_j Dv(\tilde{q}_{ij}, \tilde{q}^-_j) \quad (۶)$$

$$Dv\left(\widetilde{F1} = (l_1, m_1, u_1), \widetilde{F2} = (l_2, m_2, u_2)\right) = \sqrt{\frac{1}{3}.[(l_1 - l_2)^2 + (m_1 - m_2)^2 + (u_1 - u_2)^2]} \quad (۷)$$

در پایان فرآیند تحلیل، برای هر گزینه مقدار شاخص ترجیح تاپسیس ($\boldsymbol{C_i}$) محاسبه می‌گردد. این شاخص بر پایه نسبت فاصله گزینه موردنظر از راه‌حل ایده‌آل منفی به مجموع فواصل آن از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی و بر اساس رابطه ۸ به دست می‌آید:

$$C_i = \frac{d^-_i}{d^-_i + d^+_i} \quad (۸)$$

امتیاز یا وزن نهایی هر معیار نیز با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد که این امتیاز نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر گزینه در میان سایر گزینه‌ها می‌باشد و مبنای تصمیم‌گیری نهایی قرار می‌گیرد.

$$VS_i = \frac{C_i}{\sum_i C_i} \quad (۹)$$

۴- مطالعه موردی

مطالعه زنجیره تأمین در صنعت تجهیزات پزشکی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چرا که این صنعت نقشی حیاتی در حفظ سلامت جوامع و پشتیبانی از عملکرد نظام‌های درمانی ایفا می‌کند. حساسیت بالای محصولات، تنوع تقاضا، الزامات سخت‌گیرانه در رعایت استانداردهای کیفی و ایمنی، و تأثیر مستقیم اختلالات عرضه بر سلامت بیماران، همگی ضرورت مدیریت کارآمد زنجیره تأمین در این حوزه را آشکار می‌سازد. تجربه بحران‌هایی همچون همه‌گیری کووید-۱۹ نشان داده است که ضعف در انعطاف‌پذیری، تاب‌آوری یا هماهنگی میان اجزای زنجیره می‌تواند به کمبود تجهیزات حیاتی و تهدید جدی جان بیماران منجر شود. بر این اساس، تحلیل علمی زنجیره تأمین این صنعت با هدف شناسایی عوامل کلیدی موفقیت و ارتقای قابلیت پاسخگویی در شرایط عادی و بحرانی، ضرورتی انکارناپذیر است.

در پاسخ به این چالش‌ها، پژوهش حاضر به تحلیل و حل مسئله انتخاب تأمین‌کننده برای شرکت «ابتکار تجهیز طب یکتا» اختصاص یافته است که شرکتی پیشرو در حوزه طراحی و تولید تجهیزات پزشکی و آزمایشگاهی که علاوه بر تولید، خدمات پس از فروش شامل نگهداری و تعمیرات را نیز ارائه می‌دهد. معیارها و زیرمعیارهای مورداستفاده در این پژوهش از ترکیب سه منبع اصلی استخراج‌شده‌اند. نخست، مرور ادبیات پژوهش در زمینه زنجیره تأمین بادوام، حلقه بسته و انتخاب تأمین‌کننده تحت عدم‌قطعیت ازجمله

Ivanov, 2023; Lotfi et al., 2022; Nayeri et al., 2025) که مبنای شناسایی معیارهای عمومی و تخصصی قرار گرفته و بر شاخص‌هایی مانند هزینه، کیفیت، مدیریت ضایعات و تاب‌آوری تأکید داشته است. دوم، نظر خبرگان که از طریق مصاحبه‌های ساختاریافته با کارشناسان صنعت تجهیزات پزشکی شامل مدیران تأمین، مدیران تولید و متخصصان پایداری جمع‌آوری‌شده و نقش مهمی در اعتبارسنجی و بومی‌سازی معیارها، به‌ویژه در شناسایی مواردی همچون «تأمین‌کنندگان پشتیبان»، «حقوق و شرایط کاری منصفانه» و «سازگاری فناوری» ایفا کرده است. سوم، الزامات عملیاتی و ویژگی‌های خاص عدم‌قطعیت ترکیبی که با توجه به حساسیت بالای این صنعت، لزوم رعایت استانداردهای ایمنی و کیفی، و مواجهه با ریسک‌های چندگانه (ترکیب عدم‌قطعیت تصادفی و شناختی) بر اهمیت ابعادی همچون انعطاف‌پذیری در تولید، ذخایر استراتژیک، امنیت سایبری و شایستگی دیجیتال تأکید داشته است. درنتیجه، مجموعه معیارهای نهایی این پژوهش شامل پنج بعد اصلی یادشده است که هر یک به همراه زیرمعیارهای مرتبط، همسو با اهداف زنجیره تأمین بادوام و شرایط عملیاتی صنعت موردمطالعه، در جداول **۵** تا **۹** ارائه شده‌اند.

جدول ۵. معیارهای عمومی

Table 5. General criteria

معیار	تعریف
کاهش هزینه	کاهش مجموع هزینه‌های مرتبط با زنجیره تأمین
سطح کیفیت	میزان انطباق محصولات یا خدمات با استانداردهای مورد انتظار و نیازهای مشتری
زمان تحویل	مدت زمان لازم برای رساندن محصولات یا خدمات از لحظه سفارش تا تحویل نهایی
سطح سرویس	توانایی تأمین‌کننده در ارائه خدمات پشتیبانی، پاسخگویی، و رفع مشکلات پس از فروش

جدول ۶. معیارهای پایداری

Table 6. Sustainability criteria

معیار	تعریف
مدیریت ضایعات	وجود سیاست‌ها و برنامه‌هایی برای بازیافت، کاهش و استفاده مجدد از پسماندها
قابلیت اطمینان مالی	توان مالی و پایداری بلندمدت تأمین‌کننده برای ادامه همکاری در شرایط بحرانی
ایمنی و سلامت کارکنان	پایبندی تأمین‌کننده به ایجاد محیط کار ایمن، کاهش حوادث کاری و رعایت استانداردهای سلامت کارکنان در تمامی مراحل تولید
طراحی سبز	به‌کارگیری طراحی محصول سازگار با محیط‌زیست و سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای فناوری‌ها یا مواد اولیه سبز
حقوق و شرایط کاری منصفانه	رعایت حقوق بنیادین کارگران توسط تأمین‌کننده شامل عدم به‌کارگیری کار کودک، پرداخت دستمزد منصفانه، ساعات کار معقول، عدم تبعیض و آزادی تشکل‌های کارگری مطابق با استانداردهای کار

جدول ۷. معیارهای تاب‌آوری

Table 7. Resilience criteria

معیار	تعریف
مدیریت ریسک	توانایی شناسایی و کاهش ریسک‌های عملیاتی، مالی و محیطی
تأمین‌کنندگان پشتیبان	توان تأمین‌کننده برای همکاری با تأمین‌کنندگان پشتیبان
ذخایر استراتژیک	در اختیار داشتن موجودی یا ظرفیت اضافی در شرایط اضطراری
اشتراک اطلاعات	ارتباط مؤثر با سایر اعضای زنجیره برای تسریع واکنش در اختلالات
استواری	سطح عملیاتی تأمین‌کننده پس از وقوع اختلال

جدول ۸. معیارهای چابکی

Table 8. Agility metrics

معیار	تعریف
انعطاف‌پذیری در تولید	توانایی تأمین‌کننده در تعدیل سریع حجم، ترکیب یا زمان‌بندی تولید برای پاسخ به تغییرات تقاضا یا اختلالات محیطی
انعطاف در ارائه خدمات	توانایی تأمین‌کننده در تعدیل قیمت‌ها یا ارائه تخفیف در شرایط خاص
اعتمادسازی	ایجاد اعتماد متقابل میان تأمین‌کننده و خریدار برای بهبود همکاری و هماهنگی در زنجیره تأمین
سرعت پاسخگویی	توانایی تأمین‌کننده در پاسخ سریع به تغییرات تقاضا یا شرایط بازار
انعطاف‌پذیری در منابع اولیه	توانایی تأمین‌کننده در استفاده از منابع جایگزین یا چندمنظوره برای حفظ تولید در شرایط اختلال

جدول ۹. معیارهای دیجیتال‌سازی

Table 9. Digitization criteria

معیار	تعریف
شایستگی دیجیتال	توانایی تأمین‌کننده در بهره‌گیری از فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی جهت ایجاد یک مدل کسب‌وکار دیجیتال و کسب مزیت رقابتی
سازگاری فناوری و کارکرد	میزان سازگاری ابزارها و فرایندهای فناوری تأمین‌کننده با زیرساخت‌ها، نیازهای کسب‌وکاری و فرایندهای عملیاتی شرکت خریدار
امنیت سایبری	سطح تأمین‌کننده در حفاظت از اطلاعات با استفاده از سیستم‌های امنیت سایبری
انبارداری هوشمند	توانایی تأمین‌کننده در انبارداری هوشمند با استفاده از تکنولوژی‌های جدید
روابط دیجیتال	سطح تأمین‌کننده در برقراری ارتباطات دیجیتالی با سایر اعضای زنجیره تأمین

۵- نتایج عددی

۵-۱- نتایج روش بهترین-بدترین تصادفی

در این بخش از تحقیق ابتدا فرآیند گردآوری داده‌ها با طراحی یک پرسشنامه تخصصی آغاز گردید. این پرسشنامه‌ها به‌گونه‌ای تدوین شدند که بتوانند بردارهای مقایسه زوجی را میان معیارها و زیرمعیارهای موردبررسی تشکیل دهند و ترجیحات واقعی تصمیم‌گیرندگان را منعکس کنند. جامعه پاسخ‌دهندگان شامل گروهی از کارشناسان متخصص و باتجربه در شرکت موردمطالعه بود که قادر به ارائه ارزیابی‌های دقیق و مبتنی بر واقعیت بودند. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها، داده‌های گردآوری‌شده مورد پردازش قرار گرفت و با محاسبه میانگین نظرات، بردارهای مقایسه نهایی استخراج شد تا به‌عنوان ورودی اصلی در مدل استفاده گردد. در ادامه، برای لحاظ کردن عدم‌قطعیت‌ها و نوسانات محیطی، فرآیند تحلیل بر پایه سه سناریوی متمایز طراحی شد. سناریوی خوش‌بینانه شرایطی را نشان می‌دهد که در آن رونق اقتصادی، مشاهده می‌شود. سناریوی محتمل حالتی است که نمایانگر ثبات نسبی و وضعیت متعارف صنعت بوده و بدون تغییرات ساختاری بزرگ در اقتصاد یا جامعه ادامه می‌یابد. سناریوی بدبینانه نیز بیانگر وضعیت بحرانی شامل رکود اقتصادی شدید، کاهش تقاضا، اختلال در زنجیره تأمین یا وقوع بحران‌های غیرمنتظره مانند همه‌گیری‌ها است.

احتمال وقوع هر یک از این سناریوها بر اساس تحلیل‌های تخصصی و قضاوت خبرگان برآورد و در مدل اعمال گردید. تحلیل نهایی نشان داد که معیار تاب‌آوری به‌عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین عامل شناسایی شده است. در مقابل، دیجیتالی‌سازی کمترین وزن را به خود اختصاص داد که می‌تواند ناشی از محدودیت‌های زیرساختی یا اولویت پایین‌تر آن در محیط فعلی صنعت باشد. جزئیات کامل وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها در جدول **۱۰** ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از جدول وزن معیارها و زیرمعیارهای محاسبه‌شده با روش بهترین-بدترین فازی تصادفی، معیار تاب‌آوری با وزن (۰/۲۱۶) بالاترین اهمیت را در فرایند تصمیم‌گیری به خود اختصاص داده است. این امر بیانگر ضرورت بالای توجه به قابلیت مقابله با ریسک‌ها و اختلالات احتمالی در زنجیره تأمین است.

جدول ۱۰. وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها

Table 10. Final weight of criteria and sub-criteria

معیار	وزن معیار	زیر معیار	وزن اولیه معیار	وزن نهایی
عمومی	۰/۲۰۱	کاهش هزینه	۰/۲۲۱	۰/۰۴۴۴۲
		سطح کیفیت	۰/۲۰۱	۰/۰۴۰۴
		زمان تحویل	۰/۱۹۵	۰/۰۳۹۱۹
		سطح سرویس	۰/۱۹۱	۰/۰۳۸۳۹
		گردش کار	۰/۱۹۲	۰/۰۳۸۵۹
پایداری	۰/۲۰۴	مدیریت ضایعات	۰/۲۱۸	۰/۰۴۴۴
		ثبات و قابلیت اطمینان مالی	۰/۱۹۱	۰/۰۳۸۹۶
		ایمنی و سلامت کارکنان	۰/۱۹۴	۰/۰۳۹۵۷
		طراحی سبز	۰/۱۸۸	۰/۰۳۸۳۵
		حقوق و شرایط کاری منصفانه	۰/۲۰۹	۰/۰۴۲۶
تاب‌آوری	۰/۲۱۶	مدیریت ریسک	۰/۱۹۴	۰/۰۴۱۹
		تأمین‌کنندگان پشتیبان	۰/۲۱۲	۰/۰۴۵۷۹
		ذخایر استراتژیک	۰/۱۹۸	۰/۰۴۲۷۶
		اشتراک اطلاعات	۰/۲۰۳	۰/۰۴۳۸۴
		استواری	۰/۱۹۳	۰/۰۴۱۶۸
چابکی	۰/۱۹۴	انعطاف‌پذیری در تولید	۰/۱۹۹	۰/۰۳۸۶
		انعطاف در ارائه خدمات	۰/۲۱۵	۰/۰۴۱۷۱
		اعتمادسازی	۰/۱۸۵	۰/۰۳۵۸۹
		سرعت پاسخگویی	۰/۲۰۸	۰/۰۴۰۳
		انعطاف‌پذیری در منابع اولیه	۰/۱۹۲	۰/۰۳۷۴۴
دیجیتال‌سازی	۰/۱۸۵	شایستگی دیجیتال	۰/۱۹۶	۰/۰۳۶۲۶
		سازگاری فناوری و کارکرد	۰/۲۱۱	۰/۰۳۹۰۳
		امنیت سایبری	۰/۱۹۵	۰/۰۳۶۰۷
		انبارداری هوشمند	۰/۱۸۹	۰/۰۳۴۹۶
		روابط دیجیتال	۰/۲۰۹	۰/۰۳۸۶۶

در این زمینه، زیرمعیار تأمین‌کنندگان پشتیبان با وزن نهایی (۰/۰۴۵۷۹) بیشترین اهمیت را دارد و نشان می‌دهد که وجود گزینه‌های جایگزین برای تأمین‌کنندگان، نقش کلیدی در حفظ پایداری عملیات دارد. همچنین اشتراک اطلاعات و ذخایر استراتژیک نیز به ترتیب با وزن‌های (۰/۰۴۳۸۴) و (۰/۰۴۲۷۶) در جایگاه‌های بعدی قرار دارند و لزوم تقویت ارتباطات و پیش‌بینی منابع لازم در شرایط بحرانی را نمایان می‌سازند. معیار پایداری نیز با وزن (۰/۲۰۴) در رتبه دوم اهمیت قرار گرفته که در این میان زیرمعیار مدیریت ضایعات (۰/۰۴۴۴) مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند و تأکید بر کاهش تأثیرات زیست‌محیطی دارد. همچنین حقوق و شرایط کاری منصفانه (۰/۰۴۲۶) جایگاه قابل توجهی یافته است و نشان‌دهنده اهمیت توجه به ابعاد اجتماعی و اخلاقی در فرایند ارزیابی تأمین‌کنندگان است. معیارهای «عمومی»، «چابکی» و «دیجیتال‌سازی» به ترتیب با وزن‌های (۰/۲۰۱)، (۰/۱۹۴) و (۰/۱۸۵) در اولویت‌های بعدی قرار دارند. در گروه «عمومی»، زیرمعیار «کاهش هزینه‌ها» (۰/۰۴۴۴۲) دارای بیشترین اهمیت است و نشان‌دهنده حساسیت بالای مدیران و تصمیم‌گیرندگان نسبت به مسائل اقتصادی است. در حوزه «چابکی»، دو زیرمعیار «انعطاف در ارائه خدمات» (۰/۰۴۱۷۱) و «سرعت پاسخگویی» (۰/۰۴۰۳) بیشترین وزن‌ها را کسب کرده‌اند که بیانگر لزوم پاسخ سریع و متناسب با نیازهای متغیر مشتریان و بازار است. درنهایت،

در زمینه «دیجیتال‌سازی»، زیرمعیار «سازگاری فناوری و کارکرد» (۰/۰۳۹۰۳) دارای بیشترین وزن است که نشان‌دهنده اهمیت یکپارچگی و سازگاری فناوری‌های نوین با فرایندهای جاری زنجیره تأمین است؛ بنابراین، در ارزیابی نهایی پیشنهاد می‌شود مدیران با تمرکز ویژه بر بهبود شاخص‌های دارای اهمیت بالا ازجمله تاب‌آوری و پایداری، زمینه افزایش عملکرد و اثربخشی زنجیره تأمین را فراهم کنند.

۵-۲- نتایج روش تاپسیس فازی-تصادفی

مطابق با چارچوب ارائه‌شده در مراحل پیشین، در این بخش ابتدا تأمین‌کنندگان بالقوه شرکت شناسایی گردیده‌اند. در ادامه، با اتکا بر معیارهای استخراج‌شده از مسئله تحقیق و به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس فازی تصادفی، ارزیابی جامع تأمین‌کنندگان انجام گرفته است. هدف از این ارزیابی، رتبه‌بندی و شناسایی تأمین‌کنندگان برتر در راستای بهینه‌سازی تصمیمات مدیران زنجیره تأمین است. نتایج حاصل، شامل رتبه نهایی هر یک از تأمین‌کنندگان در دو گروه «تأمین‌کنندگان اصلی» و «تأمین‌کنندگان پشتیبان»، در جدول **۱۱** نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در میان تأمین‌کنندگان اصلی، تأمین‌کننده دوم با مقدار شاخص بالاتر (۰/۵)، در رتبه نخست قرار دارد، درحالی‌که تأمین‌کننده سوم با مقدار ۰/۳ پایین‌ترین عملکرد را داشته است. در میان تأمین‌کنندگان پشتیبان نیز، تأمین‌کننده سوم در جایگاه اول قرار گرفته است که نشان از عملکرد مطلوب آن نسبت به سایر تأمین‌کننده‌های پشتیبان می‌باشد.

۶- اعتبار سنجی روش پیشنهادی

اعتبارسنجی روش‌های به کار گرفته‌شده در هر پژوهش، یکی از مراحل بنیادین و تأثیرگذار در فرآیند تحقیق به شمار می‌آید. انجام این ارزیابی نه‌تنها موجب ارتقای کیفیت و دقت نتایج حاصل از مطالعه می‌شود، بلکه نقشی کلیدی در تضمین قابلیت اتکا و تعمیم‌پذیری یافته‌ها ایفا می‌کند.

۶-۱- عملکرد روش بهترین-بدترین تصادفی

در این بخش، کارایی روش بهترین–بدترین فازی تصادفی از دو منظر اصلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در گام نخست، این روش با سه رویکرد رایج دیگر شامل بهترین–بدترین سنتی، بهترین–بدترین فازی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مقایسه شده است. مقایسه انجام‌شده بر اساس دو شاخص «نرخ ناسازگاری» و «انحراف کل» صورت گرفته است. نرخ ناسازگاری به‌عنوان معیاری برای سنجش میزان هم‌خوانی در مقایسه‌های زوجی تلقی می‌شود و کاهش مقدار آن نشان‌دهنده افزایش انسجام منطقی و اعتمادپذیری بیشتر در نتایج حاصل از وزن‌دهی است. از سوی دیگر، انحراف کل بیانگر فاصله اقلیدسی میان نسبت وزن‌ها و مقادیر حاصل از مقایسه‌های زوجی است. کاهش مقدار این شاخص نیز به‌عنوان نشانه‌ای از عملکرد بهینه روش ارزیابی‌شده در نظر گرفته می‌شود. بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول **۱۲**، روش بهترین–بدترین فازی تصادفی در شاخص انحراف کل عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان داده است. اگرچه در شاخص نرخ ناسازگاری، روش‌های بهترین–بدترین فازی و بهترین–بدترین سنتی نتایج اندکی مطلوب‌تر ارائه داده‌اند، اما روش موردنظر نسبت به فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی برتری آشکاری دارد. در مجموع، یافته‌های حاصل از این ارزیابی گویای اثربخشی و دقت بالای روش بهترین–بدترین فازی تصادفی در فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره و مقایسات مبتنی بر قضاوت‌های ذهنی در شرایط عدم‌قطعیت هستند.

۶-۲- بررسی عملکرد روش تاپسیس فازی-تصادفی

به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی روش پیشنهادی تاپسیس تصادفی فازی، نتایج حاصل از آن با خروجی‌های به‌دست‌آمده از برخی روش‌های متداول در ادبیات شامل تاپسیس فازی، ویکور فازی و ویکور تصادفی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در این تحلیل تطبیقی، عملکرد تأمین‌کنندگان با استفاده از رویکردهای یادشده محاسبه شده و رتبه‌بندی نهایی آن‌ها در جدول **۱۳** ارائه شده است. مطابق با نتایج مندرج در این جدول، مشاهده می‌شود که رتبه‌های اول و دوم در تمامی روش‌ها ثابت باقی‌مانده‌اند. این همگرایی در نتایج رتبه‌بندی بیانگر اعتبار روش توسعه‌یافته و انسجام آن با روش‌های شناخته‌شده موجود در ادبیات است که می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از قابلیت اطمینان و استحکام مدل پیشنهادی تلقی گردد.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام، تحت شرایط عدم‌قطعیت، نیازمند توجه به معیارهایی فراتر از شاخص‌های سنتیِ هزینه و کیفیت است. بر پایه نتایج کمی، معیار «تاب‌آوری» با وزن نهایی ۰/۲۱۶ مهم‌ترین بُعد تصمیم‌گیری شناسایی شد و زیرمعیار «تأمین‌کنندگان پشتیبان» با وزن ۰/۰۴۵۷۹ بیشترین نقش را در تضمین تداوم عملیات ایفا می‌کند. پس‌ازآن، معیار «پایداری» با وزن ۰/۲۰۴ و زیرمعیار «مدیریت ضایعات» با وزن ۰/۰۴۴۴ در رتبه بعدی اهمیت قرار گرفت که نشان‌دهنده لزوم تمرکز هم‌زمان بر کاهش اثرات زیست‌محیطی و رعایت اصول اخلاقی در زنجیره تأمین است.

در بُعد چابکی، زیرمعیارهای «انعطاف در ارائه خدمات» (۰/۰۴۱۷۱) و «سرعت پاسخگویی» (۰/۰۴۰۳) بیشترین تأثیر را بر توان انطباق سریع با تغییرات بازار دارند. همچنین در بُعد دیجیتال‌سازی، زیرمعیار «سازگاری فناوری و کارکرد» (۰/۰۳۹۰۳) بالاترین وزن را کسب کرده و اهمیت یکپارچگی فناوری در بهبود کارایی زنجیره تأمین را تأیید می‌کند.

جدول (۱۱): شاخص تاپسیس و رتبه تأمین‌کنندگان

تأمین‌کننده	C_i	رتبه
اصلی اول	۰/۴۸	۲
اصلی دوم	۰/۵	۱
اصلی سوم	۰/۳	۴
اصلی چهارم	۰/۴۳	۳
پشتیبان اول	۰/۴۹	۲
پشتیبان دوم	۰/۳۸	۳
پشتیبان سوم	۰/۶۲	۱

جدول ۱۲. نرخ ناسازگاری و انحراف کل

Table 12. Non-compliance rate and total deviation

معیار	بهترین-بدترین تصادفی		فازی	بهترین بدترین سنتی		بهترین بدترین فازی		سلسله مراتبی فازی	
	میانگین	انحراف معیار		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
نرخ ناسازگاری	۰/۰۴۷۲۳۵	۰/۰۱۷۳۲		۰/۰۴۴۵۱۶	۰/۰۸۱۳۸۲۴	۰/۰۴۶۹۱۲	۰/۰۱۹۳۴	۰/۰۸۰۳۸	۰/۰۲۶۱۸
انحراف کل	۱/۶۱۴	۰/۴۱۶۷		۱/۷۲۵۱	۲/۱۱۷۴	۱/۹۸۹۳	۰/۳۵۱۷	۲/۲۱۷۲	۰/۸۲۴۱

جدول ۱۳. رتبه تأمین‌کنندگان در روش‌های مختلف

Table 13. Ranking of suppliers in different methods

تأمین‌کننده	رتبه			
	تاپسیس فازی تصادفی	تاپسیس تصادفی	تاپسیس فازی	ویکور تصادفی
اصلی اول	۲	۲	۱	۲
اصلی دوم	۱	۱	۲	۱
اصلی سوم	۴	۳	۴	۳
اصلی چهارم	۳	۴	۳	۴

مقایسه نتایج روش تاپسیس فازی–تصادفی با سه رویکرد مرجع دیگر (تاپسیس فازی، ویکور فازی و ویکور تصادفی) نشان داد که رتبه‌های اول و دوم در تمام روش‌ها ثابت است که این امر اعتبار و پایداری مدل پیشنهادی را تقویت می‌کند. به‌طور مشخص، «تأمین‌کننده دوم» در گروه اصلی و «تأمین‌کننده سوم» در گروه پشتیبان بالاترین امتیاز را به دست آوردند. این نتایج بیانگر آن است که مدل پیشنهادی، علاوه بر توانایی شناسایی دقیق تأمین‌کنندگان بهینه، با رویکرد سناریومحور فازی–تصادفی، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری پایدار در شرایط متغیر اقتصادی و عملیاتی فراهم می‌کند؛ بنابراین، توصیه می‌شود مدیران برای ارتقای کارایی و پایداری زنجیره تأمین، سرمایه‌گذاری هدفمند بر تقویت زیرمعیارهای کلیدی شناسایی‌شده انجام داده و راهبردهای تاب‌آوری و پایداری را به‌طور هم‌زمان پیاده‌سازی کنند. مطالعه موردی در صنعت تجهیزات پزشکی نیز نشان داد که تمرکز صرف بر معیارهای اقتصادی کافی نیست و باید معیارهایی که پایداری، انعطاف‌پذیری و عملکرد بلندمدت سازمان را تضمین می‌کنند، در اولویت قرار گیرند.

۷-۱- پیشنهادات مدیریتی

با توجه به یافته‌های پژوهش و اولویت‌بندی معیارهای انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه بسته بادوام تحت شرایط عدم‌قطعیت ترکیبی، مجموعه‌ای از اقدامات کلیدی برای مدیران، تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران پیشنهاد می‌شود. در حوزه تاب‌آوری، ایجاد و حفظ شبکه‌ای از تأمین‌کنندگان پشتیبان به‌منظور کاهش ریسک‌های ناشی از اختلالات، توسعه ذخایر استراتژیک مواد اولیه و محصولات کلیدی برای تضمین تداوم عملیات در شرایط بحرانی و استقرار سیستم‌های اشتراک اطلاعات میان اعضای زنجیره به‌منظور تسریع واکنش به رویدادهای غیرمنتظره، از راهبردهای ضروری به شمار می‌روند. در زمینه پایداری زیست‌محیطی و اجتماعی، پیاده‌سازی برنامه‌های جامع مدیریت ضایعات و بازیافت در تمامی سطوح زنجیره تأمین، رعایت کامل حقوق و شرایط کاری منصفانه برای کارکنان و پیمانکاران ـ شامل پرداخت دستمزد منصفانه و تضمین ایمنی و سلامت محیط کار ـ و سرمایه‌گذاری در طراحی سبز محصولات و بهره‌گیری از فناوری‌ها و مواد اولیه کم اثر بر محیط‌زیست، می‌تواند به بهبود عملکرد پایداری و ارتقای جایگاه رقابتی سازمان کمک کند.

در بُعد اقتصادی و خدماتی، بهینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین بدون کاهش کیفیت و کارایی، ارتقای سطح سرویس‌دهی از طریق پاسخگویی سریع و خدمات پشتیبانی مؤثر و انعطاف در قیمت‌گذاری و ارائه خدمات متناسب با تغییرات بازار، اقداماتی هستند که می‌توانند بهره‌وری را افزایش داده و رضایت مشتریان را ارتقا دهند. از منظر چابکی و انعطاف‌پذیری عملیاتی، ارتقای انعطاف‌پذیری در فرآیندهای تولید و استفاده از منابع جایگزین برای پاسخ‌گویی به تغییرات تقاضا، همراه با ایجاد فرهنگ اعتمادسازی میان شرکا و ذی‌نفعان، می‌تواند هماهنگی، هم‌افزایی و کارایی کلی زنجیره تأمین را بهبود بخشد. در مسیر دیجیتال‌سازی هوشمند نیز، سرمایه‌گذاری در توسعه شایستگی‌های دیجیتال و زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، پیاده‌سازی سامانه‌های انبارداری هوشمند، تقویت امنیت سایبری و گسترش روابط دیجیتال با تأمین‌کنندگان و مشتریان برای تسهیل تبادل سریع، شفاف و قابل‌اعتماد اطلاعات، نقش مهمی در افزایش یکپارچگی و شفافیت زنجیره تأمین دارد.

از منظر سیاست‌گذاری، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تدوین استانداردها و دستورالعمل‌های ملی در جهت ارتقای تاب‌آوری و پایداری زنجیره‌های تأمین به‌ویژه در صنایع حساس باشد. همچنین، سیاست‌گذاران می‌توانند با ارائه مشوق‌های مالی و قانونی، زمینه را برای پیاده‌سازی فناوری‌های سبز و سیستم‌های دیجیتال در صنایع فراهم کرده و گذار به زنجیره‌های تأمین هوشمند، مقاوم و پایدار را تسهیل کنند.

۷-۲- محدودیت‌های تحقیق و پیشنهادهای آتی

با وجود نتایج ارزشمند به‌دست‌آمده، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر و تعمیم‌یافته‌ها مدنظر قرار گیرد.

- نخست، دامنه مطالعه به صنعت تجهیزات پزشکی محدود شده است. هرچند این صنعت به‌واسطه ویژگی‌هایی همچون حساسیت بالای محصولات، الزامات سخت‌گیرانه کیفی و ایمنی و اهمیت حیاتی در نظام سلامت، بستری مناسب برای

آزمون مدل پیشنهادی فراهم کرده است، اما ماهیت خاص آن موجب می‌شود قابلیت تعمیم نتایج به سایر صنایع با ساختار، زنجیره تأمین و محیط رقابتی متفاوت، با احتیاط صورت گیرد.

- دوم، رویکرد روش‌شناختی تحقیق بر پایه مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی–تصادفی بنا شده است. این چارچوب هرچند توانمند در مواجهه با شرایط پیچیده و عدم‌قطعیت‌های ترکیبی است، اما استفاده از سایر روش‌ها مانند رویکردهای بهینه‌سازی استوار، مدل‌های یادگیری ماشین یا الگوریتم‌های تکاملی می‌تواند به نتایج متفاوت یا حتی دقیق‌تر منجر شود.
- سوم، فرآیند شناسایی و وزن‌دهی معیارها و ارزیابی تأمین‌کنندگان به میزان زیادی متکی بر قضاوت‌های خبرگان بوده است. این وابستگی، احتمال بروز سوگیری‌های ذهنی را افزایش می‌دهد، به‌ویژه زمانی که تعداد خبرگان محدود یا ترکیب تخصصی آن‌ها همگن باشد. همچنین، داده‌ها در چارچوب سه سناریوی مشخص (خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه) جمع‌آوری و تحلیل شدند که هرچند به افزایش واقع‌گرایی مدل کمک کرده است، اما ممکن است تمام شرایط محتمل محیطی و تغییرات غیرقابل‌پیش‌بینی بازار را پوشش ندهد.
- چهارم، مدل پیشنهادی اثر مستقیم فناوری‌های نوظهور مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی را بر بهبود شاخص‌های پایداری، تاب‌آوری و چابکی زنجیره تأمین لحاظ نکرده است. درحالی‌که شواهد موجود در ادبیات نشان می‌دهد این فناوری‌ها می‌توانند نقش بسزایی در بهبود شفافیت، سرعت واکنش و هماهنگی شبکه‌های تأمین ایفا کنند.

با توجه به این محدودیت‌ها، مسیرهای آینده تحقیق می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- آزمون مدل در صنایع مختلف و زنجیره‌های تأمین با ساختارهای متنوع به‌منظور سنجش قابلیت تعمیم و مقایسه الگوهای عملکرد.
- مقایسه مدل پیشنهادی با سایر روش‌های تصمیم‌گیری پیشرفته و ترکیب آن با الگوریتم‌های بهینه‌سازی یا تحلیل داده‌محور برای کاهش اثر سوگیری‌های انسانی.
- استفاده از منابع داده واقعی و بلادرنگ به‌جای اتکا صرف به نظرات خبرگان، به‌ویژه در ارزیابی معیارهای کمی و شاخص‌های عملکردی.
- بررسی و ادغام فناوری‌های نوین همچون بلاک‌چین، اینترنت اشیاء و سیستم‌های تحلیل پیش‌بینانه برای ارتقای شفافیت، قابلیت ردیابی و تاب‌آوری زنجیره تأمین.
- تحلیل اثر عوامل سازمانی و فرهنگی بر نحوه انتخاب تأمین‌کنندگان و پیاده‌سازی استراتژی‌های بادوام، به‌ویژه در بازارهای بین‌المللی با تفاوت‌های فرهنگی و مقرراتی.

بدین ترتیب، پژوهش‌های آتی می‌توانند با رفع محدودیت‌های شناسایی‌شده، نه‌تنها دقت و جامعیت مدل‌های انتخاب تأمین‌کننده را افزایش دهند، بلکه کاربرد آن‌ها را به طیف وسیع‌تری از صنایع و شرایط عملیاتی گسترش دهند.

مشارکت‌های نویسندگان

تمامی نویسندگان در مراحل مختلف پژوهش مشارکت فعال داشته‌اند و نسخه نهایی مقاله را تأیید کرده‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در خصوص این پژوهش هیچ‌گونه تضاد منافع مالی، حرفه‌ای یا شخصی وجود نداشته و نتایج به‌صورت مستقل و بی‌طرفانه ارائه شده است.

قدردانی

بدین‌وسیله از تمامی افرادی که در فرآیند شکل‌گیری و اجرای این پژوهش همکاری داشته‌اند، کارشناسان شرکت ابتکار تجهیز طب یکتا و همچنین داوران محترم نشریه که با بازخوردهای سازنده خود موجب ارتقاء کیفیت مقاله شدند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

مراجع

Ajayi, M. O., & Laseinde, O. T. (2023). Promoting viable supply chain management (SCM) in the Nigeria agro-allied industry using Internet of Things. In X.-S. Yang, S. Sherratt, N. Dey, & A. Joshi (Eds.), *Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology* (pp. 389–399). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1607-6_34

Ala, A., Goli, A., Mirjalili, S., & Simic, V. (2024). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable healthcare supply chain network design. *Applied Soft Computing, 150*, Article 111012. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111012

Alizadeh, M., Pishvaee, M. S., Jahani, H., Paydar, M. M., & Makui, A. (2023). Viable healthcare supply chain network design for a pandemic. Annals of Operations Research, 328(1), 35-73. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04934-7

Asadi, Z., Aghajani, H., Khatir, M. V., & Tirkolaee, E. B. (2025). Viable-sustainable supplier selection and order allocation problem considering Industry 5.0 pillars under mixed uncertainty. *International Journal of Production Research, 63*(7), 1–26. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2502848

Asadi, Z., Khatir, M. V., & Rahimi, M. (2022). Robust design of a green-responsive closed-loop supply chain network for the ventilator device. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(36), 53598-53618. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19105-1

Asif, K., & Albherat, K. (2024). The impact of procurement strategies on supply chain sustainability in the pharmaceutical industry. *South Asian Journal of Operations and Logistics, 3*(2), 345–361. https://doi.org/10.57044/SAJOL.2024.3.2.2446

Avazpoor, M., Zarei, J., & Alinezhad, E. (2025). Evaluation and prioritization of electricity generation technologies in Iran using a multi-criteria decision-making approach. *System Engineering and Productivity, 5*(3), 179–198. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2063697.1333 (In Persian)

Azizinejad, H., Tavakoli, G., Ehsanifar, M., & Najafi, A. (2025). Explaining the factors affecting intellectual capital to facilitate productivity in knowledge-based businesses. *System Engineering and Productivity, 5*(2), 149–174. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2055329.1299. (In Persian)

Babaei, A., Khedmati, M., Akbari Jokar, M. R., & Tirkolaee, E. B. (2023). Designing an integrated blockchain-enabled supply chain network under uncertainty. *Scientific Reports, 13*(1), Article 3928. https://doi.org/10.1038/s41598-023-30439-9

Babaei, Y. S., Sazvar, Z., Nayeri, S., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2024). A two-stage framework for a resilient medical tourism supply chain considering social aspects and supplier evaluation under uncertainty: A real-case study. *Annals of Operations Research*. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06128-9

Bahrami, M. R., Hashemzadeh, G. R., Shahmansoury, A., & Fathi Hafshejani, K. (2025). Analyzing effective components in Industry 4.0 maturity for Iranian banking. *System Engineering and Productivity,* 5(1), 21–50. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2047848.1246 (In Persian)

Bayatzadeh, S., & Talaie, H. (2024). Identifying and evaluating sustainable and resilient supplier selection criteria according to Industry 5.0 concepts (Case study: Steel industry). *Tasmimgiri va Tahqiq Dar Amaliyyat, 9*(4), 1045–1063. https://doi.org/10.22105/dmor.2025.498734.1904 (In Persian)

Belhadi, A., Kamble, S., Subramanian, N., Singh, R. K., & Venkatesh, M. (2024). Digital capabilities to manage agri-food supply chain uncertainties and build supply chain resilience during compounding geopolitical disruptions. *International Journal of Operations & Production Management, 44*(11), 1914–1950. https://doi.org/10.1108/IJOPM-11-2022-0737

Chaouni Benabdellah, A., Zekhnini, K., Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Kumar, A., & El Baz, J. (2023). Blockchain technology for viable circular digital supply chains: An integrated approach for evaluating the implementation barriers. *Benchmarking: An International Journal, 30*(10), 4397–4424. https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2022-

Govindan, K., & Gholizadeh, H. (2021). Robust network design for sustainable-resilient reverse logistics network using big data: A case study of end-of-life vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 149*, Article 102279. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102279

Govindan, K., Mina, H., Esmaeili, A., & Gholami-Zanjani, S. M. (2020). An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production, 242*, Article 118317. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118317

Habib, M. S., Omair, M., Ramzan, M. B., Chaudhary, T. N., Farooq, M., & Sarkar, B. (2022). A robust possibilistic flexible programming approach toward a resilient and cost-efficient biodiesel supply chain network. *Journal of Cleaner Production, 366*, Article 132752. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132752

Homayouni, Z., Pishvaee, M. S., Jahani, H., & Ivanov, D. (2023). A robust-heuristic optimization approach to a green supply chain design with consideration of assorted vehicle types and carbon policies under uncertainty. *Annals of Operations Research, 324*(1), 395–435. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03985-6

Ivanov, D. (2021). Supply chain viability and the COVID-19 pandemic: A conceptual and formal generalisation of four major adaptation strategies. *International Journal of Production Research, 61*(5), 1315–1333. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1890852

Ivanov, D. (2023). The Industry 5.0 framework: Viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research, 61*(5), 1683–1695. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892

Kashanian Monfared, N., Safaie, N., & Hosseininezhad, S. J. (2025). A decision-making model for the problem of designing the layout of medical centers considering uncertainty. *System Engineering and Productivity, 5*(2), 97–118. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2049327.1252 (In Persian)

0240

Chen, D., Chu, F., Liu, M., & Huang, Y. (2025). A distribution-free-based approach for stochastic food closed-loop supply chain. *International Journal of Production Research, 63*(7), 2526–2555. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2406994

De Lima, F. A., & Seuring, S. (2023). A Delphi study examining risk and uncertainty management in circular supply chains. *International Journal of Production Economics, 258*, Article 108810. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108810

Dehshiri, S. J. H., & Amiri, M. (2024). Considering the circular economy for designing closed-loop supply chain under hybrid uncertainty: A robust scenario-based possibilistic-stochastic programming. *Expert Systems with Applications, 238*(Part B), Article 121745. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121745

Dursun, M., & Ogunclu, O. (2021). Agile supplier evaluation using hierarchical TOPSIS method. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications, 18*, 12–19. https://doi.org/10.37394/23209.2021.18.3

Foroozesh, N., Karimi, B., Mousavi, S. M., & Mojtahedi, M. (2023). A hybrid decision-making method using robust programming and interval-valued fuzzy sets for sustainable-resilient supply chain network design considering circular economy and technology levels. *Journal of Industrial Information Integration, 33*, Article 100440. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100440

Forouzeshnejad, A. A. (2023). Leagile and sustainable supplier selection problem in the Industry 4.0 era: A case study of the medical devices using hybrid multi-criteria decision making tool. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(5), 13418–13437. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22916-x

Gholamian, S. A. (2024). Evaluation and selection of sustainable suppliers by providing a decision support system based on a new data envelopment analysis model and cumulative star utility. *System Engineering and Productivity, 4*(1), 1–13. https://doi.org/10.22034/msb.2024.2025845.1198 (In Persian)

and endogenous demand uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 196*, Article 104013. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104013

Marques, C. M., Silva, A. C., & de Sousa, J. P. (2024). Inventory strategies for optimizing resiliency and sustainability in pharmaceutical supply chains—A simulation-optimization approach. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 53, pp. 1825–1830). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28824-1.50305-7

Matli, K., Mahdi, A., Zibara, V., Costanian, C., & Ghanem, G. (2022). Transcatheter tricuspid valve intervention techniques and procedural steps for the treatment of tricuspid regurgitation: a review of the literature. *Open Heart*, *9*(1). https://doi.org/10.1136/openhrt-2022-002030

Mozafari, M., & Savari, J. (2025). Designing a green closed-loop supply chain network for pharmaceutical products using cuckoo search algorithm. *System Engineering and Productivity, 5*(1), 135–153. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050452.1248 (In Persian)

Nayeri, S., Sazvar, Z., & Babaee 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), Article 2469117. https://doi.org/10.1080/23302674.2025.2469117

Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2023). Towards a responsive supply chain based on the Industry 5.0 dimensions: A novel decision-making method. *Expert Systems with Applications, 213*(Part B), Article 119267. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119267

Padovano, A., & Ivanov, D. (2025). Towards resilient and viable supply chains: a multidimensional model and empirical analysis. *International Journal of Production Research*, 1-39. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2470350

Sherafati, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvaee, M. S. (2019). Supply chain network design considering sustainable

Keyvani Shahri, F. S., Kaveh, D., Karimi, M., & Zendehdel, A. (2024). Identifying the dimensions and components of entrepreneurship with a social responsibility approach in the General Directorate of Education. System Engineering and Productivity, 4(2), 75–92. https://doi.org/10.22034/msb.2024.2032004.1216 (In Persian)

Kumar, D., Soni, G., Joshi, R., Jain, V., & Sohal, A. (2022). Modelling supply chain viability during COVID-19 disruption: A case of an Indian automobile manufacturing supply chain. *Operations Management Research, 15*(3), 1224–1240. https://doi.org/10.1007/s12063-022-00277-5

Leong, W. Y., Wong, K. Y., & Wong, W. P. (2022). A new integrated multi-criteria decision-making model for resilient supplier selection. *Applied System Innovation, 5*(1), Article 8. https://doi.org/10.3390/asi5010008

Lotfi, R., Hazrati, R., Aghakhani, S., Afshar, M., Amra, M., & Ali, S. S. (2024). A data-driven robust optimization in viable supply chain network design by considering open innovation and blockchain technology. *Journal of Cleaner Production, 436*, Article 140369. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140369

Lotfi, R., Nazarpour, H., Gharehbaghi, A., Sarkhosh, S. M. H., & Khanbaba, A. (2022). Viable closed-loop supply chain network by considering robustness and risk as a circular economy. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(46), 70285–70304. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20713-0

Lotfi, R., Safavi, S., Gharehbaghi, A., Zare, S. G., Hazrati, R., & Weber, G.-W. (2021). Viable supply chain network design by considering blockchain technology and cryptocurrency. *Mathematical Problems in Engineering, 2021(1), 7347389*. https://doi.org/10.1155/2021/7347389

Lotfi, R., Weber, G.-W., & Tirkolaee, E. B. (2023). Recent advances in viable and sustainable supply chain management. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(39), 89943–89944. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28810-4

Luo, L., Li, X., & Zhao, Y. (2025). A two-stage stochastic-robust model for supply chain network design problem under disruptions

development paradigm: A case study in cable industry. *Journal of Cleaner Production, 234*, 366–380. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.095

Sun, L., Yu, C., Li, J., Yuan, Q., & Zhao, S. (2025). A two-stage decision model for sustainable-resilient supplier selection and order allocation under uncertain environment. *Kybernetes*, *54*(8), 4078-4113. https://doi.org/10.1108/K-11-2023-2347

Tao, Y., Zhu, S., Smith, J., Lakhani, N., & You, F. (2023). Environmental sustainability of the globalized pharmaceutical supply chains: The case of tenofovir disoproxil fumarate. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11*(17), 6510–6522. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c06518

Yazdani Hoshyar, A., & Keshvari, A. (2023). Investigating and formulating anthropogenic threats in refinery projects with a combination of AHP-TOPSIS method: A case study of Tehran Oil Refinery. *System Engineering and Productivity, 2*(4), 94–119. https://doi.org/10.22034/sep.2023.704334 (In Persian)

Zahari, M. K., Zakuan, N., Yusoff, M. E., Mat Saman, M. Z., Ali Khan, M. N. A., Muharam, F. M., & Yaacob, T. Z. (2023). Viable supply chain management toward company sustainability during COVID-19 pandemic in Malaysia. *Sustainability, 15*(5), Article 3989. https://doi.org/10.3390/su15053989

Zekhnini, K., Chaouni Benabdellah, A., & Cherrafi, A. (2024). A multi-agent based big data analytics system for viable supplier selection. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *35*(8), 3753-3773. https://doi.org/10.1007/s10845-023-02253-7

Zhu, A., Han, Y., & Liu, H. (2024). Effects of adaptive cooperation among heterogeneous manufacturers on supply chain viability under fluctuating demand in post-COVID-19 era: An agent-based simulation. *International Journal of Production Research, 62*(4), 1162–1188. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2178370