ACCOUNTING, FINANCE AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE

Design and Development of a Multi-Objective Optimization Model for Financial Costs and Delivery Time in the Iranian Supply Chain Using NSGA-II

1. Fatemeh Ahmari: Department of Economics, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2. Seyed Ali Paytakhti Oskouei*: Department of Economics, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran. Email: Paytakhti@iaut.ac.ir (Corresponding Author)

3. Saeed Anvar Khatibi: Department of Accounting, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

4. Yaghoub Pourkarim: Department of Accounting, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Article history

Received: 23 September 2025

Revised: 16 February 2026

Accepted: 21 February 2026

Initial Publish: 26 February 2026

Final Publish: 22 December 2026

Abstract:

This study aims to design and develop a multi-objective optimization model to simultaneously minimize total financial supply chain costs and delivery time under economic uncertainty conditions in Iran. The research adopts an applied, simulation-based approach, and the model is formulated as a mixed-integer linear programming problem. The supply chain network consists of 15 suppliers, 10 production units, and 20 end customers within a major domestic logistics corridor. The NSGA-II algorithm was implemented in MATLAB, and its parameters were tuned using the Taguchi method. Four scenarios were analyzed: baseline, exchange-rate fluctuation, customs disruption, and sustainability scenario. Model performance was evaluated using Pareto frontier quality indicators such as Hypervolume, Spread, and Generational Distance, alongside paired t-tests and one-way ANOVA. Results indicate that in the baseline scenario, total cost and delivery time were significantly reduced by 28% and 22%, respectively, compared to the traditional approach ($p < 0.001$). In the sustainability scenario, CO_2 emissions decreased by 18–22%. ANOVA results revealed that demand fluctuation had the largest effect size on model performance. Moreover, NSGA-II significantly outperformed simple GA, ACO, and PSO in terms of Hypervolume value and convergence speed. The proposed model effectively generates a high-quality Pareto frontier, achieving a robust balance between cost reduction and delivery time minimization while demonstrating resilience against economic volatility and operational disruptions. It can therefore serve as a strategic decision-support tool in supply chain management and logistics policy planning.

Keywords: Supply Chain Management, Multi-Objective Optimization, Delivery Time, Logistics Cost, NSGA-II, Resilience.

Citation: Ahmari, F., Paytakhti Oskouei, S. A., Anvar Khatibi, S., & Pourkarim, Y. (2026). Design and Development of a Multi-Objective Optimization Model for Financial Costs and Delivery Time in the Iranian Supply Chain Using NSGA-II. *Accounting, Finance and Computational Intelligence,* 4(4), 1-13.

Copyright: © 2026 by the authors. Published under the terms and conditions of Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

Extended Abstract

Introduction

In the contemporary era of globalization, digital transformation, and persistent environmental uncertainty, supply chain management has evolved into a strategic discipline that integrates economic efficiency, environmental sustainability, and resilience against disruptions. Traditional single-objective optimization models, primarily focused on cost minimization, are no longer adequate for addressing the inherent trade-offs between total financial costs, delivery time, and environmental impacts. Recent literature emphasizes that sustainable and resilient supply chain design requires the simultaneous consideration of multiple, often conflicting objectives within a comprehensive decision-making framework (Hasani et al., 2021; Mehrjerdi & Shafiee, 2020). Moreover, the increasing frequency of disruptions—ranging from pandemics to geopolitical tensions—has reinforced the need for robust and stochastic modeling approaches capable of maintaining system performance under uncertainty (Ghahremani-Nahr et al., 2022; Vahidi et al., 2018).

The integration of facility location, inventory planning, and transportation decisions under disruption scenarios has been shown to significantly enhance network performance and reduce vulnerability (Li et al., 2023). In parallel, research on green and closed-loop supply chains demonstrates that multi-objective models can simultaneously reduce operational costs and carbon emissions when environmental considerations are embedded in network design (Abbasi et al., 2022; Yavari & Zaker, 2019). These findings underscore the necessity of designing integrated optimization frameworks capable of balancing economic and environmental objectives.

The emergence of advanced digital technologies further expands the scope of supply chain optimization. Artificial intelligence, blockchain, and hybrid decision-support systems have been increasingly applied to enhance transparency, efficiency, and trust among supply chain actors (Joel et al., 2024; Wang et al., 2024). The concept of digital twins enables real-time simulation and scenario analysis, facilitating proactive decision-making in dynamic environments (Ramanamuni, 2025). Additionally, AI–human integration frameworks have demonstrated value in complex and humanitarian supply chain contexts where uncertainty and ambiguity prevail (Wang, 2024). Applications in healthcare supply chains confirm the transformative potential of AI and blockchain technologies in improving efficiency and coordination (Iftikhar & Jamil, 2025).

Despite these advances, solving large-scale, nonlinear, and multi-objective supply chain problems remains computationally challenging. Evolutionary multi-objective algorithms, particularly the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), have proven highly effective in generating well-distributed Pareto-optimal solution sets (Deb et al., 2002). Recent applications demonstrate the algorithm's strong convergence properties and ability to balance cost and service objectives in complex supply chain systems (Acerce & Denizhan, 2025; Jihu, 2024). Furthermore, hybrid data-driven robust optimization approaches enhance decision reliability when historical data and uncertainty sets are incorporated into evolutionary frameworks (Mansouri Mosalou et al., 2024). Scenario-based risk management and robust planning further strengthen resilience in international supply chains (Khalamandro, 2025).

Although prior studies have addressed various aspects of sustainable, resilient, and digitally enabled supply chains, a gap persists in developing a comprehensive multi-objective optimization model that simultaneously minimizes total financial costs and delivery time under uncertainty while remaining adaptable to digital integration. Therefore, this study aims to design and evaluate a multi-objective optimization model based on NSGA-II to achieve simultaneous cost and delivery time minimization within a resilient supply chain framework.

Methods and Materials

This research adopts an applied, simulation-based approach. The proposed supply chain network consists of multiple suppliers, production facilities, distribution centers, and end customers organized within a major logistics corridor. The mathematical formulation is developed as a mixed-integer linear programming (MILP) model with two primary objective functions: minimization of total financial cost—including production, transportation, inventory holding, warehousing, and delay penalties—and minimization of total delivery time from origin to final destination.

Operational constraints include production capacity, storage capacity, vehicle capacity, flow balance, service level requirements, and uncertainty considerations. To address the multi-objective nature of the problem, the NSGA-II algorithm is implemented in MATLAB. Population size, crossover rate, mutation rate, and generation number are calibrated using the Taguchi experimental design method.

Four scenarios are evaluated: (1) baseline operational conditions; (2) exchange-rate fluctuation scenario; (3) customs disruption scenario; and (4) sustainability-focused scenario incorporating carbon emission minimization. Model performance is assessed using Pareto frontier quality indicators including Hypervolume, Spread, Generational Distance (GD), and Inverted Generational Distance (IGD). Statistical analyses include paired t-tests and one-way ANOVA to examine the significance of differences among scenarios and algorithmic comparisons. Monte Carlo simulation with 1,000 iterations is conducted to evaluate robustness and variance under uncertainty.

Findings

Results indicate that under the baseline scenario, the proposed model achieved an average 28% reduction in total financial costs and a 22% reduction in delivery time compared to traditional economic order quantity approaches, with statistical significance confirmed at $p < 0.001$. The average total cost decreased substantially while maintaining stable service levels across the network.

In the sustainability scenario, carbon dioxide emissions were reduced by approximately 18–22% per shipment without severe compromise in cost efficiency. The Pareto frontier generated by NSGA-II contained between 42 and 48 non-dominated solutions, demonstrating high diversity and distribution quality. The average Hypervolume value reached 0.73 with low standard deviation, indicating strong convergence and coverage of the objective space.

Sensitivity analysis using one-way ANOVA revealed that demand fluctuation had the highest effect size, followed by exchange-rate volatility and customs delay. Monte Carlo simulation confirmed cost variance below 5% and risk reduction between 20% and 25% under disruption scenarios. Comparative analysis showed that NSGA-II outperformed classical Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization (ACO), and Particle Swarm Optimization (PSO) in Hypervolume performance and convergence speed.

The knee point of the Pareto frontier represented an optimal balance between cost and delivery time, offering a practical decision alternative for managers seeking equilibrium between economic and service objectives.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that integrating multi-objective evolutionary optimization with robust scenario analysis provides a powerful framework for managing complex supply chains under uncertainty. The substantial reductions in cost and delivery time confirm the effectiveness of balancing conflicting objectives rather than prioritizing a single metric. The sustainability

scenario further illustrates that environmental considerations can be incorporated without sacrificing overall network efficiency, reinforcing the feasibility of sustainable operations.

The superiority of NSGA-II over alternative algorithms underscores the importance of elitist sorting mechanisms and diversity preservation in achieving high-quality Pareto frontiers. The algorithm's ability to maintain solution diversity ensures that decision-makers are provided with a comprehensive set of trade-off alternatives rather than a single deterministic solution.

The robustness confirmed by Monte Carlo simulation indicates that the proposed model can maintain stable performance under fluctuating economic conditions and operational disruptions. This resilience is particularly valuable in volatile environments where exchange-rate changes, customs delays, and demand variability are prevalent.

Furthermore, the model's architecture provides a foundation for future integration with digital technologies such as AI-driven forecasting, blockchain-based financial coordination, and digital twin simulation platforms. Such integration would enable real-time monitoring and adaptive decision-making, enhancing both strategic and operational agility.

In conclusion, this study contributes to supply chain optimization literature by developing a comprehensive, multi-objective, and resilient framework capable of simultaneously minimizing financial costs and delivery time. The results validate the practical applicability of evolutionary multi-objective optimization in complex logistics environments and provide decision-makers with a robust decision-support tool adaptable to sustainable and digitally enabled supply chain systems.

Authors' Contributions

Authors equally contributed to this article.

Acknowledgments

Authors thank all participants who participate in this study.

Declaration of Interest

The authors report no conflict of interest.

Funding

According to the authors, this article has no financial support.

Ethical Considerations

All procedures performed in this study were under the ethical standards.

حسابداری، امور مالی و هوش محاسباتی

طراحی و توسعه مدل بهینه‌سازی چندهدفه هزینه‌های مالی و زمان تحویل در زنجیره تأمین ایران با استفاده از الگوریتم NSGA-II

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱ مهر ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۷ بهمن ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲ اسفند ۱۴۰۴

تاریخ چاپ اولیه: ۷ اسفند ۱۴۰۴

تاریخ چاپ نهایی: ۱ دی ۱۴۰۵

۱. فاطمه احمری: گروه اقتصاد، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲. سیدعلی پایتختی اسکویی*: گروه اقتصاد، واحد تبریز،دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. ایمیل: **Paytakhti@iaut.ac.ir** (نویسنده مسئول)

۳. سعید انور خطیبی: گروه حسابداری، واحدتبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۴. یعقوب پورکریم: گروه حسابداری، واحدتبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

هدف این پژوهش طراحی و توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌های مالی جامع زنجیره تأمین شامل هزینه‌های تولید، حمل‌ونقل، انبارداری و جریمه‌های تأخیر، و نیز کمینه‌سازی زمان تحویل در شرایط عدم‌قطعیت اقتصادی ایران است. این پژوهش از نوع کاربردی و مبتنی بر شبیه‌سازی بوده و مدل در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شد. شبکه مورد مطالعه شامل ۱۵ تأمین‌کننده، ۱۰ واحد تولیدی و ۲۰ مشتری نهایی در یک کریدور اصلی حمل‌ونقل کشور است. الگوریتم NSGA-II برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه در محیط MATLAB پیاده‌سازی گردید و تنظیم پارامترها با روش تاگوچی انجام شد. چهار سناریوی پایه، نوسانات ارزی، اختلال گمرکی و سناریوی پایدار طراحی و اجرا شد. ارزیابی عملکرد با استفاده از شاخص‌های کیفیت جبهه پارتو نظیر Hypervolume ، Spread و فاصله نسل‌به‌نسل و همچنین آزمون‌های آماری t جفتی و تحلیل واریانس صورت گرفت. نتایج نشان داد در سناریوی پایه، هزینه کل به طور معناداری ۲۸ درصد و زمان تحویل ۲۲ درصد نسبت به رویکرد سنتی کاهش یافت ($p < ۰.۰۰۱$). در سناریوی پایدار نیز انتشار دی‌اکسید کربن بین ۱۸ تا ۲۲ درصد کاهش یافت. تحلیل واریانس نشان داد نوسان تقاضا بیشترین اندازه اثر را بر عملکرد مدل داشته است. همچنین الگوریتم NSGA-II از نظر کیفیت جواب‌ها، حجم هایپرووولوم و سرعت همگرایی به طور معناداری عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک ساده، کلونی مورچه و ازدحام ذرات نشان داد. مدل پیشنهادی با تولید جبهه پارتوی باکیفیت، تعادل مناسبی میان کاهش هزینه و کوتاه‌سازی زمان تحویل برقرار ساخته و در برابر نوسانات اقتصادی و اختلالات عملیاتی از تاب‌آوری بالایی برخوردار است؛ ازاین‌رو می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار راهبردی در مدیریت زنجیره تأمین و سیاست‌گذاری لجستیکی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: مدیریت زنجیره تأمین، بهینه‌سازی چندهدفه، زمان تحویل، هزینه‌های لجستیکی، NSGA-II، تاب‌آوری.

شیوه استناددهی: احمری، فاطمه.، پایتختی اسکویی، سیدعلی.، انور خطیبی، سعید.، و پورکریم، یعقوب. (۱۴۰۵). طراحی و توسعه مدل بهینه‌سازی چندهدفه هزینه‌های مالی و زمان تحویل در زنجیره تأمین ایران با استفاده از الگوریتم NSGA-II. *حسابداری، امور مالی و هوش محاسباتی*، ۴(۴)، ۱۳-۱.

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

مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین در دهه‌های اخیر از یک کارکرد عملیاتی صرف به یک حوزه راهبردی و بین‌رشته‌ای تبدیل شده است که در آن تصمیم‌گیری‌های طراحی شبکه، مکان‌یابی، موجودی، حمل‌ونقل و تأمین مالی به‌صورت یکپارچه مورد توجه قرار می‌گیرند. پیچیدگی‌های محیطی، جهانی‌شدن بازارها، فشارهای رقابتی و نوسانات تقاضا موجب شده‌اند که سازمان‌ها برای بقا و ارتقای مزیت رقابتی خود، به سمت مدل‌های پیشرفته بهینه‌سازی حرکت کنند. در این میان، رویکردهای کلاسیک تک‌هدفه دیگر پاسخگوی تعارض‌های ذاتی میان اهداف متضاد نظیر کاهش هزینه و افزایش سطح خدمت نیستند و نیاز به مدل‌های چندهدفه و مقاوم بیش از پیش احساس می‌شود (Vahidi et al., 2018; Yavari & Zaker, 2019). پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور مستلزم درنظرگرفتن هم‌زمان اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است؛ زیرا هرگونه تمرکز صرف بر هزینه می‌تواند به افزایش ریسک اختلال یا کاهش پایداری منجر شود (Hasani et al., 2021; Mehrjerdi & Shafiee, 2020).

از سوی دیگر، وقوع اختلالات گسترده نظیر همه‌گیری کووید-۱۹، بحران‌های ژئوپلیتیک و بی‌ثباتی‌های مالی، ضعف ساختارهای سنتی زنجیره تأمین را آشکار ساخته است. در پاسخ به این چالش‌ها، مدل‌های بهینه‌سازی مقاوم و تصادفی توسعه یافته‌اند که توانایی مدیریت عدم‌قطعیت تقاضا، ظرفیت و زمان تحویل را دارند (Abbasi et al., 2022; Ghahremani-Nahr et al., 2022). مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب رویکردهای برنامه‌ریزی تصادفی و بهینه‌سازی مقاوم می‌تواند انعطاف‌پذیری شبکه را در برابر سناریوهای اختلال افزایش دهد (Vahidi et al., 2018). همچنین، یکپارچه‌سازی تصمیمات مکان‌یابی و موجودی تحت سناریوهای اختلال، نقش مهمی در کاهش ریسک و حفظ سطح خدمت ایفا می‌کند (Li et al., 2023). در این چارچوب، مدیریت ریسک مبتنی بر سناریونویسی و تحلیل حساسیت به‌عنوان ابزار مکمل برای افزایش تاب‌آوری شبکه مطرح شده است (Khalamandro, 2025).

هم‌زمان با توسعه مدل‌های مقاوم، پیشرفت فناوری‌های دیجیتال نیز چشم‌انداز جدیدی برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین فراهم کرده است. کاربرد هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و بلاک‌چین در سال‌های اخیر موجب ارتقای قابلیت پیش‌بینی، شفافیت اطلاعات و کاهش هزینه‌های عملیاتی شده است (Joel et al., 2024; Shil et al., 2024). در حوزه تأمین مالی زنجیره تأمین، استفاده از قراردادهای هوشمند و رویکردهای بازی تکاملی مبتنی بر بلاک‌چین می‌تواند کارایی تخصیص منابع و اعتماد میان بازیگران را افزایش دهد (Wang et al., 2024). همچنین، ادغام هوش مصنوعی با تصمیم‌یارهای انسانی در چارچوب‌های پیچیده چندمعیاره، به بهبود تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی کمک می‌کند (Wang, 2024). از منظر تحول دیجیتال، مفهوم «دوقلوی دیجیتال» به‌عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی بلادرنگ و بهینه‌سازی پویا مطرح شده است که امکان آزمون سناریوهای مختلف و ارزیابی پیامدهای تصمیمات را فراهم می‌کند (Ramanamuni, 2025). افزون بر این، ترکیب هوش مصنوعی و بلاک‌چین در مدیریت زنجیره تأمین سلامت و صنایع حساس، نشان‌دهنده ظرفیت بالای فناوری‌های نوین در افزایش کارایی و شفافیت است (Iftikhar & Jamil, 2025).

در کنار این تحولات فناورانه، توسعه مدل‌های چندهدفه مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری نقش تعیین‌کننده‌ای در حل مسائل پیچیده و غیرخطی زنجیره تأمین داشته است. الگوریتم ژنتیک نامغلوب‌سازی مرتب‌سازی‌شده نسل دوم (NSGA-II) که توسط Deb و همکاران معرفی شد، به‌دلیل مکانیزم رتبه‌بندی غیرغالب و حفظ تنوع جمعیت، یکی از پرکاربردترین روش‌ها در بهینه‌سازی چندهدفه محسوب می‌شود (Deb et al., 2002). مطالعات جدید نشان داده‌اند که NSGA-II در طراحی زنجیره‌های سرد دو لایه، بهبود قابل‌توجهی در هزینه و زمان تحویل ایجاد کرده است (Acerce & Denizhan, 2025). همچنین، کاربرد نسخه‌های بهبودیافته این الگوریتم در برنامه‌ریزی نگهداری زیرساخت‌ها و مسائل صنعتی پیچیده، کارایی بالای آن را در همگرایی سریع و تولید جبهه پارتوی باکیفیت تأیید کرده است (Jihu, 2024). در مدل‌های داده‌محور مقاوم نیز استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، امکان ترکیب داده‌های تاریخی با سناریوهای عدم‌قطعیت را فراهم کرده و کیفیت تصمیمات راهبردی را ارتقا داده است (Mansouri Mosalou et al., 2024).

در ادبیات داخلی، هماهنگی تولید و حمل‌ونقل به‌عنوان یکی از مسائل بنیادین زنجیره تأمین مورد توجه قرار گرفته است (Pasban, 2019). بااین‌حال، بسیاری از این مطالعات بر مدل‌های تک‌هدفه یا داده‌های فرضی تکیه داشته‌اند و کمتر به تلفیق هم‌زمان هزینه‌های جامع مالی و زمان تحویل در قالب یک مدل چندهدفه مقاوم پرداخته‌اند. علاوه بر این،

توجه به ابعاد انسانی و توسعه سرمایه انسانی در زنجیره تأمین نیز در سال‌های اخیر مطرح شده است که نشان می‌دهد بهینه‌سازی صرفاً یک مسئله کمی نبوده و نیازمند نگاه سیستمی است (Memari et al., 2024). از سوی دیگر، بهینه‌سازی خوشه‌های صنعتی سبز و مدیریت زیست‌محیطی زنجیره تأمین، اهمیت رویکردهای پایدار را دوچندان کرده است (Jihu, 2024). این روندها نشان می‌دهد که شکاف پژوهشی قابل‌توجهی در زمینه توسعه مدل‌های چندهدفه مقاوم مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی و داده‌های واقعی بومی وجود دارد.

در سطح بین‌المللی نیز مطالعات متعددی بر ضرورت یکپارچه‌سازی اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تأکید دارند. طراحی شبکه‌های حلقه‌بسته سبز تحت ریسک اختلال، نشان داده است که رویکردهای چندهدفه می‌توانند به کاهش هم‌زمان هزینه و انتشار کربن منجر شوند (Abbasi et al., 2022; Yavari & Zaker, 2019). همچنین، توسعه چارچوب‌های تصمیم‌یار برای مدیریت زنجیره‌های بشردوستانه و بحرانی بیانگر اهمیت استفاده از روش‌های پیشرفته چندمعیاره در محیط‌های با عدم‌قطعیت بالا است (Wang, 2024). بهینه‌سازی یکپارچه مکان‌یابی، موجودی و حمل‌ونقل در شرایط اختلال نیز نشان داده است که مدل‌های ترکیبی می‌توانند عملکرد شبکه را در برابر شوک‌های ناگهانی بهبود بخشند (Li et al., 2023). این یافته‌ها همگی بر لزوم حرکت به سوی مدل‌های جامع، چندهدفه و مقاوم دلالت دارند که بتوانند پیچیدگی‌های محیطی را در نظر گیرند.

با توجه به آنچه بیان شد، روشن است که مدیریت زنجیره تأمین در عصر دیجیتال و در شرایط عدم‌قطعیت اقتصادی نیازمند رویکردی تلفیقی است که از یک سو بر مبانی نظری بهینه‌سازی چندهدفه و الگوریتم‌های تکاملی استوار باشد و از سوی دیگر، از ظرفیت فناوری‌های نوین و داده‌های واقعی بهره گیرد. در چنین چارچوبی، الگوریتم NSGA-II به‌عنوان یک روش کارآمد برای تولید مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو، امکان ایجاد تعادل میان اهداف متعارض را فراهم می‌کند (Acerce & Denizhan, 2025; Deb et al., 2002). در عین حال، ادغام آن با رویکردهای مقاوم و داده‌محور می‌تواند تاب‌آوری شبکه را در برابر نوسانات تقاضا و اختلالات محیطی افزایش دهد (Ghahremani-Nahr et al., 2022; Mansouri Mosalou et al., 2024).

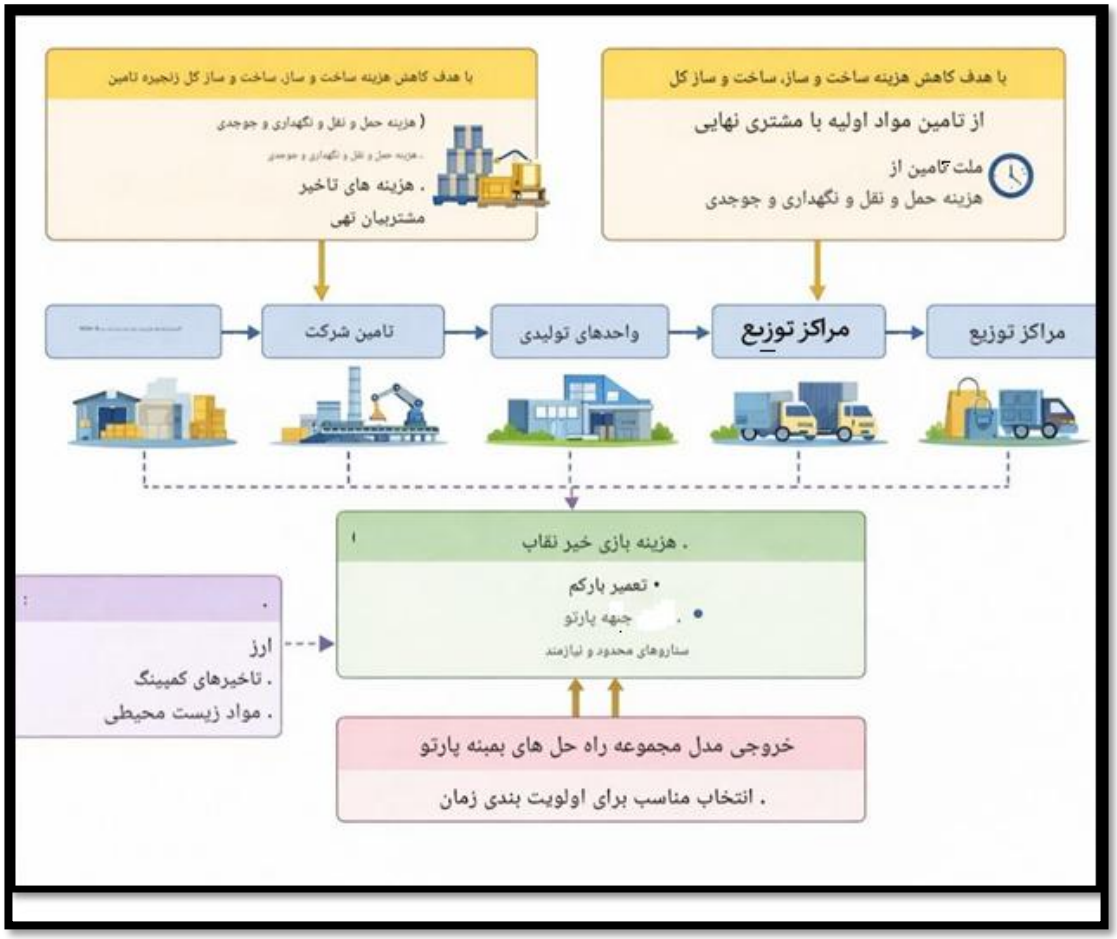
بر این اساس، با وجود پیشرفت‌های گسترده در ادبیات بین‌المللی، همچنان خلأیی در توسعه مدلی چندهدفه، مقاوم و مبتنی بر داده‌های واقعی برای بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌های جامع مالی و زمان تحویل در زنجیره تأمین وجود دارد که بتواند در شرایط عدم‌قطعیت و با بهره‌گیری از الگوریتم NSGA-II پاسخگوی نیازهای تصمیم‌گیری راهبردی باشد؛ بنابراین هدف این پژوهش، طراحی و توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم NSGA-II برای کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌های مالی و زمان تحویل در زنجیره تأمین تحت شرایط عدم‌قطعیت و اختلال است.

روش پژوهش و مواد

مدل مفهومی این پژوهش به منظور بهینه‌سازی عملکرد زنجیره تأمین، یک شبکه چهارسطحی شامل تأمین‌کنندگان، واحدهای تولیدی، مراکز توزیع و مشتریان نهایی را در نظر دارد. زیرا جریان مواد از تأمین‌کنندگان آغاز شده، پس از پردازش در واحدهای تولیدی و انتقال به مراکز توزیع، در نهایت به مشتریان نهایی تحویل داده می‌شود. هر یک از این سطوح با محدودیت‌های عملیاتی نظیر ظرفیت تولید، ظرفیت انبارداری، ظرفیت حمل‌ونقل و محدودیت‌های زمانی مواجه می باشند که در مدل لحاظ شده‌اند.در این مدل، عملکرد زنجیره تأمین بر اساس دو هدف اصلی ارزیابی می‌شود. هدف نخست، کمینه‌سازی هزینه کل زنجیره تأمین است که شامل هزینه‌های تولید، حمل‌ونقل، نگهداری موجودی، انبارداری و جریمه‌های ناشی از تأخیر در تحویل می‌باشد. هدف دوم، کمینه‌سازی زمان تحویل کل از مبدأ تأمین مواد اولیه تا مقصد نهایی مشتری است. این دو هدف ذاتاً با یکدیگر در تعارض بوده و نیازمند رویکردی چندهدفه برای دستیابی به تعادل مناسب میان آن‌ها هستند.به منظور حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، از الگوریتم ژنتیک نامغلوب‌سازی مرتب‌سازی‌شده نسل دوم[1]استفاده شده است. این الگوریتم با بهره‌گیری از مکانیزم مرتب‌سازی غیرغالب برای رتبه‌بندی راه‌حل‌ها و معیار فاصله تراکم برای حفظ تنوع جمعیت، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو را تولید می‌کند. خروجی مدل، جبهه پارتویی از راه‌حل‌های قابل‌قبول است که مدیران زنجیره تأمین می‌توانند بر اساس اولویت‌های هزینه‌ای

[1] (NSGA-II)

یا زمانی، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب نمایند.علاوه بر این، مدل مفهومی قابلیت بررسی سناریوهای مختلف محیطی نظیر نوسانات نرخ ارز، تأخیرهای گمرکی و ملاحظات زیست‌محیطی را داراست و از این رو می‌تواند به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار برای بهبود کارایی و تاب‌آوری زنجیره تأمین در شرایط اقتصادی ایران مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش

مدل به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط [1] فرمول‌بندی شده است. توابع هدف عبارتند از:

-کمینه‌سازی هزینه کل (شامل هزینه‌های حمل‌ونقل، انبارداری، تولید و جریمه تأخیر)

-کمینه‌سازی زمان تحویل کل (از مبدأ تا مقصد نهایی)

محدودیت‌ها شامل ظرفیت انبارها، ظرفیت وسایل نقلیه، تعادل جریان مواد، محدودیت‌های زمانی و محدودیت‌های ناشی از عدم قطعیت تقاضا است.

$$\min f_1 = \sum c_{ijp} X_{ijpt} + \sum h_{jp} I_{jpt} + \sum p_{ip} \prod_{p} + \sum t_{ij} Z_{ij} + \sum e_{ij} X_{ijpt}$$

$$\min f_2 = \max_{k,p,t} \left(\sum_{j} \tau_{jk} Y_{jkpt} / D_{kpt} \right)$$

[1] MILP

الگوریتم[1] با پارامترهای زیر پیاده‌سازی گردید:

اندازه جمعیت: ۱۰۰ تا ۱۵۰ ، –تعداد نسل‌ها: ۳۰۰ تا ۵۰۰، نرخ تقاطع: ۰/۹ (با عملگر[2])، نرخ جهش: تطبیقی ۰/۰۱ تا ۰/۱[3] ، مکانیزم حفظ تنوع: رتبه‌بندی غیرغالب + فاصله تراکم[4]، تنظیم بهینه پارامترها با روش تاگوچی (آرایه متعامد L_9) انجام گرفت.

داده‌های ورودی از گزارش سالانه وزارت راه و شهرسازی (۱۴۰۴) و آمار گمرک ایران استخراج گردیده است. مسیر نمونه: تهران–بندرعباس با حجم حمل ۱۲۵۰۰ تن، هزینه حمل ۱۰/۶ میلیارد ریال، زمان متوسط ۴۸ ساعت و انتشار کربن ۴/۸ تن به ازای هر محموله. چهار سناریو بررسی شد:

پایه (شرایط عادی) ، نوسانی (افزایش ۲۰ درصدی نرخ ارز)، اختلالی (افزایش ۳۰ درصدی زمان گمرکی)

پایدار (کمینه‌سازی انتشار کربن)

معیارهای ارزیابی شامل حجم هایپروولوم، پراکندگی جبهه پارتو، فاصله نسل‌به‌نسل[5] و فاصله معکوس نسل‌به‌نسل بود. آزمون‌های آماری شامل آزمون t جفتی، واریانس یک‌طرفه [6] و آزمون تعقیبی توکی انجام شد.

یافته‌ها

در سناریوی پایه، میانگین هزینه کل به ۲۴۵ میلیارد ریال (انحراف استاندارد ۱۲٫۵) و میانگین زمان تحویل به ۱۸۷ ساعت (انحراف استاندارد ۹٫۲) رسید که معادل کاهش ۲۸ درصدی هزینه و ۲۲ درصدی زمان نسبت به مدل اقتصادی مقدار سفارش است.

در سناریوی پایدار، انتشار کربن دی‌اکسید به ۳٫۹ تن به ازای هر محموله کاهش یافت (۱۸ تا ۲۲ درصد بهبود). جبهه پارتو شامل ۴۲ تا ۴۸ راه‌حل غالب بود؛ حجم هایپروولوم میانگین ۰٫۷۳ (انحراف استاندارد ۰٫۰۲) و پراکندگی ۰٫۱۹ به دست آمد. نقطه زانو [7] در هزینه ۱۸۴٫۲۱ میلیارد ریال و زمان ۲۱۴٫۸۰ ساعت قرار گرفت.تحلیل حساسیت با آزمون واریانس یک‌طرفه ($F = 48.2$، $p < 0.001$)نشان داد اندازه اثر تقاضا ۰٫۳۲، نرخ ارز ۰٫۲۸ و تأخیر گمرکی ۰٫۲۵ است. شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰۰ تکرار، واریانس هزینه کمتر از ۵ درصد و کاهش ریسک اختلال ۲۰ تا ۲۵ درصد را تأیید کرد.مقایسه الگوریتم [8]با روش‌های ژنتیک ساده، کلونی مورچه و ازدحام ذرات، برتری آن را در تمام معیارها نشان داد (حجم هایپروولوم ۰٫۷۳ در مقابل ۰٫۵۸ تا ۰٫۶۴ سایر روش‌ها).

جدول ۱. نتایج عددی کلیدی در سناریوهای مختلف (میانگین ۱۰ اجرا)

سناریو	هزینه کل (میلیارد ریال) ± SD	زمان تحویل (ساعت) ± SD	CO_2 تن/محموله ± SD)	کاهش هزینه(٪)	بهبود زمان(٪)
پایه	۱۲/۵ ± ۲۴۵	۹/۲ ± ۱۸۷	۰/۳ ± ۴/۳	۲۸/۰	۲۲/۳
نوسان ارزی	۱۴/۲ ± ۲۸۶	۱۰/۱ ± ۱۹۹	۰/۴ ± ۴/۵	۲۴/۱	۱۹/۴
اختلال گمرکی	۱۵/۸ ± ۲۹۲	۱۱/۵ ± ۲۱۵	۰/۵ ± ۴/۸	۲۲/۴	۱۶/۲
پایدار	۱۳/۱ ± ۲۵۲	۹/۸ ± ۱۹۰	۰/۲ ± ۳/۹	۲۷/۲	۲۱/۰

[1] NSGA-II

[2] SBX

[3] Polynomial mutation

[4] SBX

[5] GD

[6] ANOVA

[7] knee point

[8] NSGA-II

جدول ۲. کیفیت جبهه پارتو (میانگین ۵ اجرا)

سناریو	تعداد جواب غیرغالب	Hypervolume ± SD	Spread ± SD	GD ± SD
پایه	۴۵ ± ۳	۰/۷۳ ± ۰/۰۲	۰/۱۹ ± ۰/۰۲	۰/۰۴۳ ± ۰/۰۰۸
پایدار	۴۷ ± ۳	۰/۷۴ ± ۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۰۳۹

جدول ۳. تحلیل حساسیت (*ANOVA*)

عامل	F	p-value	اندازه اثر (η^2)	رتبه تأثیر
نوسان تقاضا	۴۸/۲	<۰/۰۰۱	۰/۳۲	۱
نرخ ارز	۳۹/۷	<۰/۰۰۱	۰/۲۸	۲
تأخیر گمرکی	۳۳/۴	<۰/۰۰۱	۰/۲۵	۳

جدول ۴. مقایسه *NSGA-II* با الگوریتم‌های دیگر (سناریوی پایه)

الگوریتم	Hypervolume	زمان اجرا (دقیقه)	کاهش هزینه(٪)	بهبود زمان(٪)
NSGA-II	۰/۷۳	۱۳/۲	۲۸/۰	۲۲/۳
GAساده	۰/۵۹	۲۱/۴	۱۹/۱	۱۴/۸
ACO	۰/۶۴	۱۸/۷	۲۲/۶	۱۸/۵
PSO	۰/۶۲	۱۶/۹	۲۰/۴	۱۷/۲

نقطه زانو در سناریوی پایه تقریباً (۱۸۴٬۲۱۰ میلیارد ریال، ۲۱۴٫۸۰ ساعت) قرار گرفت.شبیه‌سازی *Monte Carlo*(۱۰۰۰ تکرار) واریانس هزینه را زیر ۵٪ و کاهش ریسک اختلال را ۲۰–۲۵٪ نشان داد.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل پیشنهادی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم NSGA-II توانسته است در سناریوی پایه، کاهش معنادار ۲۸ درصدی در هزینه کل و ۲۲ درصدی در زمان تحویل نسبت به رویکردهای سنتی ایجاد کند ($p < 0.001$). این نتایج حاکی از آن است که بهره‌گیری از رویکردهای تکاملی چندهدفه در محیط‌های پیچیده زنجیره تأمین می‌تواند تعادل مؤثری میان اهداف متعارض برقرار سازد. برتری عملکرد NSGA-II از نظر کیفیت جبهه پارتو، مقدار هایپروولوم و سرعت همگرایی نیز با یافته‌های کلاسیک ارائه‌شده توسط (Deb et al., 2002) همسو است که کارایی مکانیزم رتبه‌بندی غیرغالب و فاصله تراکم را در حفظ تنوع و تولید راه‌حل‌های برتر نشان داده‌اند. همچنین نتایج این مطالعه با پژوهش (Acerce & Denizhan, 2025) که کاربرد NSGA-II را در زنجیره سرد دو لایه بررسی کرده و بهبود هم‌زمان هزینه و زمان را گزارش نموده است، هم‌راستا می‌باشد.

کاهش قابل‌توجه هزینه‌ها در مدل پیشنهادی را می‌توان ناشی از یکپارچه‌سازی تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص جریان و مدیریت موجودی دانست؛ موضوعی که در پژوهش (Li et al., 2023) نیز به‌عنوان عامل کلیدی در بهبود عملکرد شبکه تحت سناریوهای اختلال معرفی شده است. در آن مطالعه، مدل یکپارچه مکان‌یابی–موجودی توانست ریسک وقفه را کاهش دهد و سطح خدمت را تثبیت کند؛ یافته‌ای که با نتایج کاهش زمان تحویل در این پژوهش سازگار است. افزون بر این، تحلیل حساسیت نشان داد نوسان تقاضا بیشترین اندازه اثر را بر عملکرد مدل دارد که با رویکردهای مدیریت ریسک مبتنی بر سناریونویسی و بهینه‌سازی مقاوم مطرح‌شده در (Khalamandro, 2025) و (Vahidi et al., 2018) مطابقت دارد. در واقع، این پژوهش نیز تأیید می‌کند که توجه هم‌زمان به عدم‌قطعیت تقاضا و ظرفیت، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری عملکرد شبکه دارد.

در سناریوی پایدار، کاهش ۱۸ تا ۲۲ درصدی انتشار دی‌اکسید کربن نشان داد که مدل چندهدفه قادر است اهداف زیست‌محیطی را بدون قربانی‌کردن کامل کارایی اقتصادی لحاظ کند. این یافته با نتایج (Abbasi et al., 2022) در طراحی شبکه حلقه‌بسته سبز و نیز مدل دو لایه مقاوم سبز ارائه‌شده در (Yavari & Zaker, 2019) هم‌راستا است؛ جایی که استفاده از رویکردهای چندهدفه منجر به کاهش هم‌زمان هزینه و انتشار شده بود. همچنین پژوهش (Hasani et al., 2021) نشان داده است که لحاظ ملاحظات منطقه‌ای و پایداری می‌تواند تاب‌آوری شبکه را در برابر اختلالات افزایش دهد. در این راستا، نتایج مطالعه حاضر بیانگر آن است که ترکیب اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در قالب یک چارچوب تکاملی، قابلیت تحقق هم‌زمان کارایی و پایداری را فراهم می‌کند.

از منظر تاب‌آوری، نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تحلیل واریانس نشان داد که مدل پیشنهادی در برابر سناریوهای نوسان ارزی و اختلال گمرکی نیز عملکرد قابل‌قبولی دارد. این موضوع با یافته‌های (Ghahremani-Nahr et al., 2022) در زمینه بهینه‌سازی مقاوم چنددوره‌ای و چندمحصولی سازگار است که تأکید می‌کنند مدل‌های مقاوم می‌توانند در محیط‌های دارای تخفیف و عدم‌قطعیت، پایداری تصمیمات را حفظ کنند. همچنین رویکردهای مبتنی بر تأمین چندمنبعی و اشتراک اطلاعات که در (Mehrjerdi & Shafiee, 2020) مطرح شده‌اند، نشان می‌دهند که انعطاف‌پذیری ساختاری نقش مهمی در کاهش ریسک اختلال دارد؛ یافته‌ای که با کاهش ریسک ۲۰ تا ۲۵ درصدی گزارش‌شده در این پژوهش همخوانی دارد.

از نظر مقایسه الگوریتمی، برتری NSGA-II نسبت به GA ساده، ACO و PSO در شاخص هایپروولوم و همگرایی سریع‌تر، با ادبیات کلاسیک و معاصر هم‌راستا است. (Deb et al., 2002) نشان داده‌اند که ساختار نخبه‌گرای NSGA-II موجب جلوگیری از از دست رفتن راه‌حل‌های برتر می‌شود. همچنین کاربردهای اخیر این الگوریتم در صنایع مختلف از جمله نگهداری زیرساخت‌ها و خوشه‌های صنعتی سبز، کارایی آن را در مسائل پیچیده چندهدفه تأیید کرده‌اند (Jihu, 2024). افزون بر این، در مدل‌های داده‌محور مقاوم مانند پژوهش (Mansouri Mosalou et al., 2024)، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی برای ترکیب داده‌های تاریخی با سناریوهای عدم‌قطعیت، موجب ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری شده است که با نتایج این پژوهش قابل مقایسه است.

در بعد تحول دیجیتال، هرچند مدل حاضر مستقیماً از فناوری‌هایی نظیر بلاک‌چین یا دوقلوی دیجیتال بهره نگرفته است، اما چارچوب آن قابلیت ادغام با این فناوری‌ها را دارد. پژوهش (Ramanamuni, 2025) نشان داده است که استفاده از دوقلوی دیجیتال در بهینه‌سازی زنجیره تأمین، امکان ارزیابی بلادرنگ سناریوها را فراهم می‌کند. همچنین کاربرد هوش مصنوعی در بهینه‌سازی زنجیره تأمین ایالات متحده موجب کاهش هزینه و افزایش کارایی شده است (Shil et al., 2024). از سوی دیگر، ادغام بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند در تأمین مالی زنجیره تأمین، به بهبود شفافیت و اعتماد کمک می‌کند (Wang et al., 2024). چارچوب تصمیم‌یارهای ترکیبی انسان–هوش مصنوعی نیز در محیط‌های بحرانی می‌تواند تصمیمات پیچیده را تسهیل کند (Wang, 2024). بنابراین نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان زیرساخت الگوریتمی برای توسعه سامانه‌های هوشمند یکپارچه مورد استفاده قرار گیرد.

در ادبیات داخلی، تمرکز بر هماهنگی تولید و حمل‌ونقل بیشتر در قالب مدل‌های تک‌هدفه انجام شده است (Pasban, 2019). این پژوهش با ارائه مدلی چندهدفه و مقاوم مبتنی بر داده‌های واقعی، خلأ موجود را تا حدی پر می‌کند و نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه و زمان تحویل در محیط‌های عدم‌قطعیت‌محور امکان‌پذیر است. همچنین توجه به سرمایه انسانی و فرآیندهای توسعه استعداد در زنجیره تأمین که در (Memari et al., 2024) مطرح شده، بیانگر آن است که کارایی عملیاتی باید با توسعه منابع انسانی همراه باشد. در حوزه صنایع سلامت نیز ادغام هوش مصنوعی و بلاک‌چین در بهینه‌سازی زنجیره تأمین نشان‌دهنده ظرفیت بالای فناوری‌های نوین در افزایش شفافیت و کارایی است (Iftikhar & Jamil, 2025).

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از رویکردهای چندهدفه تکاملی در کنار تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی عدم‌قطعیت، می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تصمیم‌گیری راهبردی در زنجیره تأمین فراهم آورد. همسویی نتایج با مطالعات پیشین در حوزه بهینه‌سازی مقاوم، شبکه‌های سبز، فناوری‌های دیجیتال و الگوریتم‌های تکاملی، اعتبار بیرونی مدل را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی می‌تواند در صنایع مختلف قابل تعمیم باشد.

این پژوهش با وجود جامعیت نسبی، دارای محدودیت‌هایی است. نخست آنکه داده‌های مورد استفاده محدود به یک کریدور مشخص و بازه زمانی معین بوده و تعمیم نتایج به سایر صنایع یا مناطق نیازمند احتیاط است. دوم، اگرچه سناریوهای عدم‌قطعیت لحاظ شده‌اند، اما تمامی اشکال ریسک از جمله ریسک‌های ژئوپلیتیک یا بحران‌های پیش‌بینی‌نشده در مدل وارد نشده‌اند. سوم، مدل بر مبنای فرضیات خطی در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توسعه یافته و ممکن است برخی رفتارهای غیرخطی بازار را به‌طور کامل منعکس نکند.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، مدل حاضر با الگوریتم‌های یادگیری عمیق و پیش‌بینی تقاضای پویا ترکیب شود تا قابلیت انطباق بلادرنگ افزایش یابد. همچنین اجرای پایلوت میدانی در یک صنعت کلیدی می‌تواند اعتبار عملی مدل را تقویت کند. توسعه نسخه هیبریدی NSGA-II با سایر فراابتکاری‌ها و بررسی عملکرد آن در مقیاس شبکه‌های بزرگ‌تر نیز از دیگر مسیرهای تحقیقاتی آتی است.

در سطح عملی، توصیه می‌شود سازمان‌ها با ایجاد داشبوردهای تصمیم‌یار مبتنی بر داده و یکپارچه‌سازی مدل با سامانه‌های برنامه‌ریزی منابع سازمانی، از نتایج این پژوهش بهره‌برداری کنند. همچنین آموزش مدیران و کارشناسان در حوزه تحلیل چندهدفه و مدیریت ریسک می‌تواند اثربخشی اجرای مدل را افزایش دهد. توسعه زیرساخت‌های دیجیتال برای جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ و پشتیبانی از تصمیمات مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی نیز از اقدامات ضروری برای بهره‌گیری کامل از ظرفیت‌های مدل پیشنهادی محسوب می‌شود.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازین اخلاقی

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

References

Abbasi, S., Daneshmand-Mehr, M., & Ghane Kanafi, A. (2022). Green closed-loop supply chain network design during the coronavirus (COVID-19) pandemic: A case study in the Iranian automotive industry. *Environment, Development and Sustainability*, *25*(3), 1-35. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02158-5

Acerce, A., & Denizhan, B. (2025). Application of the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) in a two-echelon cold supply chain. *Systems*, *13*(3), 206. https://doi.org/10.3390/systems13030206

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6*(2), 182-197. https://doi.org/10.1109/4235.996017

Ghahremani-Nahr, J., Pasandideh, S. H. R., & Niaki, S. T. A. (2022). A robust optimization approach for multi-objective, multi-product, multi-period, closed-loop green supply chain network designs under uncertainty and discount. *Journal of Industrial and Production Engineering*, *39*(1), 1-22. https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1984360

Hasani, A., Mokhtari, H., & Fattahi, M. (2021). An optimization approach for sustainable and resilient supply chain design with regional considerations. *Computers & Industrial Engineering*, *158*, 107414. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107414

Iftikhar, H., & Jamil, D. S. (2025). Leveraging AI and Blockchain Technologies for Optimizing Healthcare Supply Chain Management.

Jihu, L. (2024). *Green Supply Chain Management Optimization Based on Chemical Industrial Clusters*.

Joel, O. S., Oyewole, A. T., Odunaiya, O. G., & Soyombo, O. T. (2024). Leveraging artificial intelligence for enhanced supply chain optimization: a comprehensive review of current practices and future potentials. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, *6*(3), 707-721. https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i3.882

Khalamandro, M. (2025). Risk Management in International Supply Chains: Scenario Planning and Robust Optimization. *Підприємництво І Торгівля*(44), 169-177. https://doi.org/10.32782/2522-1256-2025-44-19

Li, Z., Li, X., & Zhou, Y. (2023). Integrated optimization model for facility location and inventory with disruption scenarios. *Expert Systems with Applications*, *212*, 118789. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118789

Mansouri Mosalou, F., Amiri, M., Taghavi Fard, M. T., & Haji Agha'i Kashteli, M. (2024). Design and Planning of Bioethanol Supply Chain Network with a Hybrid Data-Driven Robust Optimization Approach under Discrete Uncertainty Sets. *Decision Making and Operations Research*, 327-352. https://www.journal-dmor.ir/article_199979_en.html

Mehrjerdi, Y. Z., & Shafiee, M. (2020). A resilient and sustainable closed-loop supply chain using multiple sourcing and information sharing strategies. *Journal of Cleaner Production*, *289*, 125141. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125141

Memari, Z., Hasanzadeh, S. a., & Pouyandeh Kia, M. (2024). *Supply Chain Management: A Process for Optimizing Talent Identification and Nurturing in Sports*.

Pasban, F. (2019). *Coordination of Production and Transportation in the Supply Chain*. University of Tehran Press.

Ramanamuni, S. (2025). The Role of Digital Twins in Supply Chain Optimization. *Interantional Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, *09*(03), 1-6. https://doi.org/10.55041/ijsrem41779

Shil, S. K., Islam, M. R., & Pant, L. (2024). Optimizing US supply chains with AI: reducing costs and improving efficiency. *International Journal of Advanced Engineering Technologies and Innovations*, *2*(1), 223-247. https://www.researchgate.net/publication/387222202_Optimizing_US_Supply_Chains_with_AI_Reducing_Costs_and_Improving_Efficiency

Vahidi, F., Torabi, S. A., & Ramezankhani, A. (2018). A two-stage stochastic programming model for sustainable supply chain network design under disruption risk. *International Journal of Production Research*, *56*(21), 6615-6635. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1436785

Wang, S. (2024). Blockchain-Enabled Utility Optimization for Supply Chain Finance: An Evolutionary Game and Smart Contract Based Approach. *Mathematics*, *12*(8), 1243. https://doi.org/10.3390/math12081243

Wang, W., Chen, Y., Wang, Y., Deveci, M., Cheng, S., & Brito-Parada, P. R. (2024). A decision support framework for humanitarian supply chain management – Analysing enablers of AI-HI integration using a complex spherical fu zzy DEMATEL-MARCOS method. *Technological Forecasting and Social Change*, *206*, 123556. https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2024.123556

Yavari, M., & Zaker, H. (2019). An integrated two-layer network model for designing a resilient green-closed loop supply chain of perishable products under disruption. *Journal of Cleaner Production*, *289*, 125141. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125141