System Engineering and Productivity/ 2027/ Vol.7/ No.1/ 415-436

System Engineering and Productivity

10.22034/sep.2026.2092560.1518

Eco-Economic Multi-Objective Modeling for Optimizing Cross-Docking Operations in the Isfahan Steel Supply Chain

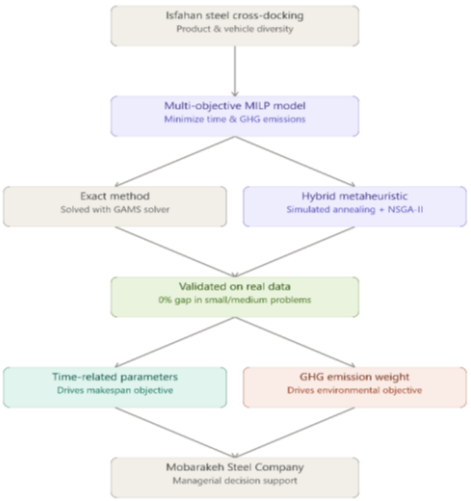
Mohammadreza Aghajafar Mahallati[1], Mohammad Hossein Darvish Motevalli[2,*], Seyyed Mostafa Mousavi[3], Majid Motamedi[4]

[1] Department of Industrial Management, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran
[2] Department of Industrial Management, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
[3] Department of Industrial Engineering, Nos.C., Islamic Azad University, Nowshahr, Iran
[4] Department of Industrial Management, Nos.C., Islamic Azad University, Nowshahr, Iran

HIGHLIGHTS

- Design of a novel multi-objective mathematical model for cross-docking management.
- Incorporating real-world system dynamics within the steel industry supply chain.
- Development and implementation of an efficient hybrid metaheuristic algorithm.
- Verification of the model's performance stability against minor parameter variations.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 26 June 2026
Revised: 2 September 2026
Accepted: 11 September 2026
Available online: 11 September 2025
*Correspondence:
mhd.darvish@iau.ac.ir
How to cite this article:
Mahallati, M. A., Motevalli, M. H. D., Mousavi, S. M., & Motamedi, M. (2027). Eco-economic multi-objective modeling for optimizing cross-docking operations in the Isfahan steel supply chain. *System Engineering and Productivity*, 7 (1), 415-436.

Keywords:
Cross-docking
Mathematical Modeling
Economic Objectives
Environmental Objectives
Isfahan Steel Supply Chain

ABSTRACT

This study addresses eco-economic multi-objective modeling to optimize cross-docking operations in the steel supply chain. Moving beyond conventional literature that often relies on homogeneous fleets and single-product assumptions, a key innovation here is the incorporation of product and vehicle diversity through specific indexed modeling, which captures complex, real-world industrial constraints. The model is solved using an efficient hybrid metaheuristic approach, where NSGA-II performs global exploration while Simulated Annealing (SA) is embedded as a local search operator to refine solutions within each generation. Computational experiments demonstrate a zero percent optimality gap in small dimensions, with the hybrid approach maintaining high efficiency for large-scale industrial cases. Furthermore, sensitivity analysis using real data from the Isfahan Mobarakeh Steel Company provides actionable insights for managers: it identifies critical operational bottlenecks (loading, unloading, and internal transfer durations) and enables data-driven trade-offs between logistical makes pan and greenhouse gas emissions, establishing the model as a robust decision-support tool for sustainable heavy industry operations.

2538-2195/© 2027 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

In today's dynamic and competitive industrial landscape, supply chain optimization plays a pivotal role in reducing logistics costs and increasing operational efficiency while addressing urgent environmental concerns. In heavy industries like steel manufacturing, traditional warehousing often leads to prolonged storage, higher inventory holding costs, and increased delivery times. Cross-docking has emerged as a prominent logistics strategy where goods are directly transferred from inbound trucks to outbound trucks with minimal or no intermediate storage, significantly reducing warehousing spatial requirements and lead times. As highlighted by Algam et al. (2024), management of material flow is crucial for gaining competitive advantages. However, integrating operational scheduling with environmental preservation—specifically minimizing greenhouse gas emissions—presents conflicting objectives that demand advanced mathematical modeling. This study introduces a multi-objective, multi-period mathematical model tailored for the Isfahan Mobarakeh Steel Company to balance makespan minimization with environmental sustainability under product and vehicle diversity.

Recent literature highlights significant advancements in supply chain and cross-docking optimization. Darvish Motevali and Motamedi (2020) evaluated the efficiency of sequential multilevel supply networks using dynamic modeling, proving that dynamic frameworks offer more realistic evaluations than static ones. For humanitarian logistics, Poornaser et al. (2022) developed a multi-objective optimization model for routing disaster relief vehicles to reduce costs and repair times. In the context of green operations, Faghih-Mohammadi et al. (2023) designed a green closed-loop supply chain for cross-dock facilities using queuing systems to reduce fleet energy consumption.

Despite these developments, key gaps remain in the existing literature:

- Most cross-docking scheduling models focus heavily on single economic objectives, neglecting integrated eco-economic trade-offs.
- Practical industrial traits, such as high product diversity and heterogeneous vehicle configurations, are frequently omitted in standard theoretical frameworks.

Many models remain entirely deterministic or static, ignoring operational delays and the benefits of hybrid metaheuristic solution methods in complex industrial contexts.

2. Methodology

This study adopts a quantitative, applied Operations Research approach formulated as a Multi-Objective Mixed-Integer Linear Programming model. The physical framework comprises a cross-docking terminal with inbound and outbound docks operating over a discrete planning horizon. The proposed model simultaneously handles two conflicting objective functions:

- **Operational Efficiency:** Minimizing the maximum operational makespan to ensure rapid material throughput, reduce terminal congestion, and maintain high customer service levels.
- **Environmental Impact:** Minimizing the total greenhouse gas emissions generated by inbound and outbound transportation operations at the terminal gates.

The core constraints ensure rigorous mass balance for diverse products, strict single-truck allocation to dock doors per time period, truck processing sequence priorities, and logical bounds governing loading, unloading, internal transfer times, and arrival delays. To solve the multi-objective problem simultaneously, the weighted-sum method is implemented, distributing weights evenly or adjusting them dynamically to capture the trade-off frontier between logistics performance and carbon footprint reduction.

3. Results and Discussion

Because cross-docking scheduling and location-allocation problems belong to the NP-hard class of computational complexity, exact optimization engines fail to provide solutions for large-scale industrial scenarios within practical time limits. To solve this, a hybrid metaheuristic approach combining Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) and Simulated Annealing (SA) was developed. The NSGA-II framework maintains population diversity and handles multi-objective sorting based on Pareto dominance, utilizing custom multi-point crossover and inversion mutation operators. Concurrently, the Simulated Annealing engine applies local search movements to fine-tune the generated solutions and avoid premature convergence in local optima, operating under a controlled exponential cooling schedule.

The mathematical model was validated using real operational data from the archives of the Isfahan Mobarakeh Steel Company. Computational experiments were evaluated across small, medium, and large dimensions, comparing the exact solutions from GAMS against the proposed hybrid metaheuristic algorithm:

- **Small and Medium Problems:** The mathematical model demonstrated exceptional solvability, maintaining a zero percent optimality gap between GAMS and the hybrid metaheuristic approach in smaller test cases, validating the algorithm's reliability.

- **Large Problems:** As complexity scales, GAMS failed to find optimal solutions within the designated time limit, whereas the hybrid NSGA-II/SA metaheuristic successfully yielded high-quality near-optimal solutions in highly reasonable computational times.
- **Sensitivity Analysis:** The analysis revealed that total operational time is exceptionally sensitive to internal handling variations, including loading, unloading, and cross-dock transfer durations. Conversely, altering the environmental objective weight explicitly mapped out the conflicting economic-environmental trade-offs. The system proved robust against minor perturbations but exhibited noticeable performance degradation under extreme conditions, such as severe terminal capacity drops or excessive vehicle arrival delays.

4. Conclusions

This research successfully develops an eco-economic mathematical framework that optimizes cross-docking operations within the steel supply chain. By incorporating vehicle and product diversity alongside environmental emission restrictions, the model bridges the gap between theoretical operations research and practical logistical execution. The proposed hybrid NSGA-II/SA algorithm provides managers at Isfahan Mobarakeh Steel with a reliable, practical decision-support tool to reduce delivery lead times and lower carbon footprints. Future research directions include the integration of real-time tracking data via the Internet of Things (IoT) and the implementation of robust optimization models to handle stochastic parameters effectively.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to all colleagues whose valuable insights and expertise played a significant role in the completion and advancement of this research.

Funding

This research received no external funding.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships.

Author Contribution Statement

Mohammadreza Aghajafar Mahallati: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Mohammad Hossein Darvish Motevalli:** Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing – review & editing; **Seyyed Mostafa Mousavi:** Supervision, Writing – review & editing; **Majid Motamedi:** Supervision, Writing – review & editing.

Data Availability Statement

Data available on request: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

References

Algam, T., Chowdhury, A., & Kundu, P. (2024, June). Optimal PMU placement using BAOA by considering variable cost. In *2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEPES60647.2024.10653595

Darvish Motevali, M. H., & Motamedi, M. (2020). Dynamic modeling to evaluate the efficiency of a sequential multilevel supply network. *Journal of Decisions and Operations Research*, *5*(3), 272-289. https://doi.org/10.22105/dmor.2020.242474.1196

Faghih-Mohammadi, F., Nasiri, M. M., & Konur, D. (2023). Cross-dock facility for disaster relief operations. *Annals of Operations Research*, *322*(1), 497-538. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04939-2

Poornaser, M., Amoozadkhalili, H., & Motamedi, M. (2022). Routing disaster relief vehicles in a humanitarian supply chain. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, *12*(2), 205-216. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23225955.1401.12.2.5.7

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۶/ دوره ۷/ شماره ۱/ صفحه ۴۱۵-۴۳۶

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

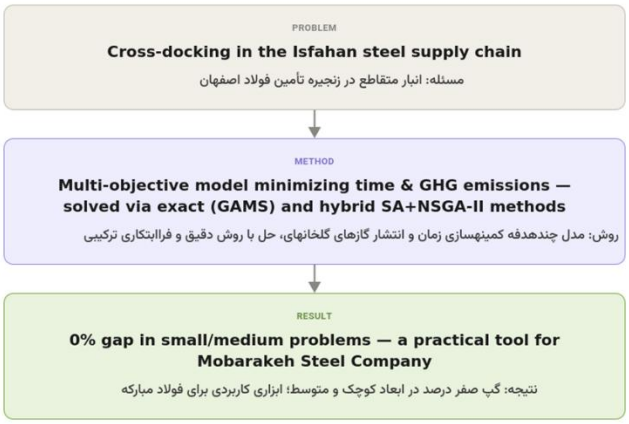
10.22034/sep.2026.2092560.1518

مدل‌سازی چندهدفه اقتصادی–زیست‌محیطی برای بهینه‌سازی عملیات انبار متقاطع در زنجیره تأمین فولاد اصفهان

محمدرضا آقاجعفر محلاتی[۱]، محمدحسین درویش متولی[۲،*]، سیدمصطفی موسوی[۳]، مجید معتمدی[۴]

[۱] گروه مدیریت صنعتی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
[۲] گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
[۳] گروه مهندسی صنایع، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران
[۴] گروه مدیریت صنعتی، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- طراحی یک مدل ریاضی جدید و چندهدفه در مدیریت انبار متقاطع
- لحاظ کردن پویایی‌های واقعی سیستم در زنجیره تأمین صنعت فولاد
- توسعه و پیاده‌سازی یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی کارآمد
- اثبات پایداری عملکرد مدل نسبت به تغییرات کوچک پارامترها

چکیده

پژوهش حاضر به مدل‌سازی چندهدفه اقتصادی-زیست‌محیطی جهت بهینه‌سازی عملیات انبار متقاطع در زنجیره تأمین فولاد می‌پردازد. برخلاف مدل‌های موجود در ادبیات که اغلب برفرض ناوگان همگن و محصولات تک‌نوعی استوارند، نوآوری کلیدی این مطالعه، توسعه یک مدل بهینه‌سازی خطی عدد صحیح است که با تعریف شاخص‌های اختصاصی برای کالاها و انواع ناوگان، پیچیدگی‌های واقعی (تنوع محصول و ناهمگنی وسایل نقلیه) را به قیود مدل وارد کرده است. مدل توسعه‌یافته با رویکرد فراابتکاری ترکیبی حل‌شده است که در آن الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب چندهدفه نسل دوم وظیفه اکتشاف فضای حل و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید وظیفه بهبود محلی بر روی پاسخ‌های جدید را بر عهده دارند. آزمایش‌های محاسباتی نشان می‌دهند که در ابعاد کوچک، گپ بهینگی صفر است و در ابعاد بزرگ نیز، ترکیب مذکور کارایی بالایی دارد. تحلیل حساسیت انجام‌شده بر روی داده‌های واقعی شرکت فولاد مبارکه اصفهان، اولویت‌بندی راهبردی را برای مدیران مشخص کرده است: شناسایی گلوگاه‌های زمانی (بارگیری، تخلیه و انتقال داخلی) و تعیین نقطه بهینه بین زمان عملیات و هزینه‌های زیست‌محیطی. این نتایج به‌عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم عملیاتی، امکان مدیریت پایدار جریان مواد را در صنایع سنگین فراهم می‌آورد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۰
ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۶/۲۰

*نویسنده مسئول:
mhd.darvish@iau.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

انبار متقاطع
مدل‌سازی ریاضی
اهداف اقتصادی
اهداف زیست‌محیطی
زنجیره تأمین فولاد اصفهان

©۲۰۲۷ 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 فضای رقابتی و پویای امروز، سازمان‌ها ناگزیرند تا با بهینه‌سازی فرآیندهای زنجیره تأمین، ضمن کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری، اثرات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های خود را نیز کنترل نمایند. در این میان، مدیریت کارای جریان مواد و اطلاعات در زنجیره تأمین نقشی حیاتی در ارتقای عملکرد و دستیابی به توسعه پایدار ایفا می‌کند. ازاین‌رو، در سال‌های اخیر با تشدید رقابت در بازارهای صنعتی، سازمان‌ها را بر آن داشته است تا با بهبود کارایی زنجیره تأمین، هزینه‌ها را کاهش و رضایت مشتریان را افزایش دهند. زنجیره تأمین، به‌ویژه در صنایع سنگین مانند فولاد، شامل مجموعه‌ای از فرآیندهای پیچیده در تأمین، تولید، انبارداری و توزیع است که هرگونه ناکارآمدی در یکی از این مراحل می‌تواند عملکرد کلی سیستم را تحت تأثیر قرار دهد (Rajabzadeh & Mousavi, 2023). در این میان، مدیریت هوشمندانه جریان مواد و اطلاعات میان واحدهای تولیدی و مراکز توزیع، نقشی کلیدی در بهبود بهره‌وری و دستیابی به مزیت رقابتی ایفا می‌کند (Algam et al., 2024).

یکی از رویکردهای نوین در بهبود جریان فیزیکی در زنجیره تأمین، استفاده از انبار متقاطع[1] است. در این روش، کالاها بدون نیاز به انبارش طولانی‌مدت، مستقیماً از تأمین‌کنندگان دریافت و پس از انجام عملیات مرتب‌سازی و بارگیری مجدد، به مقاصد نهایی ارسال می‌شوند. این رویکرد باعث کاهش سطح موجودی، صرفه‌جویی در فضا و هزینه‌های انبارداری، کاهش زمان تحویل، و درنهایت افزایش رضایت مشتریان می‌گردد (Chen et al., 2024؛ Zadehbagheri et al., 2023).

بااین‌حال، طراحی و پیاده‌سازی مؤثر انبار متقاطع نیازمند مدل‌سازی دقیق تصمیمات مرتبط با حمل‌ونقل، زمان‌بندی، ظرفیت و محدودیت‌های زیست‌محیطی است (Hemmati et al., 2024).

در صنایع فولاد، از جمله شرکت فولاد مبارکه اصفهان، حجم بالای تولید، تنوع محصولات و نیاز به تحویل به‌موقع کالاها، پیچیدگی‌های خاصی را در مدیریت زنجیره تأمین ایجاد کرده است. چالش‌هایی نظیر هماهنگی بین مراکز تولید و توزیع، کنترل هزینه‌های حمل‌ونقل، و مدیریت ظرفیت انبارها از جمله عوامل مؤثر بر عملکرد این زنجیره بشمار می‌روند. بنابراین، توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه که بتواند هم‌زمان جنبه‌های اقتصادی، زمانی و زیست‌محیطی تصمیمات مرتبط با انبار متقاطع را در نظر گیرد، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. از یک‌سو، تصمیمات نادرست در زمان‌بندی و تخصیص منابع می‌تواند موجب افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل، تأخیر در تحویل و کاهش سطح خدمت‌رسانی شود؛ و از سوی دیگر، استفاده نامناسب از وسایل نقلیه و افزایش مصرف سوخت سبب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات منفی زیست‌محیطی می‌گردد. درنتیجه، تصمیم‌گیری در خصوص عملیات انبار متقاطع باید به‌گونه‌ای انجام گیرد که اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شوند.

بااین‌حال، بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های توسعه‌یافته برای مدیریت انبار متقاطع، تک‌هدفه بوده و عمدتاً بر جنبه‌های اقتصادی مانند حداقل‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل یا کاهش زمان تحویل تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که ملاحظات زیست‌محیطی از جمله میزان انتشار CO_2، مصرف انرژی و اثرات پایداری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ پژوهشی، به‌ویژه در صنایع بزرگ و پرمصرفی همچون فولاد، بیانگر نیاز به توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه اقتصادی–زیست‌محیطی است که بتواند اهداف متضاد هزینه و آلودگی را به‌صورت هم‌زمان در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ نماید. مدل پیشنهادی در این پژوهش با هدف بهینه‌سازی فرآیندهای حمل‌ونقل و عملیات انبار متقاطع در زنجیره تأمین فولاد مبارکه اصفهان ارائه شده است. در این مدل، علاوه بر به حداقل رساندن هزینه‌ها و زمان انتقال کالاها، تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز مورد توجه قرار گرفته است. برای حل مدل، از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود تا بتوان با کارایی بالا و در زمان معقول به پاسخ‌های نزدیک به بهینه دست یافت. بنابراین، نوآوری این تحقیق در دو بعد اصلی قابل توجه است: در نظر گرفتن هم‌زمان اهداف متضاد اقتصادی و زیست‌محیطی در قالب یک مدل چندهدفه و چنددوره‌ای برای مدیریت انبار متقاطع؛ کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل و ارزیابی عملکرد

[1] Cross-Docking

آن با استفاده از داده‌های واقعی شرکت فولاد مبارکه اصفهان. بنابراین، سؤال اصلی تحقیق جاری عبارت است از اینکه چگونه می‌توان با استفاده از یک مدل ریاضی چندهدفه و بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری، عملیات انبار متقاطع در زنجیره تأمین فولاد اصفهان را به‌گونه‌ای بهینه‌سازی کرد که ضمن حداقل‌سازی هزینه‌های اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی ناشی از حمل‌ونقل و انبارداری نیز کاهش یابد؟ در راستای پاسخ به این سؤال، مدل پیشنهادی پژوهش با هدف ایجاد توازن میان کارایی اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی طراحی می‌شود. این مدل قادر است تصمیمات مرتبط با تخصیص وسایل نقلیه، برنامه‌ریزی زمان ورود و خروج کالا، و ظرفیت انبار متقاطع را بهینه‌سازی نماید. درنهایت، مدل با استفاده از داده‌های واقعی شرکت فولاد مبارکه اصفهان اعتبارسنجی و عملکرد آن در بهبود شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ارزیابی خواهد شد.

ساختار مقاله به این صورت است که در بخش دوم، مرور ادبیات و شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی ارائه می‌شود. در بخش سوم، مدل ریاضی و روش حل مسئله تشریح شده است. در بخش چهارم، نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل بر روی داده‌های واقعی بررسی می‌گردد و در بخش پایانی، جمع‌بندی و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده مطرح خواهد شد.

۲- مرور ادبیات

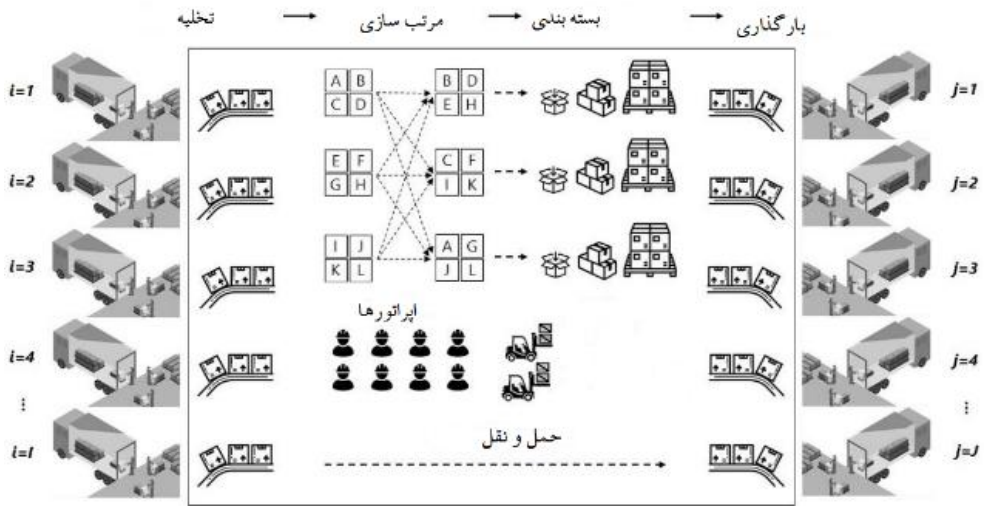
درویش‌متولی و معتمدی با مدل‌سازی پویا و توسعه مدل تحلیل پوششی داده‌های غیرشعاعی، کارایی شبکه تأمین چندسطحی را در صنعت سیمان ارزیابی کردند. نتایج نشان داد مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های ایستا، ارزیابی واقعی‌تر و منطقی‌تری از عملکرد شبکه ارائه می‌دهد (Darvish Motevali & Motamedi, 2020). پورناصر و همکاران یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای مسیریابی وسایل نقلیه در زنجیره تأمین بشردوستانه توسعه دادند که اهداف آن کاهش هزینه و زمان تعمیرات بود. مدل ارائه‌شده نسبت به روش‌های موجود، کارایی بالاتری در پاسخ‌گویی به تقاضاهای امدادی داشت (Poornaser et al., 2022). فقیه‌محمدی و همکاران شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز را برای انبارهای متقاطع با استفاده از سیستم صف طراحی کردند. مدل طراحی‌شده توسط آن‌ها موجب کاهش اثرات زیست‌محیطی و مصرف انرژی ناوگان حمل‌ونقل شد (Faghih-Mohammadi et al., 2023). امانی و نصیری به مدل‌سازی انبار متقاطع در زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن کاهش انتشار گاز کربن در ناوگان ناهمگن پرداختند. نتایج مدل ریاضی غیرخطی آن‌ها بهبود هم‌زمان شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را نشان داد(Amani & Nasiri, 2023). رجب‌زاده و موسوی مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز ارائه کردند که با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و روش اپسیلون محدودیت، توازن میان هزینه‌های عملیاتی و اثرات زیست‌محیطی را در شرایط عدم قطعیت برقرار ساخت (Rajabzadeh & Mousavi, 2023). موسوی و همکاران مدلی برای مکان‌یابی انبارهای مرکزی و ثانویه در شبکه چندسطحی محصولات فاسدشدنی ارائه نمودند. این مدل با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت، حمل‌ونقل و موجودی، منجر به حداقل‌سازی هزینه‌های کل زنجیره تأمین گردید (Mousavi et al., 2024). مودیکا و همکاران مسئله مکان‌یابی انبار متقاطع و مسیریابی کامیون‌ها را تحت عدم قطعیت بررسی کردند و با استفاده از برنامه‌ریزی احتمالی فازی، دو مدل مکان‌یابی و مسیریابی را به‌صورت یکپارچه تحلیل نمودند (Modica et al., 2024). بابازاده رفیعی و همکاران یک مدل استوار چندهدفه برای زنجیره تأمین خون در شرایط بحرانی ارائه کردند که اهداف آن کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان بود. نتایج نشان داد افزایش تعداد مراکز جمع‌آوری منجر به بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌شود (Babazadeh Rafiei et al., 2024). رجب‌زاده و همکاران مدلی برای مکان‌یابی انبار عبوری و برنامه‌ریزی مسیریابی وسایل نقلیه با استفاده از برنامه‌ریزی دوفازی MIP توسعه دادند. الگوریتم ابتکاری پیشنهادی آن‌ها در مقیاس‌های مختلف عملکرد مناسبی از نظر زمان و کیفیت پاسخ داشت (Rajabzadeh et al., 2025). حق‌گویی و همکاران به کاهش زمان عملیات و تعداد کامیون‌های موردنیاز در انبار متقاطع پرداختند. آن‌ها یک مدل غیرخطی چندمعیاره ارائه کردند و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک بهره گرفتند که نتایج بهینه‌ای در کاهش تأخیر و بهبود توالی عملیات داشت (Haghgoei et al., 2024). اصغریار و

همکاران چارچوبی یکپارچه برای مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایل نقلیه با انبار متقاطع ارائه کردند. مدل MILP آن‌ها با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل و عملیات، از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل نمونه‌های بزرگ بهره گرفت (Asgharyar et al., 2025). کورت و همکاران به تحلیل پویای شبکه زنجیره تأمین با تمرکز بر نقش انبار متقاطع پرداختند و با استفاده از مدل عدد صحیح مختلط پویا و الگوریتم اکتشافی، بهینه‌سازی هزینه کل سیستم شامل حمل‌ونقل و موجودی کوتاه‌مدت را انجام دادند (Kurt et al., 2025).

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که اگرچه تحقیقات متعددی در زمینه بهینه‌سازی شبکه‌های زنجیره تأمین و عملیات انبار متقاطع انجام شده است، اما چند نکته کلیدی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با بررسی جامع ادبیات تحقیق، مشخص گردید که اگرچه پژوهش‌های متعددی در حوزه زمان‌بندی کراس‌داک انجام شده است، اما اکثر آن‌ها سیستم را در شرایط ساده‌شده (مانند محصولات همگن یا ناوگان یکنواخت) در نظر گرفته‌اند. شکاف اصلی در مطالعات پیشین، عدم توجه هم‌زمان به تنوع فیزیکی محصولات که نیازمند زمان‌های جابجایی متفاوت هستند و ناهمگنی ناوگان حمل و نقل با ظرفیت‌ها و نرخ انتشار آلاینده متفاوت است. درحالی‌که برخی مقالات به یکی از این جنبه‌ها پرداخته‌اند، تلفیق این محدودیت‌های عملیاتی با اهداف زیست‌محیطی در قالب یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه که توسط یک الگوریتم هیبریدی کارآمد (NSGA-II/SA) حل شود، در ادبیات این حوزه به‌ندرت دیده شده است. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، مدلی جامع را توسعه می‌دهد که تعادلی میان کارایی عملیاتی و پایداری زیست‌محیطی در شرایط واقعی زنجیره تأمین ایجاد می‌کند.

۳- روش تحقیق

این پژوهش کاربردی و از نوع پژوهش عملیاتی با رویکرد کمی و مقطعی است که به طراحی مدل ریاضی زنجیره تأمین حمل‌ونقل محصولات در انبار متقاطع شرکت فولاد مبارکه اصفهان می‌پردازد. هدف اصلی، کاهش زمان عملیات و هزینه‌های لجستیکی از طریق بهینه‌سازی فرآیندهای انبار متقاطع است. در این مدل، عملیاتی مانند بارگیری، تخلیه و حمل‌ونقل داخلی برای پاسخ مؤثر به تقاضای مشتری بررسی شده‌اند. همچنین، نقش فناوری‌های اطلاعاتی نظیر سیستم مدیریت انبار، برنامه‌ریزی منابع سازمانی و تبادل الکترونیکی داده‌ها در مدیریت سفارشات و اطلاعات لجستیکی مورد تأکید قرار گرفته است. منابع اصلی شامل تجهیزات جابه‌جایی مواد و نیروی انسانی و زیرساخت‌های کلیدی مانند اسکله‌ها و سکوهای لجستیکی هستند که در تعامل با یکدیگر، کارایی فرآیند انبار متقاطع را تعیین می‌کنند. در شکل ۱ عملیات، منابع و زیرساخت‌های در نظر گرفته شده برای مسئله انبار متقاطع نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار زنجیره تأمین انبار متقاطع پیشنهادی.

Figure 1. Structure of the proposed cross-docking supply chain.

پلتفرم انبار متقاطع در این تحقیق شامل اسکله‌های ورودی I و خروجی J است و عملیاتی مانند بارگیری، تخلیه، مرتب‌سازی و بسته‌بندی توسط منابعی مانند اپراتورها و اسکله‌ها پشتیبانی می‌شود. سیستم تبادل الکترونیکی داده‌ها امکان دریافت سفارش‌های مشتری را فراهم می‌کند و سیستم مدیریت انبار، سفارش‌ها را بر اساس تاریخ سررسید و مقادیر طبقه‌بندی می‌کند. این مطالعه به فرموله کردن مسئله انبار متقاطع به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط می‌پردازد و کامیون‌های ورودی باید به‌طور کامل تخلیه و کامیون‌های خروجی به‌طور کامل بارگیری شوند. فولاد مبارکه به‌عنوان نمونه‌ای برای پیاده‌سازی مدل پیشنهادی انتخاب شده و زمان‌های عملیاتی ثابت در نظر گرفته شده است.

براساس موارد اشاره‌شده در بالا، این پژوهش بر بهینه‌سازی عملیات انبار متقاطع در زنجیره تأمین شرکت فولاد مبارکه اصفهان تمرکز دارد. واحد تحلیل، سیستم عملیاتی انبار متقاطع در سطح تصمیمات تخصیص و زمان‌بندی است؛ به‌گونه‌ای که جریان کالا بین کامیون‌های ورودی و خروجی، تخصیص وسایل نقلیه به اسکله‌ها، و هماهنگی عملیات تخلیه، انتقال داخلی و بارگیری بررسی می‌شود. افق زمانی مطالعه یک ماه کاری در نظر گرفته شده است. در این بازه، سفارش‌ها براساس تاریخ سررسید و مقدار دسته‌بندی شده و تصمیمات مدل در قالب دوره‌های زمانی گسسته اتخاذ می‌شوند. مرز سیستم از زمان ورود کامیون‌های ورودی به انبار متقاطع آغاز شده و تا زمان تکمیل بارگیری و خروج کامیون‌های خروجی ادامه می‌یابد. در این مرز، فعالیت‌هایی نظیر تخصیص به اسکله، تخلیه، انتقال داخلی و بارگیری لحاظ می‌شوند؛ درحالی‌که فرایندهای خارج از انبار متقاطع، از جمله عملیات تولید، تأمین بالادستی و توزیع نهایی پس از خروج کامیون‌ها، خارج از دامنه مدل قرار دارند.

۳-۱- مدل‌سازی ریاضی

در این بخش، تمامی نمادهای مورد استفاده برای توصیف مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله بر اساس نظرات خبرگان و اسناد موجود توضیح داده شده‌اند. به‌منظور تعیین پارامترها و اعتبارسنجی مدل ریاضی، از نظرات گروهی متشکل از ۱۰ نفر از خبرگان حوزه لجستیک و زنجیره تأمین شرکت فولاد مبارکه اصفهان استفاده شده است. این پنل خبرگی شامل مدیران ارشد واحد برنامه‌ریزی عملیات، مهندسین لجستیک با حداقل ۱۰ سال سابقه کار تخصصی و اساتید دانشگاهی در حوزه تحقیق در عملیات بوده است. جهت اطمینان از روایی محتوایی، شاخص‌های مدل طی دو مرحله مصاحبه نیمه‌ساختاریافته مورد تأیید قرار گرفتند. همچنین برای سنجش توافق میان خبرگان در خصوص وزن‌دهی به توابع هدف و صحت پارامترهای عملیاتی، از ضریب هماهنگی کندال استفاده شده است که مقدار آن (۰/۸۲) نشان‌دهنده سطح بالایی از اجماع و پایایی نظرات است. داده‌های استخراجی نیز پس از نهایی‌سازی توسط این پنل، با استانداردهای موجود در سامانه مدیریت انبار شرکت مطابقت داده شد تا از انطباق مدل با واقعیت‌های صنعتی اطمینان حاصل شود. سپس، داده‌های سامانه تبادل الکترونیکی شامل وضعیت سفارش‌های مشتری، تاریخ سررسید، تعداد اقلام و مقادیر مورد نیاز استخراج شده است. همچنین، میزان موجودی، ورود محصول و سطح خدمات بر اساس نظرات دریافتی از مشتریان بررسی شده است. وضعیت سفارش‌ها برای فرآیند انبار متقاطع، تخصیص کامیون‌ها به اسکله‌های ورودی و خروجی و تخصیص اپراتورها برای کاهش زمان انجام عملیات در طول یک ماه کاری برنامه‌ریزی شده است.

۳-۱-۱- اندیس‌ها و مجموعه‌ها

i شاخص برای کامیون‌های ورودی به اسکله نوع اول $i = 1, \dots, I$

i' شاخص برای کامیون‌های ورودی به اسکله نوع دوم $i' = 1, \dots, I$

j شاخص برای کامیون‌های خروجی از اسکله نوع اول $j = 1, \dots, J$

j' شاخص برای کامیون‌های خروجی از اسکله نوع دوم $j' = 1, \dots, J$

m شاخص برای اسکله‌های ورودی $m = 1, \dots, M$

n شاخص برای اسکله‌های خروجی $n = 1, \dots, N$

k اقلام $k = 1, \dots, K$

t دوره زمانی $t = 1, \dots, T$

۳-۱-۲- پارامترها

r_{ikt}: مقدار کالای k تخلیه‌شده از کامیون ورودی i در دوره t (تن)

s_{jkt}: مقدار کالای k برای بارگیری در کامیون خروجی j در دوره t (تن)

DT: تأخیر در زمان رسیدن کامیون‌های ورودی و خروجی در دوره t (دقیقه)

t_{mn}: زمان انتقال از اسکله m ورودی به اسکله خروجی n در اسکله انبار متقاطع در دوره t (دقیقه)

Ga: مقدار خیلی بزرگ

A_{it}: زمان رسیدن کامیون ورودی i در دوره t (دقیقه)

A_{jt}: زمان رسیدن کامیون خروجی j در دوره t (دقیقه)

t_{load}: زمان بارگذاری برای یک کالا (دقیقه)

t_{unload}: زمان تخلیه برای یک کالا (دقیقه)

GHG_{it}: میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کامیون ورودی i در دوره t (Kg GHG)

GHG_{jt}: میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کامیون خروجی j در دوره t (Kg GHG)

تعریف ۱: شاخص انتشار گازهای گلخانه‌ای در این تحقیق به میزان مصرف سوخت و انرژی ناشی از کامیون‌ها اطلاق می‌شود که با ایجاد انبار متقاطع مقدار قابل‌توجهی از مصرف سوخت و تولید این نوع از گازهای گلخانه‌ای کاسته می‌شود.

۳-۱-۱- متغیرها

متغیرهای این تحقیق از نوع پیوسته و باینری هستند. بنابراین، مسئله ارائه شده از نوع مختلط عدد صحیح است.

الف) متغیرهای پیوسته

x_{ijk}^t: مقدار کالای k از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j در دوره t منتقل شده است.

c_{it}: زمان شروع تخلیه بار کامیون ورودی i در دوره t

C_{it}: زمان پایان تخلیه بار کامیون ورودی i در دوره t

l_{it}: زمان شروع بارگیری کامیون خروجی j در دوره t

L_{jt}: زمان پایان بارگیری کامیون خروجی j در دوره t

ب) متغیرهای باینری

v_{ij}^t: اگر کالایی از کامیون ورودی i خارج و وارد کامیون خروجی j شود در دوره t برابر با یک در غیر این‌صورت صفر است.

Y_{im}^t: اگر کامیون ورودی i به اسکله ورودی m تخصیص داده شود در دوره t برابر با یک در غیر این‌صورت برابر با صفر است.

z_{jn}^t: اگر کامیون خروجی j به اسکله خروجی n در دوره t تخصیص داده شود برابر با یک در غیر این‌صورت برابر با صفر است.

U_{ijmk}^t: مقدار کالای k از کامیون ورودی i در اسکله ورودی m تخصیص‌یافته به کامیون خروجی j در اسکله خروجی n در دوره t برابر یک در غیر این‌صورت برابر صفر است.

$P_{ii'}^t$: اگر کامیون اسکله ورودی i مقدم‌تر از کامیون اسکله ورودی i' در دوره t باشد برابر با یک در غیراین‌صورت برابر با صفر است.

$Q_{jj'}^t$: اگر کامیون اسکله خروجی j مقدم‌تر از کامیون اسکله خروجی j' در دوره t باشد برابر با یک در غیراین‌صورت برابر با صفر است.

۳-۱-۴- مفروضات تحقیق

در این پژوهش، زمان‌های بارگیری و تخلیه براساس میانگین داده‌های تاریخی و استانداردهای عملیاتی شرکت فولاد مبارکه به‌صورت قطعی در نظر گرفته شده‌اند. این فرض با هدف تمرکز بر تحلیل اثرات پیچیده تنوع محصول و ناوگان ناهمگن بر توابع هدف و همچنین به دلیل استفاده از تجهیزات استاندارد بارگیری در محل مورد مطالعه اتخاذ شده است. بااین‌حال، پایایی نتایج در برابر تغییرات احتمالی این زمان‌ها، در بخش تحلیل حساسیت مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌طور کلی سایر مفروضات اصلی مدل به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

- هر کامیون ورودی فقط به یک اسکله ورودی تخصیص می‌یابد.
- هر کامیون خروجی فقط به یک اسکله خروجی تخصیص می‌یابد.
- در هر زمان، هر اسکله تنها قادر به ارائه خدمت به یک کامیون است.
- عملیات تخلیه و بارگیری تنها پس از رسیدن کامیون و تخصیص آن به اسکله آغاز می‌شود.

- جریان کالا بین کامیون‌های ورودی و خروجی باید برقرار بوده و قیود توازن جریان رعایت شود.
- کالاها دارای تنوع بوده و انواع مختلف محصولات در مدل لحاظ شده‌اند.
- ناوگان حمل‌ونقل ورودی و خروجی ناهمگن بوده و انواع مختلف وسایل نقلیه در مدل متمایز شده‌اند.
- ارزیابی عملکرد سیستم بر مبنای دو معیار اصلی، یعنی زمان کل عملیات و انتشار گازهای گلخانه‌ای، انجام می‌شود.

۳-۱-۵- توابع هدف و محدودیت‌ها

مدل چندهدفه پیشنهادی، دو بعد متمایز اما مرتبط با یکدیگر از عملیات انبار متقاطع را مورد بررسی قرار می‌دهد. تابع هدف نخست، یعنی کارایی عملیاتی، بر شاخص‌های عملکرد زمانی تمرکز دارد و به‌طور مشخص، کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل عملیات و مجموع تأخیرهای پردازشی را دنبال می‌کند. تابع هدف دوم، یعنی اثر زیست‌محیطی، بر پایداری تمرکز دارد و کمینه‌سازی مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از جریان حمل‌ونقل را مدنظر قرار می‌دهد.

اگرچه این دو هدف از نظر مفهومی متمایز هستند، از نظر عملیاتی از طریق متغیرهای تصمیم مشترک، مانند تخصیص کامیون‌ها به اسکله‌ها، توالی انجام عملیات و تخصیص منابع، و همچنین قیود مشترک مربوط به توازن جریان و ظرفیت عملیاتی، با یکدیگر ارتباط دارند. این وابستگی، نوعی مبادله ذاتی میان دو هدف ایجاد می‌کند؛ به‌گونه‌ای که تصمیم‌هایی که سرعت عملیات را در اولویت قرار می‌دهند، اغلب بر میزان ازدحام ترافیکی و سطح انتشار آلاینده‌ها اثر می‌گذارند. ازاین‌رو، به‌کارگیری رویکرد چندهدفه برای ارائه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو به تصمیم‌گیرندگان ضروری است؛ راه‌حل‌هایی که میان کارایی خدمت‌رسانی و پایداری زیست‌محیطی توازن برقرار می‌کنند.

با در نظر گرفتن موارد بالا، مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی به فرم قطعی که برای مدل‌سازی ریاضی مسئله در نظر گرفته شده در معادلات زیر توسعه داده شده است.

$$\min\ (\max(L_j)) \tag{۱}$$

$$\min \sum_{i=1}^{I} \mathrm{Y}_{im}^{t}.\,\mathrm{GHG}_{it} + \sum_{i=1}^{I} \mathrm{z}_{jn}^{t}.\,\mathrm{GHG}_{jt} \tag{۲}$$

$$s.t:$$

$$\sum_{j=1}^{J} \mathrm{x}_{ijk}^{t} = r_{ikt} \qquad \forall i,k,\mathrm{t} \tag{۳}$$

$$\sum_{i=1}^{I} \mathrm{x}_{ijk}^{t} = s_{jkt} \qquad \forall j,k,t \tag{۴}$$

$$\sum_{k=1}^{K} \mathrm{x}_{ijk}^{t} \le G \times \mathrm{v}_{ij}^{t} \qquad \forall i,j,k,t \tag{۵}$$

$$\sum_{m=1}^{M} \mathrm{Y}_{im}^{t} = 1 \qquad \forall i,t \tag{۶}$$

$$\mathrm{Y}_{im}^{t} + \mathrm{Y}_{i'm}^{t} \le \mathrm{P}_{ii'}^{t} + \mathrm{P}_{i'i}^{t} + 1 \quad \forall m,i,i',i \ne i' \tag{۷}$$

$$c_{it} + t_{unload} \sum_{k=1}^{K} r_{ik} \le C_{it} \qquad \forall i,t \tag{۸}$$

$$c_{it} + DT - G(1 - P_{ii'}) \le C_{i't} \qquad \forall i,t \tag{۹}$$

$$C_{it} \ge A_i \quad \forall i,t \tag{۱۰}$$

$$\sum_{n=1}^{N} \mathrm{z}_{jn}^{t} = 1 \qquad \forall j,n,t \tag{۱۱}$$

$$\mathrm{z}_{jn}^{t} + \mathrm{z}_{j'n}^{t} \le \mathrm{Q}_{jj'}^{t} + \mathrm{Q}_{j'j}^{t} + 1 \quad \forall j,j',n,j \ne j',t \tag{۱۲}$$

$$l_{jt} \ge A_j \qquad \forall j,t \tag{۱۳}$$

$$L_{it} + t_{load} \sum_{k=1}^{K} s_{ik} \le L_{jt} \qquad \forall j,t \tag{۱۴}$$

$$L_{it} + DT - G\left(1 - Q_{jj'}\right) \le l_{jt} \quad \forall i,j,j',j \ne j',t \tag{۱۵}$$

$$C_{it} + (t_{unload} + t_{load}) \sum_{k=1}^{K} \mathrm{x}_{ijk}^{t} + t_{mn} G\left(1 - \mathrm{v}_{ij}^{t}\right) \le L_{jt} \qquad \forall i,j,m,n,t \tag{۱۶}$$

$$\mathrm{v}_{ij}^{t}; \mathrm{Y}_{im}^{t}; \mathrm{z}_{jn}^{t}; \mathrm{U}_{ijmk}^{t}; \mathrm{P}_{ii'}^{t}; \mathrm{Q}_{jj'}^{t} \in \{0,1\} \tag{۱۷}$$

$$\mathrm{x}_{ijk}^{t}; c_{it}; C_{it}; l_{it}; L_{jt} \ge 0 \tag{۱۸}$$

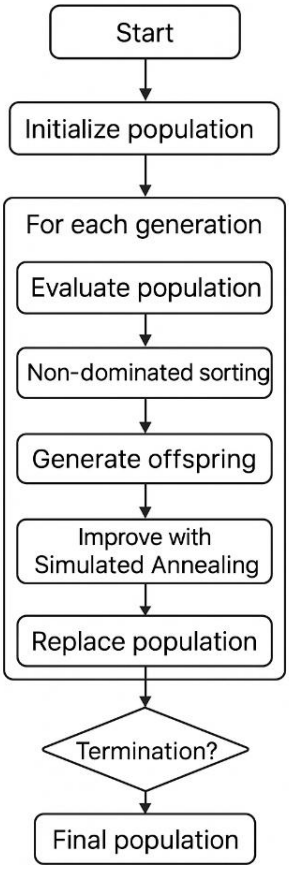
تابع هدف (۱) زودترین زمان ممکن برای انجام فرآیند و تأخیر کلی عملیات را به حداقل می‌رساند. تابع هدف (۲) میزان انتشار کامیون‌های ورودی و خروجی به اسکله‌ها را

کنترل می‌کند. ارتباط بین دو تابع هدف (۱) و (۲) در مدل بهینه‌سازی مدیریت انبار متقاطع به‌صورت زیر برقرار می‌شود: تابع هدف (۱) که به زودترین زمان ممکن برای انجام فرآیند و حداقل کردن تأخیر کلی عملیات می‌پردازد، به‌طور مستقیم بر کارایی و سرعت عملیات تأثیر می‌گذارد. این تابع هدف به دنبال کاهش زمان‌های انتظار و تسریع در فرآیندهای بارگیری و تخلیه است. به‌عبارت‌دیگر، هر چه زمان انجام فرآیندها کاهش یابد، تأخیر کلی عملیات نیز کاهش می‌یابد و این امر به بهبود سطح خدمات و رضایت مشتریان منجر می‌شود. از سوی دیگر، تابع هدف (۲) که میزان انتشار کامیون‌های ورودی و خروجی به اسکله‌ها را کنترل می‌کند، بر نحوه مدیریت و تخصیص منابع تأثیر می‌گذارد. این تابع هدف به دنبال بهینه‌سازی جریان کامیون‌ها و جلوگیری از ازدحام در اسکله‌ها است. اگر کامیون‌ها به‌طور مؤثری مدیریت شوند و به‌موقع وارد و خارج شوند، این امر می‌تواند به کاهش زمان انتظار و تأخیر در عملیات کمک کند. بنابراین، ارتباط بین این دو تابع هدف به این صورت است که بهینه‌سازی در یکی از آن‌ها می‌تواند به بهبود دیگری منجر شود. به‌عنوان مثال، اگر میزان انتشار کامیون‌ها به اسکله‌ها بهینه شود و ازدحام کاهش یابد، زمان‌های انتظار و تأخیر نیز کاهش می‌یابد و درنتیجه تابع هدف (۱) نیز بهبود می‌یابد. به همین ترتیب، اگر زمان انجام فرآیندها کاهش یابد، این امر می‌تواند به بهینه‌سازی جریان کامیون‌ها و کاهش ازدحام در اسکله‌ها کمک کند. درنتیجه، این دو تابع هدف به‌صورت متقابل بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند و بهینه‌سازی هم‌زمان آن‌ها می‌تواند به بهبود کلی عملکرد مدیریت انبار متقاطع در زنجیره تأمین منجر شود.

با توجه به ماهیت چند هدفه بودن مسئله برای تبدیل به مسئله تک هدفه طبق روش مجموع وزن‌دار شده استفاده شده است. با توجه به عدم هم‌مقیاسی توابع هدف (تابع اول از جنس زمان و تابع دوم از جنس میزان آلایندگی)، جمع مستقیم آن‌ها موجب تسلط هدف با مقیاس عددی بزرگ‌تر می‌شود. برای رفع این مشکل و مقایسه‌پذیری عادلانه، از روش مجموع وزن‌دار نرمال‌شده استفاده شده است. در این رویکرد، ابتدا هر یک از توابع هدف به‌صورت تک‌هدفه حل گردیده تا بهترین مقدار (نقطه ایده‌آل z_k^*) و بدترین مقدار (نقطه نادیر z_k^{nad}) برای هر هدف تعیین شود. سپس، توابع هدف بر اساس فرمول $\frac{z_k - z_k^*}{z_k^{nad} - z_k^*}$ بی‌ابعاد و بین بازه $[0,1]$ نرمال‌سازی شدند. سپس، به هر یک از توابع هدف اهمیت یکسان اختصاص می‌دهیم تا به‌طور منصفانه اهمیت هر دو تقسیم شود و تابع نهایی به‌صورت $w_1 f_1 + w_2 f_2$ در نظر گرفته می‌شود. محدودیت (۳) تضمین می‌کند که مقدار کل کالای k از کامیون ورودی i معادل مقدار ارسال شده به کامیون‌های خروجی است. محدودیت (۴) تضمین می‌کند که مقدار کل کالای k ارسال شده به کامیون خروجی j برابر با مقدار آزادشده از کامیون‌های ورودی است. محدودیت (۵) انتقال اقلام با رابطه بین کامیون ورودی i و کامیون خروجی j را تضمین می‌کند. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که هر کامیون ورودی i به یک اسکله ورودی اختصاص داده می‌شود. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که تنها یک کامیون ورودی در یک زمان به یک اسکله ورودی اختصاص داده می‌شود. در محدودیت (۸) زمان پایان کامیون ورودی i را تعیین می‌شود. در محدودیت (۹) زمان شروع تخلیه کامیون‌های ورودی را با در نظر گرفتن مدت‌زمان تأخیر رسیدن آن‌ها پس از زمان پایان تمام مدل‌های قبلی خود تنظیم می‌کند. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که عملیات زمان شروع تخلیه کامیون i پس از رسیدن به اسکله ورودی شروع می‌شود. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که هر کامیون خروجی j به یک اسکله خروجی اختصاص داده می‌شود. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که تنها یک کامیون خروجی در یک زمان به اسکله خروجی اختصاص داده می‌شود. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که عملیات بارگیری کامیون j پس از رسیدن به اسکله خروجی شروع می‌شود. در محدودیت (۱۴) زمان پایان کامیون خروجی j تعیین می‌شود. در محدودیت (۱۵) زمان شروع بارگیری کامیون‌های خروجی را با در نظر گرفتن مدت‌زمان تأخیر حرکت آن‌ها پس از زمان پایان تمام مدل‌های قبلی خود تنظیم می‌کند. در محدودیت (۱۶) زمان شروع تخلیه کامیون خروجی j بزرگ‌تر یا مساوی از زمان شروع کامیون‌های ورودی، زمان تخلیه اقلام، زمان انتقال از ورودی به اسکله خروجی و زمان بارگیری کالاها به کامیون خروجی j را تضمین می‌کند. در محدودیت‌های (۱۷-۱۸) محدودیت‌های غیرمنفی و دامنه تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهند.

۳-۲- روش حل مسئله

با توجه به اینکه در مطالعات کورت و همکاران و اصغریار و همکاران ثابت کرده‌اند که مسائل مدل‌سازی ریاضی برای بهینه‌سازی انبار متقاطع در زنجیره تأمین جزو مسائل NP-سخت[1] هستند، پس مسئله جاری به‌عنوان یک مسئله NP-HARD در نظر گرفته می‌شود (Asgharyar et al., 2025؛ Kurt et al., 2025). این مسئله با اجرای نمونه‌های بزرگ و حل آن با مدل ریاضی و مقایسه با الگوریتم فراابتکاری نشان داده شده است. بنابراین، روش فراابتکاری ترکیبی شبیه‌سازی به نام بازپخت و NSGA-II برای حل مسئله پیاده‌سازی شده استفاده شده است. فلوچارت اجرای الگوریتم پیشنهادی مطابق **شکل ۲** است.



شکل ۲. فلوچارت اجرای الگوریتم (Agha Jafar Mahalati et al., 2025).

Figure 2. Flowchart of algorithm execution (Agha Jafar Mahalati et al., 2025).

شبیه‌سازی بازپخت یک روش فراابتکاری است که به‌عنوان یک روش برای یافتن راه‌حل مسائل ترکیبی طبقه‌بندی می‌شود و برای حل مسئله اقتباس شده است. در مرحله اول، پارامترهای اولیه الگوریتم تنظیم می‌شوند. برای این منظور، دما $(T = T_0)$ و تکرارها $(n = 0)$ و همچنین دمای نهایی T_{min}، تکرارهای کل (N_{max}) و نرخ خنک‌کننده (α) برای شبیه‌سازی بازپخت تنظیم می‌شوند. دمای نهایی باید به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که به الگوریتم اجازه می‌دهد به‌تدریج به سمت بهینه‌سازی پیش برود. اگر دما خیلی بالا باشد، الگوریتم ممکن است به‌طور تصادفی حرکت کند و بهینه‌سازی مؤثری نداشته باشد. اگر دما خیلی پایین باشد، الگوریتم ممکن است زودتر از موعد متوقف شود و نتواند به بهینه‌سازی مطلوب برسد.

تعداد تکرارها باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که به الگوریتم اجازه دهد به‌اندازه کافی به جستجوی فضای راه‌حل بپردازد. تعداد کم تکرارها ممکن است منجر به عدم کشف راه‌حل‌های بهینه شود، درحالی‌که تعداد زیاد تکرارها می‌تواند زمان محاسباتی را افزایش دهد. معمولاً یک توازن مناسب باید برقرار شود.

نرخ خنک‌کننده باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که به الگوریتم اجازه دهد به‌تدریج از دماهای بالا به دماهای پایین‌تر برسد. نرخ خنک‌کننده سریع ممکن است منجر به عدم پذیرش کافی راه‌حل‌های بدتر شود و درنتیجه الگوریتم به بهینه‌سازی نرسد. نرخ خنک‌کننده کند نیز ممکن است زمان محاسباتی را به‌شدت افزایش دهد. معمولاً نرخ خنک‌کننده بین ۰/۸ تا ۰/۹۹ انتخاب می‌شود.

در مرحله دوم، راه‌حل اولیه r تولید می‌شود و تابع تناسب به دنبال تابع هدف عملیات محاسبه می‌شود. در مرحله سوم، یک راه‌حل همسایه r' با انجام حرکات مبادله و درج روی راه‌حل فعلی r ایجاد می‌شود. در مرحله چهارم، توابع تناسب برای r و r' مقایسه می‌شوند و اگر $f(r') < f(r)$ آنگاه r' راه‌حل فعلی برای شبیه‌سازی بازپخت می‌شود. اگر این شرط برآورده نشد، از معادله (۱۹) برای محاسبه احتمال انتقال استفاده می‌شود.

$$P(r, r', T) = \exp^{\frac{f(r')-f(r)}{T}} \qquad (۱۹)$$

اگر یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ کمتر از احتمال انتقال باشد، آنگاه r' به‌عنوان راه‌حل فعلی برای شبیه‌سازی بازپخت تنظیم می‌شود $(r = r')$، در غیر این صورت، r به‌عنوان راه‌حل فعلی باقی می‌ماند. پس از آن، اگر تکرار فعلی برابر با حداکثر تعداد تکرار $(n = N\max)$ باشد، دما

[1] Nondeterministic Polynomial-time hard (NP-Hard)

با دمای نهایی ($T = T\min$) مقایسه می‌شود. اگر این شرط برآورده شود، شبیه‌سازی بازپخت متوقف می‌شود و راه‌حل r به‌عنوان راه‌حل فعلی برای مسئله باقی می‌ماند، در غیر این صورت، نرخ خنک‌کننده (α) در دمای جریان اولیه ضرب می‌شود.

علاوه بر روش شبیه‌سازی تبرید، در این مقاله از روش فراابتکاری NSGA-II استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر اصول انتخاب طبیعی و فرآیندهای تکاملی است. این الگوریتم به‌طور خاص برای حل مسائل پیچیده و بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلف مانند مهندسی، علوم کامپیوتر و اقتصاد استفاده می‌شود. این روش دارای مؤلفه‌هایی از قبیل زیر است:

۱) **جمعیت**: مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها که به‌عنوان نسل‌های مختلف در نظر گرفته می‌شوند.

۲) **کروموزوم**: نمایندگی از یک راه‌حل که معمولاً به‌صورت رشته‌ای از بیت‌ها یا اعداد نمایش داده می‌شود.

۳) **عملکرد**: تابعی که کیفیت هر کروموزوم را ارزیابی می‌کند و به‌عنوان معیار انتخاب استفاده می‌شود.

۴) **انتخاب**: فرآیند انتخاب کروموزوم‌های برتر برای تولید نسل جدید.

۵) **تکثیر**: ترکیب دو کروموزوم برای تولید فرزندان جدید (عملیات تقاطع).

۶) **جهش**: تغییرات تصادفی در کروموزوم‌ها برای حفظ تنوع ژنتیکی.

```
Define objective functions
def objective_function_1(solution):
    # Calculate first objective
    pass
def objective_function_2(solution):
    # Calculate second objective
    pass
# Initialize population for NSGA-II
def initialize_population(pop_size):
    population = []
    for _ in range(pop_size):
        solution =
generate_random_solution()
        population.append(solution)
    return population
# Evaluate population
def evaluate_population(population):
    for solution in population:
        solution.objectives
=[objective_function_1(solution),
objective_function_2(solution)]
# Selection process for NSGA-II
def non_dominated_sort(population):
    # Implement non-dominated sorting
    pass
# Crossover operation
def crossover(parent1, parent2):
    # Implement crossover logic
    pass
# Mutation operation
def mutate(solution):
    # Implement mutation logic
    pass
# Simulated Annealing process
def simulated_annealing(solution):
    current_solution = solution
    current_energy =
evaluate_solution(current_solution)
    temperature = initial_temperature
    while temperature > final_temperature:
        new_solution =
generate_neighbor_solution(current_solution
)
        new_energy =
evaluate_solution(new_solution)
        if
acceptance_probability(current_energy,
new_energy, temperature) > random():
            current_solution = new_solution
            current_energy = new_energy
        temperature *= cooling_rate
    return current_solution
# Main Hybrid Algorithm
def hybrid_algorithm(pop_size,
generations):
    population =
initialize_population(pop_size)
    for generation in range(generations):
        evaluate_population(population)
        fronts =
non_dominated_sort(population)
        # Apply crossover and mutation to
create new population
        new_population = []
        while len(new_population) <
pop_size:
            parent1, parent2 =
select_parents(fronts)
            offspring = crossover(parent1,
parent2)
            mutate(offspring)

new_population.append(offspring)
        # Apply Simulated Annealing to
improve solutions
        for solution in new_population:
            improved_solution =
simulated_annealing(solution)

population.append(improved_solution)
        population = new_population
    return population
# Run the hybrid algorithm
final_population =
hybrid_algorithm(pop_size=100,
generations=50)
```

۴- یافته‌ها

در این بخش، با ملحوظ دانستن موارد تعیین‌شده در **جدول ۱** به‌عنوان اندازه مجموعه‌های از پیش تعیین‌شده مسئله برنامه‌ریزی‌شده برای کنترل پارامترهای در نظر گرفته شده به‌صورتی که در ادامه مشخص می‌شود در یک مسئله در ابعاد کوچک محاسبه می‌شود. مسئله مذکور به

ازای مقادیر مجموعه‌هایی که در **جدول ۱** مشخص شده است؛ در نرم‌افزار GAMS به اجرا درآمده است.

جدول ۱. مجموعه‌های تعریف‌شده برای مسئله در ابعاد کوچک (منبع: تحقیق جاری)

Table 1. Defined sets for the problem in small dimensions (Source: Current research)

مجموعه‌های تعریف‌شده	مقدار
مجموعه اسکله ورودی کامیون نوع اول	$i_1; i_2$
مجموعه اسکله ورودی کامیون نوع دوم	$i'_1; i'_2$
مجموعه اسکله خروجی کامیون نوع اول	$j_1; j_2$
مجموعه اسکله خروجی کامیون نوع دوم	$j'_1; j'_2$
تعداد کالاها	$k_1; k_2; k_3$
مجموعه کامیون‌های ورودی به اسکله نوع اول	$i_1; i_2$
مجموعه کامیون‌های ورودی به اسکله نوع دوم	$i'_1; i'_2$
مجموعه کامیون‌های خروجی از اسکله نوع اول	$j_1; j_2$
مجموعه کامیون‌های خروجی از اسکله نوع دوم	$j'_1; j'_2$
اسکله ورودی	$m_1; m_2$
اسکله خروجی	$n_1; n_2$

در **جدول ۲** کلیه پارامترهای مورد نیاز براساس توزیع‌های تصادفی آماری طبق اطلاعات مندرج در اسناد بایگانی‌شده، برای تولید عدد مورد نیاز ارائه شده است. به‌منظور تولید داده‌های ورودی شبیه‌سازی و اطمینان از اعتبار آن‌ها، برازش توزیع‌های احتمالی بر روی داده‌های واقعی با استفاده از نرم‌افزار Input Analyzer انجام شد. در این فرایند، چندین توزیع کاندید برای هر متغیر بررسی و سپس کیفیت برازش آن‌ها بر اساس معیار میانگین مربعات خطا ارزیابی شد؛ به‌طوری‌که توزیعی با کمترین مقدار میانگین مربعات خطا و بیشترین انطباق با الگوی داده‌های مشاهده‌شده به‌عنوان توزیع نهایی انتخاب گردید. بنابراین، پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی بر مبنای داده‌های واقعی و با اتکا به یک معیار کمی و قابل استناد تعیین شدند.

در این‌صورت، مدت‌زمان انتقال جابجایی کالاها از اسکله ورودی i اُم به اسکله خروجی j اُم مطابق با **جدول ۳** محاسبه می‌شود. براساس نتایج محاسبه‌شده، مجموع زمان تخلیه و بارگیری از اسکله ورودی به اسکله خروجی است در **جدول ۳** نشان داده شده است. در **جدول ۴** مقدار انتقال هر نوع از کالا از ورودی اسکله به خروجی محاسبه‌شده است.

جدول ۲. توزیع‌های تصادفی تولید مقدار برای پارامترهای مسئله (منبع: اسناد موجود در فولاد مبارکه)

Table 2. Random distributions of value generation for problem parameters (Source: existing documents in Mobarakeh Steel)

پارامتر	توزیع آماری تصادفی
r_{ikt}: مقدار کالای k تخلیه‌شده از کامیون ورودی i در دوره t	Uniform [400;800]
s_{jkt}: مقدار کالای k برای بارگیری در کامیون خروجی j در دوره t	Uniform [300;700]
t_{mnt}: زمان انتقال از اسکله m ورودی به اسکله n خروجی در دوره t	Uniform [30;60]
A_{jt}: زمان رسیدن کامیون خروجی j در دوره t	Uniform [30;60]
t_{load}: زمان بارگذاری برای یک کالا	Uniform [60;120]
t_{unload}: زمان تخلیه برای یک کالا	Uniform [30;60]
GHG_{it}: میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کامیون ورودی i در دوره t	Uniform [1.120;2.225]
GHG_{jt}: میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کامیون خروجی j در دوره t	Uniform [1.120;2.225]

جدول ۳. مقدار بهینه تابع هدف اول (دقیقه) (منبع: تحقیق جاری)

Table 3. Optimal value of the first objective function (minutes) (Source: Current research)

به / از	j_1			j_2		
	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
i_1	۱۰۶/۰۸۰	۷۱/۴۸۹	۱۰۶/۰۸۰	۸۵/۳۳۵	۷۶/۱۰۱	۱۸/۴۴۹
i_2	۸۵/۳۳۵	۱۰۶/۰۸۰	۸۵/۳۳۵	۱۰۶/۰۸۰	۷۱/۴۸۹	۱۰۶/۰۸۰

جدول ۴. مقدار انتقال هر نوع کالا از اسکله ورودی به اسکله خروجی (نوع اول و دوم) (منبع: تحقیق جاری)

Table 4. The amount of transfer for each type of commodity from the input pier to the output pier (first and second types) (Source: Current research)

به ← از	t_1			t_2		
	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
$i_1 \rightarrow j_1$	۵۵/۸۸۶	۱۹/۳۴۲	۴۸/۱۵۰	۵۱/۸۸۶	۱۰/۲۱۴	۳۹/۹۰۲
$i_1 \rightarrow j_2$	۵۱/۸۸۶	۱۵	۴۹/۱۵۰	۰	۱۷/۲۴۷	۱۵/۵۷۷
$i_2 \rightarrow j_1$	۰	۱۶/۳۲۴	۰	۳۹/۹۰۲	۰	۰/۸۶۳
$i_2 \rightarrow j_2$	۳۹/۹۰۲	۱۰/۲۱۴	۰	۱۵/۵۷۷	۱۲/۲۵۴	۱۵/۵۷۷
$i'_1 \rightarrow j'_1$	۱۵/۵۷۷	۱۷/۲۴۷	۵۱/۸۸۶	۰/۸۶۳	۱۵	۱۷/۲۴۷
$i'_1 \rightarrow j'_2$	۰/۸۶۳	۰	۰	۱۵.۵۷۷	۳۹/۹۰۲	۰
$i'_2 \rightarrow j_{,1}$	۱۵/۵۷۷	۱۲/۲۵۴	۳۹/۹۰۲	۰	۱۵/۵۷۷	۱۲/۲۵۴
$i'_2 \rightarrow j'_2$	۱۷/۵۴۲	۱۵	۱۷/۲۴۷	۰	۱۷/۲۴۷	۱۵

در **جدول ۵** تخصیص کالا به کامیون ورودی i جهت تخلیه در اسکله را براساس برنامه‌ریزی صفر و یک نشان داده است. همچنین، در **جدول ۶** تخصیص کالا به کامیون خروجی j جهت بارگیری در اسکله را براساس برنامه‌ریزی صفر و یک نشان داده است.

جدول ۵. تخصیص انتقال کالا به کامیون‌های ورودی جهت تخلیه در اسکله ورودی (منبع: تحقیق جاری)

Table 5. Allocation of cargo transfer to incoming trucks for unloading at the entrance dock (Source: Current research)

کامیون	اسکله	
	z_1	z_2
v_1	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰
v_2	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰

جدول ۶. تخصیص انتقال کالا به کامیون‌های خروجی جهت بارگیری در اسکله‌های خروجی (منبع: تحقیق جاری)

Table 6. Allocation of cargo transfer to outbound trucks for loading at outbound docks (Source: Current research)

کامیون	اسکله	
	u_1	u_2
y_1	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
y_2	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰

با محاسبه مقادیر فوق‌الذکر مقدار تابع هدف مطابق با **جدول ۷** محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه مسئله چندهدفه در این مقاله، با استفاده از روش مجموع وزن‌دارشده محاسبه شده است، مقدار بهینه تابع هدف وابسته به مقدار اوزانی است که برای توابع هدف در نظر می‌گیریم. ازآنجایی‌که فرم تابع هدف در مسئله مجموع وزن‌دار شده به‌صورت $w_1 f_1 + w_2 f_2$ می‌باشد و مجموع اوزان برابر با یک $(\sum w_i = 1)$ است، حالت‌های مختلفی می‌توانیم برای ضرایب در نظر گرفته شود که در **جدول ۷** نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده برای تابع هدف مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف به‌شدت به وزن هدف اول وابسته است. با افزایش در مقدار آن مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد و در مقابل هر چه وزن تابع هدف دوم بیشتر باشد مقدار تابع هدف کمتر است.

جدول ۷. بررسی مقدار تابع هدف به ازای اوزان مختلف (منبع: تحقیق جاری)

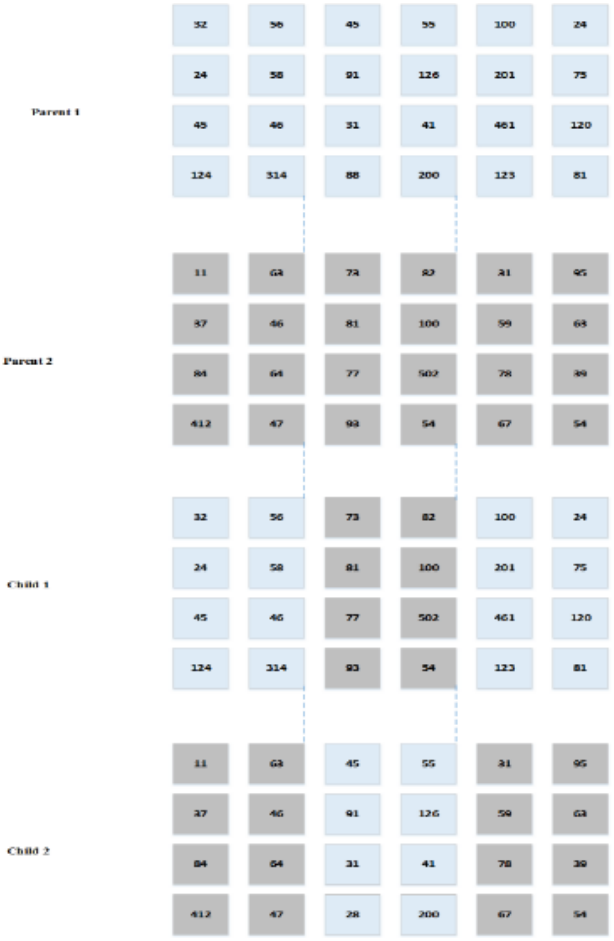
Table 7. Examination of the objective function value for different weights (Source: Current research)

ردیف	w_1	w_2	مقدار تابع هدف
۱	۰/۳	۰/۷	۳۵۹۹۶/۹۸۸
۲	۰/۲	۰/۸	۵۷۹۶۹/۷۲۹
۳	۰/۵	۰/۵	۷۶۰۱۴/۳۰۹
۴	۰/۶	۰/۴	۹۲۴۸۲/۲۳۸
۵	۰/۸	۰/۲	۱۰۸۵۷۰/۲۲۰
۶	۰/۴	۰/۶	۱۲۸۱۵/۶۸۰
۷	۰/۷	۰/۳	۱۳۴۹۹۳/۵۱۸

در **شکل ۳** تقاطع نقاط در الگوریتم NSGA-II نشان داده شده است. سازوکار این عملگر به این صورت است که دو نقطه به‌طور تصادفی در کروموزوم انتخاب می‌شوند و در رشته‌های هر کروموزوم جابه‌جا می‌شوند. در **شکل ۴**،

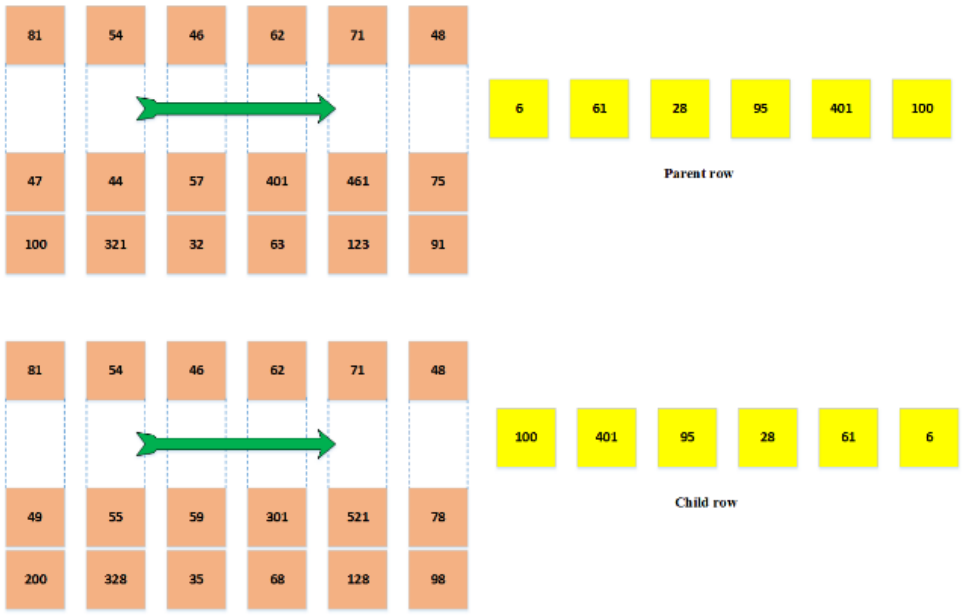
نحوه جهش در الگوریتم NSGA-II برای این تحقیق نشان داده شده است. این عملگر نشان می‌دهد که دو نقطه به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و هر رشته در این ردیف معکوس می‌شود.

در **جدول ۸**، نتایج حاصل از حل دقیق مثال‌های تولیدشده با نرم‌افزار GAMS با نتایج حاصل از الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و NSGA-II براساس دو معیار زمان و مقدار تابع هدف با یکدیگر مقایسه شده است. ازآنجایی‌که زمان حل نرم‌افزار GAMS برای مسائل با ابعاد بالا بسیار زیاد است محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه یا همان ۱ ساعت برای آن در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است چنانچه حل مسئله در نرم‌افزار GAMS زمانی بیش از ۱ ساعت لازم داشته باشد نرم‌افزار GAMS با رسیدن به زمان ۱ ساعت یک جواب موجه (نه الزاماً بهینه) را ارائه کرده و اجرای برنامه اتمام می‌یابد. در **جدول ۸** خلاصه نتایج مقایسه نرم‌افزار GAMS با الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و NSGA-II براساس اجرای آزمایش در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ بر مبنای مقایسه با شاخص‌های اصلی مدل ارائه شده است. بر طبق نتیجه بدست آمده، از اجرای محاسبات مشخص شده است که مدل ریاضی قابلیت بسیار مطلوبی در حل مسئله در ابعاد کوچک از خود نشان می‌دهد. حتی با وجود اینکه زمان محاسباتی در برخی از نمونه‌ها افزایش می‌یابد و بالطبع بعد مسئله افزایش یافته است نیز صدق می‌کند. زیرا گپ بین نتایج حل قطعی و مدل فراابتکاری صفر درصد گزارش شده است. اما با افزایش بیشتر در شاخص‌های مدل و افزایش پیچیدگی مسئله ضمن افزایش زمان محاسباتی، گپ بین نتایج نیز تا حدی که قابل‌قبول می‌باشد افزایش پیدا می‌کند. اما با توجه به اینکه در مسائل کوچک و متوسط گپ بین مدل ریاضی و مدل فراابتکاری قابل اغماض بوده است با اعتماد به نتایج محاسبه‌شده طبق مدل فراابتکاری ترکیبی می‌توانیم برای حل مسائل در ابعاد بزرگ به نتایج ارائه شده توسط آن تکیه نماییم.



شکل ۳. تنظیمات مربوط به عملگر تقاطع در الگوریتم NSGA-II (منبع: تحقیق جاری).

Figure 3. Settings related to the crossover operator in the NSGA-II algorithm (Source: Current research).



شکل ۴. تنظیمات مربوط به عملگر جهش در الگوریتم NSGA-II (منبع: تحقیق جاری).

Figure 4. Settings related to the mutation operator in the NSGA-II algorithm (Source: Current research).

جدول ۸. نتایج حل مسائل نمونه با GAMS و الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و NSGA-II (منبع: تحقیق جاری)

Table 8. Results of solving sample problems with GAMS and the hybrid Simulated Annealing and NSGA-II algorithm (Source: Current research)

بعد	شماره	i	j	k	m	n	t	حل دقیق با نرم‌افزار GAMS		الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و NSGA-II		GAP (%)
								تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	
کوچک	PR1	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۶۸۸۰	۱۲۵	۶۸۸۰	۵۷/۷	۰
	PR2	۱	۲	۱	۲	۱	۱	۷۵۸۹	۱۴۰	۷۵۸۹	۶۵/۳۲	۰
متوسط	PR3	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۳۵۲۰	۱۳۳۰	۳۵۲۰	۱۷۹/۸۲۷	۰
	PR4	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۳۹۶۵	۲۸۵۰	۲۹۳۲	۲۶۳/۸	۲
	PR5	۲	۲	۳	۲	۲	۳	۴۱۸۷	۳۳۶۰	۴۰۶۲	۳۹۴/۹	۰/۰۲
بزرگ	PR6	۳	۳	۳	۲	۳	۴	–	–	۵۵۶۴	۵۶۷/۴	–
	PR7	۴	۴	۳	۳	۳	۴	–	–	۶۰۳۶	۶۶۴/۷	–

مدل پیشنهادی از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای مسئله انبار متقاطع است که شامل تخصیص درب‌ها، توالی عملیات، زمان‌بندی فعالیت‌ها و قیود ظرفیت می‌باشد. این ساختار، تعمیمی از مسائل کلاسیک زمان‌بندی و تخصیص است که در ادبیات به‌عنوان مسائل NP-hard شناخته می‌شوند. به‌طور مشخص، با حذف مؤلفه‌های زیست‌محیطی و برخی قیود جانبی، مدل حاضر به نسخه‌ای از مسئله زمان‌بندی و تخصیص در انبار متقاطع تقلیل می‌یابد که خود NP-hard است؛ بنابراین، مدل کامل نیز از نظر ساختاری NP-hard محسوب می‌شود. بر این اساس، استفاده از روش‌های فراابتکاری مانند ترکیب NSGA-II و SA برای حل نمونه‌های بزرگ کاملاً توجیه‌پذیر است.

برای ارزیابی کارایی، پایداری و رفتار تکاملی الگوریتم NSGA-II در حل نمونه‌های با ابعاد بزرگ، رفتار همگرایی این الگوریتم بر اساس شاخص ابر حجم در طول تکرارها (نسل‌ها) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵ روند تغییرات این شاخص را تا ۵۰۰ تکرار برای سه سناریوی مختلف با ابعاد بزرگ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، الگوریتم در مراحل اولیه (تکرارهای ۱ تا ۱۰۰) نرخ بهبود و یادگیری سریعی را نشان می‌دهد که ناشی از تنوع بالای جمعیت اولیه و

عملکرد مؤثر عملگرهای تقاطع و جهش در کاوش فضای جستجو است. با پیشروی در تکرارهای میانی (۱۰۰ تا ۳۰۰)، شیب نمودار ملایم‌تر شده و الگوریتم وارد فاز بهره‌برداری و بهبود مرز پارتو می‌شود. سرانجام، از تکرار ۳۵۰ به بعد، تغییرات مقدار شاخص ابرحجم به حداقل رسیده و تثبیت کامل مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده همگرایی قطعی و پایداری عملکرد الگوریتم NSGA-II حتی در ابعاد بسیار بزرگ مسئله است.

۴-۱- تحلیل حساسیت

به‌منظور بررسی پایداری مدل ریاضی طراحی‌شده برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین در انبار متقاطع شرکت فولاد مبارکه، تحلیل حساسیت بر روی برخی پارامترهای کلیدی انجام شده است. نتایج نشان داد که پارامترهای زمان عملیات بارگیری، تخلیه و انتقال داخلی بیشترین تأثیر را بر تابع هدف اول (زمان کل عملیات) داشته‌اند، درحالی‌که ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای و وزن تابع هدف زیست‌محیطی (w_2) بیشترین حساسیت را بر تابع هدف دوم نشان دادند. همچنین تغییر وزن اهداف بین ۰ تا ۱ منجر به تغییر محسوس در توازن بین هزینه زمانی و زیست‌محیطی شده است که بیانگر وجود تعارض (trade-off) بین این دو هدف است. به‌طورکلی، مدل نسبت به تغییرات کوچک در پارامترهای عملیاتی پایدار بوده و تنها در شرایط افزایش شدید تأخیر ورود کامیون‌ها یا کاهش ظرفیت اسکله‌ها، عملکرد آن به‌طور محسوسی افت می‌کند. این موضوع بیانگر کارایی و انعطاف‌پذیری نسبی مدل پیشنهادی در برابر نوسانات پارامترهای واقعی سیستم است. علاوه بر این، به‌منظور اعتبارسنجی ادعای پایداری، آزمایش‌های عددی در ۴ سناریوی مختلف تکرار شدند. نتایج **جدول ۹** نشان می‌دهد که الگوریتم هیبریدی NSGA-II-SA قادر است حتی در صورت کاهش ظرفیت داک‌ها یا تأخیر ناوگان، جواب‌های شدنی باکیفیت بالا ارائه دهد. کم بودن انحراف در شاخص انتشار گازهای گلخانه‌ای در سناریوی تأخیر (تنها ۳/۲٪ انحراف) نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالای مدل در بازبینی برنامه بارگیری بدون آسیب جدی به اهداف زیست‌محیطی است.

با توجه به نتایج **جدول ۹**، با وجود تغییرات بزرگ در پارامترها (مثل کاهش ۲۰ درصدی ظرفیت)، خروجی‌های مدل (Makespan) به‌صورت جهشی و غیرمنطقی تغییر نکرده‌اند، بنابراین، مدل دارای پایداری ساختاری و انعطاف‌پذیری عملیاتی است.

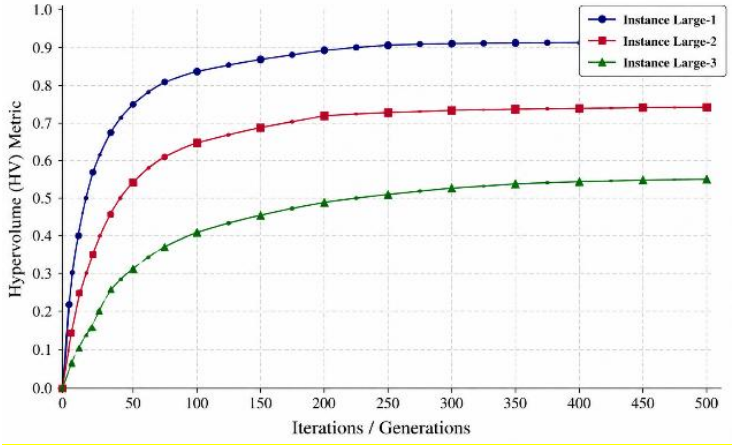
علاوه بر این، برای جلوگیری از تفسیر صرفاً مکانیکی وزن‌ها، نتایج به‌صورت جبهه پارتو نیز گزارش شد تا طیف راه‌حل‌های کارا برای تصمیم‌گیرندگان قابل مشاهده باشد. تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش وزن هدف اول موجب کاهش زمان کل عملیات و افزایش نسبی انتشار می‌شود، درحالی‌که افزایش وزن هدف دوم اثر معکوس دارد. این یافته‌ها بیانگر وجود یک مبادله روشن میان کارایی عملیاتی و پایداری زیست‌محیطی است. از منظر مدیریتی، مدل پیشنهادی امکان انتخاب سیاست بهینه متناسب با اولویت‌های سازمان را فراهم می‌کند و صرفاً به تعیین یک جواب عددی محدود نمی‌شود. در **شکل ۶** جبهه پارتو نشان داده شده است. این شکل جبهه پارتو را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که بین کاهش زمان کل عملیات و کاهش انتشار آلاینده‌ها یک مبادله وجود دارد. بنابراین هر نقطه یک راه‌حل کارا است و مدیر می‌تواند بر اساس اولویت‌های خود، بهترین تعادل بین کارایی عملیاتی و پایداری زیست‌محیطی را انتخاب کند.

با توجه به **شکل ۶**، مرز پارتو (جواب‌های نامغلوب) حاصل از مدل بهینه‌سازی را در فضای تعارض بین دو هدف زمان کل عملیات (محور افقی برحسب دقیقه) و انتشار دی‌اکسید کربن (محور عمودی برحسب Kg CO_2) نشان داده شده است. کاهش چشمگیر آلایندگی به حدود ۷۰ کیلوگرم به ازای زمان عملیاتی در حدود ۱۵۵ دقیقه مشاهده شده است. کاهش زمان به حدود ۴۵ دقیقه به ازای افزایش شدید انتشار به بیش از ۱۷۵ کیلوگرم مشاهده شده است. برقراری بهترین توازن عملیاتی-زیست‌محیطی در نقطه میانی با زمان تقریبی ۹۸ دقیقه و انتشار حدود ۱۱۰ کیلوگرم، که به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد متناسب با اولویت‌های کاری یا محدودیت‌های زیست‌محیطی، گزینه‌ای بهینه و کارا را بدون قرار گرفتن در دام جواب‌های مغلوب (نقاط خاکستری) انتخاب کنند.

۵- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی ریاضی حمل و نقل محصولات در زنجیره تأمین انبار متقاطع در صنایع فولاد مبارکه اصفهان،

به‌عنوان یک ابزار مؤثر در بهینه‌سازی فرآیندهای لجستیکی و کاهش هزینه‌ها، نتایج قابل‌توجهی را به همراه داشته است. برای این منظور، طراحی و توسعه یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی حمل و نقل محصولات در زنجیره تأمین انبار متقاطع در صنایع فولاد مبارکه اصفهان در این تحقیق ارائه شده است. مدل توسعه‌یافته یک مدل چندهدفه و چنددوره‌ای است که قادر است اهداف متضاد را در دوره‌های مختلف مورد بررسی قرار دهد.



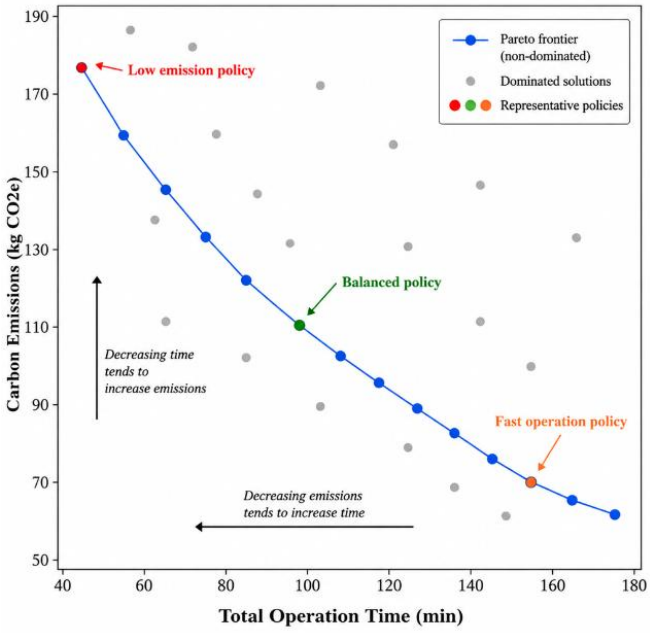
شکل ۵. همگرایی الگوریتم NSGA-II در ابعاد بزرگ.

Figure 5. NSGA-II Convergence in large scales.

جدول ۹. ارزیابی پایداری و انعطاف‌پذیری مدل تحت سناریوهای مختلف

Table 9. Evaluation of model stability and resilience under different scenarios

سناریو	زمان کل عملیات	میزان انتشار آلاینده	درصد انحراف زمان (٪)	درصد انحراف آلاینده (٪)	زمان حل الگوریتم (ثانیه)
پایه (S1)	۴۲۰	۱۲۵۰	۰	۰	۱۴۵
افزایش تقاضا (S2)	۴۶۸	۱۳۷۰	۱۱/۴	۹/۶	۱۶۲
تأخیر ناوگان (S3)	۴۹۵	۱۲۹۰	۱۷/۸	۳/۲	۱۵۸
کاهش ظرفیت (S4)	۵۱۰	۱۴۰۵	۲۱/۴	۱۲/۴	۱۷۵



شکل ۶. جبهه پارتو.

Figure 6. Pareto frontier.

علاوه بر این، الزامات زیست‌محیطی ناشی از انتشار گاز کربن در تصمیم‌گیری برای توزیع کالای ارسالی و دریافتی در انبار متقاطع را نیز در نظر گرفته است. طبق مدل پیشنهادی با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی، به شناسایی بهترین تخصیص منابع بهینه پرداخته شده است. برای حل مدل پیشنهادی، از روش فراابتکاری ترکیبی شبیه‌سازی بازپخت و NSGA-II استفاده شده است. بر طبق نتایج حاصل‌شده نشان داده شده است که با پیاده‌سازی مدل طراحی‌شده، استفاده از انبارهای متقاطع به‌عنوان نقاط کلیدی در زنجیره تأمین، به بهبود جریان مواد و کاهش زمان تحویل محصولات کمک می‌کند. علاوه بر این، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از انبارهای متقاطع می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در بهبود جریان مواد و کاهش زمان تحویل محصولات به مشتریان عمل کند. با توجه به رقابت فزاینده در صنعت فولاد، بهینه‌سازی زنجیره تأمین و حمل و نقل محصولات به‌عنوان یک عامل کلیدی در حفظ مزیت رقابتی و افزایش سهم بازار به شمار می‌رود. براساس آزمایش‌های انجام‌شده، مدل ریاضی در ابعاد کوچک قابلیت حل بسیار مطلوبی دارد و گپ بین نتایج حل قطعی و فراابتکاری صفر درصد است. با افزایش پیچیدگی مسئله و زمان محاسباتی، گپ بین نتایج نیز افزایش می‌یابد، اما در مسائل کوچک و متوسط این گپ قابل اغماض بوده و می‌توان به نتایج مدل فراابتکاری برای ابعاد بزرگ اعتماد کرد. همچنین، تحلیل حساسیت مدل ریاضی بهینه‌سازی زنجیره تأمین فولاد مبارکه نشان داد که زمان‌های بارگیری، تخلیه و انتقال داخلی بیشترین تأثیر را بر زمان کل عملیات دارند، درحالی‌که ضرایب انتشار گازهای گلخانه‌ای و وزن تابع هدف زیست‌محیطی بیشترین حساسیت را بر تابع هدف دوم دارند و تغییر وزن اهداف بین ۰ تا ۱ تعارض بین هزینه زمانی و زیست‌محیطی را نشان می‌دهد. مدل نسبت به تغییرات کوچک پایدار است، اما در شرایط شدید کاهش ظرفیت یا تأخیر ورودی کامیون‌ها عملکرد آن افت می‌کند.

این پژوهش با شناسایی محدودیت‌های مدل‌های تک‌محصولی و ناوگان همگن در ادبیات تحقیق، مدلی جامع ارائه داد که پیچیدگی‌های واقعی (تنوع محصول و ناوگان غیریکسان) را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. برخلاف بسیاری از مطالعات که تنها بر جنبه‌های عملیاتی تمرکز داشتند، این مدل تعادلی میان کارایی زمانی و شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی برقرار کرده است. بنابراین، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای تحقیقات آینده در بهینه‌سازی زنجیره تأمین و حمل و نقل در صنایع مشابه باشد و به توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر کمک کند. نتایج این تحقیق می‌تواند به مدیران صنعت فولاد مبارکه اصفهان در بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری کمک کند. بررسی تأثیر فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی بر بهینه‌سازی زنجیره تأمین نیز به‌عنوان موضوعی جذاب مطرح شده است. چالش‌های اصلی در مدل‌سازی ریاضی شامل دسترسی به داده‌های دقیق و نیاز به محاسبات سنگین است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، توسعه مدل‌های استوار و استفاده از روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند مفید باشد. مدل حاضر مبتنی بر پارامترهای قطعی توسعه‌یافته و عدم‌قطعیت‌های عملیاتی نظیر نوسان زمان‌های بارگیری، تخلیه و ورود ناوگان را لحاظ نکرده است؛ از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی برای نزدیکی به شرایط واقعی و مدیریت عدم‌قطعیت داده‌ها، از رویکردهای بهینه‌سازی استوار یا رویکردهای فازی استفاده شود.

قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از همکارانی که با ارائه دیدگاه‌ها و تخصص ارزشمند خود، نقش مؤثری در انجام و پیشبرد این پژوهش ایفا کردند، ابراز می‌کنند.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

مشارکت‌های نویسندگان

محمدرضا آقاجعفر محلاتی: مفهوم‌پردازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل آماری، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی،

تأمین منابع، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش پیش‌نویس اصلی، نگارش – بازبینی و ویرایش؛ **محمدحسین درویش متولی:** مفهوم‌پردازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش - بازبینی و ویرایش؛ **سیدمصطفی موسوی:** راهنمایی، نگارش - بازبینی و ویرایش؛ **مجید معتمدی:** راهنمایی، نگارش - بازبینی و ویرایش.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها در صورت درخواست در دسترس هستند: داده‌های پشتیبانی‌کننده نتایج این مطالعه در اختیار نویسندگان مسئول بوده و در صورت درخواست منطقی در دسترس قرار خواهند گرفت.

مراجع

Aghajafar Mahalati, M. A., Darvish Motevalli, M. H., Mousavi, S. M., & Moatamedi, M. (2025). Presenting a Multi-Objective Mathematical Model for Optimizing Cross-Docking Warehouse Management in the Supply Chain Using a Metaheuristic Algorithm. *Decision Science and Intelligent Systems*, 2(4), 1-24. (In Persian)

Algam, T., Chowdhury, A., & Kundu, P. (2024, June). Optimal PMU placement using BAOA by considering variable cost. In *2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEPES60647.2024.10653595

Amani, M. A., & Nasiri, M. M. (2023). A novel cross docking system for distributing the perishable products considering preemption: a machine learning approach. *Journal of Combinatorial Optimization*, *45*(5), 130. https://doi.org/10.1007/s10878-023-01057-y

Asgharyar, M., Farmand, N., & Shetab-Boushehri, S. N. (2025). A novel mathematical modeling approach for integrating a periodic vehicle routing problem and cross-docking system. *Computers & Operations Research*, *180*, 107048. https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107048

Babazadeh Rafiei, A., Sohrabi, T., Motamedi, M., & Darvish Motevalli, M. H. (2024). A Robust Risk Management Model for the Blood Supply Chain in Corona Pandemic Condition. *Journal of Industrial Management Perspective*, *14*(3), 56-78. https://doi.org/10.48308/jimp.14.3.56

Chen, J. C., Anggrahini, D., & Chen, T. L. (2024). Current research and future challenges in parcel hub towards logistics 4.0: a systematic literature review from a decision-making perspective. *International Journal of Production Research*, *62*(23), 8562-8593. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2337109

Darvish Motevali, M. H., & Motamedi, M. (2020). Dynamic modeling to evaluate the efficiency of a sequential multilevel supply network. *Journal of Decisions and Operations Research*, *5*(3), 272-289. https://doi.org/10.22105/dmor.2020.242474.1196

Faghih-Mohammadi, F., Nasiri, M. M., & Konur, D. (2023). Cross-dock facility for disaster relief operations. *Annals of Operations Research*, *322*(1), 497-538. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04939-2

Haghgoei, A., Irajpour, A., & Hamidi, N. (2024). A multi-objective optimization model of truck scheduling problem using cross-dock in supply chain management: NSGA-II and NRGA. *Journal of Modelling in Management*, *19*(4), 1155-1179. https://doi.org/10.1108/JM2-06-2023-0130

Hemmati, A., Kaveh, F., Abolghasemian, M., & Pourghader Chobar, A. (2024). Simulating the line balance to provide an improvement plan for optimal production and costing in petrochemical industries. *Journal of Engineering Management and Soft Computing*, *10*(1), 190-212. https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.11189.1198

Kurt, A., & Gumus, M. (2025). Dynamic Freight Planning with Hybrid Cross-Docking under Carbon Tax and Bounded Storage Age. *Transportation Research Record*, *2679*(6), 450-470. https://doi.org/10.1177/03611981251318338

Modica, T., Tappia, E., Colicchia, C., & Melacini, M. (2024). Integrating arrival time estimation in truck scheduling: an explorative study in grocery retailing. *Production & Manufacturing Research*, *12*(1), 2425678. https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2425678

Mousavi, S. M., Motamedi, M., & Karimi, R. (2024). A mathematical model of the location problem for central and secondary warehouses in the multi-level supply chain network of perishable products. *International journal of research in industrial engineering*, *13*(1), 11-24. https://doi.org/10.22105/riej.2024.394527.1378

Poornaser, M., Amoozadkhalili, H., & Motamedi, M. (2022). Routing disaster relief vehicles in a humanitarian supply chain. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, *12*(2), 205-216. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23225955.1401.12.2.5.7

Rajabzadeh, M., & Mousavi, S. M. (2023). A new interval-valued fuzzy optimization model for

truck scheduling in a multi-door cross-docking system by considering transshipment and flexible dock doors extra cost. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, *20*(6), 63-84. https://doi.org/10.22111/ijfs.2023.41416.7203

Rajabzadeh, M., Mousavi, S. M., & Azimi, F. (2025). A new gray optimization model for disposing or re-commercializing unsold goods in reverse logistics networks with a cross-docking center. *Kybernetes*, *54*(5), 2806-2836. https://doi.org/10.1108/K-12-2022-1637

Zadehbagheri, M., Abbasi, A., & Sutikno, T. (2023). Optimal placement of the phasor measurement units using differential evolution algorithm. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *31*(2), 1211-1222. http://doi.org/10.11591/ijeecs.v31.i2.pp1211-1222