KMANPUB | Decision Science and Intelligent Systems Vol. 2 No. 4 (2025): 1-24

Article history:
Received 02 June 2025
Revised 31 August 2025
Accepted 11 September 2025
Published online 22 December 2025

Presenting a Multi-Objective Mathematical Model for Optimizing Cross-Docking Warehouse Management in the Supply Chain Using a Metaheuristic Algorithm

Mohammad Reza Agha Jafar Mahalati[1], Mohammad Hossein Darvish Motevalli[2*], Seyed Mostafa Mousavi[3], Majid Moatamedi[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, Noshahr, Iran
[4] Department of Industrial Management, Nos.C., Islamic Azad University, Noshahr, Iran

*** Corresponding author email address**: Mhd.Darvish@iau.ac.ir

A r t i c l e I n f o

Article type:
Original Research

How to cite this article:
Agha Jafar Mahalati, M. R., 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.*

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

A B S T R A C T

One of the modern strategies in inventory management throughout the supply chain is the cross-docking warehousing approach. The objective of this study is to optimize the supply chain in a cross-docking warehouse within the steel industry. For this purpose, the design and development of a mathematical model for optimizing product transportation in the cross-docking supply chain of Mobarakeh Steel Company is presented. The developed model is a multi-objective and multi-period model capable of examining conflicting objectives across different periods. In addition, it considers environmental requirements arising from carbon emissions in decision-making related to the distribution of incoming and outgoing goods in the cross-docking warehouse. According to the proposed model, optimization techniques were employed to identify the best optimal allocation of resources. To solve the proposed model, the simulated annealing metaheuristic method was utilized. Based on the obtained results, it was demonstrated that implementing the designed model and using cross-docking warehouses as key points in the supply chain contribute to improving material flow and reducing product delivery time. Furthermore, the non-dominated points obtained from the simulated annealing method for the considered multi-objective problem were examined under 10%, 20%, and 30% increases in the quantity of goods entering and leaving the docks. Considering the generated Pareto frontier, the convergence of responses for each change was evident. The solutions obtained under a 10% increase generated 15 non-dominated solutions for the problem. Under a 20% increase, 19 non-dominated solutions were generated. Under a 30% increase, 86 non-dominated solutions were generated. Moreover, the quality of the solutions provided under the 30% demand increase scenario was found to be more appropriate than in the other two scenarios. Finally, this research can serve as a practical tool for managers and decision-makers in Mobarakeh Steel Company and, while contributing to the optimization of transportation and supply chain processes, can lead to the development of more advanced and efficient models in other similar industries.

Keywords: *Cross-docking, Supply chain, Mathematical modeling, Mobarakeh Steel Company*

Extended Abstract

Introduction

Supply chain management has become one of the most critical factors influencing organizational competitiveness, operational efficiency, and customer satisfaction in manufacturing industries, particularly in the steel sector. The increasing complexity of logistics operations, the diversification of products, and the growing expectations for timely deliveries have intensified the need for advanced transportation and inventory management systems. Among the innovative logistics strategies developed in recent decades, cross-docking has emerged as an effective approach for reducing inventory holding costs, minimizing storage time, and accelerating product flows throughout the supply chain. Cross-docking systems enable products to move directly from inbound transportation vehicles to outbound vehicles with little or no storage, thereby improving operational responsiveness and reducing unnecessary warehousing activities. This strategy has gained significant attention in modern supply chain management because it contributes to enhancing material flow efficiency, reducing transportation costs, and improving financial performance within organizations (Rajabzadeh & Mousavi, 2023; Essghaier et al., 2023). In large-scale industries such as steel manufacturing, where the volume of production and distribution activities is extremely high, optimizing cross-docking operations can substantially improve supply chain performance and increase organizational competitiveness. The supply chain of Mobarakeh Steel Company represents a highly complex logistics network characterized by multiple suppliers, numerous transportation vehicles, large quantities of raw materials and finished products, and extensive customer demand. Managing transportation and warehousing operations efficiently in such an environment requires the use of sophisticated mathematical optimization models capable of handling operational complexities and conflicting objectives simultaneously. Previous studies have demonstrated the importance of mathematical modeling in improving supply chain efficiency and logistics management. Darvish Motevali and Motamedi (2020) developed a dynamic modeling framework for evaluating the efficiency of multilevel supply chain networks, while Poornaser et al. (2022) proposed a multi-objective optimization model for humanitarian supply chain vehicle routing. Similarly, Faghih-Mohammadi et al. (2023) designed a green closed-loop supply chain model for cross-docking systems with environmental considerations, and Amani and Nasiri (2023) investigated carbon-emission reduction policies in cross-docking systems using nonlinear mathematical programming. More recent studies such as Asgharyar et al. (2025) and Kurt and Gumus (2025) emphasized the growing importance of integrating vehicle routing, dynamic freight planning, and environmental sustainability into cross-docking optimization frameworks. Despite these contributions, many existing models remain limited to single-objective optimization and fail to capture the simultaneous effects of operational efficiency and environmental sustainability. Furthermore, most previous studies have focused on specific operational aspects without incorporating multi-period planning and greenhouse gas emission control simultaneously. Therefore, the present study aims to develop a multi-objective and multi-period mathematical model for optimizing transportation management in cross-docking supply chains in the steel industry while simultaneously minimizing operational delays and greenhouse gas emissions.

Methods and Materials

This study was applied in terms of objective and operational research-based in terms of methodology. A quantitative and cross-sectional research design was adopted to develop and evaluate the

proposed optimization framework. The research focused on designing a multi-objective mathematical model for optimizing transportation and cross-docking operations within the supply chain of Mobarakeh Steel Company. The proposed supply chain structure included inbound docks, outbound docks, transportation vehicles, operators, loading and unloading processes, and temporary logistics platforms. The cross-docking platform was designed to facilitate rapid transfer of goods from inbound trucks to outbound trucks while minimizing storage duration and operational delays. The model considered multiple categories of inbound and outbound trucks, several types of products, and multiple time periods. Decision variables included continuous variables representing product transfer quantities and operational timing, as well as binary variables representing truck allocations to docks and operational sequencing. The mathematical model was formulated as a mixed-integer linear programming (MILP) problem with two primary objective functions. The first objective minimized the total operational time, including loading, unloading, transportation, and delay times. The second objective minimized greenhouse gas emissions generated by inbound and outbound transportation vehicles. To convert the multi-objective problem into a solvable single-objective framework, the weighted sum method was employed, assigning equal importance to operational efficiency and environmental sustainability objectives. Several operational constraints were incorporated into the model, including vehicle allocation constraints, loading and unloading sequencing constraints, capacity constraints, timing synchronization constraints, and product flow balance constraints. Data required for model implementation were extracted from archived operational records, electronic data interchange systems, warehouse management systems, and customer order databases within the company. Parameters such as product quantities, transportation times, loading and unloading durations, arrival delays, and greenhouse gas emission levels were generated using statistical distributions based on real operational conditions. Small-, medium-, and large-scale problem instances were generated for computational evaluation. Due to the NP-hard nature of cross-docking optimization problems, exact optimization methods become computationally inefficient for large-scale instances. Therefore, the simulated annealing metaheuristic algorithm was employed to solve the proposed model efficiently. The algorithm was initialized with predefined temperature, cooling rate, and iteration parameters, and neighborhood search operators including swap and insertion mechanisms were utilized to generate improved solutions iteratively. The computational experiments were conducted using GAMS software for exact optimization and simulated annealing for heuristic optimization.

Findings

The computational results demonstrated the effectiveness and applicability of the proposed multi-objective mathematical model in optimizing cross-docking operations within the steel supply chain. The experimental results obtained from small-scale problem instances showed that the proposed model successfully minimized operational delays while simultaneously controlling greenhouse gas emissions generated by transportation vehicles. The optimization results indicated that the total loading and unloading transfer times between inbound and outbound docks were significantly reduced through efficient truck allocation and operational scheduling. The product transfer analysis revealed optimized product flows between inbound and outbound docks, ensuring balanced logistics operations and minimizing unnecessary handling activities. Binary allocation programming results confirmed the efficient assignment of inbound and outbound trucks to available docks, thereby improving operational synchronization and reducing waiting times. Sensitivity analysis was conducted using different objective

function weights to evaluate the behavior of the proposed model under varying operational priorities. The results showed that the objective function value was highly sensitive to the weight assigned to operational efficiency. As the weight of the first objective function increased, the overall objective function value increased considerably, whereas increasing the weight associated with greenhouse gas emission reduction led to lower objective function values. Comparative analysis between the exact GAMS optimization results and the simulated annealing algorithm demonstrated that the proposed metaheuristic method achieved highly competitive results, particularly for medium- and large-scale problem instances. For small-scale problems, the optimization gap between the exact and heuristic solutions was reported as zero percent, indicating excellent performance of the simulated annealing algorithm. Although the computational gap increased slightly for larger instances, the obtained solutions remained within acceptable ranges while significantly reducing computational time. The sensitivity analysis of demand fluctuations further demonstrated the robustness of the proposed optimization framework. When the quantities of inbound and outbound goods increased by 10%, the simulated annealing algorithm generated 15 non-dominated Pareto solutions. Under a 20% increase scenario, 19 non-dominated solutions were generated, while a 30% increase produced 86 non-dominated solutions. The Pareto frontier analysis revealed clear convergence behavior across all scenarios, indicating the stability and reliability of the optimization process. Moreover, the quality of the solutions obtained under the 30% demand increase scenario was identified as superior to the other scenarios due to increased solution diversity and improved trade-offs between operational and environmental objectives. Similarly, under demand reduction scenarios of 10%, 20%, and 30%, the algorithm generated 24, 27, and 35 non-dominated solutions, respectively, all demonstrating acceptable convergence properties. These findings indicate that the proposed model is highly adaptable to dynamic demand conditions and capable of generating high-quality optimization solutions under varying operational environments.

Discussion and Conclusion

The results of this study demonstrate that integrating cross-docking strategies with multi-objective mathematical optimization can substantially improve supply chain performance in the steel industry. The proposed optimization framework successfully reduced operational delays, improved material flow efficiency, minimized greenhouse gas emissions, and enhanced transportation coordination across the supply chain network. The implementation of cross-docking as a key logistics strategy enabled faster movement of products through the supply chain while minimizing unnecessary storage and handling operations. The findings also confirmed that considering environmental sustainability objectives alongside operational efficiency can significantly improve overall supply chain performance and support sustainable logistics management practices. The simulated annealing metaheuristic algorithm proved highly effective for solving large-scale NP-hard optimization problems, particularly in environments characterized by operational complexity and multiple conflicting objectives. The generated Pareto-optimal solutions provided decision-makers with multiple strategic alternatives for balancing operational efficiency and environmental sustainability. Furthermore, the sensitivity analysis demonstrated that the proposed optimization framework remains robust under fluctuating demand conditions, making it suitable for dynamic industrial environments. Compared with previous studies, the present research contributes to the literature by simultaneously integrating multi-objective optimization, multi-period planning, cross-docking operations, greenhouse gas emission control, and metaheuristic solution approaches within a unified mathematical framework. Another important contribution of this study is the consideration of

product diversity and heterogeneous transportation vehicles, which reflects real operational conditions more accurately than many previous models. The practical implications of the study are particularly important for the steel industry, where logistics costs and operational delays can significantly affect competitiveness and profitability. The proposed model can assist managers and decision-makers in optimizing resource allocation, improving transportation planning, reducing environmental impacts, and increasing customer satisfaction. Despite these contributions, some limitations should be acknowledged. The proposed model relied on deterministic parameters and assumed stable operational conditions, whereas real-world supply chains often experience uncertainty and disruptions. Moreover, metaheuristic optimization methods may require substantial computational resources for extremely large-scale problems. Future research may focus on developing robust and stochastic optimization models capable of handling uncertainty in demand, transportation times, and operational disruptions. Integrating advanced technologies such as artificial intelligence, machine learning, and Internet of Things systems into cross-docking optimization frameworks may also improve real-time decision-making and operational adaptability. Overall, this study provides a comprehensive and practical optimization framework that can support sustainable and efficient supply chain management not only in the steel industry but also in other large-scale manufacturing sectors.

علم تصمیم گیری و سیستم های هوشمند دوره ۲، شماره ۴ (۱۴۰۴): ۲۴-۱

تاریخچه مقاله
دریافت شده در تاریخ ۱۲ خرداد ۱۴۰۴
اصلاح شده در تاریخ ۹ شهریور ۱۴۰۴
پذیرفته شده در تاریخ ۲۰ شهریور ۱۴۰۴
منتشر شده در تاریخ ۱ دی ۱۴۰۴

ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه‌سازی مدیریت انبار متقاطع در زنجیره تأمین با استفاده از الگوریتم فراابتکاری

محمدرضا آقاجعفر محلاتی[۱]، محمدحسین درویش متولی[۲*]، سید مصطفی 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

*ایمیل نویسنده مسئول: Mhd.Darvish@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
پژوهشی اصیل

نحوه استناد به این مقاله:
آقاجعفر محلاتی، محمدرضا.، درویش متولی، محمدحسین.، موسوی، سید مصطفی.، و معتمدی، مجید. (۱۴۰۴). ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه‌سازی مدیریت انبار متقاطع در زنجیره تأمین با استفاده از الگوریتم فراابتکاری. *علم تصمیم گیری و سیستم های هوشمند، ۲(۴)*، ۲۴-۱.

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

چکیده

یکی از استراتژی‌های نوین در مدیریت موجودی محصولات در طول زنجیره تامین رویکرد انبارداری متقاطع است. هدف این پژوهش بهینه‌سازی زنجیره تامین در انبار متقاطع در صنعت فولاد می‌باشد. 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 ارائه شده است. مدل توسعه یافته یک مدل چندهدفه و چنددوره ای است که قادر است اهداف متضاد را در دوره های مختلف مورد بررسی قرار دهد. علاوه بر این، الزامات زیست محیطی ناشی از انتشار گاز کربن در تصمیم گیری 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 شبیه سازی بازپخت استفاده شده است. بر طبق نتایج حاصل شده نشان داده شده است که با پیاده‌سازی مدل طراحی شده، استفاده از انبارهای متقاطع به عنوان نقاط کلیدی در زنجیره تأمین، به بهبود جریان مواد و کاهش زمان تحویل محصولات کمک می‌کند. علاوه بر این، نقاط نامغلوب به دست آمده از روش شبیه سازی بازپخت برای مسئله چند هدفه در نظر گرفته شده به ازای افزایش افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی در مقدار کالاهای ورودی و خروجی به اسکله ها بررسی شده است. با توجه به مرز ایجاد شده، همگرایی پاسخ ها به ازای هر تغییر مشهود است. جواب ها با افزایش ۱۰ درصدی، ۱۵ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. با افزایش ۲۰ درصدی، ۱۹ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. با افزایش ۳۰ درصدی، ۸۶ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. علاوه بر این، کیفیت راه حل های ارائه شده در حالت افزایش تقاضا ۳۰ درصد مناسب تر از دو حالت دیگر تشخیص داده شده است. سرانجام، این تحقیق می‌تواند به عنوان یک ابزار کاربردی برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان در صنعت فولاد مبارکه اصفهان عمل کند و ضمن کمک به بهینه‌سازی فرآیندهای حمل و نقل و زنجیره تأمین به توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر و کارآمدتر در سایر صنایع مشابه منجر شود.

کلیدواژگان: *انبار متقاطع، زنجیره تأمین، مدلسازی ریاضی، فولاد مبارکه*

مقدمه

زنجیره تأمین یکی از عناصر کلیدی در بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و توزیع در صنایع مختلف به ویژه در صنعت فولاد است. در این صنعت، حمل و نقل محصولات از مراحل تولید تا توزیع نهایی به مشتریان، نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه‌ها، افزایش کارایی و بهبود رضایت مشتریان دارد. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در زنجیره تأمین، بهینه‌سازی حمل و نقل محصولات به یک چالش اساسی تبدیل شده است (رجب زاده و موسوی، ۲۰۲۳). بدون شک تمرکز بر عملیات زنجیره تامین در صنایع کوچک و بزرگ به منظور تامین اقلام و نیازمندی‌ها یکی از بزرگترین دغدغه‌های مدیریت سازمان‌ها می‌باشد. نیاز به تامین کالا و خدمات تقریبا همزمان با پیدایش شرکت‌ها و سازمان ها شکل گرفت (آلگام و همکاران، ۲۰۲۴). در ابتدا شرکت ها و سازمان ها با استفاده از رویه های موردی و بدون برنامه قبلی، کالاها و خدمات مورد نیاز خود را تامین می نمودند (سازگاری و همکاران، ۲۰۲۴: نوگوریا و همکاران، ۲۰۲۴). بطورکلی زنجیره‌های تأمین به عنوان مکانیزم کاهش هزینه‌ی نهایی تولید محصول برای مشتری محسوب می‌شود. در نظر گرفتن اینکه کدام بخش از زنجیره تامین بیشتر به ارزش افزوده کمک می کند یک هدف استراتژیک مهم است زیرا ارزش افزوده با حاشیه سود مرتبط است (سوتینکو، ۲۰۲۱). استراتژی زنجیره تأمین اگر در سازمان بدرستی اجرا شود می تواند مزایای متعددی داشته باشد که در نهایت به مزیت رقابتی پایدار برای شرکت ها مبدل می شود. بنابراین سازمان زنجیره تأمین به دنبال افزایش ارزش افزوده از طریق استراتژی های نوین جهت بهبود جریان فیزیکی، جریان اطلاعات و جریان مالی است (نیاوند و همکاران، ۲۰۲۴: ویدیانتو، ۲۰۲۴). یکی از استراتژی های نوین جهت بهبود جریان فیزیکی در زنجیرهٔ تأمین، انبار متقاطع است که محصولات از طریق مراکز تولید بدون ذخیره سازی آنها بدست مشتری می‌رسد (زاده باقری و همکاران، ۲۰۲۳). این عملیات شامل دریافت محصول از یک تولید کننده یا کارخانه سازنده برای چند مقصد پایانی مختلف و یا گاهی اوقات دریافت محصول از تامین کننده برای مقصد مشترک نهایی تحویل و سپس انتقال آنها در اولین فرصت می‌شود. انبارداری متقاطع موجب کاهش موجودی زنجیره تأمین و هزینه حمل و نقل، همچنین بهبود جریان‌های مالی و سودآوری سازمان می‌گردد (فتحی و همکاران، ۲۰۲۳: چن و همکاران، ۲۰۲۴). انبار متقاطع روش مناسبی برای کاهش موجودی و بهبود رضایت مشتریان معرفی شده است. با استفاده از این استراتژی می‌توان از دوباره کاری، بیکاری پرسنل، افزایش موجودی، جابجایی و موجودی ضایعاتی جلوگیری نمود (اسقایر و همکاران، ۲۰۲۳). جریان فیزیکی در سه فرآیند تأمین، تولید و فروش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

زنجیره تأمین در صنایع فولاد، به ویژه در شرکت فولاد مبارکه اصفهان، به عنوان یکی از کلیدی‌ترین عوامل در بهینه‌سازی فرآیند تولید و توزیع محصولات شناخته می‌شود. حمل و نقل محصولات در این زنجیره تأمین، به دلیل تنوع محصولات، نیاز به انبارداری مؤثر و زمان‌بندی دقیق، چالش‌های خاصی را به همراه دارد. انبار متقاطع به عنوان یک روش نوین در مدیریت زنجیره تأمین، می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های حمل و نقل کمک کند، اما پیاده‌سازی آن نیازمند مدلسازی دقیق و تحلیل‌های عمیق است (همتی و همکاران، ۲۰۲۴).

مسأله اصلی در این تحقیق، طراحی و توسعه یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی حمل و نقل محصولات در زنجیره تأمین انبار متقاطع در صنایع فولاد مبارکه اصفهان است. این مدل باید قادر باشد تا به تحلیل و شبیه‌سازی جریان محصولات از مراحل تولید تا توزیع نهایی بپردازد و در عین حال محدودیت‌های موجود در سیستم، از جمله ظرفیت انبارها، زمان‌های حمل و نقل، و انتشار آلودگی را در نظر بگیرد. در این مطالعه به بهینه سازی این زنجیره تأمین با ارائه یک مدل ریاضی از جنس چندهدفه پرداخته شده است. مدل پیشنهادی قادر است ضمن کنترل مدت زمان فرآیند بارگیری و بارگذاری کالا، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط وسایل نقلیه را نیز اندازه گیری کند. این مدل پس از مدل سازی ریاضی، اعتبارسنجی می‌شود و با بهره‌گیری از داده‌های واقعی در فولاد مبارکه اصفهان مورد آزمون قرار می‌گیرد. در صنایع فولاد

مبارکه اصفهان، با توجه به حجم بالای تولید و تنوع محصولات، نیاز به یک مدل ریاضی کارآمد برای مدیریت و بهینه‌سازی حمل و نقل محصولات در زنجیره تأمین انبار متقاطع احساس می‌شود. انبارهای متقاطع به عنوان نقاط کلیدی در زنجیره تأمین، می‌توانند به بهبود جریان مواد و کاهش زمان‌های انتظار کمک کنند. اما عدم وجود یک مدل جامع و بهینه برای مدیریت این انبارها و حمل و نقل محصولات، منجر به افزایش هزینه‌ها، کاهش کارایی و در نهایت نارضایتی مشتریان می‌شود.

در حال حاضر، بسیاری از مدل‌های ریاضی موجود در زمینه مدیریت انبار متقاطع به صورت تک هدفه طراحی شده‌اند و به بهینه‌سازی یک جنبه خاص (مانند هزینه یا زمان) می‌پردازند. این رویکردها معمولاً قادر به در نظر گرفتن پیچیدگی‌های واقعی زنجیره تأمین نیستند. بنابراین، نیاز به توسعه مدل‌های چند هدفه وجود دارد که بتوانند به طور همزمان چندین هدف را (مانند بهبود زمان تحویل برای افزایش رضایت مشتری و کاهش آلاینده های زیست محیطی) در مدیریت انبار متقاطع در زنجیره تأمین در نظر بگیرند. بنابراین، مهمترین سهم مشارکت تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات به شرح ذیل در نظر گرفته می شود.

- در نظر گرفتن الزامات زیست محیطی ناشی از انتشار گاز کربن در تصمیم گیری برای توزیع بموقع کالای ارسالی و دریافتی در انبار متقاطع،
- توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه و چنددوره ای که قادر است اهداف متضاد را در دوره های مختلف مورد بررسی قرار دهد.

باقیمانده مقاله بصورتی که مشخص شده سازماندهی شده است. در بخش دوم یک مرور ادبیات برای شناسایی شکاف تحقیق ارائه شده است. در بخش سوم، مدل سازی ریاضی به همراه اندیس‌ها، متغیرها و پارامترها ارائه شده است. علاوه‌بر این، روش حل مسأله پیشنهادی نیز معرفی شده است. در بخش چهارم، نتایج بکارگیری مدل پیشنهادی ارائه شده است. سرانجام در بخش پنجم یک نتیجه‌گیری کلی به همراه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

مرور ادبیات

درویش‌متولی و معتمدی (۲۰۲۰)، کارائی در شبکه تامین چند سطحی متوالی را با مدلسازی پویا مورد بررسی قرار دادند. آنها به مدل‌سازی در قالب توسعه مدل غیر شعاعی و ارائه مدل تحلیل پوششی داده‌های پویا جهت ارزیابی عملکرد شبکه تأمین پایدار پرداختند. مدل ارایه شده به‌عنوان یک شبکه گسترده و چند سطحی در صنعت سیمان اعتبار سنجی شد، که امکان محاسبه کارایی در سطوح پنج‌گانه شبکه تأمین را در دوره‌های متوالی فراهم می‌آورد. نتایج نشان داد مدل جدید در مقایسه با مدل‌های کلاسیک و شبکه‌ای ایستا، ارزیابی منطقی و نزدیک به واقعیت را انجام می‌دهد و مشکلات مدل‌های شبکه ساده نیز، برطرف شده است.

پورناصر و همکاران (۲۰۲۲)، مدلی برای، مسیریابی وسایل نقلیه امدادرسان در یک زنجیره تأمین بشردوستانه ارایه کردند. برای این منظور بک مدل بهینه سازی چند هدفه برای تعیین مسیر وسایل نقلیه در پاسخ به تدارکات امداد بشردوستانه با اهداف به حداقل رساندن کل هزینه‌های هر مسیر و به حداقل رساندن کل زمان تعمیرات وسایل نقلی پیشنهاد گردید. نتایج به دست آمده از حل مدل پیشنهادی با طرح مسیریابی موجود مقایسه شد و نتایج نشان داد که نتایج به دست آمده از حل مدل پیشنهادی، مناسب‌تر از برنامه‌های مسیریابی فعلی است.

فقیه محمدی و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی با عنوان طراحی شبکه زنجیر تامین حلقه بسته سبز برای انبارهای متقاطع با استفاده از سیستم صف جهت کاهش اثرات محیط زیستی و مصرف انرژی پرداختند. محققین به طراحی شبکه تامین متشکل از سیستم تولید، مراکز توزیع، تعمیر، بازیافت، دفع و مرکز جمع آوری پرداختند. مدل پیشنهادی محققین اثرات زیست محیطی و مصرف انرژی ناوگان‌های حمل و نقل جهت بارگیری و تخلیه میزان تولید در زمان انتظار و حمل و نقل را کاهش داد.

امانی و نصیری (۲۰۲۳) در مطالعه خود به مدلسازی انبار متقاطع در زنجیره تامین حلقه بسته تحت سیاست کاهش انتشار گاز کربن ناوگان ناهمگن پرداخته اند. مدل طراحی شده با استفاده از مدل سازی ریاضی برنامه ریزی غیرخطی مختلط انجام شده و نتایج حل مدل عددی نشان داد بهره مندی از این مدل منجر به بهبود مسائل زیست محیطی و اقتصادی می‌گردد.

رجب زاده و موسوی (۲۰۲۳) در این مطالعه طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز با هدف کنترل و کاهش هزینه های انتشار گازهای CO_2، مدل طراحی شده با ترکیبی از برنامه ریزی عدد صحیح مختلط، به توسعه توازن بین تاثیر عوامل زیست محیطی و کاهش هزینه های عملیاتی که منجر گردید. محققین با استفاده از سناریویی بر پایه روش اپسیلون محدودیت به حل مدل، تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. نتایج نشان داد بهره مندی از مدل مذکور منجر به کنترل کاهش و هزینه‌های زیست محیطی و اقتصادی در زنجیره تامین حلقه بسته می‌گردد.

موسوی و همکاران (۲۰۲۴)، مدل ریاضی مساله مکان یابی انبارهای مرکزی و ثانویه در شبکه زنجیره تامین چند سطحی محصولات فاسد شدنی ارایه نمودند، که در آن یک زنجیره تامین چهار سطحی شامل سطوح تامین کننده، مشتری و انبارهای مرکزی و فرعی مورد بررسی قرار گرفته است، برای به حداقل رساندن هزینه‌های زنجیره تامین، از جمله راه اندازی و آماده سازی انبارها، حمل و نقل بین سطوح انتقال، و نگهداری محصولات ارائه شده است. مدل پیشنهادی بر اساس محدودیت هایی مانند موجودی، ظرفیت انبار، ظرفیت وسیله نقلیه و چند محصول چند دوره‌ای توسعه یافته است. نتایج خروجی اعتبار و کارایی مدل پیشنهادی را تایید کرد.

مودیکا و همکاران (۲۰۲۴) مساله مکان یابی انبار متقاطع و مسیریابی کامیونها را با دو مدل برنامه ریزی خطی مختلط عدد صحیح و به صورت یکپارچه و در حالت عدم قطعیت بررسی کرده و آن را با یک روش برنامه ریزی احتمالی فازی حل کرده اند. آنها دو مدل مکان‌یابی و مسیریابی را به طور جداگانه در نظر گرفته اند؛ از جواب‌های بدست آمده در مدل اول که مکان یابی است به عنوان پارمترهای مدل دوم استفاده کرده اند. عدم قطعیت در مدل آنها زمانهای رسیدن به انبار و ترک انبار می باشد.

بابازاده و همکاران (۲۰۲۴)، یک مدل ریاضی استوار چند هدفه مبتنی بر سناریو با هدف کاهش ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط بحرانی ارائه کردند. به منظور غلبه بر عدم قطعیت عرضه مدلی سه سطحی با دو هدف متضاد ارائه گردید، که هدف اول هزینه کل را کاهش و هدف دوم قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون را افزایش می‌دهد و در نهایت مدل با درنظر گرفتن عدم قطعیت در عرضه خون، استوار گردید. نتایج نشان داد تغییرات قابلیت اطمینان در برابر تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون رابطه مستقیم بین این دو مورد را نشان می‌دهد و با افزایش تعداد تسهیلات جمع‌آوری، قابلیت اطمینان سیستم نیز افزایش می‌یابد. یافته‌ها نشان داد که مدل ارائه شده قادر است میزان بهینه خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان، تعداد مراکز جمع‌آوری، و تعداد تسهیلات جمع آوری را با هدف کاهش ریسک تعیین نماید.

رجب زاده و همکاران (۲۰۲۴) یک مدل ریاضی برای مسئله مکانیابی انبار عبوری و برنامه ریزی مسیریابی وسایل نقلیه در شبکه توزیع ارائه کردند. برای این منظور یک برنامه ریزی دو فازی MIP فرمول بندی شده است. سپس یک روش شبیه سازی ابتکاری برای مدل MIP ارائه شده توسعه داده شده است. در نهایت الگوریتم ابتکاری ارائه شده در مقیاسهای کوچک و بزرگ تست شده است نتایج محاسباتی نشان میدهد که الگوریتم پیشنهاد شده در مدت زمان معقولی به طور مؤثر پاسخ می دهد.

حق گویی و همکاران (۲۰۲۴) به کاهش زمان انجام عملیات کل در انبارهای متقاطع پرداختند و همچنین تعداد کامیونهای مورد نیاز برای شبکه با رعایت حق تقدم در انبار عبوری را مدل کردند. مدل آنها یک مدل چند معیاره غیرخطی، با متغیرهای عدد صحیح بوده که در ابعاد بزرگ با روش های عادی قابل حل نمیباشد، به همین دلیل از الگوریتم فرااابتکاری ژنتیک برای حل آن بهره گرفته شده است. این پژوهش بهترین توالی عملیات برای کامیونهای ورودی و خروجی را برای کاهش تاخیرات کامیونها، زودرسی و تعداد تقدم بدست آورده است.

اصغریار و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه خود، یک چارچوب یکپارچه برای مسئله مسیریابی دوره‌ای وسیله نقلیه با سیستم انبار متقاطع بین مکان‌های تأمین‌کننده و خرده‌فروش معرفی کرده اند. برای این منظور، بهینه‌سازی با هدف سه تصمیم کلیدی در نظر گرفته شده است: ۱. زمان‌بندی و مسیریابی وسیله نقلیه برای هر دوره، ۲. مقادیر بارگیری و تخلیه کالا در انبار متقاطع، و ۳. انتخاب یک ترکیب روزانه از تقاضاهای خرده‌فروش دوره‌ای برای به حداقل رساندن هزینه‌های ناشی از حمل و نقل و عملیات انبار متقاطع. برای فرموله کردن مدل مسأله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) جدید طراحی شده است. با توجه به پیچیدگی محاسباتی نمونه‌های بزرگ، یک الگوریتم اکتشافی برای تولید راه‌حل‌های اولیه نزدیک به بهینه طراحی شده است که سپس در دو الگوریتم فرابتکاری جاسازی شده اند. راه‌حل‌های بهینه به‌دست‌آمده از طریق حل‌کننده CPLEX برای نمونه‌های کوچک به عنوان پایه‌ای برای مقایسه عمل کرده اند.

کورت و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی پویایی بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین، به ویژه با تمرکز بر نقش انبار متقاطع پرداخته اند. برای این منظور، شبکه‌ای متشکل از تأمین‌کنندگان، خرده‌فروشان، محصولات و تأسیسات انبار متقاطع ترکیبی را بررسی کرده اند که در آن هم انتقال کالا و هم موجودی کوتاه‌مدت با محدودیت زمانی ذخیره‌سازی، مجاز است. برای این منظور، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پویا، در کنار یک الگوریتم اکتشافی، برای بهینه‌سازی هزینه کل سیستم فرموله شده است.

در جدول ۱، طبقه بندی مطالعات گذشته برحسب نوع روش حل، نوع زنجیره و سایر مفروضات در نظر گرفته شده ارائه شده است.

جدول ۱- طبقه بندی ادبیات

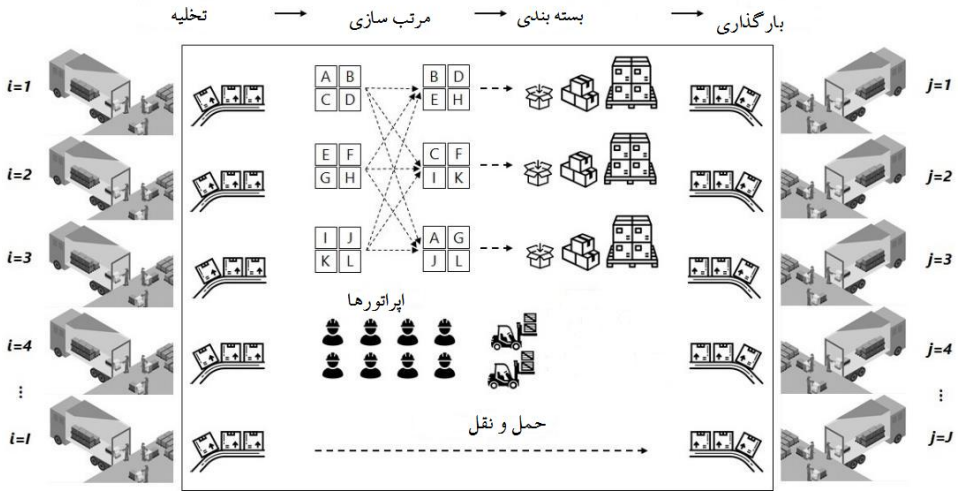
منبع	نوع روش حل			نوع زنجیره		نوع تابع هدف		نوع مسأله			دوره زمانی	
	فرابتکاری	قطعی	ابتکاری	انبار متقاطع	حلقه بسته	تک هدفه	چندهدفه	مسیریابی	انتشار گاز کربن	کارایی عملکرد	تک دوره	چند دوره
درویش متولی (۲۰۲۰)		*		*	*	*				*	*	
پورناصر و همکاران (۲۰۲۲)		*			*		*	*			*	
فقیه محمدی و همکاران (۲۰۲۳)		*		*	*				*		*	
امانی و نصیری (۲۰۲۳)		*		*	*	*			*		*	
رجب زاده و همکاران (۲۰۲۳)		*			*		*		*		*	
مودکا و همکاران (۲۰۲۴)		*		*			*	*			*	
رجب زاده و همکاران (۲۰۲۴)			*	*				*			*	
موسوی و همکاران (۲۰۲۴)	*			*		*		*		*	*	
بابازاده و همکاران (۲۰۲۴)			*	*			*	*			*	
اصغریار و همکاران (۲۰۲۵)	*	*			*	*			*			*
کورت و همکاران (۲۰۲۵)	*			*		*					*	
این مطالعه (۲۰۲۵)	*	*		*			*		*			*

با توجه به طبقه بندی انجام شده در جدول ۱، مطالعه حاضر در مقایسه با مطالعات همتراز خود مانند تفاوت ها و شباهت هایی دارد. برای مثال، مانند مطالعه اصغریار و همکاران (۲۰۲۵) از الگوریتم فراابتکاری و قطعی برای حل مسأله استفاده شده است. انتشار گاز کربن در زنجیره به عنوان هدف مدلسازی لحاظ شده است و یک برنامه ریزی چند دوره ای ارائه شده است. اما مطالعه حاضر برخلاف اصغریار و همکاران (۲۰۲۵) که یک زنجیره تأمنین حلقه بسته با تک هدف ارائه کرده اند؛ مانند مطالعه کورت و همکاران (۲۰۲۵) به مدلسازی از طریق انبار میانی پرداخته اند. علاوه بر این، در این مطالعه یک برنامه ریزی چندهدفه برای مدلسازی مسأله و اعمال چند هدف مختلف به طور همزمان پرداخته شده است.

روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف و نتایج کاربردی است و از نظر روش و ماهیت اجرا مبتنی بر پژوهش عملیاتی است. متغیرهای این پژوهش کمی است و از نظر زمان مقطعی می‌باشد. در این پژوهش یک مدل ریاضی برای زنجیره تأمین حمل و نقل محصولات در انبار متقاطع در شرکت فولاد مبارکه اصفهان ارائه شده است. برای این منظور، در این مطالعه به یک طرح حداقلی برای مسأله انبار متقاطع پرداخته شده است که نشان دهنده کل زمان اجرای عملیات انبار متقاطع[1] برای کاهش زمان عملیاتی و هزینه های لجستیک در مدیریت زنجیره تأمین است. فرآیند انبار متقاطع از یکسری عملیات، منابع و زیرساخت های لجستیکی تشکیل شده است. عملیاتی مانند بارگیری و تخلیه کامیون و همچنین فعالیت حمل و نقل در فرآیند بارگذاری متقابل انجام می شود تا تقاضای مشتری را به طور موثر برآورده کند. این عملیات های کلیدی برای بخش کالاهای مصرفی هستند که در آن تحویل مکرر و کوچک پردازش می شود و چندین مورد را در هر سفارش مشتری انجام می دهد.

فناوری های اطلاعات و ارتباطات مانند سیستم مدیریت انبار، برنامه ریزی منابع سازمانی و تبادل الکترونیکی داده‌ها برای مدیریت اطلاعات در مورد سفارشات مشتری استفاده می شود. تاریخ سررسید، مقدار محصولاتی که باید تحویل داده شود و شرایط لجستیکی، مشخصات مبدا و نقاط مقصد، از جمله اطلاعات دیگر برای عملیات انبار متقاطع بحساب می آیند. علاوه بر این، تجهیزات جابجایی مواد و نیروی کار، به عنوان منابعی که آن عملیات را اجرا می‌کنند، در حالی که بارگیری و تخلیه اسکله‌ها و سکوهای لجستیکی زیرساخت‌های کلیدی را برای فرآیند انبار متقاطع مشخص می کنند. در شکل ۱ عملیات، منابع و زیرساخت های در نظر گرفته شده برای مسأله انبار متقاطع نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار زنجیره تأمین انبار متقاطع پیشنهادی

[1] Cross docking

پلت فرم انبار متقاطع در این تحقیق توسط اسکله های ورودی I و اسکله های خروجی J تشکیل شده است. علاوه بر این، پلت فرم عملیات برای انجام عملیات هایی مانند بارگیری و تخلیه کامیون، مرتب سازی، بسته بندی و عملیات حمل و نقل توسط منابعی مانند اپراتورها، اسکله های ورودی و خروجی پشتیبانی می شود. از سوی دیگر، سامانه تبادل الکترونیکی داده ها امکان دریافت سفارش‌های مشتری را می‌دهد، در حالی که سیستم مدیریت انبار گردانی مستقر شده چنین سفارش‌هایی را بر اساس تاریخ سررسید، تعداد اقلام و مقادیری که باید تحویل داده شود طبقه‌بندی می‌کند. علاوه بر این، سیستم مدیریت انبار گردانی موجودی موجود، میزان ورودی را با مقادیر محصول درخواست شده توسط سفارشات مشتری مقایسه می کند و سطح خدمات رضایت بخشی را تضمین می کند. بنابراین، سفارش‌های مشتریان با موجودی موجود برای فرآیند انبار متقاطع، اختصاص کامیون‌ها به اسکله‌های ورودی و خروجی، و تخصیص اپراتورها برای انجام عملیات انبار متقاطع برای به حداقل رساندن طول زمان، برنامه‌ریزی می‌شوند.

به منظور فرموله کردن مسئله انبار متقاطع به عنوان یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط، این مطالعه در نظر می گیرد که کامیون های ورودی باید به طور کامل تخلیه شوند تا از اسکله ورودی خارج شوند. کامیون های خروجی باید به طور کامل بارگیری شوند تا اسکله خروجی را ترک کنند. فولاد مبارکه به طور موردی برای پیاده سازی مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. کامیون های ورودی از تأمین کنندگان کالاهای مورد نیاز فولاد را وارد مجموعه می کنند و کامیون های خروجی به عمده فروشی هایی که درخواست کالا کرده اند ارسال می شوند.

پلت فرم پیشنهادی هیچ محدودیت ظرفیتی برای ذخیره سازی موقت در نظر نمی گیرد. زمان عملیاتی برای بارگیری و تخلیه اقلام و همچنین، زمان انتقال از اسکله ورودی به اسکله خروجی ثابت در نظر گرفته شده است. اطلاعات در مورد کامیون های ورودی و خروجی و تعداد اقلام از قبل مشخص است. اندیس‌ها، مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم‌گیری، تابع هدف و محدودیت‌ها به صورت زیر نمایش داده می‌شوند.

مدلسازی ریاضی

در این بخش کلیه نمادهای بکارگرفته شده برای توصیف مجموعه‌ها؛ پارامترها و متغیرهای مسأله که براساس نظر خبرگان همکار در این تحقیق و همچنین مطابقت با اسناد موجود بایگانی شده توضیح داده شده‌اند. برای این منظور از داده های سامانه تبادل الکترونیکی وضعیت های سفارش‌های مشتری دریافت شده، تاریخ سررسید سفارش ها، تعداد اقلام و مقادیری که باید تحویل داده شود استخراج شده است. علاوه بر این، میزان موجودی، میزان ورود محصول و سطح خدمات رضایت بخشی شده براساس نقطه نظرات دریافتی از طریق صدای مشتری بررسی شده است. وضعیت سفارش‌های مشتریان با موجودی موجود برای فرآیند انبار متقاطع، اختصاص کامیون‌ها به اسکله‌های ورودی و خروجی، و تخصیص اپراتورها برای انجام عملیات انبار متقاطع برای به حداقل رساندن طول زمان، برنامه‌ریزی شده در طول مدت یکماه کاری از دیگر داده های بوده است که در این تحقیق از میان اسناد ثبت شده مورد بررسی قرار گرفته است.

اندیس ها و مجموعه ها:

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

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

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

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

m= شاخص برای اسکله های ورودی $m = 1, \dots, M$

n= شاخص برای اسکله های خروجی $n = 1, \dots, N$

k= اقلام $k = 1, \dots, K$

t= دوره زمانی $t = 1, \dots, T$

پارامترها:

r_{ikt}: مقدار کالای k تخلیه شده 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 گلخانه ای کامیون ورودی i در دوره t (Kg GHG)

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

تعریف ۱: شاخص انتشار گازهای گلخانه ای در این تحقیق به میزان مصرف سوخت و انرژی ناشی از کامیون ها اطلاق می شود که با ایجاد انبار متقاطع مقدار قابل توجهی از مصرف سوخت و تولید این نوع از گازهای گلخانه ای کاسته می شود.

متغیرها:

متغیرهای این تحقیق از نوع پیوسته و باینری هستند. بنابراین، مسأله 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 غر 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 تخصیص یافته 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 مقدم تر 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 مقدم تر از کامیون اسکله خروجی j' در دوره t باشد برابر با یک در غیراینصورت برابر با صفر است.

توابع هدف و محدودیت ها:

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

$$Min\ (\max(L_j)) \quad (۱)$$

$$Min\ \sum_{i=1}^{I} Y_{im}^{t}.GHG_{it} + \sum_{i=1}^{I} z_{jn}^{t}.GHG_{jt} \quad (۲)$$

$s.t$:

$$\sum_{j=1}^{J} x_{ijk}^{t} = r_{ikt} \qquad \forall i,k,t \quad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{I} x_{ijk}^{t} = s_{jkt} \qquad \forall j,k,t \quad (۴)$$

$$\sum_{k=1}^{K} x_{ijk}^{t} \le G \times v_{ij}^{t} \qquad \forall i,j,k,t \quad (۵)$$

$$\sum_{m=1}^{M} Y_{im}^{t} = 1 \qquad \forall i,t \quad (۶)$$

$$Y_{im}^{t} + Y_{i'm}^{t} \le P_{ii'}^{t} + P_{i'i}^{t} + 1 \qquad \forall m,i,i',i \ne i',t \quad (۷)$$

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

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

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

$$\sum_{n=1}^{N} z_{jn}^{t} = 1 \quad \forall j,n,t \quad (۱۱)$$

$$z_{jn}^{t} + z_{j'n}^{t} \le Q_{jj'}^{t} + Q_{j'j}^{t} + 1 \qquad \forall j,j',n,j \ne j',t \quad (۱۲)$$

$$l_{jt} \ge A_j \qquad \forall j,t \quad (۱۳)$$

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

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

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

$$v_{ij}^{t}; Y_{im}^{t}; z_{jn}^{t}; U_{ijmk}^{t}; P_{ii'}^{t}; Q_{jj'} \in \{0,1\} \quad (۱۷)$$

$$x_{ijk}^{t}; c_{it}; C_{it}; l_{it}; L_{jt} \ge 0 \quad (۱۸)$$

تابع هدف (۱) زودترین زمان ممکن برای انجام فرآیند و تأخیر کلی عملیات را به حداقل می‌رساند. تابع هدف (۲) میزان انتشار کامیون های ورودی و خروجی به اسکله ها را کنترل می کند. باتوجه به ماهیت چند هدفه بودن مسأله برای تبدیل به مسأله تک هدفه طبق روش مجموع وزندار شده استفاده شده است. برای این منظور، به هر یک از توابع هدف اهمیت یکسان اختصاص می دهیم تا به طور منصفانه

اهمیت هر دو تقسیم شود و تابع نهایی به صورت $w_1 f_1 + w_2 f_2$ در نظر گرفته می شود. محدودیت (۳) تضمین می کند که مقدار کل کالای k از کامیون ورودی i معادل مقدار ارسال شده به کامیون های خروجی است. محدودیت (۴) تضمین می کند که مقدار کل کالای k ارسال شده به کامیون خروجی j برابر با مقدار آزاد شده از کامیون های ورودی است. محدودیت (۵) انتقال اقلام با رابطه بین کامیون ورودی i و کامیون خروجی j را تضمین می کند. محدودیت (۶) تضمین می کند که هر کامیون ورودی i به یک اسکله ورودی اختصاص داده می شود. محدودیت (۷) تضمین می کند که تنها یک کامیون ورودی در یک زمان به یک اسکله ورودی اختصاص داده می شود. در محدودیت (۸) زمان پایان کامیون ورودی i را تعیین می شود. در محدودیت (۹) زمان شروع تخلیه کامیون های ورودی را با در نظر گرفتن مدت زمان تأخیر رسیدن آنها پس از زمان پایان تمام مدل های قبلی خود تنظیم می کند. محدودیت (۱۰) تضمین می کند که عملیات زمان شروع تخلیه کامیون i پس از رسیدن به اسکله ورودی شروع می شود. محدودیت (۱۱) تضمین می کند که هر کامیون خروجی j به یک اسکله خروجی اختصاص داده می شود. محدودیت (۱۲) تضمین می کند که تنها یک کامیون خروجی در یک زمان به اسکله خروجی اختصاص داده می شود. محدودیت (۱۳) تضمین می کند که عملیات بارگیری کامیون j پس از رسیدن به اسکله خروجی شروع می شود. در محدودیت (۱۴) زمان پایان کامیون خروجی j تعیین می شود. در محدودیت (۱۵) زمان شروع بارگیری کامیون های خروجی را با در نظر گرفتن مدت زمان تأخیر حرکت آنها پس از زمان پایان تمام مدل های قبلی خود تنظیم می کند. در محدودیت (۱۶) زمان شروع تخلیه کامیون خروجی j بزرگتر یا مساوی از زمان شروع کامیون های ورودی، زمان تخلیه اقلام، زمان انتقال از ورودی به اسکله خروجی و زمان بارگیری کالاها به کامیون خروجی j را تضمین می کند. در محدویت های (۱۷-۱۸) محدودیت های غیرمنفی و دامنه تغییرات آنها را نشان می دهند.

روش حل مسأله

با توجه به اینکه در مطالعات کورت و همکاران (۲۰۲۵) و اصغریار و همکاران (۲۰۲۵) ثابت کرده اند که مسائل مدلسازی ریاضی برای بهینه سازی انبار متقاطع در زنجیره تأمین NP-HARD هستند، پس مسئله جاری به عنوان یک مسأله NP-HARD در نظر گرفته می‌شود. این مسأله با اجرای نمونه های بزرگ و حل آن با مدل ریاضی و مقایسه با الگوریتم فراابتکاری نشان داده شده است. زیرا شامل مسئله تخصیص می شود. بنابراین، از روش فراابتکاری به نام بازپخت شبیه سازی شده برای حل مسأله پیاده سازی شده است.

شبیه سازی بازپخت یک روش فراابتکاری است که به عنوان یک روش برای یافتن راه‌حل مسائل ترکیبی طبقه‌بندی می‌شود و برای حل مسئله اقتباس شده است. در مرحله اول، پارامترهای اولیه الگوریتم تنظیم می شوند. برای این منظور، دما $(T = T_0)$ و تکرارها$(n =$ $0)$و همچنین دمای نهایی T_{min}، تکرارهای کل (N_{max}) و نرخ خنک کننده (α) برای شبیه سازی بازپخت تنظیم می شوند.

دمای نهایی باید به گونه‌ای تنظیم می شود که به الگوریتم اجازه می دهد به تدریج به سمت بهینه‌سازی پیش برود. اگر دما خیلی بالا باشد، الگوریتم ممکن است به طور 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 به گونه‌ای تنظیم شود که به الگوریتم اجازه دهد به اندازه کافی به جستجوی فضای راه‌حل بپردازد. تعداد کم تکرارها ممکن است منجر به عدم کشف راه‌حل‌های بهینه شود، در حالی که تعداد زیاد تکرارها می‌تواند زمان محاسباتی را افزایش دهد. معمولاً یک توازن مناسب باید برقرار شود.

نرخ خنک‌کننده باید به گونه‌ای انتخاب شود که به الگوریتم اجازه دهد به تدریج از دماهای بالا به دماهای پایین‌تر برسد. نرخ خنک‌کننده سریع ممکن است منجر به عدم پذیرش کافی راه‌حل‌های بدتر شود و در نتیجه الگوریتم به بهینه‌سازی نرسد. نرخ خنک‌کننده کند نیز ممکن است زمان محاسباتی را به شدت افزایش دهد. معمولاً نرخ خنک‌کننده بین ۰.۸ تا ۰.۹۹ انتخاب می‌شود.

در مرحله دوم، راه حل اولیه r تولید می شود و تابع تناسب به دنبال تابع هدف عملیات محاسبه می شود. در مرحله سوم، یک راه حل همسایه r' با انجام حرکات مبادله و درج روی راه حل فعلی r ایجاد می شود. در مرحله چهارم، توابع تناسب برای r و r' مقایسه می‌شوند و اگر $f(r') < f(r)$ آنگاه r' راه‌حل فعلی برای شبیه سازی بازپخت می‌شود. اگر این شرط برآورده نشد، از معادله (۲۰) برای محاسبه احتمال انتقال استفاده می شود.

$$P(r,r',T) = exp^{\frac{f(r')-f(r)}{T}} \qquad (۲۰)$$

اگر یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ کمتر از احتمال انتقال باشد، آنگاه r' به‌عنوان راه حل فعلی برای شبیه سازی بازپخت تنظیم می شود $(r = r')$، در غیر این صورت، r به عنوان راه حل فعلی باقی می ماند. پس از آن، اگر تکرار فعلی برابر با حداکثر تعداد تکرار $(n = Nmax)$باشد، دما با دمای نهایی $(T = Tmin)$ مقایسه می‌شود. اگر این شرط برآورده شود، شبیه سازی بازپخت متوقف می شود و راه حل r به عنوان راه حل فعلی برای مسئله باقی می ماند، در غیر این صورت، نرخ خنک کننده (α) در دمای جریان اولیه ضرب می شود.

یافته‌ها

در این بخش، با ملحوظ دانستن موارد تعیین شده در جدول ۲ به عنوان اندازه مجموعه های از پیش تعیین شده مسأله برنامه ریزی شده برای کنترل پارامترهای در نظر گرفته شده به صورتی که در ادامه مشخص می شود در یک مسأله در ابعاد کوچک محاسبه می شود. مسأله مذکور به ازای مقادیر مجموعه هایی که در جدول ۲ مشخص شده است؛ در نرم افزار GAMS به اجرا درآمده است.

جدول ۲- مجموعه های تعریف شده برای مسأله در ابعاد کوچک

مجموعه های تعریف شده	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 کامیون های ورودی به اسکله نوع اول	$i_1; i_2$
مجموعه کامیون های ورودی به اسکله نوع دوم	$i'_1; i'_2$
مجموعه کامیون های خروجی از اسکله نوع اول	$j_1; j_2$
مجموعه کامیون های خروجی از اسکله نوع دوم	$j'_1; j'_2$
اسکله ورودی	$m_1; m_2$
اسکله خروجی	$n_1; n_2$

در جدول ۳ کلیه پارامترهای مورد نیاز براساس توزیع های تصادفی آماری طبق اطلاعات مندرج در اسناد بایگانی شده، برای تولید عدد مورد نیاز ارائه شده است.

جدول ۳- توزیع های تصادفی تولید مقدار برای پارامترهای مسأله

پارامتر	توزیع آماری تصادفی
r_{ikt}: مقدار کالای k تخلیه شده از کامیون ورودی i در دوره t	$Uniform\ [۴۰۰;۸۰۰]$
s_{jkt}: مقدار کالای k برای بارگیری در کامیون خروجی j در دوره t	$Uniform\ [۳۰۰;۷۰۰]$
t_{mnt}: زمان انتقال از اسکله m ورودی به اسکله n خروجی در دوره t	$Uniform\ [۳۰;۶۰]$
A_{jt}: زمان رسیدن کامیون خروجی j در دوره t	$Uniform\ [۳۰;۶۰]$
t_{load}: زمان بارگذاری برای یک کالا	$Uniform\ [۶۰;۱۲۰]$
t_{unload}: زمان تخلیه برای یک کالا	$Uniform\ [۳۰;۶۰]$
GHG_{it}: میزان انتشار گازهای گلخانه ای کامیون ورودی i در دوره t	$Uniform\ [۱.۱۲۰;۲.۲۲۵]$
GHG_{jt}: میزان انتشار گازهای گلخانه ای کامیون خروجی j در دوره t	$Uniform\ [۱.۱۲۰;۲.۲۲۵]$

در اینصورت، مدت زمان انتقال جابجایی کالاها از اسکله وروی iام به اسکله خروجی jام مطابق با جدول ۴ محاسبه می شود.

جدول ۴- مقدار بهینه تابع هدف اول (دقیقه)

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

براساس نتایج محاسبه شده، مجموع زمان تخلیه و بارگیری از اسکله ورودی به اسکله خروجی است در جدول ۲ نشان داده شده است. در جدول (۵) مقدار انتقال هر نوع از کالا از ورودی اسکله به خروجی محاسبه شده است.

جدول ۵- مقدار انتقال هر نوع کالا از اسکله ورودی به اسکله خروجی (نوع اول و دوم)

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 (۶) تخصیص کالا به کامیون ورودی i جهت تخلیه در اسکله را براساس برنامه ریزی صفر و یک نشان داده است.

جدول ۶- تخصیص انتقال کالا به کامیون های ورودی جهت تخلیه در اسکله ورودی

کامیون	اسکله	
	z_1	z_2
v_1	۱.۰۰۰	۰.۰۰۰
v_2	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰

همچنین، در جدول (۷) تخصیص کالا به کامیون خروجی j جهت بارگیری در اسکله را براساس برنامه ریزی صفر و یک نشان داده است.

جدول ۷- تخصیص انتقال کالا به کامیون های خروجی جهت بارگیری در اسکله های خروجی

کامیون	اسکله	
	u_1	u_2
y_1	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰
y_2	۰.۰۰۰	۱.۰۰۰

با محاسبه مقادیر فوق الذکر مقدار تابع هدف مطابق با جدول ۸ محاسبه می شود. با توجه به اینکه مسأله چندهدفه در این مقاله، با استفاده از روش مجموع وزندار شده محاسبه شده است، مقدار بهینه تابع هدف وابسته به مقدار اوزانی است که برای توابع هدف در نظر می گیریم. از آنجایی که فرم تابع هدف در مسأله مجموع وزندار شده به صورت $w_1f_1 + w_2f_2$ می باشد و مجموع اوزان برابر با یک $(\sum w_i = 1)$ است، حالت های مختلفی می توانیم برای ضرایب در نظر گرفته شود که در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۸- بررسی مقدار تابع هدف به ازای اوزان مختلف

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

براساس نتایج بدست آمده برای تابع هدف مشاهده می شود که مقدار تابع هدف به شدت به وزن هدف اول وابسته است. با افزایش در مقدار آن مقدار تابع هدف افزایش می یابد و درمقابل هر چه وزن تابع هدف دوم بیشتر باشد مقدار تابع هدف کمتر است.

در جدول ۹، نتایج حاصل از حل دقیق مثال‌های تولید شده با نرم‌افزار GAMS با نتایج حاصل از الگوریتم شبیه سازی تبرید براساس دو معیار زمان و مقدار تابع هدف با یکدیگر مقایسه شده‌است. از آنجایی که 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 شده‌است. 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 الزاما بهینه) را ارائه کرده و اجرای برنامه اتمام می‌یابد. در جدول ۹ خلاصه نتایج مقایسه نرم‌افزار GAMS با الگوریتم شبیه سازی تبرید براساس اجرای آزمایش در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ بر مبنای مقایسه با شاخص های اصلی مدل ارائه شده‌است. بر طبق نتیجه بدست آمده، از اجرای محاسبات مشخص شده است که مدل ریاضی قابلیت بسیار مطلوبی در حل مسأله در ابعاد کوچک از خود نشان می دهد. حتی با وجود اینکه زمان محاسباتی در برخی از نمونه ها افزایش می یابد و بالطبع بعد مسأله افزایش یافته است نیز صدق می کند. زیرا گپ بین نتایج حل قطعی و مدل فرابتکاری صفر درصد گزارش شده است. اما با افزایش بیشتر در شاخص های مدل و افزایش پیچیدگی مسأله ضمن افزایش زمان محاسباتی، گپ بین نتایج نیز تا حدی که قابل قبول می باشد افزایش پیدا می کند. 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 محاسبه شده طبق مدل فراابتکاری می توانیم برای حل مسائل در ابعاد بزرگ به نتایج ارائه شده توسط آن تکیه نماییم.

جدول ۹- نتایج حل مسائل نمونه با GAMS و الگوریتم شبیه سازی تبرید

GAP (٪)	الگوریتم شبیه سازی تبرید		حل دقیق با نرم‌افزار GAMS		t	n	m	k	j	i	شماره مسئله	بعد مسأله
	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف								
۰٪	۵۷.۷	۶۸۸۰	۱۲۵	۶۸۸۰	۱	۱	۱	۲	۱	۱	PR۱	بعد کوچک
۰٪	۶۵.۳۲	۷۵۸۹	۱۴۰	۷۵۸۹	۱	۱	۲	۱	۲	۱	PR۲	
۰٪	۱۷۹.۸۲۷	۳۵۲۰	۱۳۳۰	۳۵۲۰	۲	۱	۱	۲	۲	۲	PR۳	بعد متوسط
٪۲	۲۶۳.۸	۲۹۳۲	۲۸۵۰	۳۹۶۵	۲	۲	۲	۳	۲	۲	PR۴	
٪۰.۰۲	۳۹۴.۹	۴۰۶۲	۳۳۶۰	۴۱۸۷	۳	۲	۲	۳	۲	۲	PR۵	
-	۵۶۷.۴	۵۵۶۴	-	-	۴	۳	۲	۳	۳	۳	PR۶	بعد بزرگ
-	۶۶۴.۷	۶۰۳۶	-	-	۴	۳	۳	۳	۴	۴	PR۷	

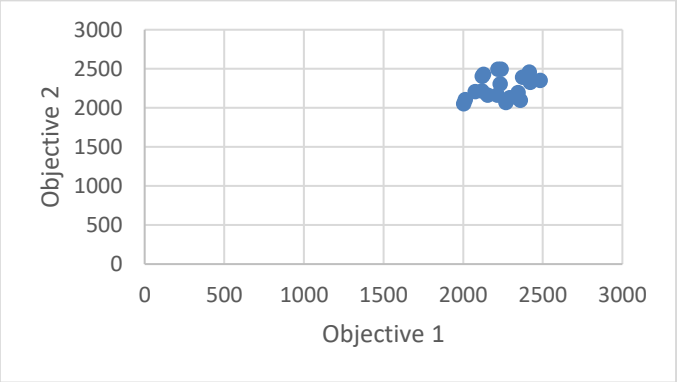
با توجه به اینکه مدل ریاضی در نمونه های بزرگ قادر به حل مسأله نیست، پس می توانیم NP-HARD بودن مدل را نیز مطابق با توصیه کورت و همکاران (۲۰۲۵) و اصغریار و همکاران (۲۰۲۵) نتیجه بگیریم.

تحلیل حساسیت

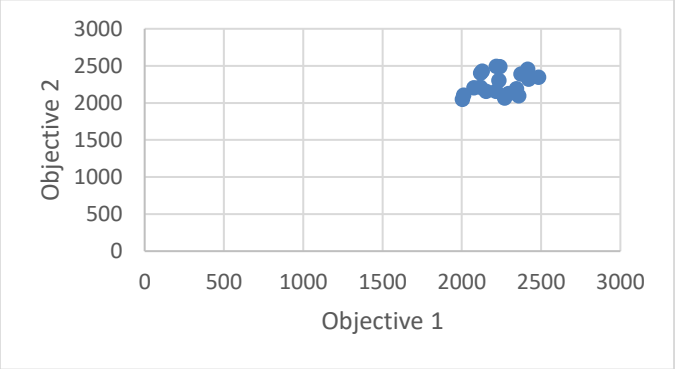
در شکل ۲ تا ۷، نقاط نامغلوب به دست آمده از روش شبیه سازی بازپخت برای مسئله چند هدفه در نظر گرفته شده به ازای افزایش افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی در مقدار کالاهای ورودی و خروجی به اسکله ها نشان داده شده است. با توجه به مرز ایجاد شده، همگرایی پاسخ ها مشهود است. در شکل ۲، جواب ها با افزایش ۱۰ درصدی نشان داده شده اند. در این مورد، ۱۵ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. همچنین در شکل ۳ جواب ها با افزایش ۲۰ درصدی نشان داده شده اند. در این مورد، ۱۹ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. علاوه بر این، در شکل ۴، جواب ها با افزایش ۳۰ درصدی نشان داده شده اند. در این مورد، ۸۶ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. کیفیت راه حل های ارائه شده در حالت افزایش تقاضا ۳۰ درصد مناسب تر از دو حالت قبلی است. زیرا، با افزایش تقاضا معمولاً تعداد گزینه‌های موجود در بازار نیز افزایش می‌یابد. این تنوع به تحلیلگران و تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که از میان گزینه‌های بیشتری، راه حل مطلوب را انتخاب کنند و به این ترتیب، احتمال پیدا کردن راه حل های مناسب تر بیشتر می‌شود. همچنین، افزایش تقاضا معمولاً به معنای رقابت بیشتر بین تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان است. این رقابت می‌تواند منجر به بهبود کیفیت محصولات و خدمات شود، زیرا شرکت‌ها تلاش می‌کنند تا با ارائه کیفیت بهتر، مشتریان بیشتری جذب کنند. بنابراین، افزایش درصد تقاضا می‌تواند به بهبود کیفیت و همگرایی جواب‌های پارتویی منجر شود، زیرا مدیران و تحلیلگران به دنبال پاسخگویی بهتر به نیازهای بازار و مشتریان هستند.

شکل های ۵، ۶ و ۷ راه حل های نامغلوب را برای کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نشان می دهند. با توجه به هر یک از کاهش های در نظر گرفته شده، تعداد راه حل های نامغلوب برابر با ۲۴، ۲۷ و ۳۵ است که در این حالت، راه حل های به دست آمده دارای همگرایی قابل قبولی هستند. وقتی درصد تقاضا کاهش می‌یابد، ممکن است تعداد تأمین‌کنندگان و گزینه‌های موجود در بازار نیز کاهش یابد. این کاهش

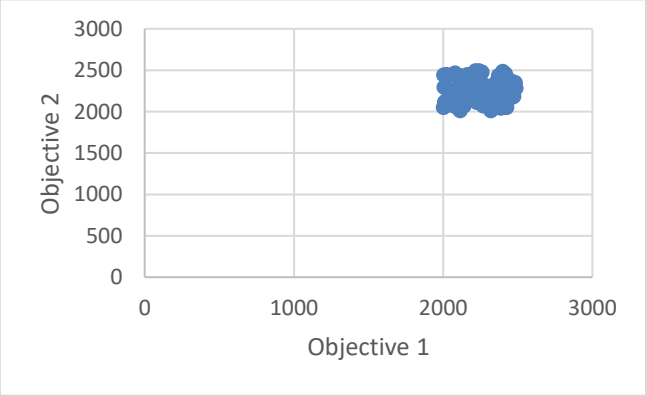
رقابت می‌تواند به شرکت‌ها این امکان را بدهد که بر روی کیفیت محصولات و خدمات خود تمرکز بیشتری داشته باشند، زیرا نیازی به جلب مشتریان از طریق قیمت‌گذاری پایین‌تر ندارند. با کاهش تقاضا، شرکت‌ها ممکن است به بررسی دقیق‌تر نیازهای خاص مشتریان بپردازند و محصولات و خدمات خود را براساس این نیازها بهینه کنند. این تمرکز می‌تواند منجر به افزایش کیفیت و همگرایی جواب‌ها شود. بنابراین، کاهش درصد تقاضا نیز می‌تواند به بهبود کیفیت و همگرایی جواب‌های پارتویی منجر شود، زیرا مدیران و تحلیلگران می‌توانند با تمرکز بیشتر بر روی کیفیت و نیازهای خاص مشتریان، به نتایج بهتری دست یابند.



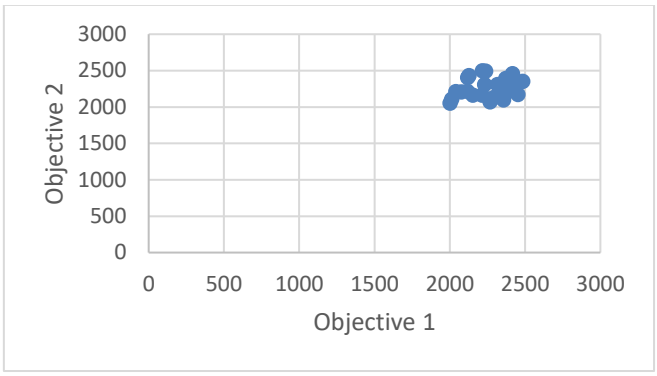
شکل ۲- نقاط نامغلوب برای افزایش ۱۰ درصدی در انتقال کالاهای ورودی و خروجی



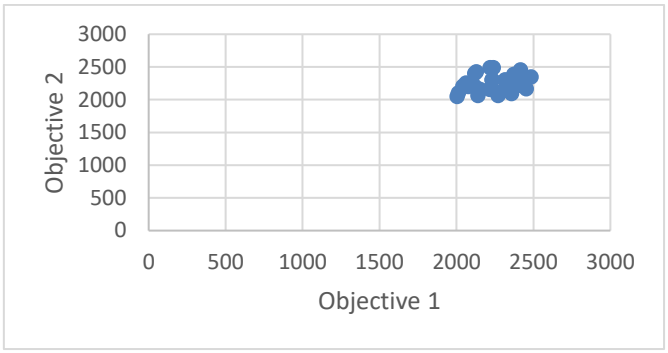
شکل ۳- نقاط نامغلوب برای افزایش ۲۰ درصدی در انتقال کالاهای ورودی و خروجی



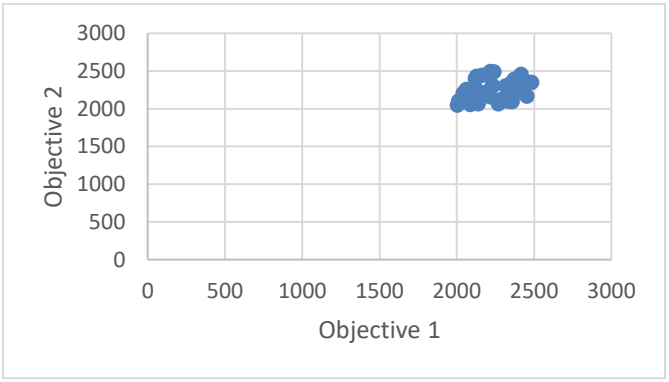
شکل ۴- نقاط نامغلوب برای افزایش ۳۰ درصدی در انتقال کالاهای ورودی و خروجی



شکل ۵- نقاط نامغلوب برای کاهش ۱۰ درصدی در انتقال کالاهای ورودی و خروجی



شکل ۶- نقاط نامغلوب برای کاهش ۲۰ درصدی در انتقال کالاهای ورودی و خروجی



شکل ۷- نقاط نامغلوب برای کاهش ۳۰ درصدی در انتقال کالاهای ورودی و خروجی

نتیجه‌گیری

مدلسازی ریاضی حمل و نقل محصولات در زنجیره تأمین انبار متقاطع در صنایع فولاد مبارکه اصفهان، به عنوان یک ابزار مؤثر در بهینه‌سازی فرآیندهای لجستیکی و کاهش هزینه‌ها، نتایج قابل توجهی 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 توسعه یافته یک مدل چندهدفه و چنددوره ای است که قادر است اهداف متضاد را در دوره های مختلف مورد بررسی قرار دهد. علاوه بر این، الزامات زیست محیطی ناشی از انتشار گاز کربن در تصمیم گیری 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 شبیه سازی بازپخت استفاده شده است. بر طبق نتایج حاصل شده نشان داده شده است که با پیاده‌سازی مدل طراحی شده، استفاده از انبارهای متقاطع به عنوان نقاط کلیدی در زنجیره تأمین، به بهبود جریان مواد و کاهش زمان تحویل محصولات کمک

می‌کند. علاوه بر این، نقاط نامغلوب به دست آمده از روش شبیه سازی بازپخت برای مسئله چند هدفه در نظر گرفته شده به ازای افزایش افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی در مقدار کالاهای ورودی و خروجی به اسکله ها بررسی شده است. با توجه به مرز ایجاد شده، همگرایی پاسخ ها به ازای هر تغییر مشهود است. جواب ها با افزایش ۱۰ درصدی، ۱۵ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. با افزایش ۲۰ درصدی، ۱۹ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. با افزایش ۳۰ درصدی، ۸۶ راه حل نامغلوب برای مسأله ایجاد شده است. علاوه بر این، کیفیت راه حل های ارائه شده در حالت افزایش تقاضا ۳۰ درصد مناسب تر از دو حالت دیگر تشخیص داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این مدل نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی تجهیزات حمل و نقل، کاهش زمان‌های انتظار و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت انبارها، امکان کاهش هزینه‌های لجستیکی به میزان قابل توجهی فراهم می‌شود. همچنین، این مدل به مدیران این امکان را می‌دهد که تصمیمات بهتری در زمینه تخصیص منابع و برنامه‌ریزی حمل و نقل اتخاذ کنند، که در نهایت منجر به افزایش کارایی زنجیره تأمین خواهد شد. علاوه بر این، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از انبارهای متقاطع می‌تواند به عنوان 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 به عنوان یک عامل کلیدی در حفظ مزیت رقابتی و افزایش سهم بازار به شمار می‌رود.

در این مقاله برخلاف سایر تحقیقات پیشین مانند تربالی و همکاران (۲۰۲۳)؛ فقیه و همکاران (۲۰۲۳) و امانی و نصیری (۲۰۲۳) از یک مدل ریاضی چندهدفه استفاده شده است که تابع هدف اول زمان اجرای عملیات و تابع دوم انتشار گازهای گلخانه ای را کنترل می کند. علاوه بر این، مدل ریاضی ارائه شده هم بصورت قطعی و هم بصورت فراابتکاری حل شده است که در تحقیقات ذکر شده تنها از یک روش بهره برده شده است. علاوه بر این تحقیق مانند مطالعات جدید مودیکا و همکاران (۲۰۲۴)؛ رجب زاده و همکاران (۲۰۲۴) و حق گویی و همکاران (۲۰۲۴) یک مدل متقاطع برای زنجیره تأمین ارائه داده است که راه جدیدی در مدلسازی مدیریت زنجیره تأمین مطرح شده است. اما مزیت استفاده از مدل پیشنهاد شده در لحاظ کردن تنوع در میان محصولات و وسایل نقلیه می باشد که در مطالعات ذکر شده بر خلاف مطالعه حاضر از یک نوع محصول در طول جریان زنجیره استفاده شده است اما در این مطالعه انواع مختلفی از محصولات در نظر گرفته شده است. بنابراین، این تحقیق می‌تواند به عنوان یک پایه و اساس برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی زنجیره تأمین و حمل و نقل در صنایع مشابه مورد استفاده قرار گیرد و به توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر و کارآمدتر در این حوزه کمک کند. با توجه به اهمیت روزافزون بهینه‌سازی زنجیره تأمین در صنایع مختلف، نتایج این تحقیق می‌تواند راهگشای مدیران و تصمیم‌گیرندگان در راستای بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری در صنعت فولاد مبارکه اصفهان باشد. بررسی تأثیر فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی بر بهینه‌سازی زنجیره تأمین و حمل و نقل می‌تواند به عنوان یک موضوع تحقیقاتی جذاب باشد. این فناوری‌ها می‌توانند به بهبود ردیابی و مدیریت موجودی کمک کنند. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی ریاضی، دسترسی به داده‌های دقیق و معتبر است. در بسیاری از موارد، داده‌های مربوط به تقاضا، هزینه‌ها و زمان‌های تحویل ممکن است ناقص یا غیرقابل اعتماد باشند. الگوریتم‌های فراابتکاری معمولاً نیاز به محاسبات سنگینی دارند که می‌تواند زمان‌بر باشد و در برخی موارد، به منابع محاسباتی بیشتری نیاز داشته باشد. این محدودیت‌ها می‌توانند به عنوان چالش‌هایی در مسیر تحقیق و توسعه مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه‌سازی مدیریت انبار متقاطع در زنجیره تأمین با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در نظر گرفته شوند. بنابراین، برای غلبه بر این محدودیت ها توسعه مدل های استوار به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در برخی از پارامترهای مدل ارائه شده و همچنین استفاده از روش های یادگیری ماشین جهت غلبه بر زمانبر شدن محاسبات می تواند در تکمیل مطالعات آتی کمک نماید.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازین اخلاقی

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

شفافیت داده‌ها

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

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

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.

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.

Babazadeh Rafiei, A., Sohrabi, T., Motamedi, M. and 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.

Chen, H. Y., & Xu, L. (2021, October). Research on Price Stickiness of Consumer Goods Based on Real-Time Social Information Flow. In *International Conference on Advanced Hybrid Information Processing* (pp. 242-253). Cham: Springer International Publishing.

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*, 1-32.

Darvish Motevali, M. H. and 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.

Essghaier, F., Chargui, T., Hsu, T., Bekrar, A., Allaoui, H., Trentesaux, D., & Goncalves, G. (2023). Fuzzy multi-objective truck scheduling in multi-modal rail–road Physical Internet hubs. *Computers & Industrial Engineering*, *182*, 109404.

Faghih-Mohammadi, F., Nasiri, M. M., & Konur, D. (2023). Cross-dock facility for disaster relief operations. *Annals of Operations Research*, *322*(1), 497-538.

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.

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. *Engineering Management and Soft Computing*, *10*(1), 190-212.

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.

Mousavi, S. M., Motamedi, M. and 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.

Nogueira, T. H., Coutinho, F. P., Peixoto, M. G. M., Carrano, E. G., & Ravetti, M. G. (2024). AI-Powered Evolutionary Algorithm for Optimizing Truck Scheduling in Multi-Dock Truck Cross-Docking Centers.

Poornaser M, Amoozadkhalili H, momeni E, Movahedi M M, Motamedi M. (2022). Routing disaster relief vehicles in a humanitarian supply chain. Disaster Prev. *Manag. Know*. 12 (2) , 205-216.

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.

Rajabzadeh, M., Mousavi, S. M., & Azimi, F. (2024). A new gray optimization model for disposing or re-commercializing unsold goods in reverse logistics networks with a cross-docking center. *Kybernetes*.

Sutikno, T. (2021). Published Articles by Master Program Lecturers in Electrical Engineering at Ahmad Dahlan University in the Academic Year. *Framework*, *183* (40), 14-21.

Torbali, B., & Alpan, G. (2023). A literature review on robust and real-time models for cross-docking. *International Journal of Production Research*, *61*(7), 2372-2401.

Widiyanto, W. W. (2024). MAN Network Optimization through EIGRP Dynamic Routing and DUAL Algorithm: A Study Using Cisco Packet Tracer. *Jurnal Inovasi Teknologi dan Rekayasa ISSN*, *9*(2), 336-344.

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.

Niavand, M., Adibi, M. A., & Pourghader Chobar, A. (2024). Selection of green supplier by multi-moora combination method and two-stage clustering. *Engineering Management and Soft Computing*, *10*(1), 14-49. doi: 10.22091/jemsc.2024.10977.1181

Fathi Hafshejani, K., Bagheri Sorkhi, M., & Modiri, M. (2023). Integrated hybrid model of sustainable supply chain in cement industry. *Engineering Management and Soft Computing*, *9*(1), 1-18. doi: 10.22091/JEMSC.2021.6422.1144

sazegari, S., davoodi, S. M., & goli, A. (2024). Designing a green supply chain pricing model with a multi-criteria decision-making approach and game theory (case study: home appliance industry). *Engineering Management and Soft Computing*, *10*(1), 92-122. doi: 10.22091/jemsc.2024.11144.1191

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.

Kurt, A., & Gumus, M. (2025). Dynamic Freight Planning with Hybrid Cross-Docking under Carbon Tax and Bounded Storage Age. Transportation Research Record, 03611981251318338.