

Designing A Perishable Product Supply Chain Network with Cross-Docking and Dynamic Pricing

Amir Mola Yousefi

Department of Industrial Management, NT.C.,
Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Vahid Baradaran*

Department of Industrial Engineering, NT.C.,
Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Kaveh Khalili-Damghani

Department of Industrial Engineering, ST.C.,
Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

The management of perishable product supply chains requires rapid distribution and flexible pricing to reduce waste and maintain profitability. Cross-docking networks with a zero-inventory approach provide an effective response to this need. The present study aims to design a multi-objective mixed-integer linear programming (MILP) model for a three-level perishable product supply chain network, considering cross-docking operations, freshness-dependent dynamic pricing, and a bulk-purchase discount policy. This research is based on mathematical modeling, and for validation, sample problems of different sizes were randomly generated. The model was solved and analyzed using the exact augmented epsilon-constraint (AUGMECON) method for small-scale problems and the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) and Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) metaheuristic algorithms, with parameter tuning using the Taguchi method, for large-scale problems. Their performance was evaluated and ranked using the TOPSIS multi-criteria decision-making method. The findings indicate a significant trade-off between total profit maximization and operational risk minimization (including fleet breakdown and product spoilage risks), evaluated via measurable and interpretable metrics. While MOPSO exhibits superior performance regarding absolute objective values (higher profit, lower risk) and computational efficiency, NSGA-II provides better diversity

* Corresponding Author: v_baradaran@iaui.ac.ir
How to Cite: xxxxxxxx

and a wider Pareto front. Consequently, TOPSIS ranks NSGA-II higher due to its comprehensive solution-space coverage, highlighting the distinct suitability of each algorithm for operational versus strategic decision-making.

Keywords: Perishable products supply chain, Cross-docking, Dynamic pricing, Multi-objective optimization, Operational risk, Meta-heuristic algorithms.

Introduction

Efficient management of perishable supply chains represents a formidable challenge in operations research due to inherent constraints such as strict shelf-life limitations, progressive quality degradation, and delivery delays, which frequently precipitate substantial spoilage rates and financial losses. Consequently, the adoption of zero-inventory cross-docking strategies, synchronized with freshness-dependent dynamic pricing and volume-based discount schemes, offers an integrated framework to balance profitability against product integrity. Despite substantial existing literature, the simultaneous integration of cross-docking routing, dynamic pricing, and purchasing policies—while accounting for stochastic operational risks, such as fleet breakdowns and spoilage consequences—remains under-researched within three-echelon networks. This study addresses these critical gaps by developing a comprehensive multi-objective mixed-integer linear programming (MOMILP) model designed to optimize material flow, heterogeneous fleet scheduling, and economic performance. By synthesizing these complex logistical components, this research provides a robust analytical foundation for decision-makers navigating the intricate trade-offs between supply chain responsiveness, sustainability, and fiscal viability.

Methodology

This study employs a Multi-Objective Mixed-Integer Linear Programming (MOMILP) framework for a three-echelon supply chain consisting of suppliers, a central cross-docking facility, and customers over a defined discrete multi-period planning horizon. The model balances two conflicting objective functions. The first objective maximizes total net profit, derived from revenue streams generated by dynamic pricing linked to product freshness, while deducting

procurement costs—factoring in volume-based cumulative step discounts across the planning horizon—as well as transportation, handling, spoilage, shortage penalties, and soft time-window violations. The second objective minimizes total operational risk, modeled as a weighted composite function representing the aggregate risk of spoilage and route-related uncertainties in inbound and outbound transport. Assumptions include deterministic demand with lost sales allowed and fixed shelf-life decay dynamics, where products are systematically categorized into ABC sensitivity classes (e.g., highly perishable Class A, moderate Class B, and low-decay Class C) governed by distinct deterioration weight coefficients. The operational flow coordinates cross-dock door assignments and vehicle routing under strict physical loading capacity constraints of a heterogeneous fleet for both inbound and outbound vehicles, alongside time-sensitive penalty-based soft time windows. Given the NP-hard complexity of this integrated problem, a two-tier solution methodology was established: small-scale problems were validated using the Augmented ϵ -Constraint (AUGMECON) method in GAMS/CPLEX to ensure structural model integrity. For medium-to-large-scale instances, two meta-heuristic algorithms—Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) and Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)—were utilized. NSGA-II applied Simulated Binary Crossover (SBX) and polynomial mutation, while MOPSO implemented an external archive for non-dominated solutions. Algorithmic parameters were calibrated using the Taguchi Design of Experiments (DOE) via Signal-to-Noise (S/N) ratios and Modified Overall Response (MOR) metrics. The comparative quality was assessed using standard multi-objective metrics (NPF, MID, SM, DM) and ranked via TOPSIS.

Findings

Computational experiments reveal that the proposed model effectively navigates the inherent trade-off between maximizing economic returns and curtailing logistics risks. In small problem sizes, the meta-heuristics verified high reliability against AUGMECON, exhibiting an optimality gap of under 8%. In medium- and large-scale scenarios, the algorithms displayed marked behavioral divergences. MOPSO consistently established superior economic returns by generating higher net profit margins and lower operational risks, while operating with significantly faster CPU execution runtimes (converging roughly 60% faster than

NSGA-II). Conversely, NSGA-II exhibited distinct superiority in global search exploration and solution diversity, yielding significantly broader Pareto fronts (elevated NPF and DM values) which provide management with a richer spectrum of balanced trade-off options. The TOPSIS evaluation validated that MOPSO ranks highest for high-frequency operational execution due to its swift convergence and economic returns, whereas NSGA-II remains the preferred tool for exploratory strategic assessments. Sensitivity analysis confirmed that shorter shelf-life horizons trigger steep dynamic price depreciation and exponential risk spikes, making rapid cross-dock throughput imperative. Expanding the product variety portfolio yielded a more substantial positive marginal profit effect than expanding single-product volumes. Furthermore, strict purchase discount thresholds effectively prevent inventory obsolescence and preserve supply chain profitability.

Discussion and Conclusion

This research contributes a comprehensive modeling architecture unifying lean logistics and revenue management. The findings establish that harmonizing cross-dock operations with quality-based dynamic pricing decreases perishable waste by 20% to 30% while securing sustainable profitability. The framework bridges strategic volume procurement with tactical door-docking and fleet scheduling, demonstrating how ignoring operational transit and deterioration risks during bulk purchasing can negate discount advantages.

Managerial implications:

First, at the operational dispatch level, distribution managers are strongly advised to implement MOPSO-based scheduling engines, capitalizing directly on its rapid algorithmic solving speed and proven economic profitability in real-time door assignments and dispatching. Second, at the strategic level, procurement executives and supply chain planners should leverage NSGA-II's extensive Pareto frontiers as a Decision Support System (DSS) to evaluate trade-offs between bulk purchasing discounts and spoilage risks. Future research directions include addressing stochastic demand fluctuations using Distributionally Robust Optimization (DRO) and incorporating fleet greenhouse gas emissions to extend the framework toward sustainable green supply chain standards.

طراحی شبکه زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی با انبارش مقاطع و قیمت گذاری پویا


 امیر ملایوسفی

گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.


 وحید برادران*

گروه مهندسی صنایع، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.


 کاوه خلیلی دامغانی

گروه مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

مدیریت زنجیره تأمین محصولات فاسدپذیر نیازمند توزیع سریع و قیمت گذاری منعطف به منظور کاهش ضایعات و حفظ سودآوری است که شبکه‌های انبار مقاطع با رویکرد موجودی صفر پاسخ مناسبی به این نیاز محسوب می‌شوند. پژوهش حاضر با هدف طراحی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای شبکه زنجیره تأمین سه سطحی محصولات فاسدپذیر با در نظر گرفتن عملیات انبار مقاطع، قیمت گذاری پویا مبتنی بر تازگی محصول و سیاست تخفیف خرید عمده انجام شده است. این پژوهش از نوع مدل‌سازی ریاضی است که برای اعتبارسنجی آن، مسائل نمونه در ابعاد مختلف به صورت تصادفی تولید شده است. حل مدل و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش دقیق محدودیت اپسیلون تقویت شده برای ابعاد کوچک و الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه با تنظیم پارامتر به روش تاگوچی برای ابعاد بزرگ انجام شده و عملکرد آن‌ها توسط روش تصمیم‌گیری چندشاخصه ارزیابی و رتبه‌بندی شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که میان اهداف پیشینه‌سازی سود کل و کمینه‌سازی ریسک‌های عملیاتی (شامل ریسک خرابی ناوگان و ریسک فساد محصول) تضاد معناداری وجود دارد و نتایج بر اساس معیارهای قابل اندازه‌گیری و قابل تفسیر گزارش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند MOPSO در دستیابی به سود بیشتر، ریسک عملیاتی کمتر و زمان محاسباتی کوتاه‌تر عملکرد بهتری دارد؛ در مقابل، NSGA-II جبهه پارتوی گسترده‌تر و جواب‌های غیرمغلوب بیشتری تولید می‌کند. با توجه به اینکه TOPSIS معیارهای عملکرد و تنوع جواب‌ها را ارزیابی می‌کند، NSGA-II به دلیل پوشش بهتر فضای

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال است.

* نویسنده مسئول: v_baradaran@iaui.ac.ir

جواب‌ها و تنوع بیشتر، رتبه بالاتری می‌گیرد؛ بنابراین، هر کدام برای تصمیم‌گیری راهبردی و عملیاتی مناسب‌تر هستند.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی، انبار متقاطع، قیمت‌گذاری پویا، بهینه‌سازی چندهدفه، ریسک عملیاتی، الگوریتم‌های فراابتکاری

آماده انتشار

مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی^۱ به دلیل حساسیت این محصولات به زمان، شرایط نگهداری و حمل و نقل، از چالش‌های مهم در حوزه مدیریت عملیات و لجستیک محسوب می‌شود (Javanmardan et al., 2026). در چنین زنجیره‌هایی، تأخیر در جابه‌جایی کالا می‌تواند موجب کاهش کیفیت محصول، افزایش ضایعات و کاهش سودآوری شود (Javdan et al., 2026). در این میان، استفاده از انبار متقاطع^۲ به عنوان یکی از رویکردهای کارآمد در سیستم‌های توزیع مطرح شده که با حذف یا کاهش ذخیره‌سازی میان‌مدت کالاها، زمان انتقال و هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و سرعت جریان محصولات در شبکه را افزایش می‌دهد (برادران و صفری، ۱۳۹۸؛ Zareian Beinabadi, 2024).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های مختلفی به بررسی مسائل طراحی و بهینه‌سازی زنجیره‌های تأمین محصولات فاسدشدنی پرداخته‌اند. برخی مطالعات بر طراحی شبکه و تصمیمات مکان‌یابی تمرکز داشته‌اند (ابراهیمی و همکاران، ۱۴۰۲)، در حالی که برخی دیگر مسئله مسیریابی وسایل نقلیه^۳ و عملیات توزیع را مورد بررسی قرار داده‌اند (علی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۱؛ Mola Yousefi et al., 2026). همچنین در برخی تحقیقات، عملکرد و پایداری زنجیره‌های تأمین محصولات فاسدشدنی ارزیابی شده است (مرزبان و همکاران، ۱۴۰۲). علاوه بر این، نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از سیاست‌هایی مانند قیمت‌گذاری پویا مبتنی بر تازگی محصول و تخفیف‌های خرید حجمی می‌تواند در مدیریت تقاضا و افزایش سودآوری شبکه مؤثر باشد (Chernonog, 2020).

با وجود پیشرفت‌های حاصل در ادبیات موضوع، بسیاری از مطالعات تنها بخشی از تصمیمات زنجیره تأمین را بررسی کرده‌اند و کمتر به ادغام همزمان تصمیمات لجستیکی و اقتصادی در یک چارچوب یکپارچه پرداخته‌اند. به‌ویژه، ترکیب ساختار انبار متقاطع با مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، قیمت‌گذاری مبتنی بر تازگی و سیاست‌های تخفیف خرید در مدل‌های ارائه‌شده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، توسعه مدل‌هایی که بتوانند

¹ Perishable Products

² Cross-Docking

³ Vehicle Routing Problem

این تصمیمات را به صورت یکپارچه در زنجیره‌های تأمین محصولات فاسدشدنی در نظر بگیرند، ضروری به نظر می‌رسد.

در همین راستا، هدف اصلی در پژوهش حاضر ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه قطعی برای طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی در ساختار سه‌سطحی شامل تأمین‌کنندگان، انبارهای متقاطع و مشتریان است. در مدل پیشنهادی، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل در محیط انبار متقاطع بررسی شده و دو هدف بیشینه‌سازی سود کل شبکه و کمینه‌سازی ریسک عملیاتی دنبال می‌شود. همچنین در مدل ارائه شده، ویژگی‌هایی نظیر قیمت‌گذاری پویا مبتنی بر تازگی محصول، سیاست تخفیف خرید حجمی تجمعی، ناوگان ناهمگن، پنجره‌های زمانی نرم، طبقه‌بندی ABC و کمبود همراه با جریمه لحاظ شده‌اند تا چارچوبی واقع‌گرایانه برای تحلیل همزمان تصمیمات عملیاتی و اقتصادی در زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی فراهم شود.

نوآوری‌ها و سهم مشارکت این پژوهش در سه محور اصلی ارائه می‌شود:

۱. مدل‌سازی یکپارچه: برخلاف پژوهش‌های پیشین که اغلب تصمیمات لجستیکی و اقتصادی را از هم جدا می‌بینند، این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) چندهدفه را ارائه می‌دهد که به شکلی نوآورانه، طراحی شبکه انبار متقاطع (Cross-docking) را با قیمت‌گذاری پویای وابسته به تازگی و تخفیف‌های حجمی تجمعی برای محصولات فاسدشدنی ادغام می‌کند. این یکپارچگی امکان تحلیل دقیق‌تر تعاملات بین کارایی عملیاتی و سودآوری زنجیره تأمین را فراهم می‌سازد.

۲. مدیریت ریسک مستحکم: ما ریسک‌های عملیاتی (به‌ویژه خرابی ناوگان و فساد محصول) را مستقیماً در تابع هدف گنجانده‌ایم. با در نظر گرفتن ریسک به عنوان یک معیار تصمیم‌گیری کلیدی، این مدل چارچوبی مستحکم برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌کند تا بتوانند بین بیشینه‌سازی سود و کاهش ریسک در بازارهای پرنوسان محصولات فاسدشدنی، تعادل برقرار کنند.

۳. چارچوب روش شناختی مقایسه‌ای: برای حل نمونه‌های پیچیده و بزرگ این مسئله، این مطالعه یک تحلیل عملکردی دقیق از دو الگوریتم فراابتکاری برجسته (NSGA-II و MOPSO) ارائه می‌دهد. علاوه بر این، از روش تصمیم‌گیری TOPSIS برای محک زدن

عملکرد این الگوریتم‌ها استفاده شده تا به متخصصان راهنمایی روشن در مورد انتخاب بهترین روش براساس شرایط عملیاتی ارائه دهد.

ساختار ادامه مقاله به این صورت است: در بخش بعدی، مطالعات پیشین مرتبط با زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی، انبار متقاطع، قیمت‌گذاری و مدیریت ریسک بررسی می‌شوند. سپس، فرضیات، نمادها و مدل ریاضی چندهدفه پیشنهادی ارائه می‌گردند. در ادامه به تشریح روش‌های حل و الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOPSO اختصاص دارد. پس از آن نتایج محاسباتی، تحلیل عملکرد الگوریتم‌ها و رتبه‌بندی راه‌حل‌ها با استفاده از روش TOPSIS ارائه و بررسی می‌شود. در نهایت، به نتیجه‌گیری، بیان محدودیت‌های پژوهش و ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده اختصاص دارد.

پیشینه پژوهش

مرور ادبیات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع و یکپارچه‌سازی تصمیمات لجستیکی از موضوعات اصلی در پژوهش‌های مدیریت زنجیره تأمین بوده است. در سال‌های اخیر، با افزایش نیاز به تحویل سریع و کاهش سطح موجودی، انبار متقاطع به عنوان جایگزینی برای انبارداری سنتی مورد توجه قرار گرفته است (Baradaran and Akhavan, 2019). در این سیستم، هماهنگی عملیات ورود، تجمع و ارسال کالا نقش مهمی در کارایی شبکه دارد و پژوهش‌های مختلف به مسیریابی و زمان‌بندی کامیون‌های ورودی و خروجی در این محیط پرداخته‌اند (Zareian Beinabadi et al., 2026). در زنجیره‌های تأمین محصولات فاسدشدنی نیز زمان‌بندی و مسیریابی از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا تأخیر در انتقال کالا می‌تواند موجب کاهش کیفیت و افزایش ضایعات شود (Theophilus et al., 2021). در حوزه طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های فاسدشدنی، مطالعات متعددی به بررسی ساختارهای چندسطحی زنجیره تأمین پرداخته‌اند. برای مثال، ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۲) یک مدل چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین چهارسطحی محصولات فاسدشدنی ارائه کردند که تصمیمات مکان‌یابی، ظرفیت و حمل‌ونقل را به صورت یکپارچه بررسی می‌کند. مرزبان و همکاران (۱۴۰۲) نیز با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای، عملکرد پایدار زنجیره‌های تأمین فاسدشدنی را ارزیابی کرده‌اند. در سطح عملیاتی، علی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۱) مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با برداشت و تحویل همزمان و پنجره‌های زمانی را مدل‌سازی کرده‌اند.

نیک‌ضمیر و همکاران (۱۴۰۰) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین پسماندهای بیمارستانی که عمر آنها محدود و فسادپذیر است، ارائه کردند. حاجی‌زاده ابراهیمی و مهتدی (۱۴۰۳) مسئله مسیریابی-موجودی محصولات فاسدشدنی را در یک زنجیره تامین حلقه‌بسته بررسی کردند. این پژوهش با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی، تلاش کرده است تصمیمات مربوط به مسیریابی وسایل نقلیه، کنترل موجودی و فسادپذیری کالا را به صورت هم‌زمان در نظر بگیرد. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده شده است. با وجود اهمیت این پژوهش در ترکیب مسیریابی، موجودی و فسادپذیری، ساختار انبار متقاطع، قیمت‌گذاری پویا، تخفیف خرید و مدیریت صریح ریسک فساد در آن لحاظ نشده است.

مرتضوی‌نیا و کرباسی (۱۴۰۴) با تمرکز بر زنجیره تامین محصولات کشاورزی فسادپذیر، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه کردند که سه هدف حداکثرسازی سود، کاهش ضایعات و افزایش تازگی محصولات را به صورت هم‌زمان دنبال می‌کند. این پژوهش با استفاده از برنامه‌ریزی لکزیکوگرافیک و روش محدودیت اسیلون حل شده و بر اساس داده‌های میدانی محصولات کشاورزی مانند گوجه‌فرنگی، خیار، بادمجان، کاهو و گل‌کلم اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان داد که برنامه‌های تامین مالی هدفمند می‌توانند موجب بهبود سودآوری و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از ضایعات شوند. با وجود توجه به سودآوری، تازگی و ضایعات، این پژوهش ساختار انبار متقاطع، مسیریابی وسایل نقلیه، قیمت‌گذاری پویا و تخفیف خرید را به صورت یکپارچه بررسی نکرده است.

پاکزاد و همکاران (۱۴۰۴) مسئله مکان‌یابی-مسیریابی وسایل نقلیه را در یک زنجیره تامین سه‌سطحی شامل تامین‌کنندگان، انبارهای متقاطع و مشتریان بررسی کردند. در این پژوهش، کالاهای فسادپذیر، عدم قطعیت و فناوری RFID برای کنترل دما و زمان ماندگاری محصولات در نظر گرفته شده است. مدل ارائه‌شده از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه بوده و اهداف آن شامل کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل، مکان‌یابی و مسیریابی و همچنین حداقل‌سازی زمان تحویل است. نتایج نشان دادند که هرچند به کارگیری RFID در مدل قطعی باعث کاهش زمان تحویل می‌شود، در مدل استوار می‌تواند هزینه و زمان را افزایش دهد. این پژوهش از نظر ترکیب انبار متقاطع، محصولات

فسادپذیر و عدم قطعیت بسیار نزدیک به موضوع رساله حاضر است، اما تصمیماتی مانند قیمت گذاری پویا و سیاست تخفیف خرید را پوشش نمی دهد.

در مطالعات مرتبط با سایر ابعاد شبکه های تأمین و توزیع نیز، صالحی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی قابلیت اطمینان در یک شبکه چندسطحی پرداخته اند، اما تصمیمات مربوط به محصولات فسادپذیر، انبار متقاطع و قیمت گذاری در مدل آنان لحاظ نشده است. در مطالعات Monteiro et al. (2023) مدلی قطعی برای زنجیره تأمین مواد غذایی ارائه کردند، اما ساختار انبار متقاطع و تصمیمات مسیریابی و قیمت گذاری را به صورت یکپارچه در نظر نگرفتند. Zhuang et al. (2023) شبکه توزیع محصولات فسادپذیر و تصمیمات مسیریابی را با استفاده از یک مدل MILP قطعی بررسی کردند، ولی به ساختار انبار متقاطع و سیاست های اقتصادی مانند قیمت گذاری پویا و تخفیف خرید نپرداختند. Liu et al. (2024) نیز یک مدل بهینه سازی قطعی برای زنجیره تأمین چندسطحی ارائه کردند که توجه محدودی به ریسک و تصمیمات عملیاتی داشت. Taheri and Taft (2024) با تمرکز بر شبکه توزیع فسادپذیر، ساختار انبار متقاطع و مسیریابی وسایل نقلیه را بررسی کردند، اما قیمت گذاری پویا و سیاست تخفیف خرید در مدل آن ها لحاظ نشده است. همچنین، Toniolo et al. (2024) یک سیستم توزیع مبتنی بر انبار متقاطع را با استفاده از مدل MILP و روش های فراابتکاری مطالعه کردند، اما محصولات فسادپذیر و تصمیمات قیمت گذاری و تخفیف را در نظر نگرفتند. Wang et al. (2026) مدلی برای شبکه لجستیک محصولات فسادپذیر با توجه به ریسک ارائه کردند، با این حال، سطح یکپارچه سازی تصمیمات اقتصادی در آن محدود است. Mola Yousefi et al. (2026) نیز در زنجیره تأمین چندسطحی محصولات لبنی، قیمت گذاری و تخفیف خرید را در قالب یک مدل چندهدفه و با استفاده از روش های فراابتکاری بررسی کردند، اما ساختار انبار متقاطع و مدیریت صریح ریسک فساد را به صورت همزمان در مدل خود لحاظ نکردند.

با وجود این پیشرفت ها، بسیاری از پژوهش ها تنها بر بخشی از تصمیمات زنجیره تأمین تمرکز داشته اند و کمتر به بررسی همزمان تصمیمات لجستیکی و اقتصادی پرداخته اند. به ویژه، ترکیب ساختار انبار متقاطع با مسیریابی وسایل نقلیه، سیاست های قیمت گذاری مبتنی بر تازگی و سازوکارهای تخفیف تأمین در قالب یک مدل یکپارچه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، مطالعات اخیر بر اهمیت در نظر گیری همزمان ابعاد هزینه، درآمد

و ریسک در تحلیل زنجیره‌های فاسدشدنی تأکید دارند (Theyel & Tucci, 2024; Koussis & Silaghi, 2023; Javdan et al., 2026).

بررسی نظام‌مند ادبیات نشان می‌دهد که مؤلفه‌هایی نظیر طراحی شبکه‌های فاسدشدنی چندسطحی، مسیریابی در محیط انبار متقاطع، تصمیمات قیمت‌گذاری و سازوکارهای هماهنگی درآمدی عمدتاً به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این حال، مدلی یکپارچه که این تصمیمات را به طور همزمان در چارچوب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) قطعی با اهداف سود و ریسک ترکیب کند، در ادبیات کمتر مشاهده می‌شود. پژوهش حاضر درصدد است این شکاف پژوهشی را پوشش دهد و چارچوبی یکپارچه برای تحلیل همزمان این تصمیمات در زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی ارائه کند.

برای شفاف‌سازی جایگاه پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات پیشین، جدول (۱) به مقایسه مهم‌ترین ویژگی‌های مدل‌های ارائه‌شده در ادبیات با مدل پیشنهادی این پژوهش می‌پردازد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر یک از مطالعات پیشین تنها بخشی از مؤلفه‌های کلیدی شامل ساختار انبار متقاطع، مسیریابی، قیمت‌گذاری پویا، سیاست‌های تخفیف و مدیریت صریح ریسک فساد را در نظر گرفته‌اند، در حالی که پژوهش حاضر این مؤلفه‌ها را به صورت یکپارچه در قالب یک مدل MILP دوهدفه (سود-ریسک) ترکیب کرده است.

جدول ۱. مقایسه مطالعات پیشین و پژوهش حاضر

نوع مدل / روش حل	سطح یکپارچه‌سازی تصمیمات	نحوه توجه به ریسک فساد	در نظر گیری سیاست تخفیف خرید	در نظر گیری قیمت گذاری پویا	در نظر گیری مسیریابی وسایل نقلیه	در نظر گیری ساختار انبار متقاطع	در نظر گیری محصولات فاسدشدنی	ساختار شبکه	منبع
شبیه‌سازی	محدود	قابلیت اطمینان	—	—	محدود	—	—	چهار سطحی	صالحی و همکاران (۱۴۰۱)

فرابهرکاری	محدود	فازی	—	—	✓	—	محدود	شبکه توزیع	علی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۱)
MILP چندهدفه	محدود	غیرمستقیم	—	—	محدود	—	✓	چهارسطحی	ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۲)
مدل خطی و +GA PSO	محدود	غیرمستقیم	—	—	✓	—	✓	زنجیره تأمین حلقه بسته	حاجی‌زاده ابراهیمی و مهدی (۱۴۰۳)
مدل چندهدفه + روش اپسلون	متوسط	غیرمستقیم	—	محدود	—	—	✓	زنجیره تأمین کشاورزی فسادپذیر	مرتضوی‌نیا و کرباسی (۱۴۰۴)
MILP دوهدفه + بهینه‌سازی استوار	متوسط	✓؛ با لحاظ عدم قطعیت و RFID	—	—	✓	✓	✓	زنجیره تأمین سه‌سطحی	پاکزاد و همکاران (۱۴۰۴)
بهینه‌سازی عملیاتی	محدود	محدود	—	—	✓	✓	—	توزیع مبتنی بر انبار متقاطع	Acevedo Chedid et al. (2023)
مدل قطعی	محدود	غیرمستقیم	—	—	—	—	✓	زنجیره تأمین مواد غذایی	Monteiro et al. (2023)
MILP قطعی	محدود	غیرمستقیم	—	—	✓	—	✓	شبکه توزیع فاسدشدنی	Zhuang et al. (2023)
بهینه‌سازی قطعی	محدود	محدود	—	—	محدود	—	✓	زنجیره تأمین چندسطحی	Liu et al. (2024)
MILP قطعی	متوسط	محدود	—	—	✓	✓	✓	شبکه توزیع فاسدشدنی	Taheri & Taft (2024)

Toniolo et al. (2024)	توزیع انبار متقاطع	-	✓	✓	-	-	-	محدود	MILP + فراابتکاری
Wang et al. (2026)	لجستیک فاسدشدنی	✓	✓	✓	-	-	✓	متوسط	بهینه سازی قطعی
Mola Yousefi et al. (2026)	زنجیره تأمین لبنیات چندسطحی	✓	-	✓	✓	✓	✓	محدود	چندهدفه و فراابتکاری
پژوهش حاضر	زنجیره تأمین چندسطحی فاسدشدنی با انبار متقاطع	✓	✓	✓	✓	✓	✓	کامل	MILP دوهدفه

در این جدول، علامت ✓ نشان دهنده در نظرگیری صریح مؤلفه مورد نظر در مدل یا چارچوب پژوهش است و علامت - بیانگر عدم پرداخت مستقیم به آن مؤلفه است. واژه محدود زمانی به کار رفته است که مؤلفه مورد نظر به صورت جزئی، ضمنی یا غیرمحموری در پژوهش لحاظ شده باشد. همچنین، واژه های محدود، متوسط و کامل در ستون سطح یکپارچه سازی، بیانگر میزان ترکیب همزمان تصمیمات لجستیکی و اقتصادی در هر مطالعه هستند.

در مجموع، مطالعات پیشین دانش ما را در زمینه طراحی شبکه برای محصولات فاسدشدنی، به ویژه از طریق توسعه مدل های برنامه ریزی و بهینه سازی عملیات شبکه و استراتژی های مدیریت موجودی، به میزان قابل توجهی ارتقا داده اند. با این حال، یک جمع بندی انتقادی از پژوهش های مرور شده، سه شکاف پژوهشی اصلی را نمایان می سازد: نخست، اکثر مدل ها تصمیمات طراحی شبکه زنجیره تأمین (تصمیمات استراتژیک) را از استراتژی های قیمت گذاری و تقاضا (تصمیمات تاکتیکی) تفکیک می کنند و ماهیت وابسته آن ها را در محیط های محصولات فاسدشدنی نادیده می گیرند. دوم، اگرچه قیمت گذاری وابسته به تازگی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است، اما همچنان خلأ یکپارچگی بین این استراتژی ها و ریسک های عملیاتی (مانند اختلالات ناوگان و فساد محصول) احساس می شود. سوم، چشم انداز روش شناختی همچنان پراکنده باقی مانده است؛ در حالی که رویکردهای فراابتکاری به طور رایج استفاده می شوند، تعداد کمی از مطالعات، یک ارزیابی

عملکرد مقایسه‌ای قوی ارائه می‌دهند که این الگوریتم‌ها را با شاخص‌های عملکردی چندگانه (مانند تاپسیس) محک بزنند. این پژوهش با ارائه یک مدل MILP یکپارچه که به طور همزمان طراحی شبکه، قیمت‌گذاری پویای مبتنی بر تازگی و کاهش ریسک‌های عملیاتی را در نظر می‌گیرد و با به کارگیری تحلیل مقایسه‌ای دقیق الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO، به این شکاف‌ها پاسخ می‌دهد.

روش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از منظر روش، کمی^۱ با رویکرد مدل‌سازی ریاضی است. برای تحلیل مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه^۲ توسعه داده شده است. شکل (۱) ساختار شبکه مورد مطالعه و جریان حرکت کالا میان سطوح مختلف زنجیره را نشان می‌دهد. این مدل با دو هدف متضاد طراحی شده است: (۱) بیشینه‌سازی سود کل زنجیره تأمین و (۲) کمینه‌سازی ریسک‌های عملیاتی مرتبط با توزیع محصولات فسادپذیر.

مدل مذکور ساختار یک زنجیره تأمین سه سطحی (تأمین‌کننده، انبار متقاطع و مشتری) را در نظر می‌گیرد که در آن عملیات انبارداری با به کارگیری سیستم انبار متقاطع و با فرض موجودی صفر بهینه‌سازی می‌شود. از مهم‌ترین نوآوری‌ها و ویژگی‌های مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- یکپارچه‌سازی سیاست تخفیف کلی از سوی تأمین‌کنندگان.
- قیمت‌گذاری پویا بر اساس میزان تازگی محصول در سطح مشتری.
- در نظر گرفتن ناوگان حمل‌ونقل ناهمگن و پنجره‌های زمانی تحویل.
- محدودیت عمر قفسه‌ای^۳ و اعمال جریمه برای پاسخ‌دهی ناقص به تقاضا.

به منظور اعتبارسنجی مدل و حل دقیق آن در ابعاد کوچک، از روش محدودیت افسیلون تقویت‌شده^۴ در نرم‌افزار گمز^۵ استفاده شده است. در این رویکرد، تابع هدف ریسک به عنوان یک محدودیت افسیلون در نظر گرفته می‌شود و با افزودن جریمه متغیرهای کمکی به

¹ Quantitative

² Multi-Objective Mixed-Integer Linear Programming - MOMILP

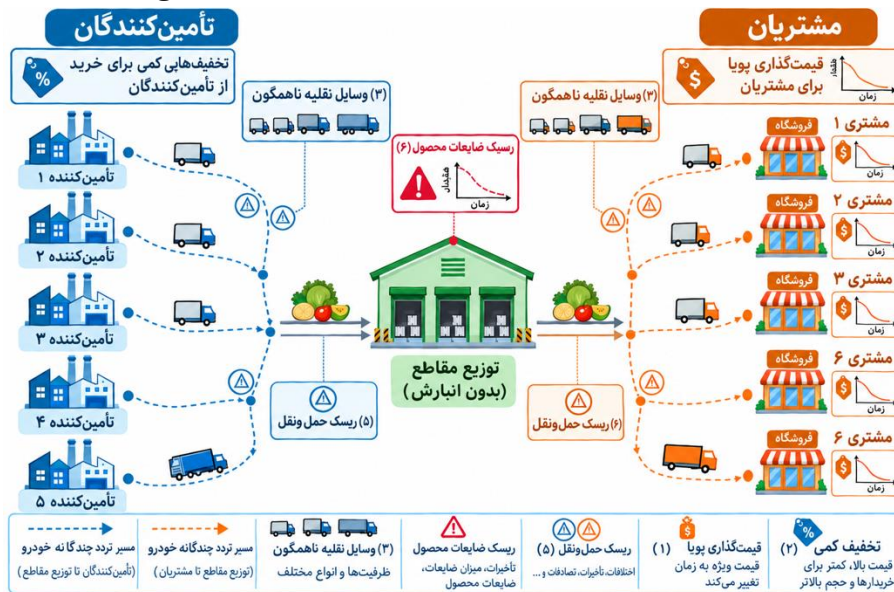
³ Shelf-life

⁴ AUGMECON

⁵ GAMS

تابع هدف اصلی (سود)، از تولید جواب‌های غیرمغلوب ضعیف جلوگیری شده و جبهه پارتوی دقیق مسئله استخراج می‌شود.

شکل ۱. ساختار شبکه زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل تأمین‌کنندگان، انبار مقاطع و مشتریان



با توجه به چالش برانگیز بودن حل دقیق مدل پیشنهادی در ابعاد بزرگ، ناشی از وجود متغیرهای عدد صحیح، ساختار ترکیبی قیود و ماهیت چندهدفه مسئله، از دو الگوریتم فراابتکاری برای دستیابی به جواب‌های باکیفیت در زمان محاسباتی قابل قبول استفاده شده است.

الگوریتم NSGA-II با بهره‌گیری از عملگرهای تقاطع دودویی شبیه‌سازی شده^۱ و جهش چندجمله‌ای و الگوریتم MOPSO مجهز به حافظه خارجی^۲ برای ذخیره جواب‌های غیرمغلوب و مکانیزم چرخ رولت جهت انتخاب رهبران. در پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها، نمایش جواب به صورت یک بردار پیوسته یک‌بعدی در نظر گرفته شده است که پس از فرآیند رمزگشایی به مقادیر جریان‌های ورودی و خروجی شبکه تبدیل می‌شود. به منظور حفظ موجه بودن جواب‌ها، یک مکانیزم تعمیر برای کنترل محدودیت‌های ظرفیت و تعادل

¹ Simulated Binary Crossover (SBX)

² Archive

جریان در مدل اعمال شده است. در نهایت، برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری، از روش طراحی آزمایش تاگوچی^۱ استفاده شده است.

در توسعه مدل ریاضی این پژوهش، مفروضات زیر در نظر گرفته شده است:

- زنجیره تأمین مورد مطالعه شامل سه سطح تأمین‌کنندگان، انبار متقاطع و مشتریان است که جریان محصولات از تأمین‌کنندگان به انبار متقاطع و سپس به مشتریان انجام می‌شود.
- شبکه شامل چند محصول فاسدشدنی با عمر قفسه‌ای محدود است و کیفیت محصولات با گذشت زمان کاهش می‌یابد.
- قیمت فروش محصولات تابعی از میزان تازگی محصول در زمان تحویل به مشتریان در نظر گرفته می‌شود.
- انبار متقاطع فاقد نگهداری موجودی بلندمدت بوده و محصولات پس از ورود، تنها عملیات تخلیه، تفکیک و بارگیری را طی کرده و در کوتاه‌ترین زمان ممکن به مشتریان ارسال می‌شوند.
- زمان پردازش عملیات در انبار متقاطع (شامل تخلیه، مرتب‌سازی و بارگیری) ثابت فرض می‌شود.
- تأمین‌کنندگان از سیاست تخفیف مقداری تجمعی استفاده می‌کنند که میزان تخفیف بر اساس حجم کل خرید در افق برنامه‌ریزی تعیین می‌شود.
- ناوگان حمل‌ونقل مورد استفاده در بخش تأمین و توزیع ناهمگن بوده و وسایل نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوتی هستند.
- مشتریان دارای پنجره زمانی نرم برای دریافت سفارش هستند.
- تقاضای مشتریان برای هر محصول در هر دوره قطعی و از پیش مشخص فرض می‌شود و در صورت عدم تأمین کامل تقاضا، کمبود تقاضا مجاز بوده و مشمول هزینه جریمه از دست رفتن فروش می‌شود.
- برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در مدل در قالب یک افق زمانی چنددوره‌ای انجام می‌شود و هزینه‌های بارگیری و تخلیه متناسب با حجم محصول محاسبه می‌گردد.
- در بخش زیر، مجموعه‌ها و اندیس‌های مورد استفاده در مدل ریاضی معرفی می‌شوند. این مجموعه‌ها اجزای مختلف شبکه زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان، مشتریان، محصولات فاسدشدنی، دوره‌های زمانی، انواع وسایل نقلیه ورودی و خروجی، و درب‌های

¹ Taguchi

ورودی انبار متقاطع را مشخص می کنند. تعریف و نماد گذاری هر یک از این مجموعه ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مجموعه ها و اندیس ها

نماد	تعریف	توضیحات
S	مجموعه تامین کنندگان	$S = \{1, 2, \dots, S \}$
C	مجموعه مشتریان	$C = \{1, 2, \dots, C \}$
P	مجموعه محصولات فاسدشدنی	$P = \{1, 2, \dots, P \}$
T	مجموعه دوره های زمانی (روزانه)	$T = \{1, 2, \dots, T \}$
K	مجموعه انواع وسایل نقلیه ورودی (ناهمگن)	$K = \{1, 2, \dots, K \}$
K'	مجموعه انواع وسایل نقلیه خروجی (ناهمگن)	$K' = \{1, 2, \dots, K' \}$
D^{in}	مجموعه درب های ورودی انبار متقاطع	$D^{in} = \{1, 2, \dots, D^{in} \}$
D^{out}	مجموعه درب های خروجی انبار متقاطع	$D^{out} = \{1, 2, \dots, D^{out} \}$
L	مجموعه سطوح تخفیف مقداری تامین کنندگان	$L = \{1, 2, 3\}$
F	مجموعه طبقات تازگی محصول	$F = \{1, 2, 3, 4, 5\}$

پارامترهای مورد استفاده در مدل ریاضی در بخش زیر معرفی می شوند. این پارامترها شامل تقاضا و عرضه، ویژگی های محصولات فاسدشدنی، قیمت ها و سیاست های تخفیف، هزینه های حمل و نقل و عملیات، فاصله ها، ظرفیت ها، پنجره های زمانی و پارامترهای مرتبط با ریسک هستند که در روابط مدل به کار می روند. علاوه بر نماد و توضیح هر پارامتر، واحد اندازه گیری و نوع پارامتر نیز برای شفافیت بیشتر در جدول ۳ مشخص شده است. این طبقه بندی به درک بهتر نقش هر پارامتر در ساختار مدل کمک می کند.

جدول ۳. پارامترهای مدل

نماد	توضیح	واحد	نوع پارامتر
D_{cpt}	تقاضای مشتری C از محصول p در دوره t	کیلوگرم	تقاضا و عرضه
CAP_{spt}	ظرفیت تامین کننده S برای محصول p در دوره t	کیلوگرم	
$Q_{cpk't}^{max}$	حداکثر مقدار قابل تحویل محصول p به مشتری C توسط وسیله k' در دوره t		
SL_p	عمر قفسه ای محصول p	روز	ویژگی
α_f	* ضریب ارزش فروش متناظر با طبقه تازگی f	محصولات فاسدشدنی	
BP_p	قیمت پایه خرید محصول p	تومان / کیلوگرم	قیمت و تخفیف خرید

PC_{spl}	قیمت مؤثر خرید محصول p از تأمین‌کننده s در سطح تخفیف l	تومان/کیلوگرم
δ_{spl}	نرخ تخفیف اختصاص یافته به سطح تخفیف l برای خرید محصول p از تأمین‌کننده s	درصد
Th_l	آستانه حجم خرید برای سطح تخفیف l	درصد
pr_p	قیمت پایه فروش محصول p	تومان/کیلوگرم
CV_k	هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه ورودی k	تومان
$CV_{k'}$	هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه خروجی k'	تومان
c_k	هزینه حمل وسیله نقلیه ورودی k به ازای واحد مسافت	تومان/کیلومتر
$c_{k'}$	هزینه حمل وسیله نقلیه خروجی k' به ازای واحد مسافت	تومان/کیلومتر
tc_s	هزینه ثابت بارگیری از عرضه‌کننده s	تومان
SS_p	هزینه پردازش محصول p در انبار متقاطع	تومان/کیلوگرم
HC_p	هزینه جابجایی محصول p در انبار متقاطع	تومان/کیلوگرم
H_p	هزینه ضایعات یا امحای محصول فاسدشده p	تومان/کیلوگرم
B_p	هزینه کمبود محصول p	تومان/کیلوگرم
FC_{din}	هزینه فعال‌سازی درب ورودی d^{in}	تومان

هزینه های فعال سازی درب ها	تومان	هزینه فعال سازی درب خروجی d^{out}	$FC_{d^{out}}$
فاصله ها	کیلومتر	مسافت انبار متقاطع تا تامین کننده S (برون شهری)	Dis_S^{CD}
	کیلومتر	مسافت بین تامین کنندگان S و S'	$Dis_{SS'}$
	کیلومتر	مسافت انبار متقاطع تا مشتری C (درون شهری)	Dis_C^{CD}
	کیلومتر	مسافت بین مشتریان C و C'	$Dis_{CC'}$
سرعت وسایل نقلیه	کیلومتر / ساعت	سرعت وسیله نقلیه ورودی k	$Speed_k$
	کیلومتر / ساعت	***سرعت وسیله نقلیه خروجی k'	$Speed_{k'}$
زمان های عملیات	ساعت	زمان پردازش در انبار متقاطع	PT
	ساعت	حداکثر زمان ماندگاری در انبار متقاطع	$MaxCD$
ظرفیت	کیلوگرم	ظرفیت وسیله نقلیه ورودی k	VV_k
	کیلوگرم	ظرفیت وسیله نقلیه خروجی k'	$VV_{k'}$
	کیلوگرم	ظرفیت پردازش درب ورودی d^{in}	$CAP_{d^{in}}$
	کیلوگرم	ظرفیت پردازش درب خروجی d^{out}	$CAP_{d^{out}}$
پنجره زمانی	ساعت	حد پایین پنجره زمانی نرم مشتری C	e_c
	ساعت	حد بالای پنجره زمانی نرم مشتری C	l_c
	تومان / ساعت	جریمه تحویل زود هنگام	p_e
	تومان / ساعت	جریمه تحویل دیر هنگام	p_l
***ریسک	احتمال	ضریب ریسک ناوگان سنگین	$rsk_{HeavyTruck}$
	احتمال	ضریب ریسک ناوگان متوسط	$rsk_{MediumTruck}$
	احتمال	ضریب ریسک ناوگان سبک	$rsk_{LightTruck}$
	احتمال	ضریب ریسک ناوگان وانت/پیکاپ	rsk_{pickup}
وزن اهداف ($\theta + \lambda + \psi = 1$)		وزن ریسک ضایعات (فساد)	θ
		وزن ریسک حمل و نقل ورودی	λ
		وزن ریسک حمل و نقل خروجی	ψ
نرمال سازی و آستانه ها	کیلوگرم	***کل تقاضای تجمیعی سیستم برای همه مشتریان، همه محصولات و در کل افق برنامه ریزی	D^{ref}
	کیلوگرم	آستانه تغییر نوع وسیله ورودی	$Threshold^{in}$
	کیلوگرم	آستانه تغییر نوع وسیله خروجی	$Threshold^{out}$
		ضریب تشدیدکننده ریسک فساد	ω_{waste}

ریسک و سیاستی	****ضریب حساسیت محصول p بر اساس طبقه‌بندی (ABC)	$sens_p$
عدد بزرگ	عدد بزرگ در قیود خطی‌سازی	M
	مقدار بسیار کوچک مثبت	ϵ

* مقادیر ضرایب کاهش قیمت فروش محصول:

$$\alpha_1 = 1.00, \quad \alpha_2 = 0.85, \quad \alpha_3 = 0.65, \quad \alpha_4 = 0.40, \quad \alpha_5 = 0.00$$

** با توجه به اینکه فاصله بین گره‌های شبکه و سرعت وسایل نقلیه مشخص است، زمان سفر اسمی در شبکه حمل‌ونقل از تقسیم فاصله مسیر بر سرعت وسیله نقلیه به‌دست می‌آید. بنابراین زمان سفر اسمی از انبار متقاطع تا مشتری C از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

رابطه (۱):

$$TT_c^{out} = \frac{Dis_c^{CD}}{Speed_k}$$

*** در مدل پیشنهادی، فرض می‌شود که ریسک حمل‌ونقل ورودی به دلیل مسافت‌های برون‌شهری و استفاده از ناوگان سنگین‌تر، به‌طور کلی بیشتر از ریسک حمل‌ونقل خروجی است. تخصیص نوع ناوگان و در نتیجه نرخ ریسک متناظر، به‌صورت پویا و بر اساس حجم ارسالی و آستانه‌های از پیش تعیین‌شده انجام می‌شود. بدین معنا که اگر حجم حمل از آستانه مشخصی تجاوز کند، ناوگان با ظرفیت بالاتر و نرخ ریسک متناظر به مسیر تخصیص می‌یابد. این سازوکار وابسته به وضعیت^۱، موجب می‌شود مدل‌سازی ریسک به شرایط واقعی عملیات حمل‌ونقل نزدیک‌تر باشد.

همچنین در محاسبه ریسک سیستم، پارامتر ω_{waste} به عنوان ضریب جریمه^۲ برای ریسک فساد محصولات در نظر گرفته شده است. از آنجا که در زنجیره تامین اقلام فسادپذیر، هزینه و تبعات ناشی از ضایعات محصولات به مراتب بیشتر از اختلالات معمول لجستیکی است، اعمال این ضریب تشدیدکننده موجب می‌شود الگوریتم بهینه‌سازی، تمرکز بیشتری بر کاهش زمان ماندگاری کالاها در شبکه داشته باشد و تخصیص منابع را با اولویت‌دهی به محصولات دارای حساسیت بالا (بر اساس سیستم طبقه‌بندی ABC) انجام دهد.

**** D^{ref} : کل تقاضای تجمعی سیستم برای همه مشتریان، محصولات و دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی که به‌عنوان پارامتر مرجع برای نرمال‌سازی مؤلفه ریسک ضایعات در تابع هدف دوم استفاده می‌شود. این پارامتر پیش از حل مدل و بر اساس داده‌های تقاضا محاسبه شده و مقدار آن ثابت در نظر گرفته می‌شود. استفاده از این پارامتر صرفاً برای مقیاس‌بندی شاخص ریسک و قابل مقایسه کردن اجزای تابع هدف دوم است و تأثیری بر خطی بودن مدل ندارد.

¹ State-dependent

² Penalty Multiplier

$$sens_p = \begin{cases} 1.5 & \text{if product } p \text{ belongs to class } A \\ 1.0 & \text{if product } p \text{ belongs to class } B \\ 0.7 & \text{if product } p \text{ belongs to class } C \end{cases} \quad \text{*****}$$

متغیرهای تصمیم مسئله بیانگر تصمیمات کلیدی سیستم از جمله تعیین مسیرهای حمل و نقل ورودی و خروجی، بازدید تأمین کنندگان و مشتریان، فعال سازی وسایل نقلیه، تخصیص درب های انبار متقاطع، جریان و توزیع محصولات، انتخاب سطوح تخفیف و زمان بندی عملیات هستند. همچنین برخی از آنها به عنوان متغیرهای کمکی برای مدل سازی ریسک و حذف زیر تور به کار می روند. در جدول ۴ علاوه بر نماد و توضیح هر مورد، واحد اندازه گیری (در صورت وجود) و نوع آنها نیز ارائه شده است تا نقش هر یک در ساختار مدل به صورت شفاف مشخص شود.

جدول ۴. متغیرهای تصمیم

نماد	توضیح	واحد	نوع متغیر
X_{0skt}	اگر وسیله نقلیه ورودی k از انبار متقاطع به تأمین کننده S در دوره t برود ۱، در غیر این صورت ۰		مسیرهای ورودی
$X_{ss'kt}$	اگر وسیله نقلیه ورودی k از تأمین کننده S به k' در دوره t برود ۱، در غیر این صورت ۰		
X_{s0kt}	اگر وسیله نقلیه ورودی k از تأمین کننده S به انبار متقاطع در دوره t برگردد ۱، در غیر این صورت ۰		
$Y_{0ck't}$	اگر وسیله نقلیه خروجی k' از انبار متقاطع به مشتری C در دوره t برود ۱، در غیر این صورت ۰		مسیرهای خروجی
$Y_{cc'k't}$	اگر وسیله نقلیه خروجی k' از مشتری C به C' در دوره t برود ۱، در غیر این صورت ۰		
$Y_{c0k't}$	اگر وسیله نقلیه خروجی k' از مشتری C به انبار متقاطع در دوره t برگردد ۱، در غیر این صورت ۰		
β_{skt}	اگر تأمین کننده S توسط وسیله k در دوره t بازدید شود ۱، در غیر این صورت ۰		بازدید
γ_{ckrt}	اگر مشتری C توسط وسیله k' در دوره t بازدید شود ۱، در غیر این صورت ۰		
U_{kt}	اگر وسیله نقلیه ورودی k در دوره t فعال باشد ۱، در غیر این صورت ۰		فعال سازی وسایل نقلیه
U'_{krt}	اگر وسیله نقلیه خروجی k' در دوره t فعال باشد ۱، در غیر این صورت ۰		

جریان محصول	مقدار محصول p بارگیری شده از تامین کننده S توسط وسیله k در دوره t	q_{spkt}
	مقدار محصول p تحویل شده به مشتری C توسط وسیله k' در دوره t	$q'_{cpk't}$
	مقدار جریان محصول p از درب ورودی d^{in} به درب خروجی d^{out} در دوره t	$F_{pd^{in}d^{out}t}$
تخفیف	مقدار محصول p بارگیری شده از تامین کننده S توسط وسیله k در سطح تخفیف l در دوره t	q_{splkt}
	اگر سطح تخفیف l برای محصول p از تامین کننده S انتخاب شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰	V_{spl}
انبار متقاطع	اگر وسیله نقلیه ورودی k به درب ورودی d^{in} در دوره t تخصیص یابد ۱، در غیر این صورت ۰	$Z_{kd^{in}t}$
	اگر وسیله نقلیه خروجی k' به درب خروجی d^{out} در دوره t تخصیص یابد ۱، در غیر این صورت ۰	$W_{k'd^{out}t}$
	اگر انتقال بار بین درب ورودی و خروجی انبار متقاطع انجام شود ۱، در غیر این صورت ۰	$\eta_{d^{in}d^{out}t}$
	اگر درب ورودی d^{in} در دوره t فعال باشد ۱، در غیر این صورت ۰	$O_{d^{in}t}$
	اگر درب خروجی d^{out} در دوره t فعال باشد ۱، در غیر این صورت ۰	$O_{d^{out}t}$
تقاضا و کمبود	مقدار کمبود محصول p برای مشتری C در دوره t	SH_{cpt}
	کل مقدار محصول p تحویل شده به مشتری C در دوره t	Y_{cpt}
تجمیعی جریان	کل محصول p دریافت شده در دوره t	QS_{pt}
	کل محصول p ارسال شده در دوره t	QD_{pt}
	کل جریان ورودی از تامین کننده S به انبار متقاطع در کل افق برنامه ریزی	Q_s^{in}
	کل جریان خروجی به مشتری C در کل افق برنامه ریزی	Q_c^{out}
	مقدار محصول فاسد شده p در دوره t (ضایعات)	I_{pt}
زمان	زمان رسیدن وسیله ورودی k به تامین کننده S در دوره t	A_{skt}
	زمان رسیدن وسیله ورودی k از تامین کننده S به S' در دوره t	$A_{s'kt}$
	زمان رسیدن وسیله خروجی k' به مشتری C در دوره t	$A'_{ck't}$
	زمان ورود وسیله ورودی k به انبار متقاطع در دوره t	Arr_{kt}^{CD}
	زمان خروج وسیله خروجی k' از انبار متقاطع در دوره t	$Dep_{k't}^{CD}$

E_{ct}	زمان تحویل زودهنگام	ساعت
L_{ct}	زمان تحویل دیرهنگام	ساعت
u_{skt}	متغیر ترتیبی برای حذف زیرتور تامین‌کنندگان	کمکی
u'_{ckit}	متغیر ترتیبی برای حذف زیرتور مشتریان	حذف
$\xi_{cpk'tf}$	اگر محصول p در دوره t در طبقه تازگی f قرار داشته باشد ۱، در غیر این صورت *	زیرتور
$vs_{cpk'tf}$	متغیر پیوسته کمکی که مقدار محصول فروخته‌شده در سطح تازگی f را نشان می‌دهد و برای خطی‌سازی تابع هدف استفاده می‌شود	طبقه تازگی
$\phi_{cpk't}$	شاخص مصرف عمر محصول ارسالی به مشتری c برای محصول c توسط وسیله نقلیه k' در دوره t	
δ_s^{in}	متغیر دودویی تعیین‌کننده فعال‌سازی ناوگان سنگین در حمل ورودی بر اساس عبور حجم از آستانه	ریسک
δ_c^{out}	متغیر دودویی تعیین‌کننده فعال‌سازی ناوگان بزرگ‌تر در حمل خروجی بر اساس عبور حجم از آستانه	
fr_{cp}	شاخص زمانی ریسک فساد برای محصول p در مشتری c	روابط
WR_{cp}	ضریب ریسک فساد (نرخ ضایعات) محصول p برای مشتری c	کمکی

* در تابع هدف اول، متغیر تصمیم مربوط به تخصیص سطح تخفیف (V_{spl}) مستقل از اندیس زمان (t) تعریف شده است؛ زیرا تخصیص سطح تخفیف پس از پایان افق برنامه‌ریزی و براساس تجمیع مقادیر خریداری شده ارزیابی می‌گردد.

$$\delta_s^{in} = \begin{cases} 1 & Q_s^{in} > Threshold^{in} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

$$\delta_c^{out} = \begin{cases} 1 & Q_c^{out} > Threshold^{out} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

اجزای مدل ریاضی شامل توابع هدف و محدودیت‌های مسئله به شرح روابط زیر ارائه شده است.

$$Max \ Z1: \left(\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{k' \in K'} \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} \alpha_f \cdot pr_p \cdot vs_{cpk'tf} \right) \quad (1)$$

$$- \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} PC_{spl} \cdot q_{splkt}$$

$$\begin{aligned}
& - \left(\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} CV_k \cdot U_{kt} + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_k \cdot Dis_s^{CD} \cdot (X_{0skt} + X_{s0kt}) \right. \\
& \quad \left. + \sum_{s \in S} \sum_{s' \in S, s' \neq s} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_k \cdot Dis_{ss'} \cdot X_{ss'kt} \right) \\
& - \left(\sum_{k' \in K'} \sum_{t \in T} CV_{k'} \cdot U'_{k't} + \sum_{c \in C} \sum_{k' \in K'} \sum_{t \in T} c_{k'} \cdot Dis_c^{CD} \cdot (Y_{0ck't} + Y_{c0k't}) \right. \\
& \quad \left. + \sum_{c \in C} \sum_{c' \in C, c' \neq c} \sum_{k' \in K'} \sum_{t \in T} c_{k'} \cdot Dis_{cc'} \cdot Y_{cc'k't} \right) \\
& - \left(\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} tc_s \cdot \beta_{skt} \right) - \left(\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (SS_p + HC_p) \cdot QS_{pt} \right) \\
& - \left(\sum_{d^{in} \in D^{in}} \sum_{t \in T} FC_{d^{in}} \cdot O_{d^{in}t} + \sum_{d^{out} \in D^{out}} \sum_{t \in T} FC_{d^{out}} \cdot O_{d^{out}t} \right) \\
& \quad - \left(\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} H_p \cdot I_{pt} \right) - \left(\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} B_p \cdot SH_{cpt} \right) \\
& \quad - \left(\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} (p_e \cdot E_{ct} + p_l \cdot L_{ct}) \right) \\
\mathbf{Min} \mathbf{Z2} = & \theta \frac{R_{waste}}{D^{ref}} + \lambda \frac{R_{inbound}}{Threshold^{in}} + \psi \frac{R_{outbound}}{Threshold^{out}} \tag{۲}
\end{aligned}$$

به طوری که:

$$\theta + \lambda + \psi = 1$$

$$\theta, \lambda, \psi \geq 0$$

$$R_{waste} = \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (WR_{cp} \cdot Y_{cpt})$$

$$WR_{cp} = \begin{cases} \omega_{waste} sens_p & \text{if } fr_{cp} \geq 0.8 \\ fr_{cp} sens_p & \text{if } fr_{cp} < 0.8 \end{cases} \quad \forall c \in C, p \in P$$

$$fr_{cp} = \min \left\{ \frac{PT + \left(\frac{Dis_c^{CD}}{60} \right)}{SL_p}, 1 \right\} \quad \forall c \in C, p \in P$$

$$sens_p = \begin{cases} 1.5 & \text{if product } p \text{ belongs to class } A \\ 1.0 & \text{if product } p \text{ belongs to class } B \\ 0.7 & \text{if product } p \text{ belongs to class } C \end{cases} \quad \forall p \in P$$

$$R_{inbound} = \sum_{s \in S} [Dis_s^{CD} \cdot rsk_{MediumTruck} \cdot Q_s^{in} + Dis_s^{CD} \cdot (rsk_{HeavyTruck} - rsk_{MediumTruck}) g_s]$$

$$R_{outbound} = \sum_{c \in C} [Dis_c^{CD} \cdot rsk_{Pickup} \cdot Q_c^{out} + Dis_c^{CD} \cdot (rsk_{LightTruck} - rsk_{Pickup}) g_c]$$

$$Q_{S_{pt}} = \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} q_{spkt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (۳)$$

$$Q_{D_{pt}} = \sum_{c \in C} \sum_{k' \in K'} q'_{cpk't} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (۴)$$

$$Q_{D_{pt}} = Q_{S_{pt}} - I_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (۵)$$

$$I_{pt} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T \quad (۶)$$

$$Y_{cpt} + SH_{cpt} = D_{cpt} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T \quad (۷)$$

$$Y_{cpt} = \sum_{k' \in K'} q'_{cpk't} \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T \quad (۸)$$

$$\sum_{k \in K} q_{spkt} \leq CAP_{spt} \quad \forall s \in S, p \in P, t \in T \quad (۹)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} q_{spkt} \leq VV_k \cdot U_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (۱۰)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} q'_{cpk't} \leq VV_{k'} \cdot U'_{k't} \quad \forall k' \in K', t \in T \quad (۱۱)$$

$$\sum_{k \in K} \beta_{skt} \leq 1 \quad \forall s \in S, t \in T \quad (۱۲)$$

$$q_{spkt} \leq M \cdot \beta_{skt} \quad \forall s \in S, p \in P, k \in K, t \in T \quad (۱۳)$$

$$\sum_{k' \in K'} \gamma_{ck't} \leq 1 \quad \forall c \in C, t \in T \quad (۱۴)$$

$$q'_{cpk't} \leq M.\gamma_{ck't} \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{s \in S} X_{0skt} = U_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{s \in S} X_{s0kt} = U_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{s' \in S, s' \neq s} X_{ss'kt} = \beta_{skt} \quad \forall s \in S, k \in K, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{c \in C} Y_{0ck't} = U'_{k't} \quad \forall k' \in K', t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{c \in C} Y_{c0k't} = U'_{k't} \quad \forall k' \in K', t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{c' \in C, c' \neq c} Y_{cc'k't} = \gamma_{ck't} \quad \forall c \in C, k' \in K', t \in T \quad (21)$$

$$u_{skt} - u_{s'kt} + |S|.X_{ss'kt} \leq |S| - 1 \quad \forall s, s' \in S, s \neq s', k \in K, t \in T \quad (22)$$

$$u'_{ck't} - u'_{c'k't} + |C|.Y_{cc'k't} \leq |C| - 1 \quad \forall c, c' \in C, c \neq c', k' \in K', t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{d^{in} \in D^{in}} Z_{kd^{in}t} = U_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{d^{out} \in D^{out}} W_{k'd^{out}t} = U'_{k't} \quad \forall k' \in K', t \in T \quad (25)$$

$$\sum_{k \in K} Z_{kd^{in}t} \leq CAP_{d^{in}} . O_{d^{in}t} \quad \forall d^{in} \in D^{in}, t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{k' \in K'} W_{k'd^{out}t} \leq CAP_{d^{out}} . O_{d^{out}t} \quad \forall d^{out} \in D^{out}, t \in T \quad (27)$$

$$\sum_{d^{out} \in D^{out}} F_{pd^{in}d^{out}t} \leq QS_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (28)$$

$$Dep_{k't}^{CD} \geq Arr_{kt}^{CD} + PT - M(3 - Z_{kd^{in}t} - W_{k'd^{out}t} - \eta_{d^{in}d^{out}t}) \quad (29)$$

$$\forall k \in K, k' \in K', d^{in} \in D^{in}, d^{out} \in D^{out}, t \in T$$

$$Dep_{k't}^{CD} - Arr_{kt}^{CD} \leq MaxCD + PT + M(3 - Z_{kd^{in}t} - W_{k'd^{out}t} - \eta_{d^{in}d^{out}t}) \quad (30)$$

$$\forall k \in K, k' \in K', d^{in} \in D^{in}, d^{out} \in D^{out}, t \in T$$

$$\sum_{d^{in} \in D^{in}} \sum_{d^{out} \in D^{out}} F_{pd^{in}d^{out}t} = QD_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (31)$$

$$F_{pd^{in}d^{out}t} \geq 0 \quad (32)$$

$$A_{s'kt} \geq A_{skt} + \frac{Dis_{ss'}}{Speed_k} - M(1 - X_{ss'kt}) \quad \forall s, s' \in S (s \neq s'), k \in K, t \in T \quad (33)$$

$$Arr_{kt}^{CD} \geq A_{skt} + \frac{Dis_s^{CD}}{Speed_k} - M(1 - X_{s0kt}) \quad \forall s \in S, k \in K, t \in T \quad (34)$$

$$A'_{c'k't} \geq A'_{ck't} + \frac{Dis_{cc'}}{Speed_{k'}} - M(1 - Y_{cc'k't}) \quad (35)$$

$$\forall c, c' \in C (c \neq c'), k' \in K', t \in T$$

$$A'_{ck't} \geq e_c - E_{ct} \quad \forall c \in C, k' \in K', t \in T \quad (36)$$

$$A'_{ck't} \leq l_c + L_{ct} \quad \forall c \in C, k' \in K', t \in T \quad (37)$$

$$E_{ct}, L_{ct} \geq 0 \quad (38)$$

$$\sum_{f \in F} v_{cpk'tf} = q'_{cpk't} \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T \quad (39)$$

$$v_{cpk'tf} \leq Q_{cpk't}^{max} \cdot \xi_{cpk'tf} \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T, f \in F \quad (40)$$

$$vS_{cpk'tf} \geq q'_{cpk't} - Q_{cpk't}^{max} \cdot (1 - \xi_{cpk'tf}) \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T, f \in F \quad (41)$$

$$vS_{cpk'tf} \geq 0 \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T, f \in F \quad (42)$$

$$\sum_{f \in F} \xi_{cpk'tf} = 1 \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T \quad (43)$$

$$\sum_{f \in F} \xi_{cpk'tf} = \gamma_{ck't} \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T \quad (44)$$

$$\sum_{f \in F} \xi_{cpk'tf} = \sum_{c' \in C, c' \neq c} Y_{cc'k't} \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T \quad (45)$$

$$\phi_{cpk't} = \frac{A'_{ck't} + PT}{SL_p} \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T \quad (46)$$

$$\phi_{cpk't} \geq 0.2(f-1) - M(1 - \xi_{cpk'tf}) \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T, f \in F \quad (47)$$

$$\phi_{cpk't} \leq 0.2f + M(1 - \xi_{cpk'tf}) \quad \forall c \in C, p \in P, k' \in K', t \in T, f \in F \quad (48)$$

$$\sum_{l \in L} V_{spl} = 1 \quad \forall s \in S, p \in P \quad (49)$$

$$\sum_{l \in L} q_{splkt} = q_{spkt} \quad \forall s \in S, p \in P, k \in K, t \in T \quad (50)$$

$$\left(Th_l \cdot \sum_{t \in T} CAP_{spt} \right) \cdot V_{spl} \leq \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} q_{splkt} \quad \forall s \in S, p \in P, l \in \{1, \dots, |L| - 1\} \quad (51)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} q_{splkt} \leq \left(Th_{l+1} \cdot \sum_{t \in T} CAP_{spt} \right) \cdot V_{spl} + M(1 - V_{spl}) \quad \forall s \in S, p \in P, l \in \{1, \dots, |L| - 1\} \quad (52)$$

$$\left(Th_{|L|} \cdot \sum_{t \in T} CAP_{spt} \right) \cdot V_{sp|L|} \leq \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} q_{sp|L|kt} \quad \forall s \in S, p \in P \quad (53)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} q_{spkt} = Q_s^{in} \quad \forall s \in S \quad (54)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} q'_{cpkrt} = Q_c^{out} \quad \forall c \in C \quad (55)$$

$$Q_s^{in} < Threshold^{in} + M.\delta_s^{in} \quad \forall s \in S \quad (56)$$

$$Q_s^{in} \geq Threshold^{in} - M(1 - \delta_s^{in}) \quad \forall s \in S \quad (57)$$

$$Q_c^{out} < Threshold^{out} + M.\delta_c^{out} \quad \forall c \in C \quad (58)$$

$$Q_c^{out} \geq Threshold^{out} - M(1 - \delta_c^{out}) \quad \forall c \in C \quad (59)$$

$$g_s \leq Q_s^{in} \quad \forall s \in S \quad (60)$$

$$g_s \leq M.\delta_s^{in} \quad \forall s \in S \quad (61)$$

$$g_s \geq Q_s^{in} - M(1 - \delta_s^{in}) \quad \forall s \in S \quad (62)$$

$$g_s \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (63)$$

$$g_c \leq Q_c^{out} \quad \forall c \in C \quad (64)$$

$$g_c \leq M.\delta_c^{out} \quad \forall c \in C \quad (65)$$

$$g_c \geq Q_c^{out} - M(1 - \delta_c^{out}) \quad \forall c \in C \quad (66)$$

$$g_c \geq 0 \quad \forall c \in C \quad (67)$$

$$X_{ss'kt}, X_{0skt}, X_{s0kt}, Y_{cc'k't}, Y_{0ck't}, Y_{c0k't}, Z_{kdin_t}, W_{k'dout_t}, \eta_{din_dout_t}, \quad (68)$$

$$U_{kt}, U'_{k't}, O_{din_t}, O_{dout_t}, \delta_s^{in}, \delta_c^{out}, V_{spl}, \beta_{skt}, \gamma_{ck't} \in \{0,1\}$$

$$q_{spkt}, q'_{cpk't}, I_{pt}, SH_{cpt}, A_{skt}, A'_{ck't}, Arr_{kt}^{CD}, Dep_{k't}^{CD}, E_{ct}, L_{ct}, Q_s^{in}, Q_c^{out} \quad (69)$$

$$, g_s, g_c \geq 0$$

تابع هدف اول: با هدف بیشینه‌سازی سود خالص زنجیره تأمین تعریف شده است. در این تابع، درآمد حاصل از فروش محصولات به مشتریان با در نظر گرفتن قیمت فروش و سطح تازگی محصول در زمان تحویل محاسبه می‌شود. سپس هزینه‌های شبکه شامل هزینه خرید از تأمین‌کنندگان (با تخفیف مقداری)، هزینه‌های حمل‌ونقل ورودی و خروجی، و هزینه‌های عملیات انبار متقاطع از آن کسر می‌شود. همچنین هزینه‌های ضایعات محصول، کمبود تقاضا و جریمه‌های زودکرد یا دیرکرد تحویل در محاسبه سود خالص لحاظ می‌شوند.

تابع هدف دوم: با هدف کمینه‌سازی ریسک عملیاتی کل زنجیره تأمین تعریف شده است. این ریسک شامل سه مؤلفه ریسک ضایعات محصول، ریسک حمل‌ونقل ورودی از تأمین‌کنندگان به انبار متقاطع و ریسک حمل‌ونقل خروجی از انبار متقاطع به مشتریان است. برای مقایسه‌پذیری این مؤلفه‌ها، مقادیر آن‌ها نرمال‌سازی شده و با استفاده از ضرایب وزنی در قالب یک شاخص ترکیبی ادغام می‌شوند. همچنین روابط غیرخطی مرتبط با ریسک حمل‌ونقل با استفاده از متغیرهای کمکی خطی‌سازی شده‌اند تا مدل به صورت یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قابل حل باشد.

محدودیت‌های مدل ریاضی پیشنهادی به پنج دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱. محدودیت‌های موازنه جریان^۱: این دسته تضمین می‌کند که جریان محصولات در کل شبکه زنجیره تأمین از اصل بقای جریان تبعیت کند. بدین معنا که مقدار محصولات ارسال‌شده از تأمین‌کنندگان، منتقل‌شده از طریق انبار متقاطع و تحویل‌شده به مشتریان با یکدیگر سازگار بوده و هیچ جریان غیرواقعی در شبکه ایجاد نشود. همچنین قیود مربوط به برآورده‌سازی تقاضای مشتریان و موازنه کل جریان ورودی و خروجی در این بخش قرار می‌گیرند.

¹ Flow Conservation Constraints

۲. محدودیت‌های ظرفیت و تخصیص منابع^۱: این محدودیت‌ها ظرفیت عناصر مختلف شبکه شامل تأمین‌کنندگان، وسایل نقلیه و امکانات عملیاتی انبار متقاطع را در نظر می‌گیرند. همچنین قیود مربوط به تخصیص تأمین‌کنندگان و مشتریان به وسایل نقلیه و محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت حمل و عملیات بارگیری و تخلیه در این دسته قرار دارند.

۳. محدودیت‌های مسیریابی وسایل نقلیه^۲: این قیود ساختار مسیرهای حمل‌ونقل در شبکه جمع‌آوری و توزیع را تعیین می‌کنند. محدودیت‌های مربوط به شروع و پایان مسیر وسایل نقلیه، تداوم حرکت بین گره‌ها، بازدید هر گره حداکثر یک‌بار و حذف زیرمسیرها در این گروه قرار می‌گیرند تا مسیرهای حمل‌ونقل معتبر و قابل اجرا شکل بگیرند.

۴. محدودیت‌های زمانی و عملیات انبار متقاطع^۳: این دسته به مدل‌سازی جنبه‌های زمانی سیستم اختصاص دارد. محدودیت‌های مربوط به زمان حرکت وسایل نقلیه، زمان ورود و خروج از انبار متقاطع، ترتیب عملیات تخلیه و بارگیری و همچنین رعایت پنجره‌های زمانی خدمت‌دهی به مشتریان در این بخش لحاظ می‌شوند.

۵. محدودیت‌های کیفیت محصول و ساختار ریاضی مدل^۴: این قیود ویژگی‌های محصولات فسادپذیر را در مدل لحاظ می‌کنند. سطح تازگی محصولات در زمان تحویل تعیین شده و ارتباط آن با زمان حمل‌ونقل و تحویل برقرار می‌شود. همچنین قیود مربوط به انتخاب سطوح تأمین، خطی‌سازی روابط غیرخطی و تعیین دامنه متغیرهای تصمیم (دودویی و پیوسته) در این دسته قرار دارند تا مدل در قالب یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط قابل حل باشد.

ساختار تخفیف تأمین‌کنندگان به صورت چندسطحی مدل‌سازی شده و قیمت خرید پس از تخفیف طبق (۷۰) محاسبه می‌شود.

$$PC_{spl} = BP_p(1 - \delta_{spl}) \quad (70)$$

آستانه فعال‌سازی هر سطح تخفیف نیز بر اساس درصدی از ظرفیت کل تأمین‌کننده در افق برنامه‌ریزی از رابطه (۷۱) تعیین می‌گردد، تا مقیاس ارزیابی متناسب با اندازه تأمین‌کننده باشد.

¹ Capacity and Allocation Constraints

² Vehicle Routing Constraints

³ Time and Cross-Docking Coordination Constraints

⁴ Product Freshness and Model Structure Constraints

$$Q_{spl} = Ratio_l \times \sum_{t \in T} Cap_{spt} \quad (71)$$

یافته‌ها

در این بخش، کارایی مدل ریاضی و الگوریتم‌های فراابتکاری ارزیابی می‌شود. ابتدا مدل در ابعاد کوچک با روش دقیق اعتبارسنجی شده، سپس پارامترهای الگوریتم‌ها تنظیم و در نهایت عملکرد آن‌ها در مسائل با ابعاد مختلف تحلیل می‌شود. به منظور صحت‌گذاری بر مدل ریاضی و بررسی کیفیت جواب‌های الگوریتم‌های توسعه‌یافته، یک مسئله نمونه با ابعاد کوچک (۳ تأمین‌کننده، ۴ مشتری، ۴ محصول و ۳ دوره زمانی) طراحی و توسط نرم‌افزار گمز (حل‌کننده سیپلکس) با رویکرد محدودیت اپسیلون تقویت شده حل شده است. نتایج مرز پارتو در جدول ۵ نشان می‌دهد که میان توابع هدف تضاد وجود دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش سود، میزان ریسک نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۵. مجموعه جواب‌های غیرمغلوب حاصل از حل دقیق GAMS

ردیف	تابع هدف اول: سود (تومان)	تابع هدف دوم: ریسک
۱	۱۵۵/۵۶۷/۰۰۰	۲/۰۰۰
۲	۱۶۱/۵۹۶/۰۰۰	۲/۱۰۰
۳	۱۶۷/۵۸۶/۰۰۰	۲/۲۰۰
۴	۱۷۳/۴۷۳/۰۰۰	۲/۳۰۰
۵	۱۷۸/۱۸۲/۰۰۰	۲/۳۸۰
۶	۱۸۰/۹۶۴/۰۰۰	۲/۴۳۰
۷	۱۸۳/۱۲۳/۰۰۰	۲/۴۷۰
۸	۱۸۴/۷۴۳/۰۰۰	۲/۵۰۰
۹	۱۸۷/۴۴۲/۰۰۰	۲/۵۵۰

پس از تولید جبهه پارتوی مرجع با استفاده از روش AUGMECON در محیط GAMS، عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOPSO با استفاده از همان داده‌ها، محدودیت‌ها و شرایط مسئله در محیط Python ارزیابی شد. به منظور کاهش اثر تصادفی بودن الگوریتم‌ها، هر الگوریتم پنج بار به صورت مستقل اجرا گردید. در هر اجرا، مجموعه جواب‌های غیرمغلوب، بهترین مقدار هر تابع هدف، میانگین نتایج، انحراف معیار

و زمان محاسباتی ثبت شد. همچنین، جبهه‌های پارتوی حاصل از الگوریتم‌ها و جبهه پارتوی مرجع AUGMECON از نظر میزان نزدیکی به جبهه مرجع، پراکندگی جواب‌ها و تعداد جواب‌های غیرمغلوب مقایسه شدند.

علاوه بر مقایسه مجموعه جبهه‌های پارتو، به منظور ارائه یک مقایسه عددی نمونه‌ای، جواب متناظر با بیشترین سود از جبهه حاصل از الگوریتم MOPSO با جواب متناظر با بیشترین سود از جبهه پارتوی مرجع AUGMECON مقایسه شد. سود جواب منتخب MOPSO برابر با ۱۷۵/۰۹۰ میلیون تومان و سود جواب منتخب از جبهه پارتوی مرجع برابر با ۱۸۷/۴۴۲ میلیون تومان بود. بر این اساس، سود جواب منتخب از جبهه مرجع نسبت به جواب متناظر در MOPSO حدود ۷/۰۵ درصد بیشتر بود.

ریسک جواب متناظر با بیشترین سود در جبهه MOPSO برابر با ۲/۸۸۰۴۳ و ریسک جواب متناظر با بیشترین سود در جبهه مرجع برابر با ۲/۵۵۰ بود. بنابراین، در این مقایسه، ریسک جواب منتخب از جبهه مرجع حدود ۱۱/۴۶ درصد کمتر از ریسک جواب منتخب MOPSO بود. با این حال، باید توجه داشت که این مقایسه صرفاً میان دو جواب متناظر با بیشترین سود در جبهه‌های پارتوی مربوطه انجام شده است؛ بنابراین، نتایج آن تنها تفاوت این دو جواب را از نظر سود و ریسک نشان می‌دهد و نمی‌توان بر اساس آن درباره کمترین ریسک یا عملکرد کلی الگوریتم‌ها نتیجه‌گیری کرد (جدول ۶).

جدول ۶. مقایسه نتایج بهترین جواب حل دقیق و الگوریتم‌های فراابتکاری در مسئله نمونه

شاخص عملکرد	پایتون (الگوریتم)	روش دقیق گمز	درصد اختلاف
(MOPSO)			
سود کل (میلیون تومان)	۱۷۵/۰۹۱	۱۸۷/۴۲۲	۷/۰۵٪
شاخص ریسک	۲/۸۸۰	۲/۵۵۰	۱۱/۴۶٪

عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری به شدت به مقادیر پارامترهای آن‌ها وابسته است. برای اطمینان از مقایسه عادلانه، پارامترهای الگوریتم‌ها با استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی تنظیم شدند. برای ارزیابی کیفیت هر ترکیب، یک متغیر پاسخ ترکیبی^۱ متشکل از میانگین وزنی شاخص‌های تعداد جواب‌های غیرمغلوب^۲، گستردگی جبهه^۳، یکنواختی توزیع^۴ و

^۱ Composite Response

^۲ Number of Non-Dominated Solutions (NNDS)

^۳ Maximum Spread (MS)

^۴ Spacing Metric (SP)

زمان اجرا^۱ تعریف شد. پس از تحلیل نسبت سیگنال به نویز^۲ و بررسی اثرات اصلی، مقادیر بهینه پارامترها مطابق جدول ۷ تعیین گردید.

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO، به ترتیب از آرایه‌های متعامد L_9 و L_{27} استفاده شد. پارامترهای این الگوریتم‌ها با استفاده از شاخص پاسخ R_i و نسبت سیگنال به نویز متناظر (S/N) تنظیم شدند. در الگوریتم NSGA-II، سطوح بهینه عوامل بر اساس بیشینه‌سازی میانگین R_i و S/N یکسان به دست آمدند. باین حال، در الگوریتم MOPSO، برای پارامتر اندازه جمعیت (nPop)، نتایج حاصل از این دو معیار متفاوت بود؛ به گونه‌ای که بیشترین میانگین R_i در سطح اول و بیشترین مقدار S/N در سطح سوم مشاهده شد. برای تعیین سطح نهایی این پارامتر، تحلیل واریانس یک طرفه و آزمون مقایسات چندگانه توکی انجام شد. مقدار P-Value برابر با ۰/۳۰۹ بزرگ‌تر از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ به دست آمد؛ بنابراین، فرض برابری میانگین سطوح مختلف رد نشد و اثر اندازه جمعیت بر شاخص R_i از نظر آماری معنادار نبود. همچنین، نتایج آزمون توکی نشان داد که سطوح اندازه جمعیت شامل ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ در یک گروه آماری قرار دارند. از این رو، با توجه به نبود تفاوت معنادار میان سطوح و به منظور کاهش بار محاسباتی، سطح اول، یعنی $nPop = 100$ ، به عنوان مقدار بهینه اندازه جمعیت در الگوریتم MOPSO انتخاب شد.

جدول ۷. مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری بر اساس روش تاگوچی

الگوریتم	اندازه جمعیت	احتمال تقاطع	احتمال جهش	اندازه مخزن	وزن ایترسی	ضریب یادگیری شخصی	ضریب یادگیری اجتماعی
NSGA-II	۱۵۰	۰/۸۰	۰/۱۵	-	-	-	-
MOPSO	۱۰۰	-	-	۵۰	۰/۸۰	۱/۵۰	۱/۵۰

در اجرای نهایی، هر دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO در هر اجرا به مدت حداکثر ۱۰۰ تکرار اجرا شدند و معیار توقف، رسیدن به حداکثر ۱۰۰ تکرار، بدون وجود شرط توقف زودهنگام، در نظر گرفته شد. برای هر الگوریتم نیز ۵ اجرای مستقل انجام گرفت. جمعیت اولیه در هر دو الگوریتم به صورت تصادفی و یکنواخت در بازه‌های VarMin و

^۱ Computational Time / CPU Time

^۲ Signal-to-Noise Ratio (S/N)

VarMax تولید شد. همچنین، قواعد برخورد با جواب‌های ناممکن در تابع ارزیابی برای هر دو الگوریتم یکسان بود؛ به این صورت که مقادیر خروجی به تقاضای مربوطه محدود شده و در صورت بیشتر بودن مجموع خروجی از مجموع عرضه، جواب به صورت تناسبی اصلاح شد.

سازوکار ذخیره‌سازی جواب‌های غیرمغلوب مطابق ساختار اختصاصی هر الگوریتم اجرا شد؛ به طوری که در NSGA-II از مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحام، و در MOPSO از مخزن جواب‌های غیرمغلوب استفاده شد. شایان ذکر است که اندازه جمعیت در NSGA-II برابر ۱۵۰ و در MOPSO برابر ۱۰۰ بود؛ بنابراین، تعداد تکرارها و اجراهای مستقل یکسان بود، اما تعداد ارزیابی‌های تابع هدف در هر اجرا دقیقاً برابر نبود. بر این اساس، عملکرد دو الگوریتم با شرایط توقف و تعداد اجراهای یکسان و با گزارش معیارهای عملکرد و زمان اجرای محاسباتی مقایسه شد.

برای ارزیابی رفتار مدل، ۱۵ مسئله نمونه در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ طراحی و اجرا شد. داده‌های ورودی شامل ظرفیت‌ها، قیمت‌ها، هزینه‌های لجستیکی و ریسک‌های عملیاتی براساس اطلاعات بازار محصولات فاسدشدنی و مراجع رسمی تنظیم شدند. پس از تنظیم پارامترها با استفاده از روش تاگوچی، الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO به منظور ارزیابی عملکرد، در پنج اجرای مستقل و با ۱۰۰ تکرار در هر اجرا به کار گرفته شدند. خروجی‌های حاصل براساس شاخص‌های تعداد جواب‌های غیرمغلوب (NPF/C3)، گستردگی جبهه پارتو (MSI/C4)، یکنواختی جواب‌ها (SP/C5)، زمان محاسباتی (TIME/C6) و همچنین میانگین مقادیر توابع هدف، شامل سود (C1) و ریسک (C2) تحلیل شدند. نتایج نهایی در جدول ۸ گزارش شده است.

در بخش اعتبارسنجی مدل، به منظور ارزیابی میزان نزدیکی جواب حاصل از الگوریتم به جواب بهینه، بهترین جواب به دست آمده با نتایج حاصل از حل دقیق در نرم‌افزار گمز مقایسه شد. با این حال، در بخش مقایسه الگوریتم‌ها، با توجه به ماهیت تصادفی این روش‌ها، نتایج براساس میانگین پنج اجرای مستقل گزارش شدند تا پایداری و قابلیت اعتماد عملکرد الگوریتم‌ها ارزیابی شود.

در هر اجرای مستقل، ابتدا جواب‌های امکان‌پذیر شناسایی و سپس جبهه پارتوی نهایی شامل جواب‌های غیرمغلوب استخراج شد. میانگین سود و ریسک با استفاده از تمامی

جواب‌های موجود در جبهه پارتوی نهایی همان اجرا محاسبه گردید. سپس، برای هر الگوریتم، میانگین مقادیر حاصل از اجراهای مستقل گزارش شد. بنابراین، هر اجرای مستقل وزن یکسانی داشته و تعداد متفاوت جواب‌های غیرمغلوب در اجراهای مختلف موجب وزن‌دهی نامتوازن به نتایج نشده است.

میانگین سود و ریسک در این پژوهش شاخصی توصیفی از عملکرد کلی جبهه پارتو است و الزاماً نشان‌دهنده یک جواب اجرایی منفرد نیست. در صورت نیاز به انتخاب یک جواب مشخص، تصمیم‌گیرنده می‌تواند حداکثر ریسک قابل قبول R_{max} را تعیین کند و از میان جواب‌های غیرمغلوب که شرط $Risk(x) \leq R_{max}$ را برآورده می‌کنند، جوابی را انتخاب نماید که بیشترین مقدار سود را دارد.

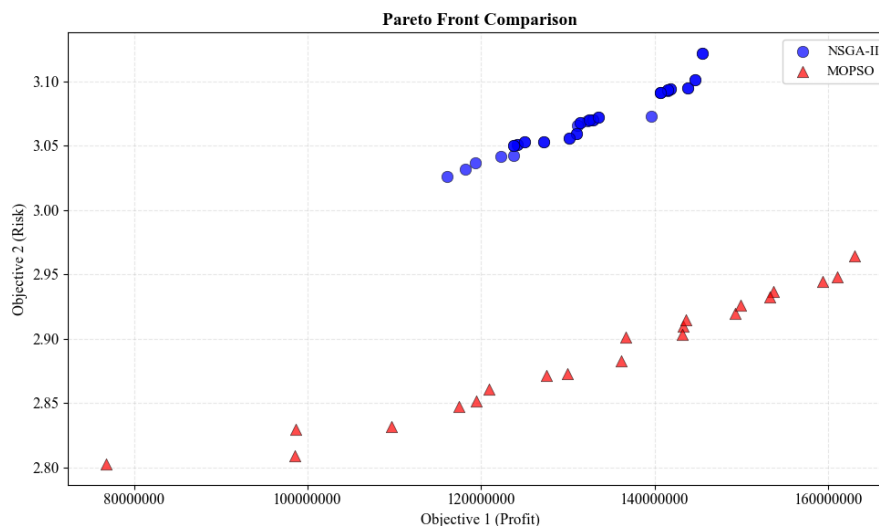
جدول ۸. میانگین شاخص‌های عملکردی الگوریتم‌ها در حل ۱۵ مسئله نمونه

الگوریتم	میانگین تابع اول (سود)	میانگین تابع دوم (ریسک)	تعداد جواب‌های غیر مغلوب	گسترده‌گی جبهه پارتو	یکنواختی اجرا (ثانیه)	زمان اجرا
NSGA-II	۳/۰۲۵/۶۶۰/۷۲۱	۳/۵۴	۵۰/۷۳	۲۵۹/۳۲۷/۲۲۰	۱۱/۶۹۶/۲۳۳	۴۸۷/۶۷
MOPSO	۳/۷۰۲/۱۹۷/۲۳۸	۳/۳۶	۱۰/۹۶	۲۹۷/۰۲۵/۴۲۷	۲۵/۲۲۵/۵۸۴	۲۱۰/۰۶

تحلیل یافته‌های جدول ۸ نشان می‌دهد که الگوریتم MOPSO از نظر زمان اجرا، زمان محاسباتی کمتری داشته و برای مسائل با ابعاد بزرگ، کارایی زمانی بالاتری ارائه می‌دهد. در مقابل، الگوریتم NSGA-II با تولید تعداد بیشتری جواب کارا، برخورداری از مقدار بالاتر شاخص گسترده‌گی جبهه پارتو و مقدار پایین‌تر شاخص یکنواختی، عملکرد بهتری در تشکیل جبهه پارتویی گسترده و یکنواخت ارائه می‌کند. از این رو، NSGA-II گزینه‌های متنوع‌تر و متوازن‌تری را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد.

شکل ۲، نمونه‌ای از تقابل توابع هدف و جبهه پارتوی تشکیل شده توسط الگوریتم‌ها را در یکی از مسائل نمونه نشان می‌دهد.

شکل ۲. جبهه پارتو حاصل از حل مسئله سائز کوچک با الگوریتم NSGA-II و الگوریتم MOPSO



اجرای مدل در مسائل گوناگون، تعامل پیچیده میان توابع هدف متضاد و متغیرهای سیستم را آشکار ساخت. به منظور ارزیابی میزان استحکام و قابلیت اتکای نتایج مدل، تحلیل حساسیت بر روی مسئله نمونه شماره ۶ و با تمرکز بر پارامترهای کلیدی شامل ضریب ریسک فساد، آستانه‌های تخفیف، ضرایب جریمه کمبود، پنجره زمانی و عمر قفسه‌ای انجام شد. این پارامترها، به ترتیب، بیانگر شدت ریسک کاهش کیفیت محصولات، شرایط فعال شدن سیاست‌های تخفیف، اهمیت اقتصادی تأمین‌نشدن تقاضا، محدودیت‌های زمانی عملیات و ماندگاری محصولات فاسدشدنی هستند. تغییر در هر یک از این عوامل می‌تواند بر تصمیم‌های مربوط به موجودی، قیمت‌گذاری، سفارش‌دهی، تخصیص، سطح خدمت، میزان کمبود و ضایعات اثرگذار باشد و در نهایت، ساختار سود، ریسک و کیفیت جواب‌های حاصل از مدل را تغییر دهد. از این رو، تحلیل حساسیت حاضر با هدف شناسایی پارامترهای اثرگذار، بررسی پایداری راه‌حل‌های مدل در شرایط مختلف و تبیین نحوه واکنش سیستم به تغییرات محیطی و مدیریتی انجام شده است.

به منظور بررسی پاسخ مدل به تغییر سناریوهای مرتبط با ضریب فساد، مسئله ۶ در سه وضعیت سهل‌گیرانه، پایه و سخت‌گیرانه با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO ارزیابی شد. بر اساس اطلاعات تعداد تکرارهای آزمایش، نتایج هر ترکیب الگوریتم-سناریو

به صورت میانگین و انحراف معیار پنج اجرا گزارش شد. سناریوی پایه مبنای محاسبه تغییرات نسبی شاخص‌های عملکرد قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار تابع هدف ریسک نسبت به سود پاسخ محسوس‌تری به تغییر سناریو دارد. در NSGA-II، انتقال از پایه به سهل‌گیرانه با کاهش ۲۳/۶۹ درصدی در ریسک و کاهش ۰/۵۴ درصدی سود همراه بود؛ در مقابل، در سناریوی سخت‌گیرانه ریسک ۲۳/۳۵ درصد افزایش یافت، درحالی‌که سود تنها ۰/۱۵ درصد بیشتر شد. در MOPSO نیز ریسک در سهل‌گیرانه برابر با ۲۴/۳۷ درصد کاهش و در سخت‌گیرانه برابر با ۲۲/۴۱ درصد افزایش داشت؛ تغییر سود در این دو سناریو به ترتیب برابر با کاهش ۱/۷۴ و ۳/۳۰ درصد بود. بنابراین، در دامنه آزمایش‌شده، تغییرات مقدار ریسک نسبتاً بزرگ و تغییرات سود محدود بوده است.

مقایسه الگوریتم‌ها نشان داد که رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس میانگین سود و ریسک در هر سه سناریو ثابت باقی می‌ماند. MOPSO نسبت به NSGA-II بین ۲۳/۹۲ تا ۲۸/۳۴ درصد سود بیشتر و بین ۶/۶۰ تا ۶/۹۰ درصد ریسک کمتر ارائه کرد. زمان اجرای آن نیز بین ۶۲/۱۲ تا ۶۲/۸۷ درصد کمتر بود. با این حال، این نتایج باید در چارچوب تنظیمات و بودجه محاسباتی آزمایش تفسیر شوند و به‌تنهایی بیانگر برتری ذاتی الگوریتم یا غلبه کامل جبهه پارتو نیستند.

به منظور ارزیابی اثر آستانه تخفیف، عملکرد دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II در سناریوهای پایه، سهل‌گیرانه و سخت‌گیرانه با یکدیگر مقایسه شد. در این تحلیل، افزایش سود، کاهش ریسک، افزایش تعداد جواب‌های غیرمغلوب (NPF) و MSI مطلوب تلقی شده است؛ درحالی‌که در شاخص SP، مقدار کمتر نشان‌دهنده عملکرد بهتر است. نتایج نشان داد که اثر آستانه تخفیف به الگوریتم حل وابسته است و نمی‌توان یک سیاست واحد را بدون توجه به معیار ارزیابی، برتر دانست.

در الگوریتم MOPSO، سناریوی سخت‌گیرانه مطلوب‌ترین نتیجه اقتصادی را ایجاد کرد؛ به‌طوری‌که سود، NPF و MSI، به ترتیب، ۳/۹۰، ۲۴/۱۴ و ۱۱/۱۵ درصد نسبت به حالت پایه افزایش یافتند. این سناریو اگرچه با افزایش جزئی ریسک (۰/۷۳ درصد) همراه بود، مقدار SP را ۳/۴۵ درصد کاهش داد که با توجه به مطلوب بودن مقدار کمتر SP، بهبود محسوب می‌شود. سناریوی سهل‌گیرانه نیز SP و ریسک را به ترتیب ۳/۶۱ و ۰/۰۹ درصد کاهش داد، اما سود و MSI را به ترتیب ۹/۵۰ و ۸/۱۴ درصد تضعیف کرد؛ بنابراین، بهبود

آن در SP نتوانست افت عملکرد اقتصادی را جبران کند. زمان محاسباتی MOPSO در همه سناریوها تقریباً ثابت باقی ماند.

در NSGA-II، سناریوی سخت گیرانه سود و MSI را به ترتیب ۸/۸۵ و ۲۲/۵۵ درصد افزایش داد و NPF نیز ۱/۵۴ درصد بیشتر شد؛ با این حال، ریسک ۱/۳۶ درصد افزایش یافت و SP با رشد شدید ۹۱/۷۸ درصدی، به طور محسوسی نامطلوب تر شد. سناریوی سهل گیرانه نیز سود و NPF را به ترتیب ۴/۸۶ و ۱۸/۰۸ درصد کاهش داد و SP را ۲۰/۰۲ درصد افزایش داد؛ از این رو، از نظر SP و تعداد جواب های غیر مغلوب، حالت پایه برای NSGA-II مناسب تر است.

در مقایسه الگوریتمی، MOPSO در هر سه سناریو سود بیشتر، ریسک کمتر و زمان محاسباتی حدود ۶۱ تا ۶۲ درصد کوتاه تر از NSGA-II داشت؛ در مقابل، NSGA-II تعداد جواب های غیر مغلوب بیشتر و SP پایین تری ارائه کرد. بنابراین، در صورت اولویت سودآوری، کنترل ریسک و کارایی محاسباتی، MOPSO تحت سناریوی سخت گیرانه گزینه برتر است؛ اما اگر کاهش SP و تنوع جواب های غیر مغلوب اهمیت بیشتری داشته باشد، NSGA-II در سناریوی پایه انتخاب مناسب تری خواهد بود.

برای بررسی حساسیت مدل نسبت به جریمه کمبود، سه سطح جریمه شامل ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ در نظر گرفته شد و در هر سطح، پنج اجرای مستقل از الگوریتم های NSGA-II و MOPSO انجام گرفت. تحلیل حاضر بر اساس مقدار پارامتر جریمه انجام می شود؛ زیرا در خروجی برنامه، سناریوی سهل گیرانه با مقدار ۰/۱۵ و سناریوی سخت گیرانه با مقدار ۰/۲۵ گزارش شده است.

نتایج نشان داد که افزایش جریمه کمبود با کاهش سودآوری همراه است. در NSGA-II، سود متوسط از ۱/۳۰۶ میلیارد تومان در سطح ۰/۱۵، به ۱/۲۵۰ میلیارد تومان در حالت پایه و ۱/۱۳۱ میلیارد تومان در سطح ۰/۲۵ کاهش یافت؛ بنابراین، افزایش جریمه از ۰/۱۵ به ۰/۲۵، افت تقریبی ۱۳/۴٪ در سود ایجاد کرد. در MOPSO نیز سود متوسط از ۱/۷۰۳ به ۱/۵۶۱ و سپس به ۱/۴۳۹ میلیارد تومان رسید که نشان دهنده کاهش کلی ۱۵/۵٪ است. این روند بیانگر آن است که جریمه شدیدتر، محدودیت بیشتری بر انتخاب راه حل های سودآور تحمیل می کند.

اثر جریمه بر ریسک محدود بود. ریسک متوسط NSGA-II در بازه ۳/۳۴۸ تا ۳/۳۶۰ و ریسک متوسط MOPSO در بازه ۳/۱۳۴ تا ۳/۱۴۲ قرار داشت. با این حال، MOPSO در هر سه سطح جریمه، سود بالاتر و ریسک کمتری نسبت به NSGA-II به دست آورد. همچنین، میانگین جواب‌های غیرمغلوب NSGA-II از ۶۰/۰۶ در حالت پایه به ۳۶/۴ در سطح جریمه ۰/۲۵ کاهش یافت. این شاخص در MOPSO نیز از ۱۵/۲ در سطح ۰/۱۵ به ۱۱/۶ در سطح ۰/۲۵ رسید. بنابراین، افزایش جریمه موجب کاهش تعداد جواب‌های غیرمغلوب، به‌ویژه در MOPSO، شد. افزون بر این، MOPSO در هر سه سناریو با دستیابی به سود بالاتر و ریسک کمتر، زمان محاسباتی را به حدود ۳۱ تا ۳۳ ثانیه، در مقایسه با ۷۵ تا ۷۷ ثانیه برای NSGA-II، رساند و از کارایی محاسباتی بالاتری برخوردار بود.

شاخص‌های MSI و SP نوسان بیشتری داشتند و روند یکنواختی در برابر تغییر جریمه نشان ندادند. در مجموع، سطح جریمه ۰/۲۵ بیشترین کاهش سودآوری را ایجاد کرد، درحالی‌که سطح پایه ۰/۲۰ مصالحه مناسب‌تری میان سودآوری، ریسک و تعداد جواب‌های غیرمغلوب فراهم ساخت.

برای بررسی اثر انعطاف‌پذیری زمانی، سه سناریوی سخت‌گیرانه، پایه و سهل‌گیرانه، به‌ترتیب با عرض پنجره‌های ۳، ۴ و ۵ ساعت مطابق جدول ۹ ارزیابی شد. برای هر ترکیب الگوریتم-سناریو، پنج اجرای مستقل انجام گرفت.

جدول ۹. نتایج سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت پنجره زمانی

الگوریتم	سخت‌گیرانه	پایه	سهل‌گیرانه
سود NSGA-II (میلیارد تومان)	۱/۴۹۳	۱/۵۱۷	۱/۵۱۴
ریسک NSGA-II	۳/۱۰۱	۳/۰۹۷	۳/۰۹۴
NPF در NSGA-II	۵۱/۴	۴۶/۸	۵۱/۶
سود MOPSO (میلیارد تومان)	۱/۳۰۴	۱/۳۸۷	۱/۴۱۸
ریسک MOPSO	۳/۱۲۲	۳/۱۳۴	۳/۱۲۵
NPF در MOPSO	۳۹/۶	۴۳/۴	۴۵/۲
زمان NSGA-II (ثانیه)	۳۲۳/۶	۴۱۵/۹	۳۱۰/۱
زمان MOPSO (ثانیه)	۱۳۳/۱	۱۳۰/۱	۱۷۷/۶

نتایج نشان می‌دهد اثر پنجره زمانی به الگوریتم حل وابسته است. در NSGA-II، سناریوی پایه با سود متوسط ۱/۵۱۷ میلیارد تومان بهترین عملکرد اقتصادی را دارد؛ به‌گونه‌ای

که نسبت به سناریوی سخت گیرانه ۱/۶۲ درصد افزایش سود ایجاد می کند، اما گسترش بیشتر پنجره در سناریوی سهل گیرانه سود را ۰/۸۹ درصد کاهش می دهد. در مقابل، سود MOPSO با افزایش عرض پنجره زمانی به صورت یکنواخت افزایش یافته و از ۱/۳۰۴ به ۱/۴۱۸ میلیارد تومان می رسد؛ یعنی ۸/۷۴ درصد رشد بین دو حالت سخت گیرانه و سهل گیرانه. این افزایش با رشد NPF از ۳۹/۶ به ۴۵/۲ همراه است و بیانگر دسترسی MOPSO به مجموعه ای گسترده تر از راه حل های غیرمغلوب در پنجره های بازتر است.

ریسک NSGA-II در هر سه سناریو تقریباً ثابت باقی می ماند و از ۳/۱۰۱ به ۳/۰۹۴ کاهش می یابد، درحالی که ریسک MOPSO نوسان محدودی دارد و در سناریوی سهل گیرانه به ۳/۱۲۵ می رسد. بنابراین، NSGA-II در همه سناریوها ضمن دستیابی به سود بیشتر، ریسک کمتری نسبت به MOPSO دارد؛ با این حال، MOPSO از نظر زمان محاسباتی برتری چشمگیری نشان می دهد و حدود ۴۳ تا ۶۹ درصد سریع تر است. در NSGA-II، مقادیر SM و DM با گسترش پنجره زمانی کاهش می یابند (به ترتیب از ۱۰/۵۷ به ۹/۴۷ میلیون و از ۶۱/۶۱ به ۵۶/۵۵ میلیون)، درحالی که در MOPSO کمترین مقادیر این شاخص ها در سناریوی پایه مشاهده می شود. در مجموع، NSGA-II با پنجره زمانی پایه گزینه مناسب برای سود بالا و ریسک کنترل شده است؛ درحالی که MOPSO با پنجره زمانی سهل گیرانه زمانی توصیه می شود که افزایش سود، تنوع جواب ها و سرعت حل، نسبت به هزینه محاسباتی بیشتر، اولویت داشته باشد.

به منظور ارزیابی اثر عمر قفسه ای، یک تحلیل حساسیت تک عاملی با سه ضریب انجام شد: سناریوی سخت گیرانه با ضریب ۰/۷۵، سناریوی پایه با ضریب ۱/۰۰ و سناریوی سهل گیرانه با ضریب ۱/۲۵؛ این ضرایب به ترتیب بیانگر کاهش ۲۵ درصدی، وضعیت مبنا و افزایش ۲۵ درصدی عمر قفسه ای هستند. نتایج میانگین پنج اجرای مستقل نشان داد که MOPSO در هر سه سناریو از نظر سود، ریسک و زمان محاسباتی بر NSGA-II برتری پایدار دارد. سود MOPSO در سناریوهای سخت گیرانه، پایه و سهل گیرانه به ترتیب برابر با ۱/۵۹۶/۳۹۴/۳۱۰، ۱/۵۸۳/۲۹۷/۶۸۹ و ۱/۵۲۱/۱۶۰/۳۰۹ بوده و نسبت به NSGA-II به ترتیب ۲۹/۴۵٪، ۲۹/۶۴٪ و ۲۴/۹۲٪ بیشتر است. همچنین، ریسک MOPSO در هر سه سناریو کمتر بوده و میزان کاهش آن نسبت به NSGA-II بین ۶/۲۶٪ تا ۷/۰۵٪ قرار دارد. برتری زمانی MOPSO از نظر محاسباتی قابل توجه است؛ زمان اجرای آن در مقایسه با

NSGA-II حدود ۶۱/۵۱٪ تا ۷۱/۰۳٪ کمتر بوده و نسبت به تغییر عمر قفسه‌ای تقریباً پایدار باقی مانده است.

از نظر حساسیت نسبت به عمر قفسه‌ای، SP بیشترین نوسان را نشان داد. در MOPSO، افزایش عمر قفسه‌ای موجب کاهش ۳/۹۲ درصدی سود و افزایش ۶۳/۷۷ درصدی SP نسبت به حالت پایه شد؛ در حالی که ریسک تنها حداکثر ۰/۵۳ درصد تغییر کرد و بنابراین تقریباً پایدار بود. در NSGA-II، سود بین ۰/۹۶ درصد افزایش و ۰/۳۰ درصد کاهش، و ریسک تنها حدود ۰/۳۱ درصد تغییر کرد؛ با این حال، SP در سناریوی سخت‌گیرانه ۵۱/۵۵٪ افزایش یافت. واکنش دو الگوریتم از نظر ساختار جبهه پارتو نیز متفاوت بود: NPF در NSGA-II تحت سناریوی سخت‌گیرانه ۲۶/۵۰ درصد افزایش، اما در MOPSO ۱۴/۸۶ درصد کاهش یافت. MSI در MOPSO تحت سناریوی سهل‌گیرانه ۲۰/۳۶ درصد افزایش پیدا کرد، ولی این گسترش جبهه با یکنواختی بهتر همراه نبود؛ زیرا SP نیز به شدت افزایش یافت. بررسی پنج اجرای مستقل نشان داد که سود و ریسک از پایداری مناسبی برخوردارند، در حالی که SP و NPF، به‌ویژه در NSGA-II، به مقداردهی تصادفی حساس‌تر هستند. در مجموع، MOPSO، به‌خصوص در سناریوی سخت‌گیرانه، گزینه‌ای استوارتر از نظر سودآوری، ریسک و زمان حل است؛ اما برای ارزیابی کیفیت جبهه پارتو باید MSI و SP به‌صورت هم‌زمان تفسیر شوند.

در این بخش، پارامترهای رفتاری مدل بر اساس نتایج حاصل از بررسی ۱۵ مسئله نمونه تحلیل می‌شوند. این تحلیل چهار مؤلفه اصلی را دربرمی‌گیرد: پایداری هدفمند ریسک و رفتار «ریسک‌آگاه»، هم‌افزایی قیمت‌گذاری پویا و پنجره طلایی تازگی، اولویت‌بندی موجودی مبتنی بر ارزش با رویکرد ABC و حساسیت شبکه‌ای و اثربخشی سیاست تخفیف خرید عمده. تمرکز تحلیل بر تبیین الگوهای رفتاری مدل و نحوه واکنش آن به تغییرات ریسک، تازگی، ارزش موجودی و سیاست‌های شبکه‌ای است.

بررسی مقادیر تابع هدف دوم نشان داد که میزان کل ریسک شبکه با بزرگ شدن ابعاد مسئله، رفتاری به شدت کنترل‌شده داشته و صرفاً در دامنه محدود منطقی (بین ۲/۹۴ تا ۴/۳۴) نوسان دارد. علیرغم افزایش ۳۰ برابری حجم تبادل کالا در مسائل بزرگ نسبت به مسائل کوچک، ریسک سیستم افزایش تصاعدی نیافته است. مدل به جای رفتار محافظه‌کارانه و «ریسک‌گریز»، رویکردی «ریسک‌آگاه» اتخاذ کرده است؛ به این معنا که با بهره‌گیری از

مفاهیم انبار متقاطع (جلوگیری از رسوب کالا)، «تخصیص بهینه ناوگان» و «خوشه‌بندی مشتریان»، مسافت‌های زائد را حذف کرده و ریسک‌های لجستیکی را در سطح بهینه مهار نموده است. با این حال در بررسی جبهه پارتو، برای دستیابی به قله‌های ماکزیمم سود (استفاده صددرصدی از ظرفیت‌ها و کاهش زمان‌های ایمنی)، پذیرش اندکی افزایش در ریسک اجتناب‌ناپذیر بوده است.

تحلیل اثر عمر قفسه‌ای^۱ نشان داد مدل حساسیت بالایی به افت کیفیت محصولات دارد. استفاده از تابع قیمت‌گذاری وابسته به زمان باعث شد الگوریتم‌ها، زمان‌بندی ورود و خروج کالاها در انبار متقاطع را به گونه‌ای تنظیم کنند که محصولات، به‌ویژه در مسائل بزرگ، در "پنجره طلایی تازگی" (بالاترین کلاس کیفی) به دست مشتری برسند. مدل با پرداخت هزینه حمل‌ونقل اضافی جهت ارسال سریع‌تر، از افت قیمت محصول جلوگیری کرده و این هزینه‌ها را با حاشیه سود حاصل از فروش محصولات کاملاً تازه^۲ جبران نموده است.

نتایج نشان داد مدل نسبت به کلاس‌های کیفی محصولات رفتار متفاوتی دارد؛ به‌طوری‌که با اولویت‌دهی و تسریع پردازش محصولات حساس (کلاس A) از افت کیفیت و جریمه‌ها جلوگیری می‌کند. در مقابل، از محصولات با ماندگاری بالاتر و ارزش کمتر (کلاس C) برای تکمیل ظرفیت ناوگان و کاهش هزینه‌های ثابت استفاده می‌شود.

جدول ۱۰. تحلیل حساسیت سود و ریسک نسبت به تغییرات ابعاد شبکه و مکانیزم تخفیف

وضعیت ابعاد شبکه	دامنه نوسان سود (تومان)	محدوده تقریبی تقاضا (کیلوگرم)	رشد نسبی سود (نسبت به ابعاد کوچک)	تأثیر بر ریسک
کوچک (مسائل ۱-۳)	۲۸۰ تا ۶۰۰ میلیون	۲۵/۰۰۰ تا ۴۲/۰۰۰	پایه (مبتنا)	نوسان محدود
متوسط (مسائل ۴-۹)	۶۸۰ میلیون تا ۵/۲ میلیارد	۶۰/۰۰۰ تا ۲۵۰/۰۰۰	۳ تا ۴ برابر	پایدار/ کنترل شده
بزرگ (مسائل ۱۰-۱۵)	۷/۲ میلیارد تا ۳/۱۲ میلیارد	۳۲۰/۰۰۰ تا ۹۴۵/۰۰۰	۱۰ تا ۳۴ برابر	افزایش جزئی

^۱ Shelf-Life

^۲ Premium Price

یکی از مهم‌ترین یافته‌های تحلیلی، تأثیر چشمگیر ترکیب تنوع محصولات و سیاست‌های تشویقی بر سودآوری کل زنجیره است که در جدول ۱۰ خلاصه شده است. با توسعه ابعاد مسئله، سود سیستم به صورت نمایی و جهشی (تا بیش از ۳۴ برابر) رشد کرده است. این رشد انفجاری صرفاً ناشی از افزایش تقاضا نیست؛ بلکه نتیجه مستقیم شکل‌گیری "اقتصاد مقیاس ۱ در بستر انبار متقاطع و فعال‌شدن حد آستانه در مکانیزم "تخفیف خرید پله‌ای" است. افزایش تنوع محصولات (بیشتر از افزایش گره‌های فیزیکی تأمین)، فرصت‌های ادغام بار را به شدت افزایش داده است. علاوه بر این، تقاضای تجمع‌شده در شبکه به سطحی رسیده است که سفارشات حجیم، خریدهای استراتژیک مشمول تخفیف را فعال کرده و با کاهش چشمگیر هزینه نهایی^۲، جهش در تابع هدف اول را رقم زده است.

از آنجا که هیچ‌یک از الگوریتم‌ها در تمام شاخص‌ها برتری مطلق نداشتند، برای ارزیابی نهایی از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس استفاده شد. در این ارزیابی، سود، تعداد جواب‌های غیرمغلوب و گستردگی جبهه پارتو به عنوان معیارهای منفعت در نظر گرفته شدند؛ زیرا افزایش مقدار آن‌ها مطلوب است. در مقابل، ریسک، شاخص یکنواختی جبهه پارتو و زمان اجرا به عنوان معیارهای هزینه در نظر گرفته شدند؛ زیرا کاهش مقدار آن‌ها مطلوب‌تر است.

به منظور مقایسه و رتبه‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری، از روش تاپسیس و شش معیار مکمل استفاده شد. معیارهای انتخاب‌شده به گونه‌ای تعیین شدند که ابعاد اصلی عملکرد الگوریتم‌ها، شامل عملکرد اقتصادی، ریسک، تعداد جواب‌های غیرمغلوب، گستردگی و یکنواختی جبهه پارتو و کارایی محاسباتی را پوشش دهند.

معیارهای مورد استفاده عبارت‌اند از: میانگین تابع هدف اول، یعنی سود؛ میانگین تابع هدف دوم، یعنی ریسک؛ تعداد جواب‌های غیرمغلوب؛ گستردگی جبهه پارتو؛ یکنواختی جبهه پارتو؛ و زمان اجرا. سود و ریسک، اهداف اصلی مسئله را نشان می‌دهند. تعداد جواب‌های غیرمغلوب و گستردگی جبهه پارتو، توانایی الگوریتم را در تولید و پوشش جواب‌های غیرمغلوب ارزیابی می‌کنند. شاخص یکنواختی، نحوه توزیع جواب‌ها در جبهه پارتو را نشان می‌دهد و زمان اجرا نیز هزینه محاسباتی الگوریتم را اندازه‌گیری می‌کند.

¹ Economies of Scale

² Marginal Cost

جدول ۱۱ معیارهای ارزیابی، نوع معیار، جهت مطلوبیت و وزن اختصاص یافته به هر معیار را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱. معیارهای ارزیابی، نوع معیار، جهت مطلوبیت و وزن اختصاص یافته به هر معیار

معیار	نماد	نوع معیار	جهت مطلوبیت	وزن
میانگین تابع هدف اول؛ سود	Profit یا c_1	منفعت	بیشتر بهتر است	۰/۳۵
میانگین تابع هدف دوم؛ ریسک	Risk یا c_2	هزینه	کمتر بهتر است	۰/۳۵
تعداد جواب‌های غیرمغلوب	NPF یا c_3	منفعت	بیشتر بهتر است	۰/۱۰
گسترده‌گی جبهه پارتو	MSI یا c_4	منفعت	بیشتر بهتر است	۰/۱۰
یکنواختی جبهه پارتو	SP یا c_5	هزینه	کمتر بهتر است	۰/۰۵
زمان اجرا	TIME یا c_6	هزینه	کمتر بهتر است	۰/۰۵

در اینجا، منظور از معیار منفعت، معیاری است که افزایش مقدار آن مطلوب‌تر است و منظور از معیار هزینه، معیاری است که کاهش مقدار آن مطلوب‌تر است. این نام‌گذاری صرفاً به جهت مطلوبیت معیارها مربوط است و ارتباطی با مثبت یا منفی بودن علامت عددی مقادیر شاخص‌ها ندارد.

اوزان معیارها بر اساس اولویت‌های مسئله و ملاحظات کارشناسی تعیین شدند. در تعیین اوزان، ماهیت محصولات فاسدشدنی و اهمیت هم‌زمان سودآوری و کنترل ریسک مورد توجه قرار گرفت. از این‌رو، سود و ریسک، به دلیل ارتباط مستقیم با عملکرد اقتصادی و پایداری تصمیم‌های زنجیره تأمین، بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند و وزن هر کدام برابر با ۰/۳۵ در نظر گرفته شد.

تعداد جواب‌های غیرمغلوب و گسترده‌گی جبهه پارتو، هر کدام با وزن ۰/۱۰، برای ارزیابی توانایی الگوریتم در تولید جواب‌های غیرمغلوب و پوشش مناسب فضای جواب در نظر گرفته شدند. شاخص یکنواختی جبهه پارتو نیز با وزن ۰/۰۵ وارد مدل شد تا نحوه توزیع جواب‌ها و میزان پراکندگی یا تمرکز نامناسب آن‌ها در بخش خاصی از جبهه پارتو ارزیابی شود. در این شاخص، مقدار کمتر SP نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر جواب‌ها و عملکرد

بهرتر الگوریتم است. زمان اجرا نیز با وزن ۰/۰۵ در نظر گرفته شد تا کارایی محاسباتی الگوریتم‌ها در رتبه‌بندی نهایی لحاظ شود.

بدین ترتیب، در پژوهش حاضر، یکنواختی به‌عنوان شاخص کیفیت توزیع جواب‌ها در جبهه پارتو و زمان اجرا به‌عنوان شاخص کارایی محاسباتی در نظر گرفته شده است. وزن کمتر زمان اجرا به این دلیل است که در مسئله مورد بررسی، سودآوری و کاهش ریسک، به‌ویژه با توجه به فاسدشدنی بودن محصولات، اهمیت بیشتری از سرعت محاسباتی دارند. با این حال، زمان اجرا حذف نشده و به‌عنوان یکی از معیارهای مکمل کارایی الگوریتم در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شده است.

بردار اوزان به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sum_{j=1}^6 w_j = 0.35 + 0.35 + 0.10 + 0.10 + 0.05 + 0.05 = 1$$

همان‌گونه که در جدول ۱۲ نشان داده شده است، معیارهای سود و ریسک در مجموع ۷۰ درصد وزن ارزیابی را تشکیل می‌دهند؛ زیرا این دو معیار مستقیماً با اهداف اصلی کسب‌وکار و پایداری تصمیم‌های زنجیره تأمین مرتبط هستند.

جدول ۱۲. ماتریس تصمیم اولیه و اوزان معیارهای مقایسه الگوریتم‌ها

الگوریتم	میانگین تابع هدف اول؛ سود	میانگین تابع هدف دوم؛ ریسک	تعداد جواب‌های غیرمغلوب	گسترده‌گی MSI	یکنواختی SP	زمان اجرا (ثانیه)
NSGA-II	۳/۰۲۵/۶۶۰/۷۲۱	۳/۵۴	۵۰/۷۳	۲۵۹/۳۲۷/۲۲۰	۱۱/۶۹۶/۲۳۳	۴۸۷/۶۷
MOPSO	۳/۷۰۲/۱۹۷/۲۳۸	۳/۳۶	۱۰/۹۶	۲۹۷/۰۲۵/۴۲۷	۲۵/۲۲۵/۵۸۴	۲۱۰/۰۶
وزن	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۵
نوع معیار	منفعت	هزینه	منفعت	منفعت	هزینه	هزینه

بر اساس جدول ۱۲، معیارهای سود، تعداد جواب‌های غیرمغلوب و گسترده‌گی جبهه پارتو از نوع منفعت هستند؛ بنابراین مقدار بیشتر آن‌ها مطلوب‌تر است. در مقابل، معیارهای ریسک، یکنواختی جبهه پارتو و زمان اجرا از نوع هزینه هستند؛ بنابراین مقدار کمتر آن‌ها مطلوب‌تر است.

ماتریس تصمیم اولیه با استفاده از نرمال سازی برداری به ماتریس نرمال شده تبدیل شد. نرمال سازی برداری از رابطه (۷۲) محاسبه می شود.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (72)$$

در این رابطه، x_{ij} مقدار اولیه معیار j برای الگوریتم i ، و r_{ij} مقدار نرمال شده آن است. سپس ماتریس نرمال شده وزن دار از رابطه (۷۳) به دست آمد.

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (73)$$

پس از تعیین ماتریس نرمال شده وزن دار، راه حل ایده آل مثبت و راه حل ایده آل منفی با توجه به نوع معیارها تعیین شدند. برای معیارهای منفعت، بیشترین مقدار به عنوان وضعیت مطلوب و کمترین مقدار به عنوان وضعیت نامطلوب در نظر گرفته شد. در مقابل، برای معیارهای هزینه، کمترین مقدار وضعیت مطلوب و بیشترین مقدار وضعیت نامطلوب را نشان می دهد.

فاصله هر الگوریتم از راه حل های ایده آل مثبت و منفی به ترتیب با D_i^+ و D_i^- نمایش داده می شود. شاخص نزدیکی نسبی نیز از رابطه (۷۴) محاسبه شد.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (74)$$

که در آن، D_i^+ فاصله الگوریتم i از راه حل ایده آل مثبت و D_i^- فاصله آن از راه حل ایده آل منفی است. هرچه مقدار CC_i بزرگ تر باشد، الگوریتم به راه حل ایده آل نزدیک تر بوده و عملکرد کلی مطلوب تری دارد.

جدول ۱۳. نتایج رتبه بندی نهایی الگوریتم ها

رتبه	الگوریتم	D_i^+	D_i^-	CC_i	نتیجه
۱	NSGA-II	۰/۰۵۸	۰/۰۸۰	۰/۵۷۹۷	بهترین
۲	MOPSO	۰/۰۸۰	۰/۰۵۸	۰/۴۲۰۳	—

مطابق جدول ۱۳، الگوریتم NSGA-II با مقدار شاخص نزدیکی نسبی $CC_i = ۰/۵۷۹۷$ رتبه اول را کسب کرد و الگوریتم MOPSO با مقدار $CC_i = ۰/۴۲۰۳$ در رتبه دوم قرار گرفت.

بررسی مقادیر جدول ۱۳ نشان می‌دهد که MOPSO در معیارهای سود، ریسک، گستردگی جبهه پارتو و زمان اجرا عملکرد بهتری دارد؛ به طوری که سود و گستردگی بیشتری، ریسک کمتر و زمان اجرای کوتاه‌تری ارائه می‌کند. در مقابل، NSGA-II از نظر تعداد جواب‌های غیرمغلوب عملکرد بهتری دارد و مقدار کمتر شاخص SP در آن نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر جواب‌ها در جبهه پارتو است.

بنابراین، رتبه اول NSGA-II به معنای برتری آن در تمامی معیارها نیست، بلکه حاصل ارزیابی هم‌زمان همه معیارها و اثرگذاری اوزان اختصاص یافته به آن‌ها در چارچوب تاپسیس است. با وجود برتری MOPSO در برخی معیارهای مهم، از جمله سود، ریسک و زمان اجرا، عملکرد بهتر NSGA-II در تعداد جواب‌های غیرمغلوب و یکنواختی جبهه پارتو موجب شده است که فاصله آن از راه‌حل ایده‌آل مثبت کمتر و شاخص نزدیکی نسبی آن بیشتر باشد. در نتیجه، NSGA-II بر اساس ارزیابی چندمعیاره انجام شده، به عنوان الگوریتم برتر انتخاب شد.

این رتبه‌بندی صرفاً بر اساس یک معیار منفرد انجام نشده است، بلکه نتیجه ارزیابی هم‌زمان سود، ریسک، تعداد جواب‌های غیرمغلوب، گستردگی و یکنواختی جبهه پارتو و زمان اجراست.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای یکپارچه‌سازی تصمیم‌های لجستیکی و اقتصادی در زنجیره تأمین سه سطحی محصولات فاسدشدنی ارائه کرد. در این مدل، جریان محصولات از تأمین‌کنندگان به انبار متقاطع و سپس به مشتریان، همراه با تصمیم‌های خرید، تخصیص، مسیریابی ناوگان ناهمگن، زمان‌بندی، قیمت‌گذاری وابسته به تازگی، تخفیف خرید حجمی، پنجره‌های زمانی نرم، کمبود تقاضا و ریسک عملیاتی به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شد. هدف نخست مدل، بیشینه‌سازی سود خالص شبکه و هدف دوم، کمینه‌سازی ریسک ناشی از فساد محصول و عملیات حمل‌ونقل بود. از این منظر، پژوهش حاضر با عبور از رویکردهای جزیره‌ای رایج در ادبیات، تعامل میان

تصمیم‌های عملیاتی و اقتصادی را در یک چارچوب واحد تحلیل می‌کند؛ موضوعی که در مطالعات پیشین، از جمله Ebrahimi et al. (2023)، Theophilus et al. (2021)، Pakzad et al. (2025) و Mola Yousefi et al. (2026) عمدتاً به صورت جزئی بررسی شده است.

نتایج حل دقیق نمونه کوچک، وجود مصالحه معنادار میان سود و ریسک را تأیید کرد. سود از ۱۵۵/۵۶۷ میلیون تومان در کم‌ریسک‌ترین جواب به ۱۸۷/۴۴۲ میلیون تومان در سودآورترین جواب افزایش یافت، درحالی که ریسک از ۲/۰۰ به ۲/۵۵ رسید. این یافته نشان می‌دهد که دستیابی به سود بالاتر مستلزم پذیرش سطحی از ریسک اضافی، استفاده فشرده‌تر از ظرفیت حمل، کاهش زمان‌های ایمنی یا انتخاب سیاست‌های سریع‌تر است. بنابراین، مدل پیشنهادی رفتاری ریسک‌آگاه دارد و نه کاملاً ریسک‌گریز؛ یعنی برای هر سطح از سود، گزینه‌ای با ریسک کنترل‌شده ارائه می‌دهد. چنین نتیجه‌ای با ماهیت زمان‌حساس محصولات فاسدشدنی و یافته‌های (Theophilus et al. (2021)، Taheri and Taft (2024)، و Wang et al. (2026) هم‌راستا است. از این رو، انتخاب جواب نهایی نباید تنها بر اساس بیشینه‌سازی سود انجام شود، بلکه لازم است حد قابل قبول ریسک نیز در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شود.

مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO در ۱۵ مسئله نمونه نشان داد که عملکرد آن‌ها به معیار ارزیابی وابسته است. MOPSO از نظر سود متوسط، ریسک متوسط، گستردگی جبهه پارتو و زمان محاسباتی عملکرد بهتری داشت؛ به طوری که سود متوسط آن ۳/۷۰۲ میلیارد تومان، ریسک متوسط آن ۳/۳۶ و زمان اجرای متوسط آن ۲۱۰/۰۶ ثانیه بود. در مقابل، سود متوسط NSGA-II برابر با ۳/۰۲۵ میلیارد تومان، ریسک متوسط آن ۳/۵۴ و زمان اجرای متوسط آن ۴۸۷/۶۷ ثانیه گزارش شد. با این حال، NSGA-II به طور متوسط ۵۰/۷۳ جواب غیرمغلوب در برابر ۱۰/۹۶ جواب برای MOPSO تولید کرد و مقدار SP پایین‌تری داشت؛ بنابراین، از نظر تنوع و یکنواختی جواب‌های پارتو عملکرد مطلوب‌تری نشان داد. این تفاوت را می‌توان به سازوکار جست‌وجوی دو الگوریتم نسبت داد: MOPSO با استفاده از سرعت ذرات، حافظه خارجی و رهبران، سریع‌تر به نواحی با کیفیت همگرا می‌شود، درحالی که NSGA-II با تکیه بر مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحام، تنوع جواب‌ها را بهتر حفظ می‌کند. بر این اساس، MOPSO برای تصمیم‌های عملیاتی با تأکید

بر سرعت حل و سودآوری و NSGA-II برای تحلیل‌های راهبردی و بررسی طیف متنوعی از سیاست‌های سود-ریسک مناسب‌تر است. رتبه‌بندی TOPSIS نیز با شاخص نزدیکی نسبی ۰/۵۷۹۷ برای NSGA-II و ۰/۴۲۰۳ برای MOPSO نشان داد که نتیجه نهایی به وزن معیارهای ارزیابی وابسته است و نمی‌توان هیچ الگوریتمی را در همه ابعاد، برتر مطلق دانست. تحلیل حساسیت، اهمیت پارامترهای مدیریتی را آشکار کرد. ضریب ریسک فساد بیشترین اثر را بر مقدار ریسک داشت، اما تغییر آن اثر محدودی بر سود ایجاد کرد؛ به گونه‌ای که در NSGA-II، تغییر از سناریوی پایه به سهل‌گیرانه، ریسک را ۲۳/۶۹ درصد کاهش داد، درحالی‌که سود تنها ۰/۵۴ درصد تغییر کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که مدل از طریق تغییر مسیر، تخصیص، زمان تحویل و انتخاب وسیله نقلیه می‌تواند بخشی از اثر اقتصادی تغییر ریسک را جذب کند، اما تغییرات ریسک عملیاتی همچنان قابل توجه باقی می‌ماند. همچنین، افزایش آستانه تخفیف در MOPSO موجب افزایش ۳/۹۰ درصدی سود و ۲۴/۱۴ درصدی تعداد جواب‌های غیرمغلوب شد، درحالی‌که ریسک تنها ۰/۷۳ درصد افزایش یافت. بنابراین، تخفیف حجمی در صورت هماهنگی با ظرفیت حمل‌ونقل، تقاضا و عمر قفسه‌ای می‌تواند ابزار مؤثری برای افزایش سودآوری باشد؛ در غیر این صورت، ممکن است خرید اضافی و کاهش تازگی، منافع حاصل از تخفیف را خنثی کند. افزایش جریمه کمبود از ۰/۱۵ به ۰/۲۵ نیز سود NSGA-II و MOPSO را به ترتیب حدود ۱۳/۴ و ۱۵/۵ درصد کاهش داد، درحالی‌که اثر آن بر ریسک محدود بود. این موضوع بیانگر آن است که جریمه کمبود عمدتاً یک اهرم اقتصادی برای کنترل سطح خدمت است.

یافته‌های مربوط به پنجره زمانی و عمر قفسه‌ای نیز نشان داد که انعطاف‌پذیری بیشتر همیشه به بهبود هم‌زمان همه شاخص‌ها منجر نمی‌شود. پنجره زمانی بازتر در MOPSO سود و تعداد جواب‌های غیرمغلوب را افزایش داد، اما NSGA-II در پنجره پایه عملکرد اقتصادی بهتری داشت. همچنین، افزایش عمر قفسه‌ای در MOPSO با کاهش ۳/۹۲ درصدی سود و افزایش ۶۳/۷۷ درصدی SP همراه شد. این نتیجه تأکید می‌کند که ماندگاری فیزیکی بیشتر محصول الزاماً به معنای سودآوری بیشتر نیست؛ زیرا کاهش تازگی در زمان تحویل می‌تواند قیمت فروش را کاهش دهد. از این رو، عمر قفسه‌ای باید در ارتباط با زمان حمل، سطح تازگی و سیاست قیمت‌گذاری تحلیل شود، نه به عنوان یک پارامتر مستقل.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سهم اصلی این پژوهش، ارائه چارچوبی یکپارچه برای تحلیل هم‌زمان انبار متقاطع، مسیریابی، تازگی، قیمت‌گذاری، تخفیف و ریسک در زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی است. از نظر مدیریتی، سیاست‌های خرید و تخفیف، انتخاب مسیر و وسیله نقلیه، زمان‌بندی تحویل و قیمت‌گذاری باید به‌صورت هماهنگ تعیین شوند.

یکی از محدودیت‌های این پژوهش فرض قطعی بودن تقاضا است؛ بنابراین توسعه مدل در شرایط عدم قطعیت با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی استوار یا تصادفی می‌تواند مسیر مناسبی برای تحقیقات آینده باشد. همچنین در نظر گرفتن معیارهای پایداری زیست‌محیطی مانند کاهش انتشار کربن در مسیریابی و بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی دقیق‌تر تقاضا در قیمت‌گذاری از دیگر پیشنهادها برای پژوهشی آینده است.

تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

ORCID

Amir Mola Yousefi



<https://orcid.org/0000-0001-9738-6517>

Vahid Baradaran



<https://orcid.org/0000-0001-5385-629X>

Kaveh Khalili-Damghani



<https://orcid.org/0000-0002-2338-1673>

منابع

۱. ابراهیمی، احمد، الفت، لعیا، امیری، مقصود و تقوی فرد، محمدتقی (۱۴۰۲). طراحی زنجیره تأمین چند دوره‌ای-چندسطحی جهت کالاهای فاسدشدنی با دوره عمر ثابت در شرایط عدم اطمینان، مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۱(۷۰)، ۱۷۲-۱۲۹. <https://doi.org/10.22054/jims.2023.54215.2522>
۲. برادران، وحید و صفری، زهرا (۱۳۹۸). یک مدل مکان‌یابی دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت، مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۷(۵۴)، ۲۲۳-۲۶۲. <https://doi.org/10.22054/jims.2018.21406.1743>

۳. پاکزاد، منا، فاروقی، هیوا و گل محمدی، امیرمحمد، (۱۴۰۴). مکان‌یابی مسیریابی وسائل نقلیه با در نظر گرفتن کالاهای فسادپذیر و به کارگیری فناوری RFID تحت شرایط وجود انبار متقاطع و عدم قطعیت، نشریه پژوهشهای مهندسی صنایع در سیستمهای تولید، ۱۳ (۲۶)، ۷۱-۹۳.
magiran.com/p2941670
۴. حاجی‌زاده ابراهیمی، فاضل و مهتدی محمد مهدی، (۱۴۰۳). مسئله مسیریابی موجودی برای محصولات فاسدشدنی در یک زنجیره تامین حلقه بسته، نشریه اندیشه آماد، ۲۳ (۹۱)، ۱۸۹-۱۹۷.
magiran.com/p2841311
۵. ربیعی، حسن، اعتباری، فرهاد. (۱۴۰۱). ارائه یک مدل ریاضی برای مسئله مکان‌یابی. مسیریابی مواد غذایی فاسدشدنی با در نظر گرفتن وابستگی مصرف سوخت به میزان بار، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۰ (۶۷)، ۱۵۹.
<https://doi.org/10.22054/jims.2020.29472.1983>
۶. صالحی، شیماء، تقوی فرد، محمد تقی، عباس پور اسفدن، قنبر و علیرضایی، ابوتراب (۱۴۰۱). توسعه مدل چندهدفه زنجیره تامین با تقاضای تصادفی: رویکرد بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی و تدوین سناری. مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۰ (۶۶)، ۱۹۷-۲۴۹.
<https://doi.org/10.22054/jims.2022.60801.2654>
۷. علی نژاد، حامد، یعقوبی، سعید و حسینی مطلق، سید مهدی (۱۴۰۱). ارائه یک رویکرد فازی برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره‌های زمانی با استفاده از الگوریتم PSO بهبود یافته (مطالعه موردی شرکت فراورده‌های لبنی رامک)، مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۰ (۶۶)، ۲۵۰-۲۱۵.
<https://doi.org/10.22054/jims.2020.22463.1778>
۸. مرتضوی نیا، سیده تینا و کرباسی علیرضا، (۱۴۰۴). مدل سازی زنجیره تامین محصولات کشاورزی فسادپذیر، نشریه مطالعات کارآفرینی و توسعه پایدار کشاورزی، ۱۲ (۳)، ۳۸-۲۱.
magiran.com/p2948685
۹. مرزبان، شهریار، شفیعی، مرتضی و مظفری، محمدرضا، (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد زنجیره تامین پایدار محصولات فاسد شدنی در صنایع غذایی، مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۱ (۷۰)، ۱۷۳-۲۲۵.
<https://doi.org/10.22054/jims.2023.69469.2806>
۱۰. نیک‌ضمیر، محمد، برادران، وحید و پناهی، یونس (۱۴۰۰). طراحی یک شبکه زنجیره تامین به منظور مدیریت پسماندهای بیمارستانی، مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۹ (۶۰)، ۸۵-۱۲۰.
<https://doi.org/10.22054/jims.2021.40574.2283>

References

11. Acevedo-Chedid, J., Soto, M. C., Ospina-Mateus, H., Salas-Navarro, K., & Sana, S. S. (2023). An optimization model for routing—location of

vehicles with time windows and cross-docking structures in a sustainable supply chain of perishable foods. *Operations management research*, 16(4), 1742-1765. <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00379-8>

12. Baradaran, V. & Akhavan, B. (2019). Determining Number of Withdrawal Kanban Using Bi-Level Optimization and Simulation Approaches, *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 26(2), 156-172. <https://doi.org/10.23055/ijietap.2019.26.2.2709>
13. Chernonog, T. (2020). Inventory and marketing policy in a supply chain of a perishable product. *International Journal of Production Economics*, 219, 259-274. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.06.019>
14. Javanmardan, A., Golpîra, H. & Baradaran, V. (2026). Robust optimization of sustainable circular fruit supply chain under quality and carbon emission considerations, *Food and Bioproducts Processing*, 158, 82-102, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2026.04.011>.
15. Javdan, N., Baradaran, V. & Rashidi Komijan, A. (2026). An economic ordering quantity model for perishable products under stochastic demand and lead time: a case study of blood supply chain, *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 13 (1), 2725248. <https://doi.org/10.1080/23302674.2026.2725248>
16. Koussis, N., & Silaghi, F. (2023). Revenue-sharing and volume flexibility in the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 261, 108845. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108845>
17. Liu, C., & Hou, P. (2024). Dynamic modelling of cold chain logistics services under budget constraints for the delivery of fresh products in an urban area. *Applied mathematical modelling*, 125, 809-835. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.09.019>
18. Mola Yousefi, A., Baradaran, V. & Kalili Damghani, K. (2026). Designing a Perishable Food Supply Chain Model and Analyzing the Financial Risk of Purchase and Distribution, *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 133(1), 119. <https://doi.org/10.22116/jiems.2026.570876.1628>.
19. Monteiro, J. S., Botelho, R. B. A., Zandonadi, R. P., & Araujo, W. M. C. (2023). Is there a convergence between the food classification adopted by Food-Based dietary guidelines and food science and technology?, *Foods*, 12(20), 3824. <https://doi.org/10.3390/foods12203824>
20. Taheri, F., & Taft, A. F. (2024). Reliable scheduling and routing in robust multiple cross-docking networks design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 128, 107466. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107466>
21. Theophilus, O., Dulebenets, M. A., Pasha, J., Lau, Y. Y., Fathollahi-Fard, A. M., & Mazaheri, A. (2021). Truck scheduling optimization at a cold-

- chain cross-docking terminal with product perishability considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107240. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107240>
22. Theyel, G., & Tucci, C. (2024). Risk-sharing and its role in manufacturer's innovation. *Production & Manufacturing Research*, 12(1), 2296051. <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2296051>
 23. Toniolo, S., Russo, I., & Bravo, I. (2024). Integrating product-focused life cycle perspectives in the fresh food supply chain: Revealing intra- and inter-organizational views. *Sustainable Production and Consumption*, 48, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.009>
 24. Wang, X., Liu, X., & Huang, Y. (2026). Optimization of cross-docking for perishable goods considering freshness dynamics. *Operational Research*, 26(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s12351-025-00997-z>
 25. Zareian Beinabadi, Baradaran, V. & Rashidi Komijan, A. (2024). Sustainable supply chain decision-making in the automotive industry: A data-driven approach, *Socio-economic planning sciences*, 95, 101908, <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.101908>
 26. Zareian Beinabadi, H., Baradaran, V. & Rashidi Komeijan, A. (2026). A Robust and Data-Driven Multi-Objective Model for Designing Resilient and Sustainable Auto Parts Supply Chain, *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 10, 2431–2453. <https://doi.org/10.1007/s41660-025-00663-z>.
 27. Zhuang, X., Zhang, Y., Han, L., Jiang, J., Hu, L., & Wu, S. (2023). Two-stage stochastic programming with robust constraints for the logistics network post-disruption response strategy optimization. *Frontiers of Engineering Management*, 10(1), 67-81. <https://doi.org/10.1007/s42524-022-0240-2>.

References [In Persian]

1. Alinezhad, S., Yaghoubi, S. & Hosseini-Motalgh S.M. (2022). A Fuzzy Approach for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery and Time Windows using Improved PSO (Case Study), *Industrial Management Studies*, 20(64), 215-240. [In Persian]. <https://doi.org/10.22054/jims.2020.22463.1778>
2. Baradaran, V. & Safari, Z. (2019). A Bi-Objective Model to Design Closed-Loop Supply Chain Network under Uncertainty, *Industrial Management Studies*, 17(54), 223-262. [In Persian]. <https://doi.org/10.22054/jims.2018.21406.1743>
3. Ebrahimi, A., Olfat, L., Amiri, M. & Taghi Taghavifard, M. (2023). Designing multi period-multi level Supply Chain for Fixed Lifetime Perishable Products under Uncertainty, *Industrial Management Studies*, 21(70), 129-172. [In Persian]. <https://doi.org/10.22054/jims.2023.54215.2522>

4. Hajizadeh Ebrahimi F. & Mohtadi, M.M. (2025). Inventory Routing Problem for Perishable Products in a Closed-Loop Supply Chain, *Journal of Logistics Thought Scientific Publication*, 23(91), 167-189. magiran.com/p2841311. [In Persian].
5. Marzban, S., Shafiee, M. & Mozaffari, M. R. (2023). Performance Evaluation of sustainable supply chain of perishable products in the food industry, *Industrial Management Studies*, 21(70), 173-225. [In Persian]. <https://doi.org/10.22054/jims.2023.69469.2806>
6. Mortazavinia, S.T. & Karbasi, A. (2025). Supply chain modeling of perishable agricultural products, *Journal of Studies in Entrepreneurship and Sustainable Agricultural Development*, 12(3), 21-38. magiran.com/p2948685. [In Persian].
7. Nikzamir, M., Baradaran, V. & Panahi, Y. (2021). A Supply Chain Network Design for Managing Hospital Solid Waste, *Industrial Management Studies*, 19(60), 85-120. [In Persian]. <https://doi.org/10.22054/jims.2021.40574.2283>
8. Pakzad, M., Farughi, H. & Golmohammadi, A. (2025). Vehicle Routing Location Problem with Consideration of Perishable Goods and Use of RFID Technology Subject to Cross-Docking, *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 13(26), 71-93. magiran.com/p2941670. [In Persian]. <https://doi.org/10.22084/ier.2025.30650.2204>
9. Rabiee, H. & Etebari, F. (2023). Presenting a mathematical location-routing model for the perishable products considering dependency of fuel consumption to the vehicle' loading, *Industrial Management Studies*, 20(67), 159-201. [In Persian]. <https://doi.org/10.22054/jims.2020.29472.1983>
10. Salehi, S., Taghi Taghavifard, M., Abbaspour Esfeden, G. & Alirezaee, A. (2022). Development of Multi-Objective Supply Chain Model with Stochastic Demand: An Optimization Approach Based on Simulation and Scenario Development, *Industrial Management Studies*, 20(66), 197-249. [In Persian]. <https://doi.org/10.22054/jims.2022.60801.2654>