

Closed-Loop Supply Chain Design for Glass Containers under Transportation Disruptions

Hamidreza Yazdi¹, Alireza Parvardeh¹, Fatemeh Sabouhi^{2,*}

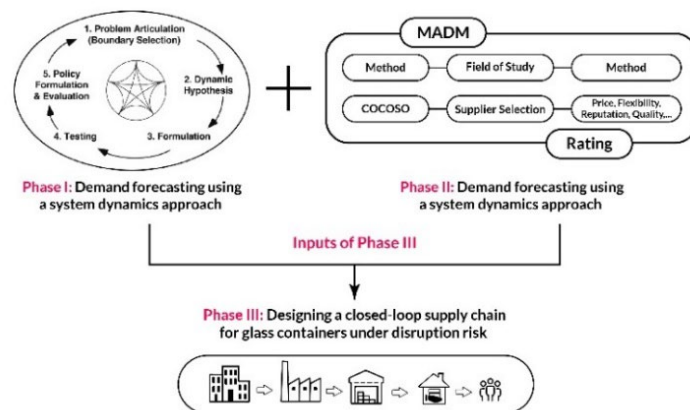
¹M.Sc., School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Assistant Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- System dynamics-based demand forecasting
- Supplier ranking via multi-criteria decision-making
- Two-stage stochastic model for glass supply chain design
- Lateral transshipment to mitigate transport disruptions

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 8 October 2025

Revised: 19 November 2025

Accepted: 30 November 2025

Available online: 3 December 2025

*Correspondence:

fatemehsabouhi@ut.ac.ir

How to cite this article:

Yazdi, H., Parvardeh, A., & Sabouhi, F. (2026). Closed-loop supply chain design for glass containers under transportation disruptions. *System Engineering and Productivity*, 6 (3), 27-49.

Keywords:

Closed-Loop Supply Chain (CLSC)

Two-Stage Stochastic Programming

System Dynamics Approach

Lateral Transshipment

Glass Containers

ABSTRACT

With the rapid rise in the use of glass containers in the food and pharmaceutical industries, demand for a sustainable and efficient packaging supply has increased significantly. At the same time, environmental concerns and regulatory requirements regarding waste recycling have turned the design of glass-container supply chains into a strategic challenge in industrial management. In response, this study proposes a three-phase hybrid approach for designing a closed-loop supply chain for glass containers under transportation-infrastructure disruption risks and uncertainty. In Phase 1, a system dynamics approach is employed to forecast customer demand. In Phase 2, suppliers are ranked using the Combined Compromise Solution (COCOSO) multi-criteria decision-making method. Building upon the outcomes of these phases, Phase 3 develops a multi-product, multi-period stochastic programming model that minimizes the total cost of the glass-container supply chain while determining decisions such as supplier selection, production quantities, transportation flows across echelons, lateral transshipments among distribution centers, recycling, disposal, and shortage management. The proposed model is implemented on three numerical examples, and the results of the sensitivity analysis on the key parameters of the problem are presented.

1. Introduction

Glass containers are among the most common and reliable types of packaging, playing a vital role in preserving the quality, safety, and shelf life of food, beverages, and pharmaceutical products (Pourjavad & Mayorga, 2019; Baptista et al., 2019). Their unique physical and chemical properties make glass a safe and dependable alternative to other packaging materials. Moreover, glass containers are naturally non-toxic, odorless, impermeable, and 100% recyclable without degradation in quality, which not only conserves natural resources but also reduces long-term production costs (Jabbarzadeh et al., 2018). Consequently, glass packaging is widely recognized as a core component of optimized packaging systems in highly sensitive industries. With the growing demand for glass containers across various sectors, the efficient design and management of their supply chains have become increasingly important (Malekpour Kalbadinejad & Bagherinejad, 2023). The supply chain of this product encompasses the procurement of raw materials, production, distribution, collection, recycling, and disposal—each of which requires careful coordination and informed decision-making at different operational levels.

Given the dependence of glass container production on specific raw materials and high energy consumption, adopting a closed-loop supply chain approach can significantly reduce the use of virgin materials, optimize energy consumption, and reintegrate waste into the production cycle, thereby generating considerable economic and environmental benefits (Guide & Van Wassenhove, 2009). This approach integrates both forward and reverse flows and enables a comprehensive management of the product life cycle. Nonetheless, the multi-stage nature of the glass supply chain and its reliance on specialized resources and infrastructure expose it to various types of disruptions (Hassanpour et al., 2023). Challenges such as fluctuations in the supply and price of raw materials, production constraints, and transportation disruptions may increase costs and reduce service quality. Therefore, designing a resilient and flexible supply chain capable of withstanding such disruptions is of paramount importance (Sadjady Naeeni & Sabbaghi, 2022). Disruptions occurring in one part of the chain often propagate downstream, causing instability in production and distribution planning. Accordingly, identifying, characterizing, and analyzing potential disruptions is essential for improving efficiency and mitigating the costs associated with uncertainties (Motavalli et al., 2024).

To address these challenges, this study proposes a three-phase hybrid framework to design a closed-loop supply chain for glass containers:

- First, using the system dynamics approach, a conceptual model of demand behavior is simulated and forecasted.
- Secondly, the CoCoSo multi-criteria decision-making method is applied to evaluate and rank suppliers based on key performance criteria.
- Thirdly, leveraging the outputs of the first two phases, a mixed-integer programming model is developed in the third phase to design the glass container supply chain under disruption risks and uncertainty.

The objective of the model is to minimize total supply chain cost by determining strategic and tactical decisions such as supplier selection, production quantities, transportation flows at different stages, lateral transshipment between distribution centers, recycling, disposal, and unmet demand management.

2. Problem Description

The supply chain examined in this research consists of two main flows: a forward flow that begins with raw material procurement and continues through production until the final product is delivered to customers, and a reverse flow that moves from the production stage toward recycling or waste disposal. The network includes raw material suppliers, manufacturers, sorting centers, recycling facilities, disposal sites, distribution centers, and customers. In the forward flow, raw materials are delivered from suppliers to manufacturers; after production, intact products are shipped to distribution centers and subsequently to end users. At the same time, a portion of the produced items may be defective and is therefore sent to sorting centers, where recyclable and non-recyclable waste streams are separated. Recyclable waste is processed and returned to the production cycle, while non-recyclable waste is directed to disposal facilities.

One of the critical dimensions of this supply chain is the impact of transportation disruptions on the distribution of intact products to customers. These disruptions are modeled using a two-stage stochastic programming approach. In the face of such disruptions, if proper infrastructure for rapid response is not available, the fulfillment of customer demand is interrupted, and the overall efficiency of the supply chain is adversely affected. To manage these disruptions, the model incorporates a lateral transshipment strategy between distribution centers. This mechanism enables the system to redirect products from other distribution centers to the affected customer whenever a problem occurs in a particular center or route, thereby mitigating the impact of the aforementioned supply chain disruptions. The objective of the proposed model is to minimize the total cost of the glass supply chain while determining decisions such as supplier selection, production quantities, transportation

flows at different levels of the supply chain, lateral transshipment, recycling, disposal, and unmet demand management.

3. Methodology

The proposed methodology consists of three integrated phases to design a closed-loop supply chain for glass containers under disruptions.

- Phase 1: Demand Forecasting Using System Dynamics

In the first phase, a system dynamics approach is employed to simulate and forecast customer demand over the planning horizon. A causal loop diagram is developed to represent the feedback-driven relationships among key factors such as product quality, advertising, customer acquisition, and customer churn. This conceptual model is then translated into a stock–flow structure in which “current demand” acts as the main state variable influenced by the inflow of demand rate and the outflow of customer churn. Auxiliary variables—including advertising, product quality, churn rate, and customer acquisition—capture nonlinear, delayed, and accumulative behavioral patterns within the system. The SD model is implemented to generate realistic demand patterns that serve as inputs to the optimization phase.

- Phase 2: Supplier Ranking Using the CoCoSo Method

In the second phase, raw-material suppliers are evaluated using the CoCoSo multi-criteria decision-making method. Since supplier performance affects product quality, recyclability, defect rates, and overall supply chain cost, multiple quantitative and qualitative criteria are incorporated, such as price, delivery time, location, accessibility, quality, serviceability, communication, reputation, and flexibility. The decision matrix is constructed and normalized according to cost- and benefit-type criteria. Three CoCoSo scoring strategies—linear weighted aggregation, exponential weighted aggregation, and a compromise formulation—are applied, and the final supplier scores are computed by integrating these strategies. The top-ranked suppliers identified in this phase are used as input candidates for the optimization model.

- Phase 3: Two-Stage Stochastic Optimization Model

In the third phase, a multi-product, multi-period, two-stage stochastic programming model is developed to design the closed-loop supply chain under transportation disruption scenarios. The first stage determines strategic decisions such as supplier selection, while the second stage addresses tactical decisions including production quantities, transportation flows, defective product flows, recycling, disposal, lateral transshipment between distribution centers, and unmet demand. The objective function minimizes total costs across all

scenarios. The model incorporates capacity constraints, material balance equations, quality-based production ratios, recycling and disposal relationships, and disruption-adjusted demand satisfaction constraints. Lateral transshipment is explicitly included as a resilience mechanism to mitigate the effects of transportation infrastructure disruptions.

4. Results

The simulation results demonstrate that dynamic demand behavior is highly sensitive to product quality, and even modest improvements in quality generate nonlinear increases in customer attraction and retention. Moreover, cumulative improvements in product quality positively influence overall market growth. High-quality products directly enhance customer loyalty, helping to retain existing customers and reduce churn. Also, by incorporating the CoCoSo method into the modeling pipeline, the study ensures that selected suppliers—ranked based on quality, serviceability, flexibility, cost, and logistical accessibility—serve as reliable inputs to the optimization model.

Sensitivity analyses of the production rate of defect-free products (α) and the recyclable-scrap separation rate (β) reveal that both parameters exert strong yet asymmetric influences on total system cost. Improvements in α generate substantial cost reductions due to decreased reliance on virgin materials and lower defect-related handling requirements, while increases in β yield additional but comparatively smaller efficiency gains. The interaction between these parameters is particularly noteworthy: when α is low, enhancing β plays a compensatory role by recovering more material into the production loop; whereas at higher α levels, the marginal benefit of recycling diminishes. These insights suggest that cost-effective decision-making requires a coordinated policy that simultaneously targets quality enhancement and recycling efficiency instead of optimizing either dimension in isolation. Such integrated strategies not only minimize operational costs but also strengthen the long-term viability of the closed-loop system.

5. Conclusion

In this study, a hybrid framework was developed for designing a closed-loop supply chain for glass containers under uncertainty and disruption. In the first phase, customer demand over the planning horizon was forecasted using a system dynamics approach. In the second phase, the CoCoSo multi-criteria decision-making method was employed to evaluate and rank suppliers based on key indicators such as price, flexibility, and delivery time. In the third phase, the outcomes of the first two phases were used as input parameters for a multi-product, multi-period stochastic optimization model. The

objective of this model was to minimize the total supply chain cost under various disruption scenarios. The results obtained from three numerical examples show that the proposed framework effectively integrates demand forecasting, optimal supplier selection, and lateral transshipment as a resilience strategy, thereby reducing total costs while enhancing the flexibility and adaptability of the supply chain in the face of disruptions. The findings also indicate that supply capacity, the rate of producing intact products, and the consideration of lateral transshipment have the greatest influence on supply chain performance.

Managerial insights can be summarized as follows:

- Lateral transshipment between distribution centers can reduce total costs under transportation disruptions; therefore, managers should consider alternative routing strategies when designing the glass container supply chain.
- Employing multiple sourcing options enhances supply chain flexibility in situations involving reduced capacity or disruptions, making it essential to ensure supply continuity during critical conditions.
- Demand is influenced by product quality and consumer behavior. By using system dynamics, managers can assess the impact of marketing policies or quality improvements before implementation, helping to avoid sudden fluctuations in production or inventory.
- Increasing the proportion of intact products lowers total supply chain costs; thus, investing in quality improvement enhances both cost-efficiency and system performance.

Future research directions include:

- Integrating the proposed model with operational decisions such as vehicle routing and scheduling to obtain more realistic estimates of cost and performance.
- Applying data-driven approaches to cluster customers based on demand patterns, geographic location, and disruption risk to design more effective production and distribution policies.
- Considering multiple types of disruptions in facilities and transportation links and developing resilience strategies such as alternative routing, pre-positioned emergency inventory, and backup supplier contracts.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions in writing this article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

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

References

- Baptista, S., Barbosa-Póvoa, A. P., Escudero, L. F., Gomes, M. I., & Pizarro, C. (2019). On risk management of a two-stage stochastic mixed 0-1 model for the closed-loop supply chain design problem. *European Journal of Operational Research*, 274(1), 91–107. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.041>
- Guide, V. D. R., Jr., & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10–18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Hassanpour, H. A., Aliyari, S., Barzegar, H., & Zarei, M. (2023). Modeling supply chain disruption in the apparel supply chain and analyzing its improvement solution with a system dynamics approach. *System Engineering and Productivity*, 3(3), 33–62 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/msb.2023.711489>
- Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.025>
- Malekpour Kolbadinejad, S., & Bagherinejad, J. (2023). Presenting a dual-objective location-inventory model for designing an integrated forward/reverse logistics network. *System Engineering and Productivity*, 3(1), 1–40 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2023.706141>
- Motevalli, S. H., Nazarizadeh, F., & Mir Shahvelayati, F. (2024). Identifying and evaluating strategic options for advancing the resilience of the Kaleh Dairy Company's supply chain. *System Engineering and Productivity*, 3(4), 106–135 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2021449.1176>
- Pourjavad, E., & Mayorga, R. V. (2019). An optimization model for network design of a closed-loop supply chain: A study for a glass manufacturing industry. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 14(3), 169–179.

<https://doi.org/10.1080/17509653.2018.1512387>

7

Sadjady Naeeni, H., & Sabbaghi, N. (2022). Sustainable supply chain network design: A case of the glass manufacturer in Asia. *International Journal of Production Economics*, 248, 108483. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108483>

طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ظروف شیشه‌ای تحت اختلالات حمل‌ونقل

حمیدرضا یزدی^۱، علیرضا پرورده^۱، فاطمه صبحی^{۲*}

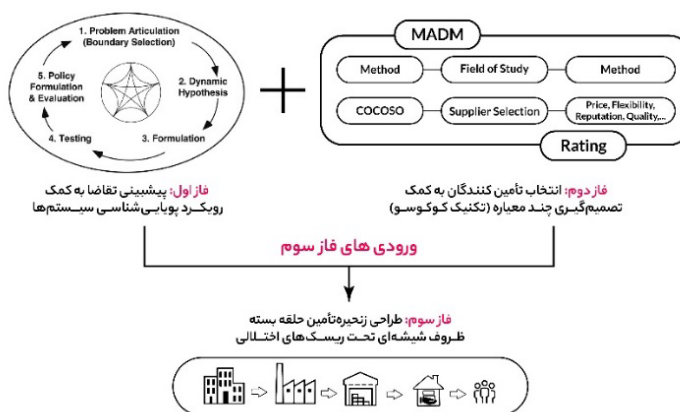
^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

برجسته‌ها

- پیش‌بینی تقاضا به کمک رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها
- رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره
- مدل تصادفی دومرحله‌ای برای طراحی زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای
- انتقال عرضی برای مقابله اختلالات حمل‌ونقل

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

*نویسنده مسئول:

fatemehsabouhi@ut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

زنجیره تأمین حلقه بسته

برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها

انتقال عرضی

ظروف شیشه‌ای

چکیده

با افزایش روزافزون مصرف ظروف شیشه‌ای در صنایع غذایی و دارویی، تقاضا برای تأمین پایدار و کارآمد این نوع بسته‌بندی به‌طور قابل‌توجهی رشد کرده است. هم‌زمان افزایش فشارهای محیط‌زیستی و الزامات قانونی مربوط به بازیافت ضایعات موجب شده است که طراحی زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای به‌عنوان یک مسئله راهبردی در مدیریت صنعتی مطرح شود. در پاسخ به این چالش‌ها، پژوهش حاضر یک رویکرد ترکیبی سه‌فازی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ظروف شیشه‌ای تحت ریسک‌های احتمالی در زیرساخت‌های حمل‌ونقل و عدم قطعیت ارائه می‌دهد. در فاز اول، به‌منظور پیش‌بینی تقاضای مشتریان، از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها بهره گرفته شده است. در فاز دوم، با به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوکوسو به رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان پرداخته می‌شود. با استفاده از نتایج فازهای اول و دوم، در فاز سوم، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمحصولی و چنددوره‌ای توسعه داده می‌شود. هدف مدل پیشنهادی حداقل کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای جهت تعیین تصمیماتی از قبیل انتخاب تأمین‌کنندگان، مقدار تولید، میزان حمل‌ونقل در سطوح مختلف زنجیره، انتقال عرضی بین مراکز توزیع، بازیافت، دفع و مدیریت کمبود تقاضا است. مدل پیشنهادی بر روی سه مثال عددی پیاده‌سازی می‌شود و نتایج تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی مسئله ارائه می‌گردد.

۱- مقدمه

عرضه و قیمت مواد اولیه، محدودیت‌های تولید و اختلال در حمل‌ونقل به‌ویژه به دلیل شکنندگی و حجم بالای ظروف شیشه‌ای، می‌توانند باعث افزایش هزینه‌ها و کاهش کیفیت خدمات شوند. از این رو، طراحی زنجیره تأمین مقاوم و منعطف در برابر این اختلالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Sadjady Naeeni & Sabbaghi, 2022). این اختلالات در یک بخش، معمولاً تأثیرات زنجیره‌ای داشته و برنامه‌ریزی تولید و توزیع را دچار بی‌ثباتی می‌کنند. بنابراین، شناسایی و تحلیل دقیق اختلالات محتمل از اهمیت بالایی در بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های ناشی از عدم قطعیت‌ها برخوردار است (Motavalli et al., 2024).

برای مقابله با چالش‌های فوق‌الذکر، این پژوهش یک چارچوب ترکیبی سه فازی جهت طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ظروف شیشه‌ای ارائه می‌دهد. ابتدا، با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها^۲ و ابزار ونسیم^۳، مدل مفهومی رفتار تقاضا شبیه‌سازی و پیش‌بینی شده است. سپس، با به‌کارگیری روش کوکوسو^۴، تأمین‌کنندگان بر اساس معیارهای کلیدی ارزیابی و رتبه‌بندی گردیده‌اند. در نهایت، با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از دو مرحله نخست، در فاز سوم یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جهت طراحی زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای تحت ریسک‌های اختلالی و عدم قطعیت پیشنهاد می‌شود. هدف مسئله حداقل کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین جهت تعیین تصمیماتی از قبیل انتخاب تأمین‌کنندگان، مقدار تولید، میزان حمل‌ونقل در سطوح مختلف زنجیره، انتقال عرضی^۵ بین مراکز توزیع، بازیافت، دفع و مدیریت کمبود تقاضا است.

بنابراین سؤالات تحقیق عبارت‌اند از:

- با استفاده از چه رویکردهایی می‌توان عملکرد زنجیره تأمین حلقه بسته ظروف شیشه‌ای را بهبود داد؟
- اختلالات حمل‌ونقل چگونه بر هزینه کل تأثیر می‌گذارند و انتقال عرضی تا چه حد می‌تواند این اثرات را کاهش دهد؟

ظروف شیشه‌ای به‌عنوان یکی از رایج‌ترین و مطمئن‌ترین انواع ظروف بسته‌بندی، نقش مهمی در حفظ کیفیت، ایمنی و ماندگاری مواد غذایی، نوشیدنی‌ها و محصولات دارویی ایفا می‌کنند (Pourjavad & Mayorga, 2019). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص ظروف شیشه‌ای، از جمله خنثی بودن در برابر واکنش‌های شیمیایی، مقاومت بالا در برابر نفوذ رطوبت، اکسیژن و قابلیت استریل شدن در دماهای بالا، آن را نسبت به سایر مواد بسته‌بندی، انتخابی ایمن و قابل‌اعتماد ساخته است. همچنین، ظروف شیشه‌ای به‌صورت طبیعی غیر سمی، بدون بو و غیرقابل نفوذ بوده و قابلیت بازیافت صددرصدی بدون کاهش کیفیت را داراست که این مزیت، ضمن حفظ منابع طبیعی، هزینه‌های تولید را در بلندمدت کاهش می‌دهد (Jabbarzadeh et al., 2018). به همین دلیل، ظروف شیشه‌ای علاوه بر نقش محافظتی، به‌عنوان یکی از ارکان اصلی بسته‌بندی بهینه در صنایع حساس شناخته می‌شوند. با توجه به افزایش تقاضا برای این ظروف در صنایع مختلف، طراحی و مدیریت کارآمد زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای اهمیت فزاینده‌ای یافته است (Malekpour Kalbadinejad & Bagherinejad, 2023). زنجیره تأمین این محصول شامل مراحل تأمین مواد اولیه، تولید، توزیع، جمع‌آوری، بازیافت و دفع است که نیازمند هماهنگی و تصمیم‌گیری دقیق در سطوح مختلف عملیاتی می‌باشد.

با توجه به وابستگی تولید ظروف شیشه‌ای به منابع خاص و مصرف بالای انرژی، بهره‌گیری از رویکرد زنجیره تأمین حلقه بسته^۱ می‌تواند ضمن کاهش مصرف مواد اولیه، بهینه‌سازی انرژی و بازگرداندن ضایعات به چرخه تولید، منافع اقتصادی و محیط‌زیستی قابل‌توجهی به همراه داشته باشد (Guide & Van Wassenhove, 2009). این رویکرد جریان‌های مستقیم و معکوس را در بر گرفته و امکان مدیریت جامع چرخه عمر محصول را فراهم می‌کند. با این حال، ماهیت چندمرحله‌ای زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای و وابستگی آن به منابع و زیرساخت‌های ویژه، آن را در معرض انواع اختلالات قرار داده است (Hassanpour et al., 2023). مشکلاتی همچون نوسانات

² System dynamics approach

³ Vensim

⁴ Combined Compromise Solution (CoCoSo) Method

⁵ Lateral Transshipment

¹ Closed-Loop Supply Chain (CLSC)

افزون بر این، زرین‌پور در یک مطالعه موردی در حوزه شیشه‌های ضایعاتی در شهر شیراز نشان داد که بهره‌گیری از تصمیم‌گیری گروهی و برنامه‌ریزی فازی چندهدفه، درک دقیق‌تری از سیاست‌های پایدار فراهم می‌آورد (Zarrinpoor, 2021). حاجی‌آقایی و فتح‌اللهی با ارائه مدلی که تخفیف در هزینه حمل و نقل و اهداف اجتماعی مانند اشتغال و کاهش آسیب‌های شغلی را مدنظر قرار می‌داد، توانستند با ترکیب یک الگوریتم فراابتکاری با مدل‌های عدد صحیح، عملکرد قابل قبولی در حل مسائل بزرگ‌مقیاس در صنعت شیشه ارائه دهند (Hajiaghahi-Keshteli & Fathollahi Fard, 2019).

در بعد زنجیره تأمین حلقه بسته، پژوهش‌های متعددی به طراحی شبکه‌های بازگشتی در صنایع مختلف پرداخته‌اند. پورجوادی و مایورگا یک مدل چنددوره‌ای جهت طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت بطری و ظروف شیشه‌ای با در نظر گرفتن نرخ بازگشت و کیفیت محصول ارائه دادند (Pourjavad & Mayorga, 2019). جبارزاده و همکاران نیز با رویکردی استوار، مدلی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته بطری‌ها و شیشه‌های ظروف غذایی و نوشیدنی تحت شرایط اختلال ارائه کردند که در آن، استراتژی انتقال عرضی بین مراکز برای حفظ عملکرد شبکه در هنگام بروز اختلالات پیشنهاد شده است (Jabbarzadeh et al., 2018).

باپتیستا و همکاران با استفاده از مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای و معیارهای ریسک‌گریز، طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته شیشه را تحت پارامترهای غیرقطعی نظیر نرخ بازگشت، تقاضا و کیفیت محصول، موردبررسی قرار دادند (Baptista et al., 2019). در همین راستا، زیاری و سجادیه با تمرکز بر صنعت شیشه، مدلی را ارائه کردند که قیمت‌گذاری برای محصولات نهایی و برگشتی را در حضور اختلالات تلفیق می‌کرد (Ziari & Sajadieh, 2022). جدول ۱ به مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات پیشین می‌پردازد.

با توجه به جدول ۱ و مرور ادبیات، مشخص می‌شود که در زمینه طراحی زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای، برخی خلأهای پژوهشی وجود دارد که به شرح زیر قابل توجه‌اند: اولاً، در پژوهش‌های پیشین، استفاده هم‌زمان از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل بهینه‌سازی برای طراحی زنجیره تأمین به‌طور جامع

چگونه می‌توان تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی زنجیره تأمین حلقه بسته ظروف شیشه‌ای را به‌گونه‌ای اتخاذ کرد که طراحی زنجیره بهینه و کارآمد باشد؟

ساختار مقاله به این صورت تنظیم شده است: در بخش دوم، ادبیات موضوع مرور می‌شود، بخش سوم به تشریح مسئله اختصاص دارد، در بخش چهارم روش‌شناسی پژوهش ارائه می‌گردد، بخش پنجم شامل روش حل و نتایج رویکرد پیشنهادی است و در پایان نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی مطرح می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش به مرور مطالعات انجام‌شده در حوزه طراحی زنجیره تأمین شیشه/ظروف شیشه‌ای پرداخته می‌شود. در حوزه مدل‌های استوار و غیرکلاسیک، برومند و همکاران با بهره‌گیری از یک الگوریتم مبتنی بر اوراکل، به حل مسئله برنامه‌ریزی تولید و مسیریابی در زنجیره تأمین بطری‌های شیشه‌ای نوشیدنی پرداخته‌اند. آن‌ها با ترکیب مدل‌سازی استوار و سناریوهای احتمالی، نشان دادند که بهره‌گیری از روش‌های غیرکلاسیک می‌تواند کیفیت تصمیمات راهبردی را در مواجهه با نوسانات تقاضا و هزینه بهبود بخشد (Borumand et al., 2024).

در بعد پایداری با فناوری‌های نوآورانه، قمی و همکاران با استفاده از فناوری بلاک‌چین، مدلی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته صنعت شیشه همدان ارائه کردند که در آن کنترل انتشار کربن، متغیرهای محیطی و الزامات شفاف‌سازی اطلاعات لحاظ شده است (Ghomi-Avili et al., 2023). در همین حوزه، وانگ و همکاران یک مدل دوهدفه برای زنجیره تأمین کم‌کربن در صنعت بطری‌های شیشه‌ای در چین تحت اختلالات ارائه کردند که رابطه میان هزینه و انتشار آلاینده‌ها را در بستر عدم قطعیت نشان دادند (Wang et al., 2023).

نائینی و سیاغی نیز با معرفی یک مدل سه‌هدفه ترکیبی، ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را به‌طور هم‌زمان در طراحی پایدار شبکه زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای لحاظ کرده و با بهره‌گیری از تکنیک الگوی محدودیت نرمال‌شده، به استخراج مرز پارتویی یکنواخت پرداختند (Sadjady Naeni & Sabbaghi, 2022).

و پس از تولید، محصولات سالم به مراکز توزیع و سپس به مشتریان ارسال می‌شوند. هم‌زمان، بخشی از محصولات تولیدی ممکن است معیوب باشند که به مراکز جداسازی فرستاده شده و در آنجا به ضایعات قابل بازیافت و غیرقابل بازیافت تفکیک می‌شوند. ضایعات قابل بازیافت پس از پردازش در مراکز بازیافت، دوباره وارد چرخه تولید می‌شوند، درحالی‌که ضایعات باقی‌مانده به مراکز دفع منتقل می‌گردند.

یکی از ابعاد حیاتی این زنجیره، تأثیر اختلالات حمل‌ونقل در مسیر توزیع محصولات سالم به مشتریان است. این اختلالات که می‌توانند ناشی از بلایای طبیعی، شرایط نامساعد جوی یا تصادف‌های جاده‌ای باشند، با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مدل‌سازی می‌شوند. در مواجهه با این اختلالات، چنانچه زیرساخت مناسبی برای پاسخ سریع وجود نداشته باشد، تأمین تقاضای مشتریان دچار وقفه شده و کارایی کل زنجیره تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای کنترل این اختلالات، در این مدل از استراتژی انتقال عرضی بین مراکز توزیع بهره گرفته شده است. این سازوکار به سیستم اجازه می‌دهد تا در صورت بروز مشکل در یک مرکز یا مسیر، محصول را از سایر مراکز توزیع به مشتری مربوطه منتقل کند و از این طریق با اختلالات ذکرشده در زنجیره تأمین مقابله می‌گردد. هدف مدل پیشنهادی حداقل کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین شیشه جهت تعیین تصمیماتی از قبیل انتخاب تأمین‌کنندگان، مقدار تولید، میزان حمل‌ونقل در سطوح مختلف زنجیره، انتقال عرضی، بازیافت، دفع و مدیریت کمبود تقاضا است.

بدین منظور، پژوهش حاضر، یک رویکرد ترکیبی سه فازی را برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ظروف شیشه‌ای در نظر گرفته است. در فاز اول، با بهره‌گیری از پویایی‌شناسی سیستم‌ها، تقاضای مشتریان پیش‌بینی شده است. در فاز دوم، رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوکوسو انجام می‌گردد. در فاز سوم، با استفاده از نتایج دو فاز قبلی به‌عنوان پارامترهای ورودی مسئله، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چندمحصولی و چنددوره‌ای تحت اختلالات زیرساخت‌های حمل‌ونقل و عدم قطعیت پیشنهاد می‌شود. در ادامه، جزئیات هر یک از این سه فاز تشریح می‌گردد.

موردتوجه قرار نگرفته است. این محدودیت باعث شده است که رفتار تقاضا، اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان و تصمیمات طراحی زنجیره تأمین در یک چارچوب منسجم تحلیل نشود. ثانیاً، اختلالات حمل‌ونقل در زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای و نقش انتقال عرضی بین مراکز توزیع به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش اثر این اختلالات در بسیاری از مطالعات نادیده گرفته شده است. سوماً، مدل‌های یکپارچه‌ای که بتوانند جریان‌های مستقیم و معکوس زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای شامل فرآیندهای جداسازی، بازیافت، دفع و مدیریت ضایعات تولید را به‌صورت هم‌زمان در نظر بگیرند، به‌طور کامل توسعه نیافته‌اند. این کمبود مانع تحلیل جامع چرخه عمر محصول و ارزیابی واقعی هزینه و ریسک می‌شود.

این پژوهش با بهره‌گیری از یک رویکرد سه فازی به طراحی زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای می‌پردازد. ابتدا از طریق رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، به پیش‌بینی تقاضای مشتریان پرداخته و سپس با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوکوسو، تأمین‌کنندگان را ارزیابی و رتبه‌بندی می‌کند. با استفاده از نتایج حاصله از فازهای اول و دوم، در فاز سوم، یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ظروف شیشه‌ای تحت اختلالات زیرساخت‌های حمل‌ونقل و عدم قطعیت توسعه داده می‌شود. هدف مدل پیشنهادی حداقل کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین است. مدل پیشنهادی بر روی سه مثال عددی پیاده‌سازی و نتایج حاصل از آن ارائه می‌گردد.

۳- تشریح مسئله

این پژوهش با توسعه مدل جبارزاده و همکاران و تمرکز بر صنعت تولید ظروف شیشه‌ای انجام شده است (Jabbarzadeh et al., 2018).

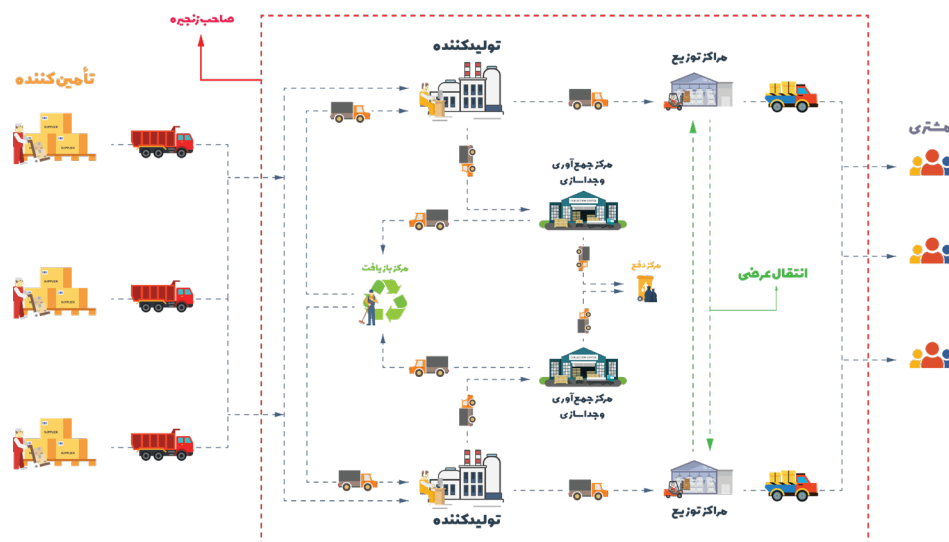
شکل ۱ زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای تحت بررسی را نمایش می‌دهد که شامل دو جریان اصلی است: جریان مستقیم از تأمین مواد اولیه تا تحویل محصول به مشتری نهایی و جریان معکوس از مرحله تولید تا بازیافت یا دفع ضایعات. اجزای این زنجیره عبارت‌اند از تأمین‌کنندگان مواد اولیه، تولیدکنندگان، مراکز جداسازی، مراکز بازیافت، مراکز دفع، مراکز توزیع و مشتریان. در جریان مستقیم، مواد اولیه از تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان منتقل شده

جدول ۱. مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات پیشین

Table 1. Comparison of the present study with previous

تعداد محصول	ساختار زنجیره تأمین	اجزای شبکه	عدم قطعیت	رویکرد	انتقال عرضی	جزء مختل شده	مراجعه
تک محصولی	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی	پویایی شناسی سیستم ها	لینک حمل و نقل	تسهیلات	۱
چند محصولی	تولید کننده	مشتری	تصمیم گیری				۲
حلقه بسته	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی				۳
مستقیم	تولید کننده	مشتری	تصمیم گیری				۴
معکوس	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی				۵
تولید کننده	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی				۶
توزیع کننده	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی				۷
جمع آوری	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی				۸
تأمین کننده	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی				۹
انبار	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی				۱۰
مرکز دفع	تولید کننده	مشتری	پهینه سازی				۱۱

* توضیحات: ۱: Borumand et al., 2024؛ ۲: Ghomi-Avili et al., 2023؛ ۳: Wang et al., 2023؛ ۴: Ziari & Sajadieh, 2022؛ ۵: Sadjady Naeeni & Sabbaghi, 2022؛ ۶: Zarrinpoor, 2021؛ ۷: Hajiaghaei-Keshteli & Fathollahi Fard, 2019؛ ۸: Pourjavad & Mayorga, 2019؛ ۹: Baptista et al., 2019؛ ۱۰: Jabbarzadeh et al., 2018؛ ۱۱: پژوهش حاضر.

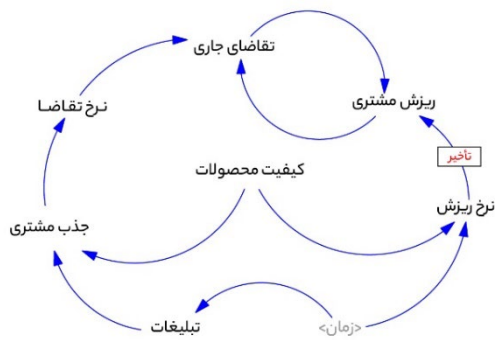


شکل ۱. زنجیره تأمین پیشنهادی ظروف شیشه‌ای.

Figure 1. Proposed Supply Chain for Glass Containers.

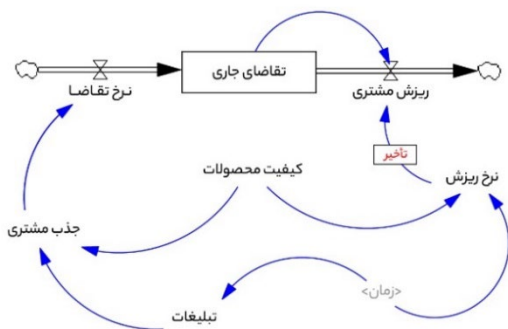
برای تقویت پویایی و بازنمایی بهتر اثرات واقعی سیستم به مدل افزوده می‌شوند.

در شکل ۲، ساختار مفهومی این مدل در قالب یک نمودار علی-معلولی نمایش داده شده است. در شکل ۳، مدل جریان-موجودی که مبنای شبیه‌سازی و تحلیل دینامیک تقاضا بوده، ارائه شده است. همچنین روابط ریاضی حاکم بر متغیرهای مدل جریان-موجودی در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار علی-معلولی.

Figure 2. Causal loop diagram.



شکل ۳. نمودار جریان-موجودی.

Figure 3. Stock and flow diagram.

۴-۲- فاز دوم: رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان با استفاده از روش کوکوسو

در مدل پیشنهادی، انتخاب تأمین‌کنندگان مواد اولیه یکی از تصمیمات اساسی و تعیین‌کننده در طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ظروف شیشه‌ای به شمار می‌رود، چرا که بر کیفیت محصولات نهایی، نرخ ضایعات، قابلیت بازیافت و کل هزینه‌های زنجیره تأثیر مستقیم دارد. در میحث انتخاب بهترین تأمین‌کننده نیز اصولاً روش انتخاب بر اساس کمترین قیمت پیشنهادی است اما واضح است که شاخص‌های کمی و کیفی متعدد با درجات اهمیت متفاوت در تعیین صلاحیت یک تأمین‌کننده مطرح

۴- روش‌شناسی پژوهش

۴-۱- فاز اول: پیش‌بینی تقاضا با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها

پویایی‌شناسی سیستم‌ها روشی برای درک رفتارهای یک سیستم پیچیده در طول زمان است. همه انسان‌ها در همه‌جا با پدیده‌های دینامیکی در حوزه‌ها و سطوح مختلف روبه‌رو هستند. آن‌ها پدیده‌های واقعی را با مدلی ذهنی جایگزین می‌کنند و سپس بر اساس آن، نتیجه‌گیری و درک می‌کنند؛ بنابراین، مدل‌ها تنها ابزار فهم دنیای بیرون (واقعیت) هستند (Hemmasian Etefagh, 2022a). نمودارهای علی و معلولی یکی از ابزارهای مهم پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای نشان دادن ساختار بازخوردی سیستم‌ها به شمار می‌روند (Sterman, 2000). این رویکرد به دلیل توانایی در تحلیل رفتارهای بازخوردی، انباشتی، غیرخطی و همچنین شناسایی و مدل‌سازی تأخیرهای تصمیم‌گیری و اثرات آن‌ها در سیستم‌های واقعی، ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی رفتار پویای تقاضا است.

در این فاز، با هدف پیش‌بینی تقاضای مشتریان در طول افق برنامه‌ریزی، از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور، ابتدا یک مدل مفهومی به‌صورت نمودار علی-معلولی^۱ طراحی می‌شود که در آن متغیرهای اصلی و کمکی و نیز روابط میان آن‌ها ترسیم می‌گردد. این مدل مفهومی بیانگر آن است که افزایش تبلیغات و بهبود کیفیت محصول، منجر به جذب مشتری بیشتر شده و در مقابل، جریان خروجی از تقاضای جاری به نرخ ریزش مشتریان وابسته است. علاوه بر شرایط کیفی محصول، جریان خروجی تحت تأثیر تأخیر زمانی نیز قرار می‌گیرد تا اثرات تصمیمات بازاریابی بر وفاداری مشتریان به‌صورت واقع‌بینانه در شبیه‌سازی لحاظ شود. در ادامه، به‌منظور کمی‌سازی این روابط، مدل جریان-موجودی^۲ متناظر توسعه داده می‌شود که در آن تقاضای جاری به‌عنوان متغیر حالت تحت تأثیر دو جریان اصلی (نرخ تقاضا (جریان ورودی) و ریزش مشتری (جریان خروجی)) قرار دارد. متغیرهای کمکی همچون تبلیغات، جذب مشتری و نرخ ریزش مشتریان نیز

¹ Causal Loop Diagram (CLD)

² Stock-and-Flow Model (SFD)

در این بخش امتیاز گزینه‌ها بر اساس سه استراتژی از سه رابطه زیر حاصل می‌شود. رابطه (۶) میانگین حسابی امتیازات جمع وزنی ساده و ضرب وزنی را بیان می‌کند، درحالی‌که رابطه (۷) در مقایسه با بهترین‌ها، نمرات نسبی جمع وزنی ساده و ضرب وزنی را بیان می‌کند. رابطه (۸) مصالحه‌ای بین مدل‌های جمع وزنی ساده و ضرب وزنی است. در این رابطه λ توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود اما در حالت λ برابر با $0/5$ انعطاف‌پذیری زیادی دارد.

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^m (P_i + S_i)} \quad (6)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min_i S_i} + \frac{P_i}{\min_i P_i} \quad (7)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda(S_i) + (1 - \lambda)P_i}{\lambda(\min_i S_i) + (1 - \lambda)\min_i P_i} ; \quad (8)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

• محاسبه امتیاز نهایی؛ در این بخش بر اساس رابطه (۹) امتیاز نهایی محاسبه می‌شود درواقع این رابطه بیانگر جمع میانگین هندسی و میانگین حسابی سه استراتژی گام قبل می‌باشد. امتیاز (k) هر گزینه‌ای بزرگ‌تر باشد نشان از برتری آن گزینه دارد.

$$k_i = (k_{ia} \cdot k_{ib} \cdot k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3}(k_{ia} \cdot k_{ib} \cdot k_{ic}) \quad (9)$$

۳-۴- فاز سوم: مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای

در این بخش با استفاده از نتایج فاز اول و دوم، به ارائه مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله معرفی می‌گردد. سپس ساختار ریاضی مدل شامل تابع هدف و محدودیت‌ها ارائه می‌شود.

۳-۴-۱- مجموعه‌ها

I	مجموعه تأمین‌کننده‌ها
J	مجموعه تولیدکننده‌ها
D	مجموعه توزیع‌کننده‌ها
V	مجموعه مشتری‌ها
P	مجموعه محصولات
T	مجموعه دوره‌های زمانی
L	مجموعه مراکز جداسازی

هستند و باید در تصمیم‌گیری‌ها موردتوجه قرار گیرند (Hemmasian Etefagh, 2022b). در این تحقیق، به‌منظور شناسایی تأمین‌کنندگان برتر از میان گزینه‌های پیشنهادی، از روش کوکوسو استفاده می‌شود. روش کوکوسو یک تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره است که بر پایه تلفیق مدل‌های جمع وزنی ساده، ضرب وزنی و مصالحه عمل می‌کند (Yazdani et al., 2019). این روش به‌ویژه در شرایطی مناسب است که معیارهای ارزیابی شامل ترکیبی از شاخص‌های کمی (مانند قیمت، زمان تحویل، موقعیت مکانی و دسترسی ترافیکی) و کیفی (مانند کیفیت، خدمات‌رسانی و ارتباطات، شهرت تأمین‌کننده، انعطاف‌پذیری) باشد. فرآیند اجرای کوکوسو شامل مراحل زیر است:

- تعیین معیارهای ارزیابی مناسب برای انتخاب تأمین‌کننده؛
- ساخت ماتریس تصمیم (X) : شامل m گزینه و n معیار؛

$$x_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad , \quad j = 1, 2, \dots, n$$

- نرمال‌سازی ماتریس تصمیم و محاسبه میانگین وزنی خطی و ضربی؛ در این مرحله، بسته به ماهیت معیارها، برای معیارهای سود (بزرگ‌تر بهتر) از رابطه (۲) و برای معیارهای هزینه (کوچک‌تر بهتر) از رابطه (۳) استفاده می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (3)$$

استفاده از روابط (۴) و (۵) جهت محاسبه امتیازات جمع وزنی ساده و ضرب وزنی (بر اساس این روابط مقادیر جمع وزنی (S) و توان وزنی (P) برای هر گزینه محاسبه می‌شود. در دو رابطه زیر w_j وزن معیارها می‌باشد که به‌عنوان ورودی وارد روش کوکوسو شده است).

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j r_{ij}) \quad (4)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (5)$$

S	مجموعه سناریوهای اختلال	$s \in S$	ac_{ep}	هزینه دفع هر واحد محصول غیرقابل بازیافت p در مرکز دفع e (میلیون ریال)
R	مجموعه مراکز بازیافت	$r \in R$	ad_{jp}	هزینه تولید هر واحد محصول p توسط تولیدکننده j (میلیون ریال)
E	مجموعه مراکز دفع	$e \in E$	de_{vpt}	مقدار تقاضای مشتری v در دوره زمانی t برای محصول p (تعداد ظروف)
M	مجموعه مواد اولیه	$m \in M$	al	هزینه عدم برآورد هر واحد تقاضای مشتری v (میلیون ریال)

۴-۳-۲- پارامترها

cs_{im}	ظرفیت تأمین‌کننده i برای تأمین ماده اولیه m (کیلوگرم)	α	نرخ تولید محصول سالم برای تولیدکننده‌ها
cp_{jp}	ظرفیت تولیدکننده j برای محصول p (تعداد)	β	نرخ جداسازی ضایعات قابل بازیافت در هر مرکز جداسازی
cl_{jp}	ظرفیت مرکز جداسازی l برای ضایعات محصول p (کیلوگرم)	γ	نرخ تبدیل ضایعات قابل بازیافت به مواد اولیه
cr_{rp}	ظرفیت مرکز بازیافت r برای ضایعات قابل بازیافت محصول p (کیلوگرم)	θ_{dvs}	درصد ظرفیت ازدست‌رفته مسیر بین مشتری v و مرکز توزیع d تحت سناریوی s
ce_{ep}	ظرفیت مرکز دفع e برای ضایعات غیرقابل بازیافت محصول p (کیلوگرم)	g_i	هزینه قرارداد بستن با تأمین‌کننده i ام (میلیون ریال)
cd_{dp}	ظرفیت مرکز توزیع d برای محصول سالم p (تعداد)	π_s	احتمال وقوع سناریوی اختلال
c_{ijm}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد ماده اولیه m از تأمین‌کننده i به تولیدکننده j (میلیون ریال)	me_{mp}	مقدار ماده اولیه m موردنیاز برای تولید هر واحد محصول p (کیلوگرم)
c'_{jdp}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول سالم p از تولیدکننده j به مرکز توزیع d (میلیون ریال)		

۴-۳-۳- متغیرهای تصمیم

a_{jlp}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول معیوب p از تولیدکننده j به مرکز جداسازی l (میلیون ریال)	X_{ijmst}	مقدار مواد اولیه نوع m ارسال شده از تأمین‌کننده i به تولیدکننده j در دوره t تحت سناریوی s (کیلوگرم)
a'_{rjm}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد ماده اولیه بازیافتی m از مرکز بازیافت r به تولیدکننده j (میلیون ریال)	Y_{jdpts}	تعداد محصول سالم نوع p ارسال شده از تولیدکننده j به مرکز توزیع d در دوره t تحت سناریوی s (تعداد)
cb_{lrp}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول قابل بازیافت p از مرکز جداسازی l به مرکز بازیافت r (میلیون ریال)	Z_{jlpts}	مقدار محصول معیوب نوع p ارسال شده از تولیدکننده j به مرکز جداسازی l در دوره t تحت سناریوی s (کیلوگرم)
cb'_{lep}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول غیرقابل بازیافت p از مرکز جداسازی l به مرکز دفع e (میلیون ریال)	W_{lrpts}	مقدار محصول قابل بازیافت نوع p ارسال شده از مرکز جداسازی l به مرکز بازیافت r در دوره t تحت سناریوی s (کیلوگرم)
K_{dvps}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول سالم p از مرکز توزیع d به مشتری v تحت سناریوی s (میلیون ریال)	F_{lepts}	مقدار محصول غیرقابل بازیافت نوع p ارسال شده از مرکز جداسازی l به مرکز دفع e در دوره t تحت سناریوی s (کیلوگرم)
$tc_{dd'}$	هزینه انتقال هر واحد محصول از مرکز توزیع d به مرکز توزیع d' (میلیون ریال)		
ab_{rm}	هزینه فرآوری هر واحد ماده اولیه m در مرکز بازیافت r (میلیون ریال)		

$$\sum_j X_{ijmst} \leq N_i \times cs_{im} ; \forall i, m, t, s \quad (11)$$

$$Q_{jpst} \leq cp_{jp} ; \forall j, p, t, s \quad (12)$$

$$\sum_j Y_{jdpts} + \sum_{d' \neq d} O_{dd'pts} \leq cd_{dp} ; \forall d, p, t, s \quad (13)$$

$$\sum_j Z_{jlpst} \leq cl_{lp} ; \forall l, p, t, s \quad (14)$$

$$\sum_l W_{lrpts} \leq cr_{rp} ; \forall r, p, t, s \quad (15)$$

$$\sum_l F_{lepts} \leq ce_{ep} ; \forall e, p, t, s \quad (16)$$

$$\sum_i X_{ijmst} + \sum_r U_{rjmst} = \sum_d Y_{jdpts} + \sum_l Z_{jlpst} ; \forall j, p, t, s, m \quad (17)$$

$$\sum_j Y_{jdpts} + \sum_{d' \neq d} O_{dd'pts} = \sum_m H_{dvpts} + \sum_{d' \neq d} O_{dd'pts} ; \forall d, p, t, s \quad (18)$$

$$\sum_j Z_{jlpst} = \sum_r W_{lrpts} + \sum_e F_{lepts} ; \forall l, p, t, s \quad (19)$$

$$\gamma \times \sum_l W_{lrpts} = \sum_j U_{rjmst} ; \forall r, p, t, s, m \quad (20)$$

$$\sum_d H_{dvpts} + B_{vpst} = de_{vpt} ; \forall v, p, t, s \quad (21)$$

$$\alpha \times Q_{jpst} = \sum_d Y_{jdpts} ; \forall j, p, t, s \quad (22)$$

$$(1 - \alpha) \times Q_{jpst} = \sum_l Z_{jlpst} ; \forall j, p, t, s \quad (23)$$

$$\beta \times \sum_j Z_{jlpst} = \sum_r W_{lrpts} ; \forall l, p, t, s \quad (24)$$

$$(1 - \beta) \times \sum_j Z_{jlpst} = \sum_e F_{lepts} ; \forall l, p, t, s \quad (25)$$

H_{dvpts} تعداد محصول سالم نوع p ارسال شده از مرکز توزیع d به مشتری v در دوره t تحت سناریو s (تعداد)

$O_{dd'pts}$ تعداد محصول سالم نوع p ارسال شده از مرکز توزیع d به مرکز توزیع d' در دوره t تحت سناریو s (تعداد)

Q_{jpst} تعداد محصول p تولید شده توسط تولیدکننده j در دوره t تحت سناریو s (تعداد)

U_{rjmst} مقدار مواد اولیه بازیافتی نوع m ارسال شده از مرکز بازیافت r به تولیدکننده j در دوره t تحت سناریو s (کیلوگرم)

B_{vpst} میزان عدم برآورد تقاضای مشتری v برای محصول p در دوره t تحت سناریو s (تعداد) برابر یک است اگر تأمین کننده i انتخاب شود و در غیر این صورت صفر.

۴-۳-۴- تابع هدف و محدودیت‌ها

$$\begin{aligned} & \text{minimize } TotalCost \quad (10) \\ & = \sum_i g_i \times N_i \\ & + \sum_s \pi_s \sum_t \left(\sum_i \sum_j \sum_m c_{ijm} \times X_{ijmst} \right. \\ & + \sum_j \sum_d \sum_p c'_{jdp} \times Y_{jdpts} \\ & + \sum_j \sum_l \sum_p a_{jlp} \times Z_{jlpst} \\ & + \sum_l \sum_r \sum_p cb_{lrp} \times W_{lrpts} \\ & + \sum_l \sum_e \sum_p cb'_{lep} \times F_{lepts} \\ & + \sum_d \sum_v \sum_p k_{dvps} \times H_{dvpts} \\ & + \sum_d \sum_{d' \neq d} \sum_p tc_{dd'} \times O_{dd'pts} \\ & + \sum_r \sum_j \sum_m a'_{rjm} \times U_{rjmst} \\ & + \sum_l \sum_r \sum_m \sum_p ab_{rm} \times W_{lrpts} \\ & + \sum_l \sum_e \sum_p ac_{ep} \times F_{lepts} \\ & \left. + \sum_j \sum_p ad_{jp} \times Q_{jpst} + \sum_v \sum_p al \times B_{vpst} \right) \end{aligned}$$

فرآیند تفکیک ضایعات را در مراکز جداسازی مدل‌سازی می‌کنند؛ به طوری که با استفاده از نرخ β مقدار محصولات قابل بازیافت و ضایعات غیرقابل بازیافت تعیین می‌شود و هر یک به مسیرهای مربوطه اختصاص می‌یابند. محدودیت (۲۶) سازگاری کلی زنجیره تأمین را حفظ کرده و تضمین می‌کند مجموع مواد اولیه مورد نیاز تولید دقیقاً برابر با مجموع دریافتی‌ها از تأمین‌کنندگان و مراکز بازیافت باشد. محدودیت (۲۷) عملکرد شبکه توزیع را در حضور اختلالات حمل‌ونقل کنترل می‌کند و اطمینان می‌دهد میزان کالاهای ارسالی به مشتریان از هر مرکز توزیع، با در نظر گرفتن درصد اختلال مسیر، از ظرفیت مؤثر آن مرکز فراتر نرود. در نهایت، محدودیت‌های (۲۸) تا (۳۰) نوع و دامنه متغیرهای تصمیم را تعریف می‌کند.

۵- روش حل

در این پژوهش سه مثال عددی در نظر گرفته شده است که در تمامی آن‌ها، مجموعه‌های زیر ثابت فرض شده‌اند:

- ده تأمین‌کننده مواد اولیه برای تولید ظروف شیشه‌ای؛
- دو مرکز جداسازی برای تفکیک ضایعات تولید
- یک مرکز بازیافت برای ضایعات قابل بازیافت
- یک مرکز دفع برای ضایعات غیرقابل بازیافت
- سه مشتری جهت ارسال بطری‌های شیشه‌ای
- دو نوع ماده اولیه جهت تولید بطری‌های شیشه‌ای
- سه دوره زمانی به‌عنوان افق برنامه‌ریزی مدل
- دو نوع محصول از بطری‌های شیشه‌ای
- سه سناریو شامل وضعیت پایه (بدون اختلال) با احتمال وقوع ۶۲ درصد، اختلال جزئی با احتمال وقوع ۲۰ درصد و اختلال شدید با احتمال وقوع ۱۸ درصد در شبکه حمل‌ونقل که همگی به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین شده‌اند.

تفاوت میان مثال‌ها تنها در تعداد تولیدکنندگان و مراکز توزیع است:

- مثال اول ۲ تولیدکننده و ۲ مرکز توزیع
- مثال دوم ۳ تولیدکننده و ۴ مرکز توزیع
- مثال سوم ۴ تولیدکننده و ۶ مرکز توزیع

$$\sum_p me \times Q_{jpts} \quad (26)$$

$$= \sum_i X_{ijmts} + \sum_r U_{rjmts} \quad ; \quad \forall j, m, t, s$$

$$\sum_p H_{dvpts} \quad (27)$$

$$\leq (1 - \theta_{avs}) \times \sum_p de_{vpt} \quad ; \quad \forall d, v, t, s$$

$$X_{ijmts}, Z_{jlpts}, W_{lrpts}, F_{lepts}, \quad (28)$$

$$U_{rjmts} \geq 0 \quad ; \quad \forall i, j, d, v, m, s, d, t, s, t, p$$

$$N_i \in \{0, 1\} \quad ; \quad \forall i \quad (29)$$

$$Y_{jdpts}, H_{dvpts}, O_{dd'pts}, Q_{jpts}, B_{vpts} \in Int \quad (30)$$

تابع هدف (۱۰) در تلاش است تا مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین را در طول افق برنامه‌ریزی تحت سناریوهای مختلف اختلال کمینه نماید. این هزینه‌ها شامل قرارداد با تأمین‌کنندگان، خرید مواد اولیه، تولید محصولات، حمل‌ونقل در تمام سطوح زنجیره، تفکیک ضایعات، بازیافت، دفع، نگهداری، انتقال عرضی میان مراکز توزیع و جریمه بابت کمبود تأمین تقاضای مشتریان را پوشش می‌دهد. محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۶) به ترتیب حداکثر ظرفیت در مراکز تولید، توزیع، جداسازی، بازیافت و دفع را نشان می‌دهند. محدودیت‌های (۱۷) تا (۱۹) به ترتیب تعادل جریان در فرآیند تولید و توزیع محصولات سالم و معیوب را نشان می‌دهند. این محدودیت‌ها بر برقراری موازنه میان مواد اولیه دریافتی (اعم از تأمین مستقیم و بازیافتی) و مقدار مصرف‌شده در تولید، تعادل میان محصولات سالم ارسال‌شده به مراکز توزیع و تحویلی به مشتریان و سایر مراکز و همچنین تنظیم جریان کالاهای معیوب به مسیرهای بازیافت و دفع تمرکز دارند. محدودیت (۲۰) فرآیند تبدیل بخشی از ضایعات قابل بازیافت به مواد اولیه قابل‌استفاده در تولید را تعریف می‌نماید. محدودیت (۲۱) به‌منظور پاسخگویی به تقاضای مشتریان تدوین‌شده و نشان می‌دهد تقاضای هر مشتری یا به‌صورت مستقیم تأمین می‌شود یا به‌عنوان کمبود در مدل لحاظ خواهد شد. محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) نسبت α از محصولات تولیدی را به‌عنوان محصولات سالم شناسایی و به مسیر توزیع اختصاص می‌دهند و سهم باقی‌مانده $(1 - \alpha)$ را به‌عنوان محصولات معیوب به مراکز جداسازی تخصیص می‌دهند. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵)

نیز، تحلیل حساسیت‌های مختلف نسبت به برخی از پارامترهای کلیدی مدل انجام خواهد شد. روند تغییرات تقاضای سه مشتری برای دو محصول طی افق برنامه‌ریزی در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین، جدول ۴ وزن‌دهی معیارها را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از اجرای گام‌های روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوکوسو، امتیاز نهایی هر یک از ده تأمین‌کننده و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس سطح مطلوبیت، در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول، تأمین‌کنندگان شماره ۱۰، ۹ و ۳ با کسب بالاترین امتیاز نهایی، به‌عنوان گزینه‌های منتخب جهت ورود به مدل بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند. این تأمین‌کنندگان از نظر شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و عملیاتی، عملکرد بهتری نسبت به سایرین داشته‌اند. در مرحله بعد، نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌بینی تقاضا با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها و فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب تأمین‌کنندگان به‌عنوان ورودی‌های مدل ریاضی به کار گرفته شده‌اند تا دقت و انسجام تصمیم‌گیری افزایش یابد.

تمام فازهای رویکرد پیشنهادی بر روی سیستمی با پردازنده هشت‌هسته‌ای نسل ششم صورت می‌گیرد. برای پیش‌بینی تقاضا در فاز اول، مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها با استفاده از نرم‌افزار ونسیم با نسخه PLE 7.3.5، اجرا شد. همچنین در مرحله بعدی، برای رتبه‌بندی ده تأمین‌کننده، از شاخص‌های مهمی نظیر کیفیت، ظرفیت، خدمات‌رسانی و ارتباطات استفاده شده است و تمامی مراحل محاسباتی و پیاده‌سازی این فرآیند در محیط برنامه‌نویسی پایتون انجام شده است. وزن هریک از این شاخص‌ها پس از بررسی تطبیقی مطالعات پیشین، مشورت با متخصصان حوزه و داده‌های موجود، تعیین شده به‌طوری‌که توازن میان جنبه‌های کمی و کیفی تصمیم‌گیری حفظ گردد. در فاز نهایی، مدل بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار گمز نسخه ۲۴.۱.۲ و حل‌کننده سیپلکس پیاده‌سازی و اجرا شده است. زمان حل سه مثال عددی به ترتیب برابر با ۱۲۵، ۲۶۶ و ۳۷۵ میلی‌ثانیه می‌باشد.

۵-۱- نتایج حل مدل

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از اجرای مدل ترکیبی پیشنهادی بر روی سه مثال عددی، ارائه می‌شود. در ادامه

جدول ۲. روابط ریاضی مدل جریان - موجودی

Table 2. Mathematical Relationships of the Stock-Flow Model

ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	رابطه
۱	تقاضای جاری	حالت	INTEG (Demand Rate-Customer Churn,80)
۲	نرخ تقاضا	جریان	Customer Acquisition
۳	ریزش مشتری	جریان	Current Demand × Churn Rate
۴	نرخ ریزش	متغیر کمکی	SMOOTH (IF THEN ELSE (Time>1,0.6×Product Quality,0.27×Product Quality))
۵	کیفیت محصولات	متغیر کمکی	0.75
۶	تبلیغات	متغیر کمکی	IF THEN ELSE (Time<2,0.35,0.18)
۷	جذب مشتری	متغیر کمکی	Advertising × Product Quality×100

جدول ۳. نتایج پیش‌بینی تقاضای مشتریان

Table 3. Customer Demand Forecasting Results

محصول / نقاط تقاضا	دوره زمانی ۱	دوره زمانی ۲	دوره زمانی ۳
محصول ۱ برای مشتری ۱	۸۰	۹۰	۸۵
محصول ۲ برای مشتری ۱	۸۰	۹۰	۸۵
محصول ۱ برای مشتری ۲	۷۰	۹۵	۹۰
محصول ۲ برای مشتری ۲	۷۰	۹۵	۹۰
محصول ۱ برای مشتری ۳	۸۵	۸۰	۹۵
محصول ۲ برای مشتری ۳	۸۵	۸۰	۹۵

جدول ۴. وزن دهی بر اساس اهمیت معیارها

Table 4. Weighting Based on the Importance of Criteria

معیار کیفیت	خدمات رسانی	و شهرت	انعطاف پذیری	قیمت	زمان تحویل	موقعیت مکانی و دسترسی	ترافیکی	وزن
۰/۳	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳

جدول ۵. نتایج اجرای روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

Table 5. Results of the Multi-Criteria Decision-Making Method

تأمین‌کننده	شماره ۱۰	شماره ۹	شماره ۳	شماره ۱	شماره ۸	شماره ۲	شماره ۶	شماره ۵	شماره ۷	شماره ۴
امتیاز	۰/۲۸۶۴	۰/۲۷۳۶	۰/۲۷۳۲	۰/۲۶۷۶	۰/۲۶۶۷	۰/۲۶۴۱	۰/۲۶۱۱	۰/۲۵۳۵	۰/۲۵۱۶	۰/۲۴۶۲
رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰

زنجیره‌تأمین رخ نداده است، نیازی به انجام انتقال عرضی میان مراکز توزیع وجود نداشته و جریان محصولات صرفاً در مسیرهای اصلی زنجیره‌تأمین برقرار شده است. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط بدون اختلال، ساختار پایه‌ای زنجیره‌تأمین قادر به پاسخ‌گویی کامل به تقاضای مشتریان بوده و بدون نیاز به مسیرهای جایگزین یا مداخله‌های اصلاحی، جریان محصولات به شکل بهینه مدیریت می‌شود.

۵-۲- تحلیل روند نرخ تقاضا و ریزش مشتری نسبت به تغییرات کیفیت محصول

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب روند نرخ تقاضا و ریزش مشتری نسبت به تغییر کیفیت محصول را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، چهار سناریو برای کیفیت محصول در نظر گرفته شده که سناریو ۱ (شرایط پایه) تا ۴ به ترتیب بیانگر کیفیت ۷۵ درصد، ۹۵ درصد، ۵۰ درصد و ۳۵ درصد هستند. این درصدها بر اساس شاخص عملکرد کیفی و با هدف پوشش طیف واقع‌بینانه‌ای از شرایط تولید، از وضعیت بحرانی تا حالت بهینه تعیین شده‌اند.

بر اساس شکل ۶، کیفیت محصول نقش تعیین‌کننده‌ای در پویایی نرخ تقاضا دارد. در شرایط پایه (کیفیت ۷۵ درصد)، تقاضا در یک سطح نسبتاً پایدار حفظ می‌شود، اما بهبود کیفیت تا سطح ۹۵ درصد منجر به افزایش قابل توجه تقاضا در طول دوره شبیه‌سازی شده است. این روند بیانگر آن است که بهبود کیفیت علاوه بر جذب مشتریان جدید، توانسته است به صورت تجمعی اثر مثبتی بر رشد بازار داشته باشد. در مقابل، کاهش کیفیت به ۵۰ درصد موجب افت محسوس در نرخ تقاضا شده و در

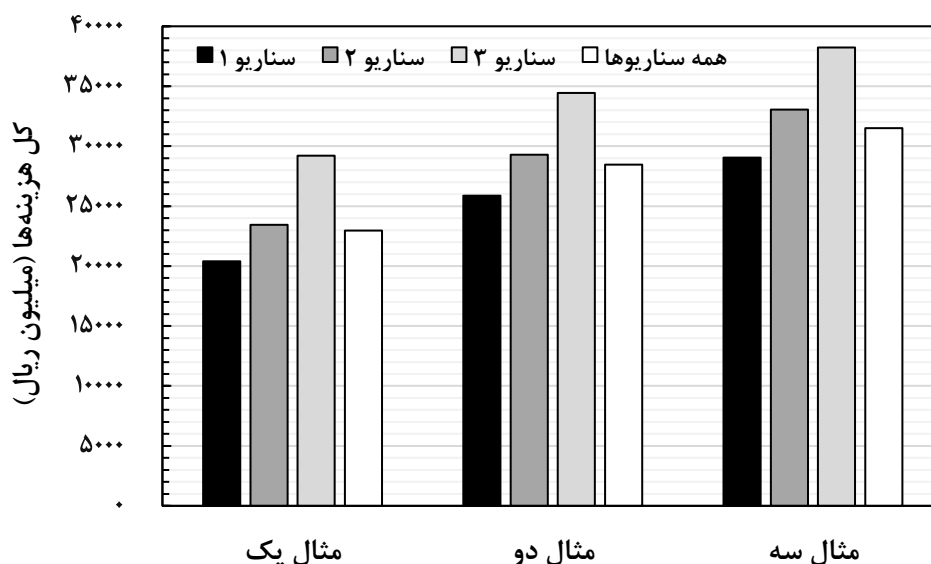
شکل ۴ مقایسه هزینه کل زنجیره‌تأمین را برای سه مثال عددی مختلف در سناریوهای گوناگون اختلال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شدت اختلال، هزینه کل زنجیره‌تأمین روندی افزایشی را دنبال می‌کند که نشان‌دهنده افزایش پیچیدگی زنجیره‌تأمین و تأثیر بیشتر اختلالات است. به عبارت دیگر، در هر سه مثال، سناریوی اول (بدون اختلال) کمترین هزینه را به همراه داشته است، درحالی‌که سناریوی سوم (اختلال شدید) بیشترین هزینه را ایجاد کرده است. سناریوی دوم نیز هزینه‌ای میان دو حالت دیگر دارد و نمایانگر شرایطی با سطح اختلال متوسط است. مدل پیشنهادی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای که همه سناریوها را در نظر می‌گیرد، توانسته است میانگین هزینه کل زنجیره‌تأمین را کاهش دهد. این کاهش هزینه ناشی از ساختار دومرحله‌ای مدل است که با در نظر گرفتن عدم قطعیت و احتمال وقوع سناریوها، تصمیمات استراتژیک (مرحله اول) و تاکتیکی (مرحله دوم) را بهینه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که مدل دومرحله‌ای در هر سه مثال، میانگین هزینه کل را نسبت به سناریوهای اختلال منفرد، کاهش داده است که بیانگر افزایش انعطاف‌پذیری زنجیره‌تأمین حلقه بسته در برابر اختلالات می‌باشد.

شکل ۵ نتایج حاصل از حل مثال یک در سناریوی ۱ و دوره زمانی ۱ برای تولید محصول ۱ را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، مشاهده می‌شود که تأمین‌کننده شماره ۳ در این حالت انتخاب‌نشده و تنها دو تأمین‌کننده دیگر در فرآیند تأمین مواد اولیه مشارکت دارند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه در این سناریو هیچ‌گونه اختلالی در

منجر می‌شود. در مقابل، کاهش کیفیت به ۵۰ و به‌ویژه ۳۵ درصد موجب افزایش شدید ریزش شد، به‌طوری‌که در سناریوی آخر، منحنی ریزش به بالاترین سطح ممکن رسید. این شواهد بیانگر این است که کیفیت محصول نه‌تنها محرک اصلی رشد تقاضا است، بلکه عامل کلیدی در تثبیت مشتریان موجود و جلوگیری از خروج آنان به شمار می‌رود. انتخاب این درصدها بر اساس شاخص عملکرد کیفی و با هدف پوشش طیف واقع‌بینانه‌ای از شرایط تولید و از وضعیت بحرانی تا حالت بهینه تعیین شده‌اند.

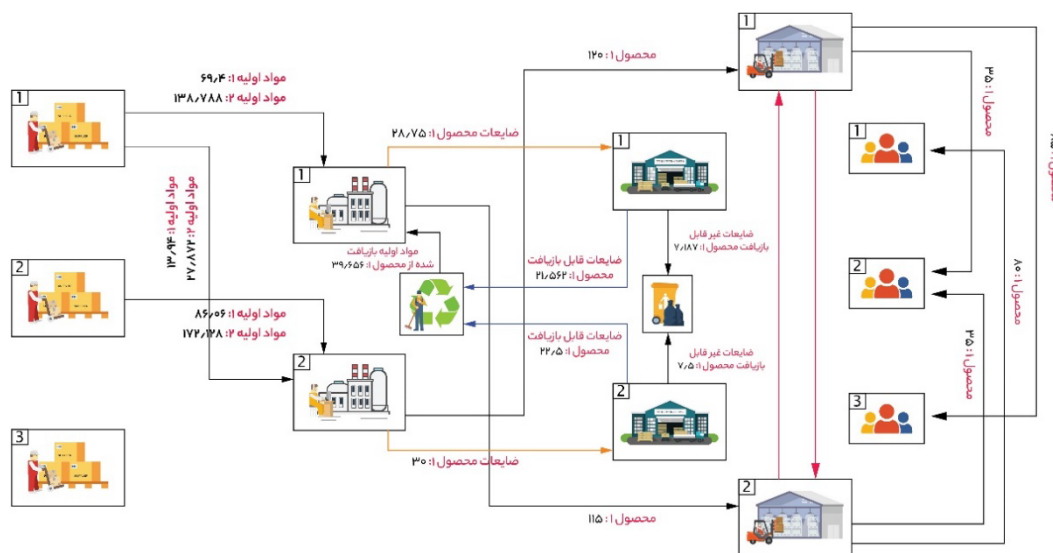
شرایط کاهش شدید کیفیت (۳۵ درصد)، تقاضا به پایین‌ترین سطح خود رسیده است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تغییرات حتی کوچک در کیفیت محصول می‌تواند به‌صورت غیرخطی بر رفتار تقاضا اثر بگذارد و در نتیجه مدیریت کیفیت، به‌ویژه در صنایع رقابتی، از اهمیت حیاتی برخوردار است.

بر اساس شکل ۷، افزایش کیفیت مستقیماً با وفاداری بیشتر همراه است. در سناریوی بهبود کیفیت (۹۵ درصد)، ریزش مشتری به حداقل مقدار خود رسید و این موضوع نشان می‌دهد که ارتقای کیفیت نه‌تنها جذب را افزایش می‌دهد بلکه به کاهش نارضایتی و ترک بازار نیز



شکل ۴. تأثیر سناریوهای مختلف اختلال بر روی کل هزینه زنجیره تأمین.

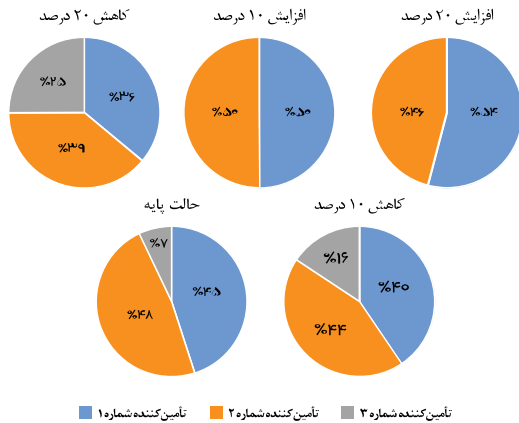
Figure 4. The impact of different disruption scenarios on the total supply chain cost



شکل ۵. نتایج حاصل از حل مدل بهینه‌سازی.

Figure 5. Cost diagram in the examples under different.

مدل، به صورت بهینه از تأمین کنندگان کم هزینه تر استفاده می کند و تنها در صورت اجبار (اختلال یا محدودیت در ظرفیت سایر تأمین کننده ها)، به سمت منابع پرهزینه تر سوق پیدا می کند.



شکل ۸. درصد سهم هر تأمین کننده بر اساس تغییرات ظرفیت.

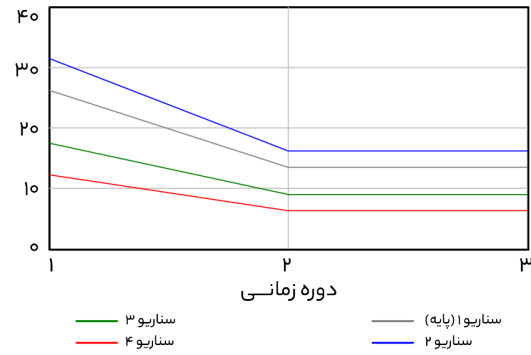
Figure 8. Percentage share of each supplier based on capacity variations

۴-۵- تحلیل حساسیت کل هزینه نسبت به تغییرات نرخ تولید محصولات سالم و نرخ جداسازی ضایعات قابل بازیافت

شکل ۹ تأثیر دو پارامتر کلیدی نرخ تولید محصول سالم (α) و نرخ جداسازی ضایعات قابل بازیافت (β) را بر کل هزینه زنجیره تأمین در مثال یک نشان می دهد. از بررسی نتایج روشن است که کل هزینه زنجیره تأمین به کیفیت تولید محصولات سالم و همچنین به شدت و کارایی فرآیند بازیافت وابسته است؛ زیرا بخشی از ضایعات قابل بازیافت مجدداً به چرخه وارد شده و به عنوان منبعی از مواد اولیه استفاده می گردد. یافته ها بیانگر این است که مستقل از سطح β ، با افزایش α از ۰/۶۵ به ۰/۹۵ کل هزینه به طور پیوسته کاهش می یابد که نشان دهنده تأثیر کیفیت تولید بر کاهش نیاز به تأمین مواد اولیه جدید و کاهش هزینه های مرتبط است. از سوی دیگر، به ازای هر مقدار α ، افزایش β در بازه ۰/۲۵ تا ۰/۹۵ نیز سبب کاهش کل هزینه می گردد، اما شدت اثر β نسبت به α کمتر است.

رفتار تعاملی پارامترها نیز قابل توجه است: وقتی α در سطح پایین تر (مثلاً $\alpha = ۰/۶۵$) قرار دارد، بهبود کارایی

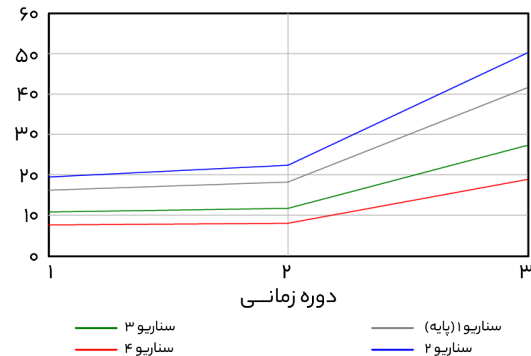
نرخ تقاضا



شکل ۶. روند نرخ تقاضا نسبت به تغییرات کیفیت محصول.

Figure 6. Trend of demand rate with respect to product quality changes

نرخ تقاضا



شکل ۷. روند نرخ ریزش مشتری نسبت به تغییرات کیفیت محصول.

Figure 7. Trend of customer churn rate with respect to product quality changes

۳-۵- تحلیل عملکرد تأمین کنندگان

شکل ۸ درصد سهم هر تأمین کننده بر اساس تغییرات ظرفیت در مثال یک را نشان می دهد. بر اساس شکل، تأمین کننده شماره ۳ در شرایطی انتخاب می شود که ظرفیت تأمین کنندگان ارزان تر (شماره های ۱ و ۲) کاهش یافته باشد. در شرایط کاهش ظرفیت، به دلیل محدودیت در منابع تأمین مطمئن و ارزان، سیستم ناگزیر به استفاده از تأمین کننده سوم می شود تا تقاضای زنجیره تأمین را پوشش دهد. این تأمین کننده اگرچه احتمالاً دارای هزینه های بالاتری است، اما نقش حیاتی در افزایش انعطاف پذیری زنجیره در شرایط بحرانی ایفا می کند. در مقابل، در سناریوهای افزایش ظرفیت که تأمین کنندگان ارزان تر توان عرضه بیشتری دارند، سهم تأمین کننده ۳ به صفر کاهش یافته است. این امر حاکی از آن است که

عدم قطعیت و اختلالات ارائه شد. در فاز نخست، با بهره‌گیری از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، تقاضای مشتریان در افق برنامه‌ریزی پیش‌بینی گردید. در فاز دوم، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوکوسو برای ارزیابی و رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان به کار گرفته شد تا تأمین‌کنندگان مناسب با در نظر گرفتن شاخص‌های کلیدی مانند قیمت، انعطاف‌پذیری و زمان تحویل انتخاب شوند. سپس در فاز سوم، نتایج این دو مرحله به‌عنوان ورودی مدل بهینه‌سازی تصادفی چندمحصولی و چنددوره‌ای مورد استفاده قرار گرفت. هدف مسئله حداقل‌سازی کل هزینه زنجیره تأمین در مواجهه با سناریوهای مختلف اختلال است. نتایج حاصل از اجرای مدل بر روی سه مثال عددی نشان داد که چارچوب پیشنهادی قادر است با ترکیب دقیق پیش‌بینی تقاضا، انتخاب بهینه تأمین‌کنندگان و بهره‌گیری از استراتژی انتقال عرضی، ضمن کاهش کل هزینه، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری زنجیره تأمین را در برابر اختلالات افزایش دهد. همچنین، یافته‌ها بیانگر این موضوع است که ظرفیت تأمین، نرخ تولید محصول سالم و در نظر گرفتن انتقال عرضی بیشترین تأثیر را بر عملکرد زنجیره تأمین دارند.

- بینش‌های مدیریتی به‌صورت خلاصه عبارت‌اند از:
 - انتقال عرضی بین مراکز توزیع می‌تواند هزینه‌ها را در شرایط اختلال لینک‌های حمل و نقل کاهش دهد؛ بنابراین، مدیران در طراحی زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای باید مسیرهای جایگزین را مدنظر قرار دهند.
 - استفاده از منابع تأمین چندگانه، انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین را در مواجهه با کاهش ظرفیت یا اختلالات افزایش می‌دهد. از این رو، تضمین تداوم تأمین در شرایط بحرانی ضروری است.
 - تقاضا تحت تأثیر کیفیت و واکنش مصرف‌کنندگان قرار دارد. مدیران می‌توانند با بهره‌گیری از پویایی‌شناسی سیستم‌ها، پیامد سیاست‌های بازاریابی یا بهبود کیفیت را پیش از اجرا ارزیابی کنند تا از نوسانات ناگهانی در تولید و موجودی جلوگیری شود.
 - ارتقای درصد محصولات سالم تولیدشده، هزینه کل زنجیره تأمین را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، سرمایه‌گذاری در بهبود کیفیت تولید، ضمن

بازیافت (افزایش β)، نقش برجسته‌تری در کاهش هزینه دارد؛ در حالی که در سطوح بالای α (مثلاً $\alpha = 0.95$) اثر افزایش β بر هزینه کل تضعیف می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که بیشترین کارایی سیستم بازیافت، زمانی است که کیفیت تولید اولیه پایین‌تر باشد، یعنی بازیافت می‌تواند تا حدی کمبود کیفیت تولید را جبران کند. در نتیجه، نتایج شکل ۹ حاکی از آن است که کمینه‌سازی هزینه زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای، نیازمند بهینه‌سازی هم‌زمان α و β است؛ بدین معنا که تصمیم‌گیران نباید این دو پارامتر را به‌صورت جداگانه و مجزا بهبود دهند، بلکه سیاست‌های یکپارچه‌ای که هم کیفیت تولید را ارتقا می‌دهد و هم ظرفیت و کارایی بازیافت را تقویت می‌کند، بیشترین تأثیر را در کاهش کل هزینه‌ها و افزایش پایداری اقتصادی زنجیره خواهند داشت.

۵-۵- تأثیر انتقال عرضی بر کل هزینه‌های زنجیره تأمین

شکل ۱۰ تأثیر در نظر گرفتن انتقال عرضی بر کل هزینه زنجیره تأمین را در سه مثال عددی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ابعاد مسئله، روند کلی هزینه زنجیره چه در حالت وجود انتقال عرضی و چه در حالت عدم وجود آن، صعودی است؛ با این حال، میزان تغییرات با توجه به مقیاس مسئله متفاوت است. در هر سه مثال، انتقال عرضی موجب کاهش کل هزینه‌های زنجیره تأمین شده و نشان می‌دهد این سازوکار می‌تواند به‌طور مؤثری کمبود ظرفیت یا اختلالات در لینک‌های حمل و نقل را جبران کند. علاوه بر این، انتقال عرضی امکان استفاده بهینه از منابع موجود در مسیر توزیع محصولات را فراهم ساخته و انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این است که انتقال عرضی نه تنها از لحاظ فنی، بلکه از منظر مدیریتی نیز یک سیاست استراتژیک مؤثر برای افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین و کاهش ریسک‌های ناشی از اختلالات محسوب می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک رویکرد ترکیبی جهت طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته ظروف شیشه‌ای تحت شرایط

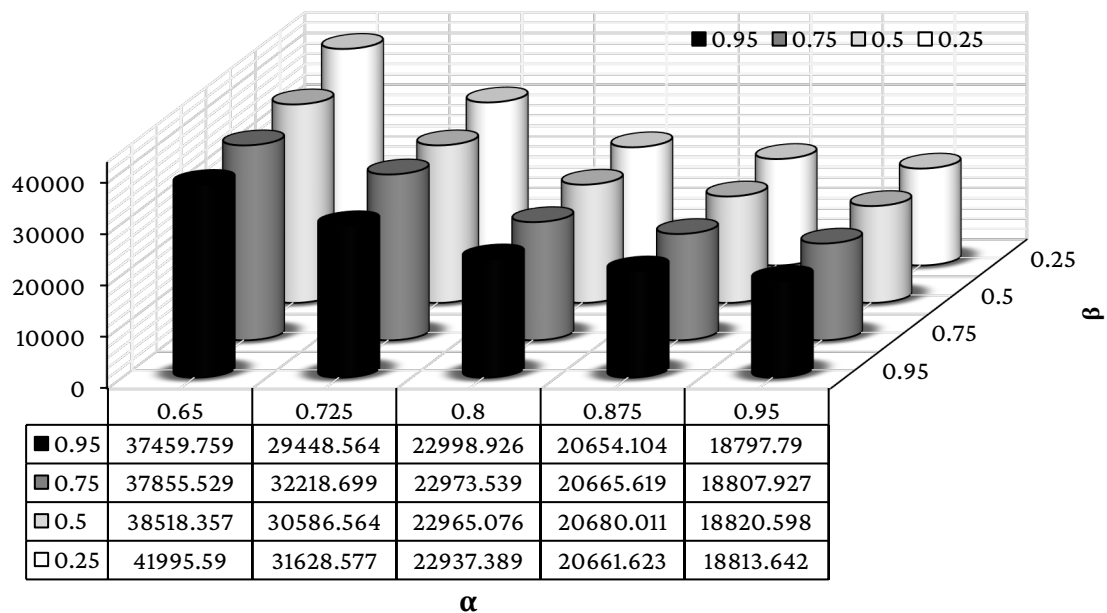
موقعیت جغرافیایی و سطح ریسک اختلال جهت طراحی سیاست‌های تولید و توزیع کارآمدتر

- در نظر گرفتن انواع ریسک‌های اختلالی در تسهیلات و لینک‌های حمل‌ونقل و توسعه استراتژی‌های تاب‌آوری مانند مسیرهای جایگزین، موجودی اضطراری از پیش تعیین شده و قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان برای مقابله با این اختلالات

کاهش هزینه‌ها، کارایی زنجیره را افزایش می‌دهد.

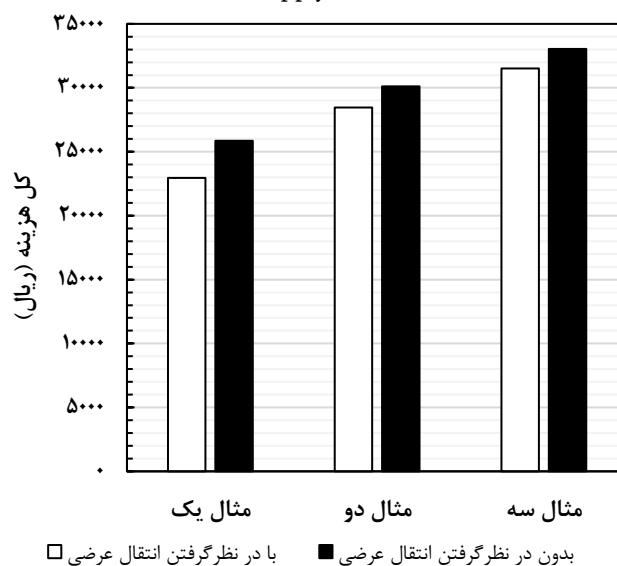
پیشنهاد‌های آتی عبارت‌اند از:

- یکپارچه‌سازی مدل پیشنهادی با تصمیمات عملیاتی مانند مسیریابی و زمان‌بندی وسایل حمل‌ونقل جهت برآورد دقیق‌تر و واقعی‌تر هزینه‌ها و عملکرد زنجیره تأمین ظروف شیشه‌ای
- به‌کارگیری رویکردهای داده‌محور جهت خوشه‌بندی مشتریان بر اساس الگوهای تقاضا،



شکل ۹. تأثیر نرخ تولید محصولات سالم و نرخ جداسازی ضایعات قابل بازیافت بر کل هزینه زنجیره تأمین.

Figure 9. The impact of the production rate of defect-free products and the separation rate of recyclable scrap on the total supply chain cost.



شکل ۱۰. تأثیر انتقال عرضی بر کل هزینه زنجیره تأمین.

Figure 10. The impact of lateral transshipment on the total supply chain cost.

- approach. *System Engineering and Productivity*, 3(3), 33-62 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/msb.2023.711489>
- Hemmasian Etefagh, M. (2022a). Identifying and evaluating factors affecting contractor selection using a combination of construction management perspectives and multi-criteria decision-making methods. *System Engineering and Productivity*, 2(2), 105-121 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2022.243413>
- Hemmasian Etefagh, M. (2022b). Modeling of machinery productivity management based on system dynamics approach. *System Engineering and Productivity*, 2(1), 107-124 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2022.243407>
- Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178-191. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.025>
- Malekpour Kolbadinejad, S., & Bagherinejad, J. (2023). Presenting a dual-objective location-inventory model for designing an integrated forward/reverse logistics network. *System Engineering and Productivity*, 3(1), 1-40 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/sep.2023.706141>
- Motevalli, S. H., Nazarizadeh, F., & Mir Shahvelayati, F. (2024). Identifying and evaluating strategic options for advancing the resilience of the Kaleh Dairy Company's supply chain. *System Engineering and Productivity*, 3(4), 106-135 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2021449.1176>
- Pourjavad, E., & Mayorga, R. V. (2019). An optimization model for network design of a closed-loop supply chain: A study for a glass manufacturing industry. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 14(3), 169-179. <https://doi.org/10.1080/17509653.2018.1512387>
- Sadjady Naeni, H., & Sabbaghi, N. (2022). Sustainable supply chain network design: A case of the glass manufacturer in Asia. *International Journal of Production Economics*, 248, 108483. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108483>
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Wang, Y., Ji, X., & Lang, Y. (2023). A bi-objective optimization model for a low-carbon supply chain network with risk of uncertain disruptions. *Symmetry*, 15(9), 1707. <https://doi.org/10.3390/sym15091707>
- Yazdani, M., Zarate, P., Kazimieras Zavadskas, E., & Turskis, Z. (2019). A combined compromise
- مشارکت‌های نویسندگان**
- تمامی نویسندگان نقش و سهم یکسان در نگارش این مقاله داشته‌اند.
- تضاد منافع**
- نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به صورت بی طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به دست آمده است.
- قدردانی**
- نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش دادند، قدردانی می‌نمایند.
- مراجع**
- Baptista, S., Barbosa-Póvoa, A. P., Escudero, L. F., Gomes, M. I., & Pizarro, C. (2019). On risk management of a two-stage stochastic mixed 0-1 model for the closed-loop supply chain design problem. *European Journal of Operational Research*, 274(1), 91-107. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.041>
- Borumand, A., Marandi, A., Nookabadi, A. S., & Atan, Z. (2024). An oracle-based algorithm for robust planning of production routing problems in closed-loop supply chains of beverage glass bottles. *Omega*, 122, 102939. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102939>
- Ghomi-Avili, M., Niaki, S. T. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2023). A blockchain-based system for a network design problem considering pricing decisions and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138696. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138696>
- Guide, V. D. R., Jr., & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10-18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Hajiaghahi-Keshteli, M., & Fathollahi Fard, A. M. (2019). Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition. *Neural Computing and Applications*, 31(9), 5343-5377. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3369-5>
- Hassanpour, H. A., Aliyari, S., Barzegar, H., & Zarei, M. (2023). Modeling supply chain disruption in the apparel supply chain and analyzing its improvement solution with a system dynamics

solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision*, 57(9), 2501–2519. <https://doi.org/10.1108/MD-05-2017-0458>

Zarrinpoor, N. (2021). Designing a sustainable supply chain network for producing high-value products from waste glass. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 39(12), 1489–1500. <https://doi.org/10.1177/0734242X21994669>

Ziari, M., & Sajadieh, M. S. (2022). A joint pricing and network design model for a closed-loop supply chain under disruption (glass industry). *RAIRO - Operations Research*, 56(1), 431–444. <https://doi.org/10.1051/ro/2022002>