Journal of Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

A Multi-Compartment Vehicle Routing Problem Considering Multimodal Transportation in a Supply Chain

Najva Shekari [a], Seyyed Mohammad Hadji Molana [b*], Reza Tavakkoli-Moghaddam [c], Seyed Ahmad Yazdian [d]

[a] Department of Industrial Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. najva.shekari@iau.ac.ir
[b] Department of Industrial Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. molana@iau.ac.ir
[c] School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. tavakoli@ut.ac.ir
[d] Department of Industrial Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. a.yazdian@iau.ac.ir

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Shekari N, Hadji Molana S M, Tavakkoli-Moghaddam R, Yazdian S A. A Multi-Compartment Vehicle Routing Problem Considering Multimodal Transportation in a Supply Chain. Journal of Industrial Innovations. 2026; 4(3):164-185.

https://doi.org/10.22034/jii.2026.742441

KEYWORDS

Supply Chain;
Multimodal Transportation;
Routing;
Multi Compartment Vehicle;
Multi Objective Programing.

ABSTRACT

Today, economic growth and the enhancement of social welfare have led to a significant surge in demand for transportation services. In this context, optimizing logistics costs is a fundamental prerequisite not only for reducing final product prices but also for establishing a competitive advantage and ensuring the sustainability of domestic supply chains. Addressing this challenge requires comprehensive approaches to transportation network optimization. Particularly within the pharmaceutical supply chain, the necessity of achieving timely delivery at minimal cost has rendered the Multi Compartment Vehicle Routing Problem an indispensable strategy. By facilitating the simultaneous transport of diverse products, these vehicles maximize distribution efficiency and enhance customer responsiveness with greater economic viability. This study proposes a novel model for a Multi Compartment Vehicle Routing Problem integrated with multimodal transportation within the supply chain, aimed at minimizing both total network costs and distribution time. The proposed model is solved using the TH multi objective optimization approach via GAMS version 23 software. The computational results demonstrate the efficiency and robustness of the model. Furthermore, to validate its practical applicability, a real-world case study of the pharmaceutical supply chain in Tehran is presented, confirming the model's effectiveness in optimizing complex distribution networks.

Extended Abstract

1. Introduction

The pharmaceutical industry holds strategic importance due to its direct impact on public health and economic dimensions, and the optimal design of the pharmaceutical supply chain as an integrated process from raw material procurement to safe consumption by patients requires effective coordination among suppliers, manufacturers, distributors, pharmacies, and hospitals. Achieving this coordination depends on interdependent decisions, including the location of distribution centers and the allocation of transportation routes, whose separate treatment increases total system costs. Since a considerable share of pharmaceutical product costs is attributed to the transportation and distribution system, multimodal transportation emerges as an efficient and cost effective alternative to single mode approaches that improves distribution time and enhances cost efficiency and service quality. Moreover, given the need to control conditions such as temperature in pharmaceutical products, multi compartment vehicles enable drugs with different temperature requirements to be carried in separate adjustable compartments within a shared vehicle, thereby reducing loading and transportation costs and enabling more flexible delivery patterns within a single trip.

* Corresponding author.
E-mail address: molana@iau.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22034/jii.2026.742441
Received: August 21, 2026; Received in revised form: September 21, 2026; Accepted: October 5, 2026.
Article type: Research Paper

2. Modeling and formulation

Given the importance of this issue, a pharmaceutical supply chain network is considered, comprising a set of raw material suppliers and a set of intermediate nodes for changing transportation modes. In this framework, pharmaceutical production and distribution centers are also incorporated, and multi compartment vehicles are assigned to these facilities to transport pharmaceutical products to demand points. The arrival time of the products at the demand points is explicitly considered in the proposed model. Accordingly, multi-compartment vehicles are assigned to deliver pharmaceutical products to pharmacies and hospitals, which serve as the demand points. Ultimately, an optimal supply chain network is designed and implemented to minimize the total cost and overall distribution time of the network.

3. Figures and Tables

In this study, a fuzzy solution approach is considered to solve the proposed model. In order to demonstrate the validity of the model and the efficiency of the proposed solution method, several numerical tests have been performed and the results obtained (value and satisfaction of each objective function) are shown in Table 1 with different degrees of importance for the objective functions. As expected, it is observed that the proposed solution method provides unique solutions for different degrees of importance for the objective functions.

Table 1 Sensitivity analysis results in terms of different values of ϕ for different problems

O/F/N/M/H/P/C/D/V/K	(ϕ_1, ϕ_2)	(Z_1, μ_1)	(Z_2, μ_2)
1/2/3/2/1/3/2/9/2/2	(0.6 , 0.4)	(36970159.05, 0.86)	(2432.53, 0.77)
	(0.4 , 0.6)	(38043664.59, 0.83)	(2021.04, 0.89)
	(0.5 , 0.5)	(37391057.66, 075)	(2216.81, 0.82)
2/2/3/3/2/3/3/11/2/3	(0.6 , 0.4)	(44122058.42, 0.79)	(3810.84, 0.76)
	(0.4 , 0.6)	(46730483.00, 0.84)	(3291.63, 0.83)
	(0.5 , 0.5)	(45014673.16, 0.91)	(3568.55, 0.89)
3/2/4/3/2/4/4/13/3/4	(0.6 , 0.4)	(61905235.18, 0.72)	(5027.11, 0.85)
	(0.4 , 0.6)	(64898801.64, 0.79)	(4318.02, 0.91)
	(0.5 , 0.5)	(62485542.43, 0.82)	(4688.42, 0.68)
3/3/4/4/3/5/5/16/4/5	(0.6 , 0.4)	(91130859.64, 0.74)	(7648.05, 0.85)
	(0.4 , 0.6)	(95044106.00, 0.69)	(7129.18, 0.87)
	(0.5 , 0.5)	(93653728.25, 0.74)	(7403.57, 0.77)

4. Conclusion and Future Research

In this study, a bi-objective mathematical model was presented for the integrated design and planning of the pharmaceutical supply chain, considering multi-compartment vehicles, multimodal transportation, and distribution time constraints. The proposed model aims to establish a balance between two conflicting criteria, including minimizing the total network cost and minimizing the total distribution operation time, and integrates decisions related to raw material procurement, selection of intermediate nodes, multimodal transportation, allocation of drug production and distribution, and routing of multi-compartment vehicles. To solve the multi-objective model, the Torabi–Hassini (TH) method was used, which allows multiple objectives to be converted into a single-objective problem and a compromise solution to be obtained. The results of the experimental problems also demonstrated the capability of the proposed solution method to obtain high-quality solutions. In order to examine the applicability of the model in a real-world environment, a case study of the pharmaceutical supply chain in Tehran was conducted. The results showed that the model is capable of simultaneously and integratively determining decisions related to supplier selection, selection of intermediate nodes, changes in transportation modes, allocation of manufacturing plants and distribution centers, and routing of multi-compartment vehicles. In the case study, only a subset of the candidate intermediate nodes was selected, and an appropriate combination of transportation modes was used to transport raw materials. In addition, the allocation of multi-compartment vehicles to distribution centers enabled the simultaneous fulfillment of demand at different demand points. These results show that considering these decisions in an integrated manner can prevent isolated decision-making at different levels of the supply chain and provide the basis for more efficient utilization of transportation capacity. The results of the sensitivity analysis showed that demand and service time are parameters affecting network performance. An increase in demand increased the total system cost while reducing the total operation time, whereas an increase in service time increased the total operation time and reduced the total cost. These findings indicate the existence of a trade-off between cost and time in the design and operation of the pharmaceutical supply chain network and emphasize the importance of considering these two criteria simultaneously in managerial decision-making. From a managerial perspective, the research findings show that the use of multi-compartment vehicles can enable the consolidation of different types of drugs and more effective utilization of fleet capacity, while multimodal transportation and intermediate nodes allow for greater flexibility in the transportation of raw materials and facilitate a balance between transportation cost and time. Hence, pharmaceutical supply chain decision-makers can design a more appropriate configuration for the distribution network by simultaneously considering the network structure, product characteristics, fleet capacity, service time, and demand conditions.

Finally, based on the results obtained, the proposed model provides an integrated framework to support pharmaceutical supply chain design and planning decisions. However, some assumptions of the model can be extended in future research. Among others, uncertainty in travel time and service time, sharing among distribution centers, multi-period decision-making,

and environmental sustainability considerations can be incorporated into the model. In addition, developing more efficient solution methods for large-scale instances and validating the model in real-world networks using operational data can provide suitable directions for future studies.

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند محفظه‌ای با در نظر گرفتن حمل‌ونقل چندوجهی در زنجیره‌تامین

نجوا شکاری[الف]، سید محمد حاجی مولانا[ب*]، رضا توکلی مقدم[ج]، سید احمد یزدیان[د]

[الف] گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. najva.shekari@iau.ac.ir

[ب] گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. molana@iau.ac.ir

[ج] دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. tavakoli@ut.ac.ir

[د] گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. a.yazdian@iau.ac.ir

واژگان کلیدی

زنجیره تامین؛
حمل‌ونقل چندوجهی؛
مسیریابی؛
وسیله نقلیه چندمحفظه‌ای؛
برنامه‌ریزی چند هدفه.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۳

چکیده

امروزه رشد اقتصادی و ارتقای سطح رفاه اجتماعی، منجر به افزایش چشمگیر تقاضا برای خدمات حمل‌ونقل شده است. در چنین بستری، بهینه‌سازی هزینه‌های لجستیک نه تنها عاملی برای کاهش قیمت نهایی کالاها، بلکه یکی از شرایط اساسی در ایجاد مزیت رقابتی و پایداری زنجیره‌های تامین داخلی محسوب می‌شود. دستیابی به این مهم، نیازمند اتخاذ رویکردهای جامع و بهینه‌سازی شبکه‌های ترابری است. در این میان، به‌ویژه در زنجیره تأمین دارو، چالش ارسال به‌موقع کالا با حداقل هزینه موجب شده تا استفاده از مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه چندمحفظه‌ای به ضرورتی انکارناپذیر تبدیل شود، چرا که این وسایل‌نقلیه با امکان حمل همزمان محصولات گوناگون، بهره‌وری شبکه توزیع را به حداکثر رسانده و پاسخگویی به نیاز مشتریان را با دقت و صرفه اقتصادی بیشتری همراه می‌سازند. در این مطالعه یک مسئله مسیریابی وسایل چند محفظه‌ای با درنظر گرفتن حمل و نقل چندوجهی در زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است که هدف آن کاهش هزینه‌های کل شبکه و زمان کل توزیع می‌باشد. مدل با استفاده از رویکرد چند هدفه TH با نرم افزار GAMS ورژن ۲۳ حل شده است که نتایج حاصل از آن نشان دهنده کارایی مدل دارد. همچنین به منظور نشان دادن کاربرد مدل ارائه شده در دنیای واقعی، مطالعه موردی برای زنجیره تأمین دارویی در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۱- مقدمه

صنعت داروسازی به دلیل تأثیرات مستقیم بر سلامت جامعه و ابعاد اقتصادی آن، همواره مورد توجه ویژه دولت‌ها و سیاست‌گذاران بوده است. از این رو، طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین دارویی و مدیریت اثربخش سازمان‌های درگیر در توسعه و تولید دارو از اهمیت بالایی برخوردار است [۳-۱]. زنجیره تأمین دارو، فرآیندی یکپارچه و هماهنگ است که از تأمین مواد اولیه آغاز شده و تا مصرف ایمن توسط بیمار ادامه می‌یابد. کیفیت و پایداری این زنجیره به طور مستقیم به سطح هماهنگی میان تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، شرکت‌های پخش، داروخانه‌ها و بیمارستان‌ها وابسته است تا تضمین شود که داروهای حیاتی، با کیفیت مطلوب و در زمان و مکان مناسب به دست مصرف‌کننده نهایی می‌رسند [۴،۵].

* نویسنده مسئول؛
آدرس پست الکترونیک: molana@iau.ac.ir

با این حال، تحقق چنین هماهنگی پایداری در شبکه توزیع، مستلزم اتخاذ تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی دقیقی است که در رأس آن‌ها، تصمیم‌گیری پیرامون مکان‌یابی مراکز توزیع و تخصیص مسیرهای حمل‌ونقل قرار دارد. از آنجا که بخش عمده‌ای از هزینه‌های شرکت‌های دارویی ناشی از فرآیندهای لجستیکی است، بهینه‌سازی مکان تسهیلات و تصمیمات مسیریابی در سیستم توزیع می‌تواند مزایای مالی و لجستیکی قابل‌توجهی به همراه داشته باشد [۶]. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که تصمیمات مکان‌یابی و مسیریابی به شدت به یکدیگر وابسته هستند و بررسی مجزای آن‌ها منجر به افزایش هزینه‌های کل سیستم می گردد [۷]. یک سیستم توزیع کارآمد که در آن تعداد و مکان انبارها و همچنین شبکه‌های حمل‌ونقل به طور بهینه تعیین شده باشند، نه تنها هزینه‌های عملیاتی را حداقل می‌سازد، بلکه سطح خدمت‌رسانی و رضایت بیماران را نیز بهبود می‌بخشد [۸]. در مسیر بهبود عملکرد این سیستم‌های توزیع، مدیریت زنجیره تأمین با چالش انتخاب بین شبکه‌های حمل‌ونقل تک‌حالته و چندوجهی[1] مواجه است. در لجستیک دارویی که بیش از ۴۰ درصد از قیمت تمام‌شده محصولات به سیستم حمل‌ونقل و توزیع اختصاص دارد [۹،۱۰]، حمل‌ونقل چندوجهی به عنوان جایگزینی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای روش‌های سنتی جاده‌ای تک‌وجهی (به ویژه در مسافت‌های طولانی) مطرح می‌شود [۱۱]. این رویکرد که تلفیقی از حالت‌های مختلف حمل‌ونقل در یک زنجیره انتقال است، به بهبود زمان توزیع، کاهش هزینه‌ها، ارتقای کیفیت خدمات و کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند [۱۴-۱۲]. با این حال، پیاده‌سازی لجستیک چندوجهی به دلیل ماهیت چندمرحله‌ای جریان شبکه، نیازمند مدل‌های برنامه‌ریزی دقیق در سطح تاکتیکی است تا جریان انتقال کالا را به شکلی مطمئن و کم‌هزینه هدایت کند [۱۵].

علاوه بر چالش‌های مسیریابی و چندوجهی بودن، حمل‌ونقل اقلام دارویی با محدودیت‌های بیولوژیکی و فیزیکی خاصی نظیر لزوم کنترل دما روبروست. در گذشته، خرده‌فروشان و توزیع‌کنندگان ناگزیر بودند برای حمل محصولاتی با نیازهای دمایی متفاوت، از خودروهای تک‌محفظه‌ای مجزا استفاده کنند که این امر هزینه‌های لجستیک را به شدت افزایش می‌داد. امروزه با پیشرفت‌های فناوری، استفاده از وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای[2] این امکان را فراهم آورده است تا داروهایی با نیازهای دمایی گوناگون در محفظه‌های مجزا و با دماهای قابل‌تنظیم در یک وسیله نقلیه مشترک حمل شوند [۱۶،۱۷]. استفاده از این ناوگان انعطاف‌پذیر، نه تنها هزینه‌های بارگیری و حمل را تا تقریبا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد [۱۶]، بلکه الگوهای تحویل جدید و منعطفی را برای پاسخگویی به تقاضای متنوع داروخانه‌ها و مراکز درمانی در یک سفر واحد فراهم می‌سازد.

در این مطالعه با توجه به اهمیت ویژه هماهنگی شبکه زنجیره تأمین دارو، ویژگی‌های مسئله به شرح زیر می‌باشد:

۱) ارائه مدل ریاضی کاربردی و جدید برای هماهنگی تأمین، تولید و توزیع اقلام دارویی در یک شبکه زنجیره تأمین دارو
۲) توسعه مدل دو هدفه برای تصمیمات مکانیابی- مسیریابی و زمانبندی با در نظر گرفتن حمل و نقل چندوجهی
۳) در نظر گرفتن ناوگان چندمحفظه‌ای جهت حمل محصولات با الزامات دمایی متفاوت
۴) ارائه مطالعه موردی جهت کاربرد مدل ارائه شده در دنیای واقعی

۲- مرور ادبیات

مطالعات زیادی در زمینه زنجیره تأمین دارو، حمل و نقل چندوجهی و مسیریابی وسایل نقلیه چند محفظه‌ای با درنظر گرفتن زمانبندی انجام شده است. زنجیره تأمین دارو یکی از پیچیده‌ترین و حساس‌ترین زنجیره‌های تأمین در حوزه سلامت محسوب می‌شود، زیرا علاوه بر الزامات معمول زنجیره‌های تأمین مانند کاهش هزینه، افزایش بهره‌وری و مدیریت موجودی، دارای محدودیت‌های ویژه‌ای نظیر الزامات کیفی، قوانین نظارتی، کنترل شرایط نگهداری، حساسیت زمانی و ضرورت تأمین مستمر دارو برای بیماران است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی ابعاد مختلف مدیریت زنجیره تأمین دارو پرداخته‌اند. مطالعه مروری سوشمیتا و همکاران [۱۸] بر بهینه‌سازی عملکر زنجیره تمرکز داشته است. جابری دوست و همکاران [۵] ریسک‌های زنجیره تأمین دارو را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که ریسک‌های تأمین‌کنندگان، مشکلات تولید، عدم قطعیت تقاضا، محدودیت‌های قانونی، مشکلات لجستیکی و حمل‌ونقل از مهم‌ترین عوامل ایجاد اختلال در زنجیره تأمین دارویی هستند.

[1] Multimodal Transportation
[2] Multi-Compartment Vehicle

موسوی و توکلی مقدم [۱۹] یک مدل برنامه‌ریزی مختلط- عدد صحیح دو مرحله‌ای را برای مکان‌یابی مراکز انتقال بی‌واسطه و مسائل زمان‌بندی مسیریابی وسایل‌نقلیه با انتقال بی واسطه، ارائه کرده و آن را با استفاده از یک الگوریتم جدید بر مبنای شبیه‌سازی تبرید ترکیبی دو مرحله‌ای با یک لیست ممنوعه که از جستجوی ممنوع اقتباس شده، حل کردند.

توکایا و همکاران [۲۰] مسئله مکان‌یابی مراکز توزیع را در یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی ارائه کردند. بر این اساس، آن‌ها ابتدا با استفاده از فرآیند شبکه تحلیلی، بهترین شیوه حمل‌ونقل و بهترین مکان‌های بالقوه برای ایجاد مراکز توزیع را انتخاب کردند و سپس مسئله مکان‌یابی مراکز توزیع را حل نمودند. تیواری و همکاران [۲۱] یک مسئله انتخاب مسیر را در یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی ارائه کردند. مسئله چندهدفه برای حداقل رساندن زمان سفر و هزینه سفر، زمان‌بندی‌های بعدی و زمان‌های تحویل هر ارائه‌دهنده خدمات در هر جفت مکان با فرمول‌بندی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه شد. کوک و همکاران [۲۲] مدلی را برای مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه چندمحفظه‌ای با محفظه‌هایی با ابعاد پیوسته و انعطاف‌پذیر ارائه کردند. در این مسئله، محصولات مختلف از نقاط مشتری جمع‌آوری و با کمترین هزینه به انبار منتقل می‌شوند. به‌منظور جلوگیری از اختلاط محصولات گوناگون در یک وسیله‌نقلیه، ظرفیت خودرو به تعداد مشخصی محفظه مجزا تقسیم شده است. ابعاد هر محفظه می‌تواند به‌صورت انعطاف‌پذیر و در محدوده ظرفیت کل وسیله‌نقلیه تعیین شود و هر محفظه نیز قابلیت حمل یک یا چند محموله از یک نوع محصول را دارد. به‌منظور حل مدل پیشنهادی، این پژوهشگران از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته‌اند. در ادامه، هسیائو و همکاران [۲۳]، علاوه بر انعطاف‌پذیری ابعاد محفظه‌ها، قابلیت تنظیم انعطاف‌پذیر دمای هر محفظه را نیز در نظر گرفتند و برای حل مسئله، رویکردی مبتنی بر بهینه‌سازی جغرافیای زیستی ارائه کردند. ستانی و همکاران [۲۴] فرصت‌های پیکربندی مجدد در زنجیره‌های تأمین دارویی ناشی از مداخلات فناوری در تولید و مدل‌های جدید و بیمارمحورتر تحویل را مورد ارزیابی قرار داده اند. فضایلی و همکاران [۸] یک مسئله مکان‌یابی- مسیریابی چندوجهی را با پنجره‌های زمانی و تقاضاهای فازی ارائه دادند. مدل آن‌ها به طور همزمان مکان‌هایی را برای استقرار انبارها، پایانه‌های چندوجهی (برای ارائه تسهیلات تغییر حالت)، مسیرهای چندوجهی برای تحویل محصولات به انبارها و تورهایی برای تحویل محصولات به مشتریان تعیین می‌کند. مدینا و همکاران [۲۵] برای حل مسئله شرکت‌های حمل‌ونقلی که با تقاضای مشتریان برای تحویل سریع مواجه هستند یک مدل دو فرمول‌بندی برای مسئله طراحی و مسیریابی شبکه خدمات که برنامه‌ریزی‌های حمل‌ونقل طولانی مدت و محلی را برعهده دارند، پیشنهاد دادند. مارتینز و همکاران [۲۶] یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند محفظه‌ای را برای دوره‌های متعدد ارائه داده‌اند که تحویل‌های ثابت در بخش‌ها را در نظر گرفته اما از الگوهای تحویل داده شده به عنوان پارامتر ورودی استفاده کرده‌اند. در مسئله آن‌ها، ناوگانی از وسایل نقلیه چند محفظه‌ای برای توزیع استفاده شده و یک پنجره زمانی منحصر به فرد برای تحویل هر بخش محصول به هر فروشگاه به طور مداوم در طول افق برنامه‌ریزی تعریف شده است. وینسنت و همکاران [۲۷] مدل جدیدی از مسئله مکان‌یابی-مسیریابی را معرفی کردند که در آن تقاضاهای وابسته به زمان بر اساس زمان رسیدن وسیله‌نقلیه مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش، کمینه‌سازی هزینه‌های کل شامل هزینه‌های سفر، تجهیز انبار و بهره‌برداری از ناوگان بوده است. از سوی دیگر، فرانک و همکاران [۱۷] با تمرکز بر وسایل‌نقلیه چندمحفظه‌ای، به بررسی الگوهای تحویل پرداخته‌اند. آن‌ها با اصلاح ساختار سنتی کامیون‌های چندمحفظه‌ای، امکان تحویل مشترک را فراهم آورده‌اند که منجر به تأثیرگذاری همزمان بخش‌های مختلف محصول بر الگوهای تحویل هفتگی تکرارشونده می‌گردد. کاربرد عملی این مدل نیز از طریق یک مطالعه موردی بر روی یک خرده‌فروشی بزرگ مواد غذایی در آلمان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

زخروف وهمکاران [۲۸] مدل بهینه‌سازی جدید برای بازیابی شبکه حمل‌ونقل چندوجهی ارائه داده‌اند. مدل ارائه شده برای اختلال در جاده‌ها برای امدادرسانی کالاها در زمان زلزله و سونامی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل آن‌ها با در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل شبکه جاده‌ای و پایانه‌های چندوجهی برای ارسال کالاهای امدادی، یک تصمیم یکپارچه از فعالیت‌های بازسازی را ارائه می‌کند. دلفانی و همکاران [۲۹] یک زنجیره تأمین دارویی جدید و کارآمد ارائه دادند که قادر به پیاده‌سازی پارامترهای نامشخص مانند تقاضا و هزینه‌های خرید دارو می‌باشد. آن‌ها یک مسئله چند هدفه طراحی شبکه زنجیره تأمین دارو با در نظرگرفتن قابلیت اطمینان و زمان تحویل را در نظر گرفته‌اند. همچنین برای حل مدل از رویکرد بهینه‌سازی فازی استوار

استفاده نمودند. وانگ و همکاران [۳۰] با توسعه یک الگوریتم ژنتیک خوشه‌بنیان، به حل مسئله مسیریابی خودروهای چندانباری با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و محدودیت‌های بارگذاری سه‌بعدی پرداختند. در این پژوهش، یک طرح اشتراک منابع بر پایه خوشه‌بندی مشتریان پیشنهاد شده است که با هدف دستیابی به تعادل در توزیع فضایی منابع مکانی، منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی در شبکه‌های لجستیک چندانباری مشترک می‌گردد. علاوه‌بر این، وانگ و همکاران [۳۱] با تمرکز بر زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی، مدل مسیریابی خودروهای برقی چندمحفظه‌ای را معرفی کردند که در آن، مدیریت پنجره‌های زمانی در کنار تنظیم دقیق دما و رطوبت لحاظ شده است.

نجیمی و همکاران [۳۲] مدل تعادل بازار چند ارائه‌دهنده چندوجهی را با استفاده از رویکرد نظری بازی[1] ارائه دادند. این مطالعه یک مدل تعادل بازار چند ارائه‌دهنده چندوجهی تعمیم‌یافته را برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل پیشنهاد می‌کند. قیصری‌ها و همکاران [۳۳] مدلی یکپارچه را برای زنجیره عرضه صنایع لبنی طراحی کردند که جنبه‌های عرضه، تولید و توزیع را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در عرضه و تقاضا پوشش می‌دهد. در فاز عرضه، یک سیستم تولید پیچیده چند دوره‌ای، چند محصولی و چند مرحله‌ای با ظرفیت‌های متغیر تولید و الزامات فسادپذیری خاص محصولات در هر مرحله، مورد تحلیل قرار گرفته است. علاوه‌بر این، در مرحله توزیع، ملاحظات مربوط به وسایل‌نقلیه چندمحفظه‌ای، همراه با پنجره‌های زمانی اختصاص یافته به محصولات و امکان تحویل زودهنگام یا دیرهنگام، لحاظ شده است. یکی از مطالعات بنیادی در زمینه بهینه‌سازی عملکرد زنجیره تأمین است که نشان می‌دهد موضوعاتی مانند یکپارچگی اعضای زنجیره، توسعه پایدار و شرایط کشورهای در حال توسعه کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. پاتز و همکاران [۳۴] برای حمل‌ونقل دارو به دلیل حساسیت بالا مفهوم زنجیره تأمین سرد دارویی را مورد بررسی قرار دادند که در آن ادغام هماهنگ‌سازی دارو و روش‌های متنوع تحویل مورد بررسی قرار گرفته شده است. یکی از دغدغه‌های حیاتی لجستیکی، برنامه‌ریزی توزیع است که بسته به امکانات و کالاهای مورد استفاده، حیاتی است. رضاعلی و همکاران [۳۵] زنجیره‌های تأمین سه سطحی برای کالاهای فاسدشدنی برای ایجاد یک شبکه زنجیره تأمین که هزینه‌ها را به حداقل می‌رساند، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به طور همزمان برنامه‌ریزی تولید و توزیع وابسته به زمان را در نظر گرفتند که هدف ارائه یک استراتژی تولید و توزیع برای خدمت‌رسانی بهتر به مشتریان و مصرف‌کنندگان بود.

مسمودی و همکاران [۳۶] مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند محفظه‌ای برای جمع‌آوری زباله با در نظر گرفتن ماشین ظرفشویی را معرفی کردند. این مسئله شامل ناوگانی از کامیون‌های جمع‌آوری زباله فشرده مجهز به ماشین ظرفشویی است که هر نوع زباله را در محفظه مربوطه وسیله نقلیه فشرده می‌کند. وسایل نقلیه همچنین می‌توانند سطل‌ها را بشویند. مکان‌های جداسازی و ایستگاه‌های پر کردن مجدد آب در این مسئله در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مسئله یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی کارآمد توسعه داده شده است. برای یک زنجیره تأمین کارآمد در شرایط عدم قطعیت، تخصیص کارآمد منابع برای تولید و توزیع بسیار ضروری است. حسین و حسین [۳۷] بر ادغام مشکلات تولید و توزیع در عین مدیریت اهداف متناقض و پرداختن به عدم قطعیت‌ها تمرکز کردند. در مدل ارائه شده، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چند هدفه فازی برای به حداقل رساندن همزمان کل هزینه تولید یکپارچه و زمان تحویل در میان عدم قطعیت‌ها توسعه داده شده است.

آیر و راب [۳۸] یک بررسی سیستماتیک بر روی مدل‌های بهینه‌سازی زنجیره سرد انجام داده‌اند. زنجیره‌های سرد به دلیل حفظ کیفیت محصولات حساس به دما، از مرحله تهیه تا تحویل، کمک می‌کنند و بسیار حیاتی می‌باشند. آن‌ها با بررسی مطالعات زیادی، مزایای استفاده از این زنجیره سرد را در حوزه تجاری، زیست‌محیطی و اجتماعی که بسیار قابل‌توجه بود، ارائه دادند. جیا و همکاران [۳۹] یک مسئله زمان‌بندی یکپارچه طراحی، تولید و توزیع در کارگاه‌های مختلط توزیع‌شده را با در نظر گرفتن شرایط سفارشی‌سازی انبوه شخصی‌سازی‌شده را مورد بررسی قرار دادند. هدف آن‌ها به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل، هزینه‌های کل و کل تأخیر بود. همچنین یک الگوریتم تکاملی مشارکتی چند جمعیتی با کمک یادگیری و دانش برای حل مدل توسعه داده شده استفاده نمودند. سپهری و همکاران [۴۰] شبکه زنجیره تأمینی را طراحی کردند که در آن بهینه‌سازی مسائل موجودی-مکانیابی-تخصیص تسهیلات به منظور تحویل محصول قابل اعتماد برای کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن مورد مطالعه

[1] Game-Theoretic Approach

قرار گرفته شده است. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه، با تمرکز بر پیکربندی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار قابل اعتماد ارائه دادند. هدف مدل ارائه شده به حداقل رساندن هزینه‌ها، به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای و به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان بوده است. یانگ و همکاران [۴۱] یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه شامل چندین دوچرخه باری و ربات‌های خودران را با تمرکز بر محدودیت‌های بارگذاری واقع‌بینانه مورد بررسی قرار دادند. در این مدل برخلاف اکثر مسائل موجود که ظرفیت‌های وسیله نقلیه تک‌مقداری و تقاضای مشتری را فرض می‌کنند، ربات‌های مجهز به کانتینرهایی با اندازه‌های مختلف و مشتریانی که چندین بسته دریافت می‌کنند در نظر گرفته شده است و در نتیجه محدودیت‌های بسته‌بندی سه بعدی معرفی شده است. اسلام و همکاران [۴۲] با هدف بهینه‌سازی انتخاب روش حمل‌ونقل، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای کاهش همزمان هزینه و زمان تحویل ارائه دادند. آن‌ها با به‌کارگیری رویکرد مجموع وزنی و حل آن، مدل خود را از طریق یک مطالعه موردی لجستیکی اعتبارسنجی کرده و کارایی آن را به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری اثبات کردند.

با وجود پیشرفت‌های حاصل شده در هر یک از حوزه‌های یادشده، بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر جنبه‌های خاصی از مسئله تمرکز داشته‌اند. به عبارت‌دیگر، کمتر مطالعه‌ای توانسته است مدل‌های مکان‌یابی-مسیریابی را به صورت یکپارچه با شبکه‌های حمل‌ونقل چندوجهی و محدودیت‌های عملیاتی پیچیده‌ای همچون زمان‌بندی تحویل و به‌کارگیری ناوگان چندمحفظه‌ای برای محصولات دارویی با شرایط نگهداری حساس تلفیق کند. در واقع، شکاف تحقیقاتی موجود ناشی از نادیده گرفتن تعاملات پویای میان این متغیرهاست؛ چرا که بررسی مجزا هر یک از این مؤلفه‌ها، منجر به از دست رفتن فرصت‌های بهینه‌سازی در سطح کلان شبکه می‌گردد. این پژوهش با هدف پرکردن این خلأ، مدلی ریاضی و یکپارچه ارائه می‌دهد که ضمن لحاظ کردن محدودیت‌های زمانی و ماهیت خاص داروها، تصمیمات استراتژیک مکان‌یابی را با تصمیمات عملیاتی مسیریابی در یک بستر حمل‌ونقل چندوجهی و با استفاده از ناوگان چندمحفظه‌ای ترکیب می‌کند. این رویکرد یکپارچه، با هدف کاهش هزینه‌های کل شبکه، حذف ترددهای اضافی و بهبود کارایی زمان رسیدن محصول به دست مشتری طراحی شده است تا پاسخی جامع به چالش‌های لجستیکی در صنعت حساس داروسازی باشد.

۳- مدل‌سازی و فرمول‌بندی ریاضی

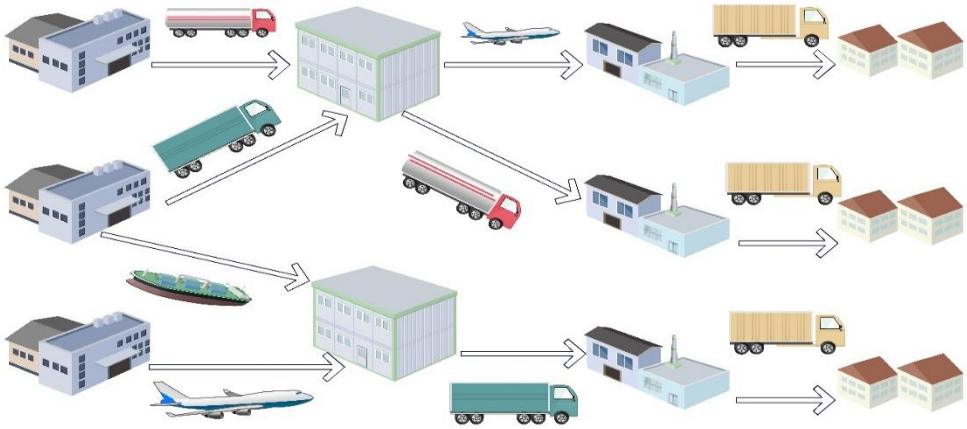
در این بخش، چارچوب ریاضی مسئله مسیریابی وسایل‌نقلیه چندمحفظه‌ای با لحاظ ساختار حمل‌ونقل چندوجهی در زنجیره تأمین توسعه یافته ارائه می‌گردد. ابتدا در بخش ۳-۱ تعریف مسئله ارائه می‌گردد. سپس در بخش ۳-۲ مفروضات مسئله معرفی می‌گردد. در بخش ۳-۳ نمادهای ریاضی شامل مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها معرفی شده و در نهایت در بخش ۳-۴ مدل ریاضی ارائه می‌گردد.

۳-۱-تعریف مسئله

در این پژوهش، مسئله طراحی شبکه یکپارچه توزیع دارو با تمرکز بر بهره‌وری لجستیکی و بهینه‌سازی جریان کالا بررسی می‌شود. پیچیدگی اصلی این شبکه ناشی از تنوع محصولات دارویی است که دارای ویژگی‌های متفاوت نظیر ابعاد، وزن، الزامات دسته‌بندی و سازگاری نوع محصول می‌باشند. طراحی شبکه توزیع در این شرایط، مستلزم توازنی دقیق میان دو شاخص کلیدی زمان پاسخ‌گویی به تقاضا و هزینه‌های عملیاتی زنجیره تأمین است. با توجه به ضرورت جداسازی محصولات دارویی بر اساس کلاس‌بندی‌های مختلف جهت جلوگیری از اختلاط فیزیکی یا رعایت قوانین تخصیص، از وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای بهره گرفته شده است. این رویکرد امکان حمل هم‌زمان گروه‌های مختلف دارویی را در محفظه‌های جداگانه فراهم می‌آورد. این مکانیزم نه‌تنها بهره‌برداری از ظرفیت ناوگان را به حداکثر می‌رساند، بلکه با تجمیع تقاضاها و کاهش ترددهای غیرضروری در مسیرهای توزیع، هزینه‌های لجستیکی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. مدل پیشنهادی با عبور از رویکردهای حمل و نقل تکی، از الگوی حمل‌ونقل چندوجهی جهت یکپارچه سازی حمل‌ونقل استفاده می‌کند. در این ساختار، شبکه شامل مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان، مراکز تولید، نقاط واسط جهت تغییر مد حمل‌ونقل (جاده‌ای، ریلی و هوایی) و در نهایت نقاط تقاضا (بیمارستان‌ها و داروخانه‌ها)

است. تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مد حمل‌ونقل در هر بخش از مسیر، متغیری استراتژیک در جهت افزایش کارایی کل شبکه محسوب می‌شود.

مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه فرموله شده است. هدف اول، کمینه‌سازی کل هزینه‌های زنجیره تامین (شامل هزینه‌های حمل‌ونقل بین‌وجهی، هزینه‌های ثابت و متغیر مراکز توزیع و هزینه‌های عملیاتی ناوگان) است. هدف دوم، کمینه‌سازی زمان کل چرخه عملیات است که با در نظر گرفتن زمان‌بندی دقیق در گره‌های واسط و مسیرهای توزیع، تضمین‌کننده تحویل به‌موقع سفارش‌ها به مراکز درمانی می‌باشد. در شکل ۱ ساختار گرافیکی شبکه و جریان کالا از تأمین‌کنندگان تا مراکز تولید و در نهایت توزیع در میان نقاط تقاضا به تصویر کشیده شده است. این مدل با تخصیص بهینه وسایل‌نقلیه چندمحفظه‌ای به مسیرهای توزیع، در تلاش است تا با مدیریت هوشمندانه منابع و انتخاب بهینه مدهای حمل‌ونقل، کارایی کل زنجیره تأمین را به حداکثر برساند.



شکل ۱ ساختار گرافیکی شبکه و جریان کالا

۳-۲-نمادهای ریاضی

۳-۲-۱-مجموعه‌ها

O: مجموعه تأمین‌کنندگان

F: مجموعه مواد اولیه

O_f: زیر مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان که قادر به تأمین مواد اولیه نوع f هستند

N: مجموعه ای از گره‌های میانی برای تغییر مدهای حمل و نقل

M: مدهای حمل ونقل

H: مجموعه کارخانه‌ها (تولید کننده‌ها)

P: مجموعه داروهای تولید شده (محصولات نهایی)

P_f: زیر مجموعه‌ای از داروهایی که نیاز به مواد اولیه f دارند

C: مجموعه شرکت‌های پخش دارو

D: مجموعه داروخانه‌ها/بیمارستانها

V: مجموعه کامیونهای چند محفظه‌ای برای انتقال داروها از کارخانه به شرکت‌های پخش دارو

δ_v: محفظه‌های متعلق به کامیون v

K: مجموعه وسایل چندمحفظه‌ای یخچالدار برای حمل و توزیع دارو بین داروخانه‌ها/بیمارستانها

E_k: مجموعه محفظه‌های متعلق به وسیله k

(i,j,h): اندیس گره‌ها

۳-۲-۲- پارامترها

$\widetilde{de}_{ip}$: تقاضای داروی نوع p برای بیمارستان/داروخانه $i\epsilon D$

cap_{pi}: ظرفیت تولید داروی نوع p در کارخانه $i\epsilon H$

bm_{mf}: ظرفیت مد حمل و نقل m برای مواد اولیه نوع f

θ_{fi}: ظرفیت تامین‌کننده $i\epsilon O_f$ برای تأمین مواد اولیه نوع f

LQ_p: ظرفیت کل عرضه داروی نوع p در تمام شرکت‌های پخش دارو

MQ_{pi}: ماکزیمم ظرفیت شرکت $i\epsilon C$ برای عرضه دارو p

μ_p: نرخ مجاز اضافه تقاضا برای داروی p

qk_e: ظرفیت محفظه e وسیله چندمحفظه‌ای یخچالدار توزیع دارو بین داروخانه‌ها/بیمارستانها

qv_δ: ظرفیت محفظه δ کامیون انتقال‌دهنده دارو به شرکت‌های پخش

γ_{pe}: پارامتر باینری است مقدار یک می‌گیرد اگر دارو p در محفظه e قابل حمل باشد (در فرآیند توزیع دارو بین داروخانه‌ها)

$\beta_{p\delta}$: پارامتر باینری است که مقدار یک می‌گیرد اگر داروی نوع p در محفظه δ قابل حمل باشد (در فرآیند انتقال از کارخانه به شرکت پخش)

ca_{fm}: هزینه حمل‌ونقل هر واحد مواد اولیه نوع f به ازای هر واحد مسافت برای مد حمل و نقل m

$cb^f_{mm'}$: هزینه تغییر مد حمل‌ونقل از m به m' برای مواد اولیه نوع f

cz_p: هزینه تولید و بسته‌بندی هر واحد دارو نوع p

ch_k: هزینه هر واحد مسافت طی شده توسط وسیله چندمحفظه‌ای k

cf_p: هزینه تخلیه و بارگیری هر واحد محصول نوع p

dis_{ij}: مسافت بین i و j

ε_k: سرعت وسیله چند محفظه‌ای k در فرآیند توزیع

ϑ: هزینه جریمه به ازای هر واحد اضافه تقاضا

cs_{fi}: هزینه سفارش‌دهی مواد اولیه نوع f از تامین‌کننده $i\epsilon O_f$

cd_{ij}^{p}: هزینه انتقال دارو p از کارخانه i به شرکت پخش j

σ: زمان ثابت سرویس‌دهی به داروخانه‌ها/ بیمارستانها

$\tilde{\varphi}_{ip}$: زمان سرویس‌دهی متغیر که به مقدار تحویل بستگی دارد

T: حداکثر زمان مجاز برای تحویل دارو به داروخانه/ بیمارستان در هر تور

۳-۲-۳- متغیرها

W_{ijm}^{fh}: مقدار مواد اولیه نوع f که از طریق مد حمل و نقل m، از گره i به گره j به کارخانه h ارسال می‌شود

u_{ijm}^{fh}: مقدار یک می‌گیرد اگر مواد اولیه نوع f از طریق مد حمل و نقل m و کمان بین گره‌های i و j به کارخانه h ارسال شود

$L_{if}^{mm'}$: مقدار یک می‌گیرد اگر مد حمل‌ونقل در گره $i\epsilon N$ برای مواد نوع f از m به m' تغییر کند؛ در غیر اینصورت صفر

IR_{ip}: مقدار داروی نوع p تولید شده در کارخانه i؛ $i\epsilon H$

α_{vi}: مقدار یک می‌گیرد اگر کامیون v به کارخانه i تخصیص یابد؛ در غیر اینصورت صفر

$R_{ij\delta}^{p}$: مقدار داروی نوع p ارسال شده از کارخانه i به شرکت پخش j توسط محفظه $\delta\epsilon\delta_v$ متعلق به کامیون v

g_{jp}: مقدار داروی نوع p عرضه شده توسط شرکت پخش j

x_{ijk}: مقدار یک می‌گیرد اگر وسیله چند محفظه‌ای k گره i را قبل از گره j بازدید کند در فرآیند توزیع دارو بین داروخانه‌ها/ بیمارستانها؛ در غیر اینصورت صفر

y_{ipe}: مقدار یک می‌گیرد اگر داروی نوع p مورد تقاضای داروخانه/بیمارستان j توسط محفظه $e\epsilon E_k$ متعلق به وسیله k تحویل داده شود؛ در غیر اینصورت صفر

λ_e: مقدار یک می‌گیرد اگر محفظه $e\epsilon E_k$ متعلق به وسیله k فعال باشد ؛ در غیر اینصورت صفر

z_{ij}: مقدار یک می‌گیرد اگر داروخانه/بیمارستان i به شرکت j تخصیص یابد؛ در غیر اینصورت صفر

zk_{jk}: مقدار یک می‌گیرد اگر گره $j\epsilon C \cup D$ در مسیر وسیله k قرار گیرد؛ در غیر اینصورت صفر

τ_{jk}: زمان رسیدن وسیله چند محفظه‌ای k به داروخانه/ بیمارستان j

un_{jk}: متغیرهای کمکی برای حذف زیر تور

۳-۳- مدل ریاضی

$$\min Z_1 = \sum_{i\epsilon O_f \cup N} \sum_{j\epsilon H\cup N} \sum_{m\epsilon M} \sum_{f\epsilon F} \sum_{h\epsilon H} ca_{fm}\, dis_{ij}\, w_{ijm}^{fh} + \sum_{i\epsilon N} \sum_{m\epsilon M} \sum_{m'\epsilon M} \sum_{f\epsilon F} cb_{mm'}^{f}\, L_{if}^{mm'} + \sum_{i\epsilon H} \sum_{p\epsilon p} cz_p\, IR_{ip} + \sum_{i\epsilon H} \sum_{j\epsilon C} \sum_{p\epsilon P} \sum_{\delta\epsilon\delta_v} \sum_{v\epsilon V} cd_{ij}^{p}\, R_{ij\delta}^{p} + \sum_{j\epsilon D} \sum_{p\epsilon P} \sum_{e\epsilon E_k} \sum_{k\epsilon K} cf_p\, \widetilde{de}_{jp}\, y_{jpe} + \sum_{i\epsilon C\cup D} \sum_{j\epsilon C\cup D} \sum_{k\epsilon K} dis_{ij}\, ch_k\, x_{ijk} + \sum_{j\epsilon C} \sum_{p\epsilon P} \vartheta . zm_{jp} \quad (۱)$$

$$min\, Z_2 = \sum_{j\epsilon D\cup C} \sum_{k\epsilon K} \tau_{jk} \quad (۲)$$

$$s.t$$

$$\sum_{j\epsilon O_f\cup N} \sum_{h\epsilon H} u_{jim}^{fh} + \sum_{j\epsilon H\cup N} \sum_{h\epsilon H} u_{ijm'}^{fh} = 2\, L_{if}^{mm'} \qquad \forall\ i\epsilon N\ \ , f\epsilon F\ \ ,\ \ m,m'\epsilon M \quad (۳)$$

$$\sum_{j\epsilon O_f\cup N} \sum_{h\epsilon H} \sum_{m\epsilon M} u_{jim}^{fh} - \sum_{j\epsilon H\cup N} \sum_{h\epsilon H} \sum_{m\epsilon M} u_{ijm'}^{fh} = \begin{cases} 1 & i\epsilon H \\ 0 & i\epsilon N \\ -1 & i\epsilon O_f \end{cases} \quad \forall\ f\epsilon F \quad (۴)$$

$$w_{ijm}^{fh} \le bm_{mf} * u_{ijm}^{fh} \qquad \forall\ i,j\epsilon O_f \cup N \cup N\ \ , h\epsilon H\ \ , f\epsilon F\ \ , m\epsilon M \quad (۵)$$

$$\sum_{i\epsilon O_f} \sum_{j\epsilon N} \sum_{m\epsilon M} w_{ijm}^{fh} = \pi_f \,.\, \sum_{p\epsilon P_f} IR_{hp} \qquad \forall\ \ f\epsilon F\ \ \ , h\epsilon H \quad (۶)$$

$$IR_{ip} \le cap_{pi} \qquad \forall\ \ p\epsilon P\ \ \ , i\epsilon H \quad (۷)$$

$$\sum_{j\epsilon C} \sum_{\delta\epsilon\delta_v} \sum_{v\epsilon V} R_{ij\delta}^{p} \le IR_{ip} \qquad \forall\ \ p\epsilon P\ \ \ , i\epsilon H \quad (۸)$$

$$\sum_{i\epsilon H} \alpha_{vi} \le 1 \qquad \forall\ \ v\epsilon V \quad (۹)$$

$$R_{ij\delta}^{P} \le qv_\delta\, \beta_{p\delta}\, \alpha_{vi} \qquad \forall\ \ i\epsilon H\ \ , j\epsilon C\ \ , \delta\epsilon\delta_v\ \ , v\epsilon V\ \ \ , p\epsilon P \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i\epsilon H} \sum_{\delta\epsilon\delta_v} \sum_{v\epsilon V} R_{ij\delta}^{p} \ge g_{jp} \qquad \forall\ \ j\epsilon C\ \ \ , p\epsilon P \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i\epsilon D} \widetilde{de}_{ip}\, z_{ij} \le \left(1+\mu_p\right) g_{jp} \qquad \forall\ \ j\epsilon C\ \ \ , p\epsilon P \quad (۱۲)$$

$$\sum_{j\epsilon C} z_{ij} = 1 \qquad \forall\ \ \ i\epsilon D \quad (۱۳)$$

$$\sum_{i\epsilon D} z_{ij} \ge 1 \qquad \forall\ \ j\epsilon C \quad (۱۴)$$

$$\sum_{j\epsilon C} g_{jp} \le LQ_p \qquad \forall\ \ p\epsilon P \quad (۱۵)$$

$$g_{jp} \le MQ_{pj} \qquad \forall\ j\epsilon C\ ,p\epsilon P \tag{۱۶}$$

$$y_{jpe} \le \lambda_e .\ \gamma_{pe} \qquad \forall\ j\epsilon D\ ,p\epsilon P\ \ ,e\epsilon E_k\ \ ,k\epsilon K \tag{۱۷}$$

$$\sum_{e\epsilon E_k} \lambda_e \ge 1 \qquad \forall\ k\epsilon K \tag{۱۸}$$

$$\sum_{j\epsilon C} zk_{jk} = 1 \qquad \forall\ \ k\epsilon K \tag{۱۹}$$

$$\sum_{k\epsilon K} zk_{jk} \ge 1 \qquad \forall\ j\epsilon C \tag{۲۰}$$

$$\sum_{k\epsilon K} zk_{jk} = 1 \qquad \forall\ j\epsilon D \tag{۲۱}$$

$$zk_{jk} \ge x_{jik} \qquad \forall\ \ i,j\epsilon D\cup C\quad ;i\ne j\ \ ,k\epsilon K \tag{۲۲}$$

$$\sum_{i\epsilon C}\sum_{j\epsilon D} x_{ijk} \le 1 \qquad \forall\ k\epsilon K \tag{۲۳}$$

$$\sum_{j\epsilon D}\sum_{k\epsilon K} x_{ijk} \ge 1 \qquad \forall\ i\epsilon C \tag{۲۴}$$

$$\sum_{j\epsilon D\cup C} x_{ijk} - \sum_{j\epsilon D\cup C} x_{jik} = 0 \qquad \forall\ i\epsilon D\cup C\ ;i\ne j\ \ ,\ \ k\epsilon K \tag{۲۵}$$

$$un_{jk} - un_{ik} + |D| * x_{jik} \le |D| - 1 \qquad j,i\epsilon C\ \ ,k\epsilon K \tag{۲۶}$$

$$z_{ij} \ge x_{jik} \qquad \forall\ i\epsilon D\ \ ,j\epsilon C\ \ ,k\epsilon K \tag{۲۷}$$

$$\sum_{k\epsilon K} x_{ijk} \le 1 \qquad \forall\ \ i,j\epsilon D\cup C\quad ;i\ne j \tag{۲۸}$$

$$\sum_{i\epsilon C\cup D}\sum_{k\epsilon K} x_{ijk} = 1 \qquad \forall\ \ j\epsilon D \tag{۲۹}$$

$$\sum_{p\epsilon P}\sum_{e\epsilon E_k} y_{jpe} \le |P| .\sum_{i\epsilon C\cup D} x_{ijk} \qquad \forall\ j\epsilon D\ \ ,k\epsilon K \tag{۳۰}$$

$$\sum_{i\epsilon D}\sum_{p\epsilon P} \widetilde{de}_{ip}\ y_{ipe} \le qk_e \qquad \forall\ e\epsilon E_k\ \ \ ,k\epsilon K \tag{۳۱}$$

$$\tau_{jk} \ge \frac{dis_{ij}}{\varepsilon_k} + \sigma - bigm * \left(1 - x_{ijk}\right) \qquad \forall\ \ j\epsilon D\ \ ,i\epsilon C\ \ ,k\epsilon K \tag{۳۲}$$

$$\tau_{jk} \ge \tau_{ik} + \frac{dis_{ij}}{\varepsilon_k} + \sigma + \sum_{p\epsilon P}\sum_{e\epsilon E_k} \tilde{\varphi}_{ip}\ y_{ipe} - bigm * \left(1 - x_{ijk}\right) \quad \forall\ \ i\epsilon D\ \ ,j\epsilon D \cup C\ \ ,k\epsilon K \tag{۳۳}$$

$$\tau_{ik} + \frac{dis_{ij}}{\varepsilon_k} + \sigma + \sum_{p\epsilon P}\sum_{e\epsilon E_k} \tilde{\varphi}_{ip}\, y_{ipe} - bigm * (1 - x_{ijk}) \leq T \qquad \forall\ i\epsilon D\ \ , j\epsilon C\ \ , k\epsilon K \tag{۳۴}$$

تابع هدف (۱) هزینه‌های کل شبکه و تابع هدف (۲) زمان عملیات توزیع را حداقل می‌سازد. محدودیت (۳) پیوستگی حمل در شبکه چندوجهی را تضمین می‌کند. محدودیت (۴) اصل تعادل در شبکه چندوجهی را تعریف می‌کند. محدودیت (۵) ارتباط بین متغیرها و میزان مواد اولیه ارسالی از تأمین‌کنندگان را نشان می‌دهد. محدودیت (۶) تعادل مواد اولیه نوع f منتقل شده از تامین‌کنندگان و تولید داروهای مختلف بواسطه مواد اولیه نوع f در کارخانه h را نشان می‌دهد. محدودیت (۷) ظرفیت تولید هر نوع دارو در هر کارخانه را نشان می‌دهد. محدودیت (۸) نشان می‌دهد میزان داروی نوع p منتقل شده از هر کارخانه توسط محفظه‌های کامیون‌ها به شرکت‌های پخش، از میزان تولید شده در کارخانه تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۹) تضمین می‌کند که هر کامیون چند محفظه‌ای فقط به یک کارخانه سرویس می‌دهد. محدودیت (۱۰) ظرفیت محفظه هر کامیون خروجی از کارخانه را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند میزان عرضه هر نوع دارو توسط هر شرکت پخش، از میزان داروی منتقل شده از تمام کارخانه‌ها تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد تقاضای تمام داروخانه‌ها/ بیمارستانهای تخصیص یافته به هر شرکت پخش، توسط عرضه آن شرکت در نرخ اضافه تقاضای مجاز، برآورده می‌شود. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند هر داروخانه/ بیمارستان به یک شرکت پخش تخصیص می‌یابد. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد که هر شرکت به بیش از یک داروخانه/ بیمارستان خدمت می‌دهد. محدودیت (۱۵) تضمین می‌کند عرضه کل تمام شرکت‌های پخش از هر نوع دارو نباید از حدکلی تجاوز کند. محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند مقدار عرضه شده هر نوع دارو از هر شرکت پخش از ماکزیمم ظرفیت عرضه آن شرکت تجاوز نمی‌کند. محدودیت (۱۷) تضمین می‌کند هر نوع دارو در محفظه فعال مختص خود به داروخانه/ بیمارستان حمل می‌شود. محدودیت (۱۸) نشان می‌دهد در هر وسیله حمل چند محفظه‌ای، بیش از یک محفظه فعال است. محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند هر وسیله چند محفظه‌ای تنها به یک شرکت پخش تعلق دارد. محدودیت (۲۰) نشان می‌دهد به هر شرکت پخش حداقل یک وسیله تخصیص می‌یابد. محدودیت (۲۱) تضمین می‌کند هر داروخانه/ بیمارستان در مسیر یک کامیون قرار می‌گیرد. محدودیت (۲۲) نشان می‌دهد هر وسیله از طریق اتصال i و j سفر می‌کند اگر و فقط اگر j در مسیر k باشد. محدودیت (۲۳) هر وسیله چند محفظه‌ای حداکثر از یک شرکت پخش ارسال می‌شود. در محدودیت (۲۴) نشان داده که از هر شرکت پخش حداقل یک وسیله خارج می‌شود. محدودیت (۲۵) حفظ جریان برای وسیله چند محفظه‌ای در فرآیند توزیع دارو بین داروخانه‌ها/ بیمارستانها را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۶) حذف زیر تور و محدودیت (۲۷) ارتباط بین متغیرها را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۸) تضمین می‌کند برای هر مسیر توزیع حداکثر یک وسیله انتخاب می‌شود. محدودیت (۲۹) تضمین می‌کند هر داروخانه/ بیمارستان یکبار خدمت دریافت می‌کند. محدودیت (۳۰) تضمین می‌کند تحویل دارو به هر داروخانه/ بیمارستان فقط توسط محفظه‌های وسیله‌ای انجام می‌شود که از آنها بازدید کرده باشد. محدودیت (۳۱) ظرفیت هر محفظه وسیله چند محفظه‌ای در فرآیند توزیع را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۲) و (۳۳) زمان رسیدن وسیله چند محفظه‌ای به داروخانه/ بیمارستان در فرآیند توزیع دارو را تنظیم می‌کند. محدودیت (۳۴) تضمین می‌کند که هر تور در فرآیند توزیع محصول از حداکثر زمان تعیین شده تجاوز نمی‌کند.

۴- روش حل

در متون علمی اخیر، رویکردهای متنوعی برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه توسعه یافته است که در میان آن‌ها، الگوریتم‌های مبتنی بر منطق فازی به دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری بالا در تبیین سطح برآورده‌سازی توابع هدف، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. با تکیه بر این مزیت رقابتی، پژوهش حاضر جهت دستیابی به راهکار بهینه برای مسئله مسیریابی چندوجهی توزیع دارو، از روش حل چندهدفه پیشنهادی توسط ترابی و حسینی [۴۳] بهره می‌گیرد. این رویکرد به دلیل کارآمدی در

مدیریت توابع هدف متعارض و حصول نتایج نزدیک به فضای بهینه پارتو، به عنوان چارچوب محاسباتی این مطالعه انتخاب شده است.

۴-۱- رویکرد حل چندهدفه TH

فرآیند محاسباتی این رویکرد در قالب هشت گام منسجم عملیاتی می‌شود:

گام اول: شناسایی پارامترها و متغیرهای نامعین و استخراج توابع توزیع متناسب برای استفاده در ساختار مدل.
گام دوم: تدوین مدل ریاضی مسئله بر پایه پارامترهای مشخص‌شده در گام اول.
گام سوم و چهارم: تبدیل محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به مدل قطعی معادل
گام پنجم: محاسبه سطوح ایده‌آل؛ برای هر تابع هدف، مقادیر ایده‌آل مثبت از طریق حل مجزای مدل قطعی و مقادیر ایده‌آل منفی بر اساس تخمین‌های متناظر تعیین می‌گردند. یعنی $(\mathcal{W}_1^{PIS}, x_1^{PIS})$ و $(\mathcal{W}_2^{PIS}, x_2^{PIS})$ هر کدام از مدل‌های قطعی برای هر یک از توابع هدف به صورت مجزا حل می‌گردد و جواب ایده‌ال مثبت بدست می‌آید و سپس جواب ایده‌ال منفی به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\mathcal{W}_1^{NIS} = \mathcal{W}_1(x_2^{PIS}),\ \mathcal{W}_2^{NIS} = \mathcal{W}_2(x_1^{PIS})$$

گام ششم: تعریف توابع عضویت خطی برای مدل‌سازی درجه رضایت‌مندی؛ در این راستا، توابع هدف کمینه‌سازی و بیشینه‌سازی با توابع عضویت متناسب‌سازی می‌شوند که به صورت زیر است:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & if \quad \mathcal{W}_1 < \mathcal{W}_1^{PIS} \\ \frac{\mathcal{W}_1^{NIS} - \mathcal{W}_1}{\mathcal{W}_1^{NIS} - \mathcal{W}_1^{PIS}} & if \quad \mathcal{W}_1^{PIS} \le \mathcal{W}_1 \le \mathcal{W}_1^{NIS} \\ 0 & if \quad \mathcal{W}_1 > \mathcal{W}_1^{NIS} \end{cases} \tag{۳۵}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & if \quad \mathcal{W}_2 > \mathcal{W}_2^{PIS} \\ \frac{\mathcal{W}_2 - \mathcal{W}_2^{NIS}}{\mathcal{W}_2^{PIS} - \mathcal{W}_2^{NIS}} & if \quad \mathcal{W}_2^{NIS} \le \mathcal{W}_2 \le \mathcal{W}_2^{PIS} \\ 0 & if \quad \mathcal{W}_2 < \mathcal{W}_2^{NIS} \end{cases} \tag{۳۶}$$

در حقیقت، $\mu_h(x)$ نمایش‌دهنده درجه رضایت‌مندی تابع هدف hام می‌باشد. لازم به ذکر است $\mu_1(x)$ برای توابع هدف کمینه‌سازی و $\mu_2(x)$ برای توابع هدف بیشینه‌سازی بکار گرفته می‌شود.

گام هفتم: تجمیع توابع هدف؛ با استفاده از تابع ادغامی، مدل چندهدفه به یک مدل تک‌هدفه (برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط) تبدیل می‌شود که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$max \ \ \lambda(x) = \psi\lambda_0 + (1-\psi)\sum_h \phi_h \mu_h(x) \tag{۳۷}$$

$$s.t.$$
$$\lambda_0 \le \mu_h(x), \quad h = 1,2 \tag{۳۸}$$

$$x \in F(x), \quad \lambda_0 and \ \lambda \in [0,1] \tag{۳۹}$$

گام هشتم: تنظیم پارامترهای تعادلی ρ، ϕ_h و ψ و اجرای مدل؛ در صورت عدم رضایت تصمیم‌گیرندگان از خروجی‌های به دست آمده، مقادیر این پارامترها به صورت تکرارپذیر تعدیل می‌شوند تا فضای جواب بهبود یابد.

۵- نتایج عددی

به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و سنجش کارایی روش حل ارائه‌شده، مجموعه‌ای از آزمون‌های عددی طراحی و اجرا گردید. نتایج این آزمون‌ها شامل مقدار بهینه و سطح رضایت‌مندی هر یک از توابع هدف به ازای درجات اهمیت متفاوت توابع هدف در جدول ۱ گزارش شده است. چنانکه انتظار می‌رفت، یافته‌ها نشان می‌دهد که روش حل پیشنهادی برای هر ترکیب وزنی از اهمیت توابع هدف، راه‌حل‌های متمایز و منحصربه‌فردی تولید می‌کند؛ این امر حاکی از حساسیت‌پذیری مناسب رویکرد نسبت به ترجیحات تصمیم‌گیرنده و توانایی آن در پوشش طیف متنوعی از سناریوهای تصمیم‌گیری است.

جدول ۱ نتایج تحلیل حساسیت برحسب مقادیر مختلف ϕ برای مسائل مختلف

O/F/N/M/H/P/C/D/V/K	(ϕ_1, ϕ_2)	(Z_1, μ_1)	(Z_2, μ_2)
1/2/3/2/1/3/2/9/2/2	(0.6 , 0.4)	(36970159.05, 0.86)	(2432.53, 0.77)
	(0.4 , 0.6)	(38043664.59, 0.83)	(2021.04, 0.89)
	(0.5 , 0.5)	(37391057.66, 075)	(2216.81, 0.82)
2/2/3/3/2/3/3/11/2/3	(0.6 , 0.4)	(44122058.42, 0.79)	(3810.84, 0.76)
	(0.4 , 0.6)	(46730483.00, 0.84)	(3291.63, 0.83)
	(0.5 , 0.5)	(45014673.16, 0.91)	(3568.55, 0.89)
3/2/4/3/2/4/4/13/3/4	(0.6 , 0.4)	(61905235.18, 0.72)	(5027.11, 0.85)
	(0.4 , 0.6)	(64898801.64, 0.79)	(4318.02, 0.91)
	(0.5 , 0.5)	(62485542.43, 0.82)	(4688.42, 0.68)
3/3/4/4/3/5/5/16/4/5	(0.6 , 0.4)	(91130859.64, 0.74)	(7648.05, 0.85)
	(0.4 , 0.6)	(95044106.00, 0.69)	(7129.18, 0.87)
	(0.5 , 0.5)	(93653728.25, 0.74)	(7403.57, 0.77)

۵-۱- مطالعه موردی

به‌منظور ارزیابی قابلیت کاربرد مدل ریاضی پیشنهادی در یک مسئله واقعی، یک شبکه یکپارچه تأمین، تولید و توزیع دارو در ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. شبکه مورد بررسی شامل سه تأمین‌کننده در کشورهای چین، هند و ترکیه است که وظیفه تأمین دو نوع ماده اولیه موردنیاز برای تولید چهار نوع دارو را بر عهده دارند. به‌منظور انتقال مواد اولیه از تأمین‌کنندگان به کارخانه‌های تولیدی، چهار گره واسط بالقوه و سه شیوه حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. همچنین، دو کارخانه تولید دارو در شهر تهران در شبکه مستقر هستند. در بخش توزیع، چهار شرکت پخش در مناطق مختلف شهر تهران به‌عنوان مراکز توزیع در نظر گرفته شده‌اند. برای انتقال داروهای تولیدشده از کارخانه‌ها به مراکز پخش، سه کامیون حمل محصول مجهز به دو محفظه مستقل در نظر گرفته شده است. در مرحله نهایی توزیع نیز، با توجه به نقاط تقاضا شامل بیمارستان‌ها و داروخانه‌های واقع در مناطق مختلف شهر تهران، ۱۳ نقطه تقاضا در شبکه لحاظ شده است. به‌منظور پاسخ‌گویی به تقاضای این نقاط و با توجه به ماهیت چندمحصولی مسئله، چهار وسیله نقلیه چندمحفظه‌ای، هر یک مجهز به دو محفظه مجزا، برای انجام عملیات توزیع نهایی در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS نسخه ۲۳ حل شده و در مدت زمان 1000ثانیه به جواب زیر دست یافته است:

$$Z1 = 62485542.43 \quad , \quad Z2 = 4688.42$$

نتایج حاصل از حل مدل نشان می‌دهد که از میان چهار گره واسط کاندید، تنها گره‌های واسط ۲ و ۴ در شبکه نهایی انتخاب شده‌اند. در بخش تأمین مواد اولیه، مقدار ۱۰۵۴ واحد از ماده اولیه نوع اول از تأمین‌کننده ۱، با استفاده از مد حمل‌ونقل سوم، به گره واسط ۲ منتقل شده و سپس با استفاده از مد حمل‌ونقل دوم به کارخانه ۲ ارسال شده است. همچنین، ۱۰۴۰ واحد از

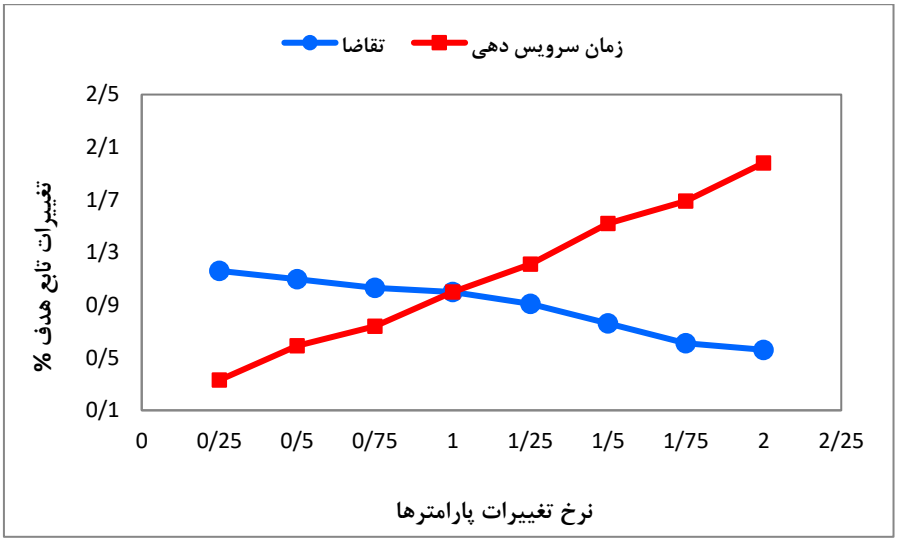
ماده اولیه نوع دوم از تأمین‌کننده ۲ به گره واسط ۲ منتقل و از طریق مد حمل‌ونقل اول به کارخانه ۱ ارسال شده است. علاوه بر این، ۱۱۲۰ واحد از ماده اولیه نوع اول از تأمین‌کننده ۲ از طریق گره واسط ۴ ارسال شده و پس از تغییر مد حمل‌ونقل از مد سوم به مد اول، به کارخانه ۱ منتقل شده است. در نهایت، ۹۹۸ واحد از مواد اولیه از تأمین‌کننده ۳ از طریق گره واسط ۴ به کارخانه ۲ ارسال شده و در این مسیر، مد حمل‌ونقل از مد اول به مد دوم تغییر یافته است. پس از تأمین و انتقال مواد اولیه، عملیات تولید چهار نوع دارو در دو کارخانه انجام شده و محصولات تولیدی مطابق با تصمیمات بهینه مدل به مراکز پخش تخصیص یافته‌اند. در کارخانه ۱، کامیون ۱ مسئولیت انتقال محصولات به مراکز پخش را بر عهده داشته است. بر این اساس، ۲۵۷ واحد داروی نوع اول و ۲۵۷ واحد داروی نوع سوم از کارخانه ۱ به مرکز پخش ۱ منتقل شده است. همچنین، به مرکز پخش ۲ به‌ترتیب ۱۶ واحد داروی نوع اول، ۴۷۴ واحد داروی نوع دوم و ۱۸۱۰ واحد داروی نوع چهارم ارسال شده است. علاوه بر این، محصولات شامل داروهای انواع اول، دوم و سوم از کارخانه ۱ به مراکز پخش ۳ و ۴ نیز ارسال شده‌اند.

در کارخانه ۲ نیز کامیون‌های ۲ و ۳ به کارخانه تخصیص یافته‌اند. بر اساس جواب بهینه، ۲۲۰ واحد داروی نوع دوم و ۱۷۷ واحد داروی نوع چهارم به مرکز پخش ۱ ارسال شده است. همچنین، مرکز پخش ۲ دریافت‌کننده ۱۸۰۰ واحد داروی نوع اول، ۱۴۱۹ واحد داروی نوع سوم و ۱۱۳۱ واحد داروی نوع دوم از کارخانه ۲ بوده است. به مرکز پخش ۳ نیز ۳۵۲ واحد داروی نوع چهارم و ۳۲۲ واحد داروی نوع دوم ارسال شده و در نهایت، ۴۷۷ واحد داروی نوع سوم و ۱۴۳۱ واحد داروی نوع چهارم توسط کامیون ۲ به مرکز پخش ۴ منتقل شده است. در مرحله نهایی شبکه توزیع، نقاط تقاضا بر اساس تخصیص بهینه وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای تحت پوشش مراکز پخش قرار گرفته‌اند. به‌طور مشخص، تقاضای نقاط ۸، ۱۱ و ۱۲ توسط مرکز پخش ۱ و وسیله نقلیه چندمحفظه‌ای ۲ تأمین می‌شود. وسیله نقلیه چندمحفظه‌ای ۳ که به مرکز پخش ۲ تخصیص یافته است، به‌ترتیب نقاط تقاضای ۹، ۴، ۱۳ و ۳ را پوشش می‌دهد. همچنین، وسیله نقلیه چندمحفظه‌ای ۱ تخصیص‌یافته به مرکز پخش ۳، نقاط تقاضای ۶، ۲، ۱ و ۱۰ را بازدید می‌کند. در نهایت، وسیله نقلیه چندمحفظه‌ای ۴ که به مرکز پخش ۴ تخصیص یافته است، نقاط تقاضای ۷ و ۵ را تحت پوشش قرار می‌دهد.

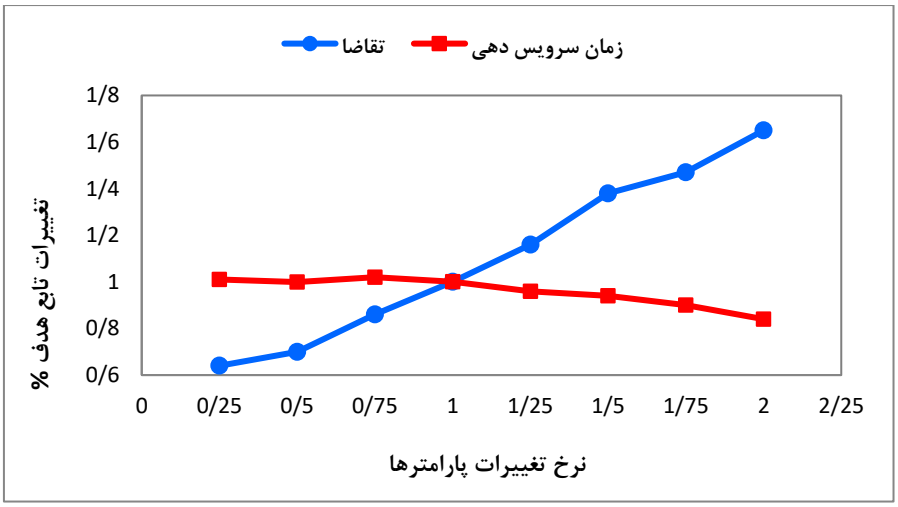
در مجموع، نتایج مطالعه موردی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است به‌صورت یکپارچه تصمیمات مربوط به انتخاب تأمین‌کنندگان، تخصیص و انتقال مواد اولیه، انتخاب گره‌های واسط، انتخاب و تغییر شیوه حمل‌ونقل، توزیع محصولات به مراکز پخش و مسیریابی وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای برای پاسخ‌گویی به نقاط تقاضا را تعیین کند. این ویژگی، امکان هماهنگی تصمیمات سطوح مختلف زنجیره تأمین دارو و استفاده کارآمدتر از ظرفیت‌های حمل‌ونقل و زیرساخت‌های شبکه را فراهم می‌سازد.

۵-۲- تحلیل حساسیت

به منظور تحلیل دقیق‌تر رفتار مدل پیشنهادی، تأثیر برخی پارامترهای کلیدی بر دو معیار عملکردی زمان کل عملیات و هزینه کل مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ اثر تغییرات پارامترهای تقاضا و زمان سرویس‌دهی را بر زمان کل عملیات نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که افزایش زمان سرویس‌دهی، زمان کل عملیات را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. در مقابل، مشاهده می‌شود که افزایش سطح تقاضا با کاهش زمان کل عملیات همراه است. این رفتار را می‌توان چنین بیان کرد که در سطوح بالای تقاضا، ایجاد مراکز توزیع بیشتر و به تبع آن افزایش تعداد وسایل نقلیه فعال، سرعت ارائه خدمات را به‌طور معناداری ارتقا می‌بخشد و در نتیجه زمان کل عملیات کاهش می‌یابد. شکل ۳ نیز تأثیر پارامترهای یادشده را بر هزینه کل سیستم نشان می‌دهد. مطابق انتظار، افزایش تقاضا هزینه کل را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد؛ زیرا رشد تقاضا مستلزم ایجاد تسهیلات بیشتر و افزایش تعداد ترددها (سفرهای وسایل نقلیه) است که طبیعتاً افزایش هزینه‌ها را به دنبال دارد. از سوی دیگر، تحلیل اثر زمان سرویس‌دهی بر هزینه کل نشان می‌دهد که افزایش این پارامتر با کاهش هزینه‌ها همراه بوده است.



شکل ۲ تاثیر پارامترها بر روی زمان عملیات



شکل۳ تاثیر پارامترها بر روی هزینه کل

۶- بینش‌های مدیریتی

بینش مدیریتی ۱: در زنجیره تأمین دارو، محصولات مختلف ممکن است دارای شرایط متفاوتی از نظر دمای نگهداری، حجم و ویژگی‌های حمل باشند. ساده‌ترین روش توزیع این محصولات، استفاده از وسایل نقلیه مجزا برای هر گروه از داروها است که در این حالت، ظرفیت وسایل نقلیه به‌طور کامل مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و تعداد ترددها و در نتیجه هزینه و زمان توزیع افزایش می‌یابد. همچنین، حتی در صورت استفاده از وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای، اگر هر محفظه صرفاً به یک نوع دارو اختصاص داده شود، ممکن است ظرفیت برخی محفظه‌ها تکمیل شده و ظرفیت سایر محفظه‌ها بدون استفاده باقی بماند؛ در نتیجه، برای تأمین تقاضای نقاط دیگر، نیاز به اعزام وسایل نقلیه اضافی و طی مسافت‌های بیشتر خواهد بود. از این جهت، استفاده از وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای در مدل پیشنهادی امکان تجمیع هم‌زمان انواع مختلف دارو و استفاده مؤثرتر از ظرفیت ناوگان را فراهم می‌کند. این رویکرد علاوه بر کاهش تعداد ترددهای غیرضروری، امکان پاسخ‌گویی سریع‌تر به تقاضای بیمارستان‌ها و داروخانه‌ها را فراهم کرده و می‌تواند به کاهش هم‌زمان هزینه و زمان کل توزیع منجر شود.

بینش مدیریتی ۲: در شبکه تأمین دارو، انتقال مواد اولیه از تأمین‌کنندگان خارجی به کارخانه‌های تولیدی مستلزم جابه‌جایی در مسیرهای مختلف و تحت شرایط متفاوت حمل‌ونقل است. استفاده از یک مد حمل‌ونقل ثابت در کل مسیر، اگرچه

ساختار شبکه را ساده می‌کند، اما ممکن است به دلیل تفاوت در هزینه و زمان مدهای مختلف، منجر به افزایش هزینه یا زمان انتقال مواد اولیه شود. از سوی دیگر، استفاده مستقل از مدهای حمل‌ونقل بدون در نظر گرفتن نقاط مناسب برای تغییر مد نیز می‌تواند موجب افزایش جابه‌جایی‌های غیرضروری و هزینه‌های عملیاتی شود. از این جهت، در مدل پیشنهادی، گره‌های واسط به‌عنوان نقاطی برای تغییر مد حمل‌ونقل در نظر گرفته شده‌اند تا امکان انتخاب ترکیب مناسب مدهای حمل‌ونقل در بخش‌های مختلف مسیر فراهم شود. نتایج مطالعه موردی نشان می‌دهد که از میان چهار گره واسط کاندید، تنها گره‌های ۲ و ۴ انتخاب شده‌اند و برای انتقال مواد اولیه در مسیرهای مختلف، تغییر مد حمل‌ونقل نیز صورت گرفته است. این نتیجه نشان می‌دهد که مکان‌یابی مناسب گره‌های واسط و انتخاب هم‌زمان مدهای حمل‌ونقل می‌تواند انعطاف‌پذیری شبکه را افزایش داده و امکان ایجاد توازن مناسب میان هزینه و زمان انتقال مواد اولیه را فراهم کند.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این پژوهش، یک مدل ریاضی دوهدفه برای طراحی و برنامه‌ریزی یکپارچه زنجیره تأمین دارو با در نظر گرفتن وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای، حمل‌ونقل چندوجهی و محدودیت‌های زمانی توزیع ارائه شد. مدل پیشنهادی با هدف ایجاد توازن میان دو معیار متعارض شامل کمینه‌سازی هزینه کل شبکه و کمینه‌سازی زمان کل عملیات توزیع، تصمیمات مرتبط با تأمین مواد اولیه، انتخاب گره‌های واسط، انتقال چندوجهی، تخصیص تولید و توزیع دارو و مسیریابی وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. برای حل مدل چندهدفه، از روش ترابی–حسینی (TH) استفاده شد که امکان تبدیل اهداف چندگانه به یک مسئله تک‌هدفه و دستیابی به یک راه‌حل مصالحه‌ای را فراهم می‌کند. نتایج مسائل آزمایشی نیز قابلیت روش حل پیشنهادی در دستیابی به جواب‌های باکیفیت را نشان داد. به‌منظور بررسی قابلیت کاربرد مدل در یک محیط واقعی، یک مطالعه موردی از زنجیره تأمین دارو در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل قادر است به‌صورت هم‌زمان و یکپارچه تصمیمات مربوط به انتخاب تأمین‌کنندگان، انتخاب گره‌های واسط، تغییر مدهای حمل‌ونقل، تخصیص کارخانه‌ها و مراکز پخش و مسیریابی وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای را تعیین کند. در جواب حاصل از مطالعه موردی، از میان گره‌های واسط کاندید تنها بخشی از گره‌ها انتخاب شدند و برای انتقال مواد اولیه، ترکیب مناسبی از مدهای حمل‌ونقل مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، تخصیص وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای به مراکز پخش امکان پاسخ‌گویی هم‌زمان به تقاضای نقاط مختلف را فراهم کرد. این نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن این تصمیمات به‌صورت یکپارچه می‌تواند از ایجاد تصمیمات جزیره‌ای در سطوح مختلف زنجیره تأمین جلوگیری کرده و زمینه استفاده کارآمدتر از ظرفیت حمل‌ونقل را فراهم سازد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تقاضا و زمان سرویس‌دهی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد شبکه هستند. افزایش تقاضا موجب افزایش هزینه کل سیستم، در عین حال کاهش زمان کل عملیات شد؛ در حالی‌که افزایش زمان سرویس‌دهی، زمان کل عملیات را افزایش و هزینه کل را کاهش داد. این یافته‌ها وجود توازن میان هزینه و زمان در طراحی و بهره‌برداری از شبکه زنجیره تأمین دارو را نشان می‌دهد و بر اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان این دو معیار در تصمیمات مدیریتی تأکید دارد. از منظر مدیریتی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از وسایل نقلیه چندمحفظه‌ای می‌تواند امکان تجمیع انواع مختلف دارو و استفاده مؤثرتر از ظرفیت ناوگان را فراهم کند، در حالی‌که حمل‌ونقل چندوجهی و گره‌های واسط امکان انعطاف‌پذیری بیشتر در انتقال مواد اولیه و ایجاد توازن میان هزینه و زمان حمل را فراهم می‌سازد. از این‌رو، تصمیم‌گیرندگان زنجیره تأمین دارو می‌توانند با توجه هم‌زمان به ساختار شبکه، ویژگی‌های محصولات، ظرفیت ناوگان، زمان سرویس‌دهی و شرایط تقاضا، پیکربندی مناسب‌تری برای شبکه توزیع طراحی کنند.

در نهایت، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مدل پیشنهادی چارچوبی یکپارچه برای پشتیبانی از تصمیمات طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین دارو ارائه می‌دهد. با این حال، برخی فرضیات مدل می‌توانند در پژوهش‌های آتی توسعه یابند. از جمله، می‌توان عدم قطعیت در زمان سفر و زمان سرویس‌دهی، اشتراک گذاری بین مراکز پخش، چنددوره‌ای بودن تصمیمات و ملاحظات پایداری زیست‌محیطی را در مدل لحاظ کرد. همچنین، توسعه روش‌های حل کارآمدتر برای نمونه‌های بزرگ مقیاس و بررسی مدل در شبکه‌های واقعی با داده‌های عملیاتی می‌تواند زمینه مناسبی برای مطالعات آینده فراهم کند.

مراجع

[1] Fard AF, Gholian-Jouybari F, Paydar MM, Hajiaghaei-Keshteli M. A bi-objective stochastic closed-loop supply chain network design problem considering downside risk. Industrial Engineering & Management Systems. 2017; 16:342-62. https://doi.org/10.7232/iems.2017.16.3.342

[2] Nezhadroshan AM, Fathollahi-Fard AM, Hajiaghaei-Keshteli M. A scenario-based possibilistic-stochastic programming approach to address resilient humanitarian logistics considering travel time and resilience levels of facilities. International journal of systems science: operations & logistics. 2021; 8: 321-47. https://doi.org/10.1080/23302674.2020.1769766

[3] Zahiri B, Zhuang J, Mohammadi M. Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study. Transportation research part e: logistics and transportation review. 2017; 103: 109-42. https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.04.009

[4] Uthayakumar R, Priyan S. Pharmaceutical supply chain and inventory management strategies: Optimization for a pharmaceutical company and a hospital. Operations Research for Health Care. 2013; 2: 52-64. https://doi.org/10.1016/j.orhc.2013.08.001

[5] Jaberidoost M, Nikfar S, Abdollahiasl A, Dinarvand R. Pharmaceutical supply chain risks: a systematic review. DARU Journal of Pharmaceutical Sciences. 2013; 21: 69. https://doi.org/10.1186/2008-2231-21-69

[6] Belenguer JM, Benavent E, Prins C, Prodhon C, Calvo RW. A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem. Computers & Operations Research. 2011; 38: 931-41. https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.09.019

[7] Prodhon C, Prins C. A survey of recent research on location-routing problems. European Journal of Operational Research. 2014; 238: 1-17. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005

[8] Fazayeli S, Eydi A, Kamalabadi IN. Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm. Computers & Industrial Engineering. 2018; 119:233-46. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.041

[9] Asl-Najafi J, Zahiri B, Bozorgi-Amiri A, Taheri-Moghaddam A. A dynamic closed-loop location-inventory problem under disruption risk. Computers & Industrial Engineering. 2015; 90:414-28. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.10.012

[10] Hansen KRN, Grunow M. Planning operations before market launch for balancing time-to-market and risks in pharmaceutical supply chains. International Journal of Production Economics. 2015; 161: 129-39. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.10.010

[11] Wolfinger D, Tricoire F, Doerner KF. A matheuristic for a multimodal long haul routing problem. EURO Journal on Transportation and Logistics. 2019; 8: 397-433. https://doi.org/10.1007/s13676-018-0131-1

[12] Firoozi Z, Ismail N, Ariafar S, Tang SH, Ariffin MKMA, Memariani A. Effects of integration on the cost reduction in distribution network design for perishable products. Mathematical Problems in Engineering. 2014; 2014:739741. https://doi.org/10.1155/2014/739741

[13] Mousazadeh M, Torabi SA, Zahiri B. A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. Computers & chemical engineering. 2015; 82: 115-28. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.06.008

[14] Susarla N, Karimi IA. Integrated supply chain planning for multinational pharmaceutical enterprises. Computers & Chemical Engineering. 2012; 42: 168-77. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.03.002

[15] Elbert R, Müller JP, Rentschler J. Tactical network planning and design in multimodal transportation – A systematic literature review. Research in Transportation Business & Management. 2020; 35: 100462. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100462

[16] Ostermeier M, Hübner A. Vehicle selection for a multi-compartment vehicle routing problem. European Journal of Operational Research. 2018; 269: 682-94. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.059

[17] Frank M, Ostermeier M, Holzapfel A, Hübner A, Kuhn H. Optimizing routing and delivery patterns with multi-compartment vehicles. European Journal of Operational Research. 2021; 293: 495-510. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.033

[18] Sushmita AN, Pati RK, Vrat P. Managerial research on the pharmaceutical supplychain–A critical review and some insights for future directions. Journal of Purchasing and Supply Management. 2013; 20: 18-40. https://doi.org/10.1016/j.pursup.2013.09.001

[19] Mousavi M,Tavakkoli-Moghadam R. A hybrid simulated annealing algorithm for location and routing scheduling problems with cross-docking in the supply chain, Journal of Manufacturing systems. 2013; vol: 32:335-47. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.12.002

[20] Tuzkaya UR, Onut S, Tuzkaya G. A Strategic planning methodology for the multimodal transportation systems: a case study from Turkey. Journal of Applied Mathematics. 2014: 2014: 931456. https://doi.org/10.1155/2014/931456

[21] Tiwari MK, Kumar RA, Mohapatra P, Yew WK, Benyoucef L. Route selection and consolidation in international intermodal freight transportation. Applications of Multi-Criteria and Game Theory Approaches: Manufacturing and Logistics. 2014; 181-94. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5295-8_9

[22] Koch H, Henke T, Wäscher G. A genetic algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. Otto-von-Guericke-University Magdeburg. 2016. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.020

[23] Hsiao YH, Chen MC, Chin CL. Distribution planning for perishable foods in cold chains with quality concerns: Formulation and solution procedure. Trends in food science & technology. 2017; 61: 80-93. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.016

[24] Settanni E, Harrington TS, Srai JS. Pharmaceutical supply chain models: A synthesis from a systems view of operations research. Operations research perspectives. 2017; 4: 74-95. https://doi.org/10.1016/j.orp.2017.05.002

[25] Medina J, Hewitt M, Lehuédé F, Péton O. Integrating long-haul and local transportation planning: The service network design and routing problem. EURO Journal on Transportation and Logistics. 2019; 8: 119-45. https://doi.org/10.1007/s13676-017-0114-7

[26] Martins S, Ostermeier M, Amorim P, Hübner A, Almada-Lobo B. Product-oriented time window assignment for a multi-compartment vehicle routing problem. European Journal of Operational Research. 2019; 276: 893-909. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.053

[27]Vincent FY, Normasari NME, Chen WH. Location-routing problem with time-dependent demands. Computers & Industrial Engineering. 2021; 151: 106936. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106936

[28] Zukhruf F, Frazila RB, Burhani JT, Prakoso AD, Sahadewa A, Langit JS. Developing an integrated restoration model of multimodal transportation network. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2022; 110: 103413. https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103413

[29] Delfani F, Samanipour H, Beiki H, Yumashev AV, Akhmetshin EM. A robust fuzzy optimisation for a multi-objective pharmaceutical supply chain network design problem considering reliability and delivery time. International journal of systems science: operations & logistics. 2022; 9:155-79. https://doi.org/10.1080/23302674.2020.1862936

[30] Wang Y, Wei Y, Wang X, Wang Z, Wang H. A clustering-based extended genetic algorithm for the multidepot vehicle routing problem with time windows and three-dimensional loading constraints. Applied Soft Computing. 2023; 133: 109922. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109922

[31] Wang Y, Zhou J, Sun Y, Fan J, Wang Z, Wang H. Collaborative multidepot electric vehicle routing problem with time windows and shared charging stations. Expert Systems with Applications. 2023; 219: 119654. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119654

[32] Najmi A, Rashidi TH, Waller T. A multimodal multi-provider market equilibrium model: A game-theoretic approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2023; 146: 103959. https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103959

[33] Gheisariha E, Etebari F, Vahdani B, Tavakkoli-Moghaddam R. A holistic, integrated supply-production–distribution problem in the dairy industry under uncertain supply and demand. Computers & Industrial Engineering. 2023; 181: 109296. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109296

[34] Potters E, Nezhad BM, Huiskes V, Hans E, Asadi A. Enhancing pharmaceutical cold supply chain: integrating medication synchronization and diverse delivery modes. arXiv preprint arXiv. 2024; 2404:06373. https://doi.org/10.2139/ssrn.4550876

[35] Rezaali Z, Ghodratnama A, Amiri-Aref M, Tavakkoli-Moghaddam R, Wassan N. Lagrangian relaxation method for solving a new time-dependent production–distribution planning model. Expert Systems with Applications. 2024; 255: 124669. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124669

[36] Masmoudi MA, Baldacci R, Mancini S, Kuo YH. Multi-compartment waste collection vehicle routing problem with bin washer. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2024; 189: 103681. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103681

[37] Hossain MS, Hossain MM. Multi-objective optimization for integrated production and distribution planning using non-linear fuzzy membership functions. Cham: Springer International Publishing. In Operations research forum. 2024; 5: 110. https://doi.org/10.1007/s43069-024-00385-x

[38] Iyer P, Robb D. Cold chain optimisation models: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering. 2025; 204: 110972. https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110972

[39] Jia Y, Wang W, Zhang J. A learning-and-knowledge-assisted multi-population collaborative evolutionary algorithm for integrated design-production-distribution scheduling problems in mass personalized customization. Swarm and Evolutionary Computation. 2025; 99: 102158. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2025.102158

[40] Sepehri A, Tirkolaee EB, Simic V, Ali SS. Designing a reliable-sustainable supply chain network: adaptive m-objective ε-constraint method. Annals of Operations Research. 2026; 359: 921-52. https://doi.org/10.1007/s10479-024-05961-2

[41] Yuan B, Yang B, Geng N, Baldacci R. Improving last-mile delivery efficiency using cargo bikes and autonomous robots. European Journal of Operational Research. 2026. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2026.01.013

[42] Islam T, Abdullah J, Munna MMH, Nahid NAAH, Tusar MIH, Sarder MD. Multi-objective optimization for transportation mode selection: A case study in logistics. The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2026. https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2026.01.002

[43] Torabi SA, Hassini E. An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. Fuzzy sets and systems. 2008; 159: 193-214. https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.08.010