



A goal programming model for robust routing of multimodal transportation networks under uncertainty

Maryam Tajik Khaveh 

Master of industrial management, Management Dept, Faculty of Management and Finance, Khatam University, Tehran, Iran.

Maryam Daneshvar* 

Assistant Professor, Management Dept, Faculty of Management and Finance, Khatam University, Tehran, Iran.

Seyed Hosein Razavi Haji Agha 

Associate Professor, Management Dept, Faculty of Management and Finance, Khatam University, Tehran, Iran.

Abstract

Route selection in multimodal transport networks is a key issue in transport management and planning that require advanced modeling and optimization approaches due to the multimodal nature and complexities arising from uncertainty. This study aims to develop a multi-objective mathematical model for optimal route selection in multimodal transportation networks, simultaneously minimizing transportation costs, carbon emissions, and delivery time deviations while preserving cargo value. This model, by considering time windows and uncertainty management, seeks to provide sustainable solutions to improve the transport system's performance. In this model, transport capacity and demand are assumed fixed in each period, and costs and time are uncertain. The output of the model determines optimal routes and transport modes to achieve the defined objectives. Also, a robust optimization approach has been used to manage uncertainty and provide a model that maintains its reliability even under uncertain conditions. In order to validate the model, a numerical example of a multimodal transportation

* Corresponding Author: m.daneshvar@khatam.ac.ir

How to cite: Tajik Khaveh, M., Daneshvar, M., & Razavi Haji Agha, H. (). A goal programming model for robust routing of multimodal transportation networks under uncertainty, *Industrial Management Studies*, ().

network is solved using goal programming approach. The results show that the proposed model using robust optimization has the necessary flexibility to adapt with changes and can help improve the quality of service and reduce operating costs. Also, using the robust optimization approach in a multimodal transportation network leads to increased resilience and network efficiency.

Keywords: routing, multimodal transportation network, robust optimization, uncertainty, time window

Introduction

The advancement of economic globalization and information technology has significantly facilitated global communication. A singular mode of transportation is insufficient to satisfy the demands of the transportation market, leading to the emergence of multi-modal transportation. (Peng et al., 2023) The route selection strategy of multimodal transportation network is a complex multi-objective decision-making problem that has become a key aspect in multimodal transportation system (Elbert et al., 2020).

In this research, the multimodal transportation structure is a network structure with nodes (terminals) and edges (transportation) representing multiple modes of transportation. Also, in the research conducted, the objectives related to reducing travel time have been considered, while in the real world, arriving on time is preferable to arriving early. Hence, adding a time window to the objective functions is one of the innovations of this study.

Considering uncertainty factors in the decision-making process is essential for designing optimal routes. Robust optimization, as one of the approaches in the field of uncertainty management, has the ability to provide models that enable better decision-making by maintaining stability and efficiency in uncertain conditions. in this study, a multi-objective robust optimization model is developed to minimize the total transportation cost, delivery delays, and carbon emissions while maintaining the value of perishable goods, considering the time window for timely arrival of goods.

According to the above, the innovations of this paper are as follows:

- Adding time windows to objective functions.
- Definition of the value function of perishable goods
- Combining uncertainty in time and cost with the perishability factor
- Considering uncertainty with a robust optimization approach

Research background

Multimodal freight transport means the transport of goods by at least two different modes of transport (UNECE, 2009). This type of transport ensures the efficiency of transport in terms of the timely availability of products and raw materials. This method usually involves a combination of land (truck, train), sea (ship), and air transport. The main features of multimodal transport are that even if several modes of transport are used, the transport process is managed under a single contract or general responsibility, which helps to reduce delays, improve efficiency, and reduce transport risks. Other advantages of this transport method include cost reduction through the optimal use of different modes of transport, the possibility of using the fastest transport methods in specific conditions, and increased transparency and damage reduction through integrated management. The combination of methods can also help reduce energy consumption and greenhouse gas emissions. For a transport system to be efficient, it must be multimodal to meet different needs. Hence, the importance of multimodal transport lies in its ability to improve efficiency, reduce costs, and enhance delivery speed by strategically combining different modes of transport (Udomwannakhet et al., 2018).

Methodology

The main objective of this research is to develop a mathematical model for route selection in a multimodal transportation network. Therefore, this research is applied research conducted within the positivist paradigm. In order to collect research data, information related to multimodal transportation networks has been extracted from reports, databases and scientific articles. Since the routing problem formulated

in this paper is a multi-objective problem, weighted goal programming (GP) is used to solve it. To account the uncertainty in the parameters of transportation cost and time, the Bertsimas and Sim robust optimization approach is applied and a robust goal programming model has also been formulated

Discussion and Results

To verify the validity of the model, real data and numerical scenarios have been used. The results of solving the model show that the proposed model is able to provide optimal paths considering uncertainty and multiple objectives (cost reduction, carbon emission reduction, and product value preservation). Solving the model and specifying the values of the decision variables indicate the structural coherence and feasibility of the model. One of the main validation criteria in mathematical modeling is the ability of the model to provide a justified and optimal solution. In addition, the model results are consistent with the logic of the problem and the defined constraints. Also, the proposed model has been solved using the goal programming method, which is one of the valid methods for solving multi-objective optimization problems. Also, the sensitivity analysis of key parameters shows that the model behaves stably against changes in input parameters and its outputs are reasonable and reliable.

Conclusion

The findings indicate that integrating multiple transportation modes and optimizing routing decisions can significantly reduce total costs. Furthermore, the incorporation of time windows and the reduction of delivery time deviation enhance customer satisfaction compared to conventional models. The study confirms that the robust optimization model can recommend routes that maintain high levels of stability and efficiency, even in the presence of uncertainty. The model also accounts for the perishability of goods, thereby contributing to waste reduction. Overall, the proposed model improves the performance of transportation systems under uncertain conditions, lower costs, improves productivity, and offers a practical solution applicable across various industries.

ارائه مدل برنامه‌ریزی آرمانی مسیریابی استوار شبکه حمل‌ونقل چندوجهی در شرایط عدم قطعیت

مريم تاجيك خاوه	کارشناسی ارشد مدیریت، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و علوم مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران
مريم دانشور *	استادیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و علوم مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران
سيد حسين رضوي حاجي آقا	دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و علوم مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران

چکیده

انتخاب مسیر در شبکه‌های حمل‌ونقل چندوجهی یکی از مسائل کلیدی در مدیریت و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل است که با توجه به ماهیت چندوجهی و پیچیدگی‌های ناشی از عدم قطعیت، نیازمند رویکردهای پیشرفته در مدل‌سازی و بهینه‌سازی است. هدف این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای انتخاب مسیر بهینه در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی است که در آن هزینه‌های حمل‌ونقل، انتشار کربن و انحراف زمان ارسال به حداقل برسد ضمن اینکه ارزش کالا حفظ شود. این مدل با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و مدیریت عدم قطعیت، به دنبال ارائه راه‌حل‌های پایدار برای بهبود عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل است. در این مدل ظرفیت و تقاضا حمل‌ونقل در هر دوره ثابت و هزینه‌ها و زمان غیر قطعی هستند. خروجی حل این مدل انتخاب مسیر و حالات حمل‌ونقل به گونه‌ای است که اهداف مدل بهینه شود. همچنین از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مدیریت عدم قطعیت و ارائه مدلی که در شرایط غیر قطعی نیز قابلیت اطمینان خود را حفظ کند، استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل، یک مثال عددی شبکه حمل‌ونقل چندوجهی با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی حل شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی با استفاده از بهینه‌سازی استوار، انعطاف‌پذیری لازم برای تطبیق با تغییرات را دارد و می‌تواند به بهبود کیفیت خدمات و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کند.

همچنین استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی منجر به افزایش تاب‌آوری و کارایی شبکه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: مسیریابی، شبکه حمل‌ونقل چندوجهی، بهینه‌سازی استوار، عدم قطعیت، پنجره زمانی.

مقدمه

با توسعه جهانی‌سازی اقتصاد و فناوری اطلاعات و ارتباطات در سراسر جهان، یک شیوه حمل‌ونقل منفرد دیگر نمی‌تواند نیازهای بازار حمل‌ونقل را برآورده کند، به همین دلیل حمل‌ونقل چندوجهی به وجود آمده است. نمونه‌ای بارز از حمل‌ونقل چندوجهی، حمل‌ونقل ترکیبی بار که نمایانگر حمل بار از مبدا تا مقصد از طریق ترکیب شیوه‌های مختلف حمل‌ونقل مانند دریایی، جاده‌ای، ریلی و هوایی است. به وضوح، حمل‌ونقل چندوجهی نشان‌دهنده پیشرفت در صنعت حمل‌ونقل است. انتخاب خدمات حمل‌ونقل و پایانه‌های انتقال میانی در یک شبکه چندوجهی می‌تواند یک کار پیچیده باشد. این امر منجر به افزایش علاقه و توجه به توسعه روش‌ها و ابزارهایی برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب طرح و خدمات بهینه توزیع بار شده است (Peng et al., 2023).

استراتژی انتخاب مسیر شبکه حمل‌ونقل چندوجهی یک مسئله تصمیم‌گیری چندهدفه پیچیده است که به جنبه اصلی در سیستم حمل‌ونقل چندوجهی تبدیل شده است. فرآیندهای حمل‌ونقل پیچیده نیاز به مدل‌های طراحی و برنامه‌ریزی جریان شبکه دارند که مراحل و مسیرهای چندگانه یک شبکه چندوجهی را برای تعیین عملیات‌های کم‌هزینه و قابل اعتماد پوشش می‌دهند (Elbert et al., 2020). از این رو یک رویکرد بهینه‌سازی کارآمد برای حل مسئله انتخاب مسیر می‌تواند کارایی کل شبکه حمل‌ونقل را بهبود بخشد. کارایی زنجیره تامین، مدیریت لجستیک و رضایت مشتری همگی به مهلت‌های ارسال بستگی دارد. یک مزیت واضح در حمل‌ونقل چندوجهی این است که، تاخیرهای تحویل به حداقل برساند. (Zhu et al., 2021)

بهینه‌سازی مسیریابی از جمله جهت‌های تحقیقاتی مهم در حمل‌ونقل چندوجهی است. به عنوان مسئله اصلی بهینه‌سازی مسیرهای حمل و نقل چندوجهی، هدف از انتخاب مسیر، جستجوی مسیری است که نیازهای چندگانه و اهداف چندگانه مشتریان یا بازرگانان را تحت شرایط نامشخص مختلف برآورده کند که می‌تواند با مدت زمان حمل و نقل نامشخص بین گره‌ها نشان داده شود. از منظر مدل‌های بهینه‌سازی، بهینه‌سازی مسیر چندوجهی را می‌توان به عنوان توسعه‌ای از مسئله کلاسیک کوتاه‌ترین مسیر در نظر گرفت. نکته ظریف این است که بهینه‌سازی مسیر حمل‌ونقل چندوجهی، علاوه بر اینکه در محیط‌های واقعی و روش‌های حمل‌ونقل نوآورانه را در نظر می‌گیرد، در عین حال هزینه‌های حمل و نقل را کاهش می‌دهد و حمل‌ونقل سازگار با محیط‌زیست را فراهم کرده و نیازهای مشتری را برآورده می‌کند. (Peng et al., 2023).

بررسی پژوهش‌های انجام شده در حوزه مدل‌سازی ریاضی مسیریابی حمل‌ونقل چندوجهی نشان می‌دهد، هدف اکثر مدل‌های پیشنهادی به حداقل رساندن هزینه‌های لجستیک و زمان حمل‌ونقل و در مطالعات اخیر مسائل مربوط به محیط زیست است. در همه آثار بررسی شده ساختار حمل‌ونقل چندوجهی ساختار شبکه‌ای با گره و یال با چند حالت حمل‌ونقل است. گره‌ها ترمینال و یال‌ها مسیر حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. حالت‌های حمل شامل جاده، ریل، راه آبی و هوایی است. تفاوت مدل‌های ارائه شده در توسعه پارامترها و راه حل‌های بهینه است. همچنین در پژوهش‌های انجام شده اهداف مربوط به زمان کاهش طول سفر در نظر گرفته شده است، در حالی که در جهان واقعی به موقع رسیدن برزود رسیدن ارجحیت دارد. از این رو اضافه کردن پنجره زمانی در توابع هدف از نوآوری‌های این مطالعه است. برای کالاهایی که زودتر از زمان مقرر وارد مقصد می‌شوند هزینه انبارداری و برای کالاهایی که دیرتر می‌رسند هزینه تاخیر محاسبه خواهد شد. در این میان، وجود عدم قطعیت‌ها در محیط‌های عملیاتی، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در تصمیم‌گیری برای طراحی مسیرهای بهینه در شبکه‌های حمل و نقل به شمار می‌آید.

در مطالعات انجام شده عدم قطعیت تقاضا، مطالعه‌شده‌ترین نوع عدم قطعیت است. از این رو، در نظر گرفتن عوامل عدم قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری برای طراحی مسیرهای

بهینه امری ضروری است. بهینه‌سازی استوار، به عنوان یکی از رویکردها در حوزه مدیریت عدم قطعیت، توانایی ارائه مدل‌هایی را دارد که با حفظ پایداری و کارایی در شرایط غیرقطعی، تصمیم‌گیری بهتری را امکان‌پذیر می‌کند. مدل‌های استوار ابزارهای قدرتمندی برای مقابله با عدم قطعیت در مدل‌های ریاضی هستند. انتخاب مدل مناسب به ماهیت مسئله و اهداف تصمیم‌گیرنده بستگی دارد. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان تصمیمات بهتری گرفت و ریسک ناشی از عدم قطعیت را کاهش داد برای حل این مسئله، در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی استوار چند هدفه برای به حداقل رساندن کل هزینه حمل‌ونقل، تاخیرهای تحویل، انتشار کربن با حفظ ارزش کالای فاسدشدنی با در نظر گرفتن پنجره زمانی جهت به موقع رسیدن کالا توسعه داده می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

۱. افزودن پنجره‌های زمانی به توابع هدف: در این مقاله، با معرفی پنجره‌های زمانی در توابع هدف، مدل ارائه‌شده به شرایط واقعی‌تر و کاربردی‌تر نزدیک شده است. این امر امکان مدیریت بهتر زمان در فرآیند تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند.

۲. تعریف تابع ارزش کالای فسادپذیر: برای اولین بار، تابعی برای ارزش‌گذاری کالاهای فسادپذیر ارائه شده است که عوامل مؤثر بر فسادپذیری را به‌طور سیستماتیک در نظر می‌گیرد. این تابع به بهبود دقت مدل در برخورد با کالاهای حساس به زمان کمک می‌کند.

۳. ترکیب عدم قطعیت در زمان و هزینه با عامل فسادپذیری: در این مقاله، عدم قطعیت‌های مرتبط با زمان و هزینه به همراه عامل فسادپذیری کالاهای در یک مدل یکپارچه ترکیب شده‌اند. این ترکیب، رویکردی نوین برای مواجهه با مسائل پیچیده در زنجیره تأمین کالاهای فسادپذیر ارائه می‌دهد.

۴. در نظر گرفتن عدم قطعیت با رویکرد بهینه‌سازی استوار: برای مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در مدل، از روش بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. این رویکرد تضمین می‌کند که راه‌حل‌های ارائه‌شده در برابر تغییرات پارامترهای نامطمئن، مقاوم و قابل اعتماد هستند.

پیشینه پژوهش

مطالعات و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل بار وجود دارد. اما طی چند سال اخیر، محققان علاقه رو به افزایشی به مسائل بهینه‌سازی چند هدفه در زمینه حمل‌ونقل چندوجهی داشته‌اند. حمل‌ونقل چندوجهی^۱ بار به معنی حمل‌ونقل کالا توسط حداقل دو روش مختلف حمل‌ونقل است. (UNECE, 2009). این نوع حمل‌ونقل، کارآمدی حمل‌ونقل از نظر سازگاری با محیط زیست و در دسترس بودن به موقع محصولات و مواد خام را تضمین می‌کند. این روش معمولاً شامل ترکیب حمل‌ونقل زمینی (کامیون، قطار)، دریایی (کشتی) و هوایی است. (Udomwannakhet et al., 2018)

از ویژگی‌های اصلی حمل‌ونقل چندوجهی این است حتی اگر از چندین روش حمل استفاده شود فرایند حمل‌ونقل تحت یک قرارداد یا مسئولیت کلی مدیریت می‌شود، این موضوع به کاهش تأخیرها و بهبود کارایی و کاهش ریسک‌های حمل‌ونقل کمک می‌کند. از دیگر مزایای این روش حمل‌ونقل، کاهش هزینه‌ها با استفاده بهینه از حالت‌های مختلف حمل‌ونقل، امکان استفاده از سریع‌ترین روش‌های حمل در شرایط خاص و شفافیت و کاهش آسیب‌ها با مدیریت یکپارچه است. همچنین ترکیب روش‌ها می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. برای اینکه یک سیستم حمل‌ونقل کارآمد باشد باید چندوجهی باشد تا نیازهای مختلف را برآورده کند. از این رو اهمیت حمل‌ونقل چندوجهی در توانایی آن در بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود سرعت تحویل با ترکیب استراتژیک شیوه‌های مختلف حمل‌ونقل است. (Udomwannakhet et al., 2018)

حمل‌ونقل بین‌وجهی^۲، حمل‌ونقل هم‌وجهی^۳، حمل‌ونقل همزمان^۴ به عنوان نوع خاصی از حمل‌ونقل چندوجهی تعریف می‌شود. (Udomwannakhet et al., 2018) هر نوع حمل‌ونقل چندوجهی بسته به ماهیت کالا، مسافت و فوریت، مزایای خاص خود را دارد.

¹ Multimodal transportation

² intermodal transportation

³ Co-modal transportation

⁴ Synchromodal transportation

در این بخش، پیشرفت‌ها و تلاش‌های اخیر در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل چندوجهی به طور مختصر و با تأکید بر مسئله مسیریابی چندوجهی غیرقطعی در مطالعات سال‌های اخیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. ابتدا به پیشینه داخلی و سپس به پیشینه خارجی اشاره می‌شود.

در مقالات داخلی مسائل مربوط به حمل و نقل چند وجهی، به صورت قطعی در نظر گرفته شده‌اند. رحیمی و همکاران (1403) برای سیستم‌های حمل‌ونقل و لجستیک با مشتری محدود مدلی توسعه دادند که منجر به کاهش هزینه‌ها، بهبود زمان تحویل و افزایش کیفیت خدمات می‌شود. افندی زاده و همکاران (1403) برای بهینه‌سازی فرآیند حمل‌ونقل در یک زنجیره تامین یک مدل تک هدفه ارائه دادند که هزینه‌ها و زمان‌ها (به انضمام هزینه ارزش زمانی) به عنوان متغیرهای کلیدی در نظر گرفته شد است. این مدل شامل یک تابع هدف است که به دنبال به حداقل رساندن هزینه‌ها و زمان حمل‌ونقل در زنجیره تامین است. نعمت نیا و همکاران (1404) برای توزیع محصولات با در نظر گرفتن همزمان مسیریابی و مکان یابی، در جهت کاهش هزینه‌ها و کاهش اثرات تخریبی زیست محیطی یک مدل ریاضی چند هدفه ارائه داده‌اند. برای حل این مدل از روش‌های دقیق و فرا ابتکاری (روش بهینه سازی ذرات چند هدفه)، محدودیت اپسیلون و بهینه ساز چند هدفه، استفاده می‌شود. حبیب زاده بیژنی و صاحبی (1403) یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه در زمینه مدیریت پسماندهای خطرناک صنعتی توسعه است که مکان یابی و مسیریابی وسایل نقلیه را پوشش می‌دهد. در این مدل سه تابع هزینه کل که شامل کل هزینه حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک، جریمه زودکرد یا دیرکرد و هزینه تأسیس تسهیلات است، به ریسک حمل‌ونقل خطر برای جمعیتی که اطراف تسهیلاتی که پسماندهای خطرناک در آن جمع‌آوری شدند زندگی می‌کنند، حداقل می‌شود.

حسن پور و همکاران (1402) ابتدا به ضرورت استفاده از حمل‌ونقل چندوجهی پرداخته، سپس رویکردها و تجهیزات حمل‌ونقل ریلی برای ترکیب با دیگر روش‌های حمل‌ونقل، تشریح کرده‌اند. در ادامه شرایط جغرافیایی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و فناوری موثر بر فرآیند شکل‌گیری شیوه حمل‌ونقل چندوجهی و ساختار شبکه، عناصر زنجیره حمل‌ونقل چندوجهی در ایران، مزایا و معایب آن تشریح کردند. نقاط قوت، ضعف، فرصت و

تهدید (SWOT) حمل و نقل چندوجهی را بررسی کرده اند. در پایان نیز، روش جدید حمل و نقل سریع لوله‌ای (انتقال کالا در شرایط خلا و فراصوت) معرفی کرده اند. ارشادی و همکاران () برای مسیر یابی سبز یک مدل ریاضی احتمالی عدد صحیح آمیخته خطی به منظور کمینه سازی مجموع هزینه‌های حمل و نقل ارائه داده اند علی نژاد و همکاران (1401) در پژوهشی یک مدل فازی بر مبنای اعتبار برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن گذاشت و برداشت همزمان و همچنین پنجره‌های زمانی ارائه داده‌اند. عباسی عقدا و همکاران (1401) به حل مدل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی با هدف دستیابی به کمترین هزینه توزیع و همچنین هزینه تنزل کیفیت به دلیل نقص سیستم ترابری و نیز اندازه بهینه ناوگان توزیع جهت برآورده کردن تقاضای پرداختند. علی نژاد و همکاران (1399) در مقاله خود مدل مکان یابی- مسیریابی با توابع هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های مرتبط با وسایل حمل و نقل، هزینه اجاره انبارها و حداقل کردن ریسک سیستم ارائه دادند. این مسئله با الگوریتم فرا ابتکاری چند هدفه جستجوی هارمونی چند هدفه حل شده است. برادران و آذری خواه (1399) یک مسئله مسیریابی برای شبکه‌های سیستم‌های حمل و نقل عمومی درون شهری چندوجهی با اهداف حداقل کردن هزینه، زمان سفر و تعداد تغییر نوع وسایل نقلیه مورد مطالعه قرار دادند. ربانی و همکاران (1387) برای اولین بار یک سیستم حمل و نقل متناسب با بنادر خلیج فارس و دریای عمان با هدف کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل کالا و انتقال کالا بین وسایل نقلیه طرح کردند و به صورت یک شبکه متشکل از مسیرهای وسایل نقلیه و مسیرهای حمل و نقل چند وجهی مدل کرده اند.

در مطالعات خارجی در پژوهشی مسئله برنامه‌ریزی حمل و نقل چندوجهی کم کربن چند هدفه با تقاضا و زمان فازی ارائه شده است. این مدل همزمان هزینه و زمان را با لحاظ کردن سیاست‌های اجباری انتشار، جبران و مالیات کربن، به حداقل می‌رساند (Zhang et al., 2024). در تحقیقی دیگر مسئله مسیریابی چندوجهی با در نظر گرفتن پنجره زمانی انعطاف‌پذیر و اهداف کاهش زمان و هزینه با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا، سرعت سفر، حالت حمل و نقل و زمان انتقال بین حالت‌های مختلف حمل و نقل توسعه داده شده است. در این مطالعه از اعداد فازی مثلثی برای مدل‌سازی پارامترهای نامشخص و متغیرهای نامشخص

استفاده شده است (Ge et al., 2024). در مطالعه دیگری برای بررسی مسئله مسیریابی حمل و نقل چندوجهی، ابتدا یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح ریاضی با اهداف کاهش هزینه برای توصیف مسئله در یک محیط قطعی استفاده شده است. سپس، دو مدل بهینه سازی استوار برای عدم قطعیت نوسانات نرخ حمل و نقل در هر دوره و فضای ذخیره سازی در مجموعه کل ارائه شده است (Guo et al., 2024). محققان حوزه مسیریابی در پژوهشی یک چارچوب تصمیم گیری ترکیبی برای انتخاب یک مسیر حمل و نقل بهینه در زنجیره های تامین چندوجهی پیشنهاد کرده اند. برای محاسبه مقادیر ریسک کیفی، استدلال استنتاج فازی مبتنی بر FRAM استفاده شد. (Koohathongsumrit & Chankham, 2023) در پژوهشی دیگر یک مدل برنامه ریزی غیرخطی فازی چند هدفه برای برنامه ریزی مسیر حمل و نقل چندوجهی تحت محیط های نامشخص، با در نظر گرفتن محدودیت های پنجره زمان مختلط با در نظر گرفتن هزینه، زمان و انتشار کربن به عنوان اهداف بهینه سازی ارائه شده است (Li et al., 2023). در مطالعه ای محققان به برنامه ریزی توزیع محصولات فاسدشدنی با در نظر گرفتن خدمات حمل و نقل موجود در یک شبکه حمل و نقل چندوجهی تحت عدم قطعیت زمان حمل و نقل از جمله زمان انتظار در سایت ها و زمان حمل و نقل بین سایت ها پرداخته اند و در نهایت یک مدل استوار برای به حداقل رساندن کل هزینه های متشکل از هزینه های حمل و نقل و هزینه کاهش ارزش محموله ها پیشنهاد شده است (Pang et al., 2023). پنگ و همکاران یک مدل بهینه سازی چند هدفه برای یک شبکه حمل و نقل چندوجهی تصادفی با هدف حداقل سازی هزینه و زمان کل حمل و نقل ارائه کرده اند. در این مطالعه، برای مدیریت زمان تصادفی حمل و نقل در شبکه، از شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده است (Peng et al., 2023). در پژوهشی دیگر بر اساس سیاست های انتشار کربن یک مسئله تصمیم گیری انتخاب مسیر چند هدفه برای حداقل سازی زمان و هزینه حمل و نقل با در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت حمل و نقل و زمان انتقال محموله طراحی شده است (Zhu & Zhu, 2022). در مطالعه ای دیگر یک رویکرد ترکیبی پیشنهاد شده است، که روش مرکز ارزیابی ریسک فازی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و VIKOR را ادغام می کند. در این مدل هزینه و زمان حمل و نقل، مقادیر ریسک قابل اعتماد و مقادیر

اولویت با استفاده از VIKOR تحلیل می‌شوند (Koothongsumrit & Chankham, 2022). در پژوهشی دیگر یک مدل شانس محدود چند هدفه ایجاد می‌شود که هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل، زمان و انتشار کربن است. این مدل بهینه‌سازی عدم قطعیت‌های حجم حمل‌ونقل، هزینه‌ها، زمان و انتشار کربن را در نظر می‌گیرد (Y. Lu et al., 2022). در مقاله‌ای دیگر سه معیار تصمیم‌گیری هزینه، زمان و ریسک حمل‌ونقل توسط یک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی وزن داده می‌شوند (Koothongsumrit & Meethom, 2021). محققان در پژوهشی دیگر یک مدل بهینه‌سازی تصادفی استوار هیبریدی با در نظر گرفتن هزینه حمل‌ونقل، هزینه زمان و هزینه انتشار کربن ارائه کرده‌اند. در این مدل تقاضا غیرقطعی و زمان تصادفی در نظر گرفته شده است (Zhang et al., 2021). در پژوهشی مدلی ارائه شده است که در آن عدم قطعیت مدت زمان حمل‌ونقل بین گره‌ها در بهینه‌سازی مسیریابی شبکه حمل‌ونقل چندوجهی برای تضمین قابلیت اطمینان زمان تحویل مورد توجه قرار است. مدل بهینه‌سازی استوار چند هدفه حداقل‌سازی مدت زمان حمل‌ونقل و هزینه را پوشش می‌دهد (Peng et al., 2021). محققان در پژوهشی دیگر یک سیستم حمل‌ونقل چندوجهی با محصولات فاسدشدنی را برنامه‌ریزی کردند که در آن عدم قطعیت تقاضا و تغییر موقعیت اقلام حمل‌ونقل برگشت‌پذیر خالی (RTI)¹ مطالعه شده است. در این مقاله، تابع هدف، به حداقل رساندن کل هزینه‌های عملیاتی، از جمله هزینه‌های جریان RTI‌های بارگذاری شده، هزینه‌های جریان RTI‌های خالی اختصاص یافته و جابجا شده، هزینه‌های انبار و در نهایت هزینه‌های استفاده از حالت‌های حمل‌ونقل، در تمام افق‌های برنامه‌ریزی است (StadieSeifi et al., 2021). سان در پژوهش خود، به بررسی یک مسئله مسیریابی مواد خطرناک برای حمل‌ونقل از طریق یک شبکه چندوجهی جاده-راه آهن می‌پردازد. مسئله بهینه‌سازی مسیریابی اهداف متناقض اقتصادی، ریسک، قابلیت اطمینان و به موقع بودن، پشتیبانی کمی را برای سازماندهی کارآمد حمل‌ونقل مواد خطرناک فراهم می‌کند. در این مسئله عدم قطعیت تقاضا با اعداد فازی مثلثی مدل‌سازی می‌شوند (Sun, 2020). پر

¹ بسته‌ها، پالت‌ها، سطل‌ها، ظروف و سایر مواردی هستند که می‌توان از آنها برای جابجایی کالا بین زنجیره تامین استفاده مجدد کرد.

استنادترین مقاله در حوزه مسیریابی در شبکه‌های حمل و نقل چندوجهی مقاله‌ای است که در آن، یک مدل فازی ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله پیشنهادی ارائه شده است که 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 (Fazayeli et al., 2018).

در جدول 1 خلاصه مقالات مدل‌سازی مسیریابی حمل و نقل چندوجهی و رویکرد حل آن‌ها ارائه شده است.

جدول 1. خلاصه مقالات مدل‌سازی مسیریابی حمل و نقل چندوجهی

نویسنده	تابع هدف			کالای فاسد شدنی	پنجره زمانی	رویکرد حل	بهینه سازی استوار	منبع عدم قطع
	هزینه	زمان	انتشار کربن					
(Zhang et al., 2024)	✓	✓	✓	-	-	sparrow search algorithm	-	تقاضا و زمان (فا)
(Ge et al., 2024)	✓	-	-	-	✓	حل دقیق	-	تقاضا، سرعت و حالت حمل و زمان
(Guo et al., 2024)	✓	-	-	-	-	MKIGALNS	✓	نوسانات نرخ حمل و فضا و ذخیره‌سازی
(Koohathongsumrit & Chankham, 2023)	✓	✓	-	-	-	Fuzzy AHP, DEA	-	ریسک
(Li et al., 2023)	✓	✓	✓	-	✓	NSGA-II	-	تقاضا (فازی)
(Pang et al., 2023)	✓	✓	-	✓	-	VNS algorithm	✓	زمان

منبع عدم قطع	بهینه سازی استوار	رویکرد حل	پنجره زمانی	کالای فاسد شدنی	تابع هدف			نویسنده
					انتشار کربن	زمان	هزینه	
حمل و نقل								
زمان	-	DD-MSAC	-	-	-	✓	✓	(Peng et al., 2023)
سرعت حمل و نقل زمان	-	NSGA-II	-	-	-	✓	✓	(Zhu & Zhu, 2022)
تقاضا (فازی)	-	Fuzzy AHP, VIKOR	-	-	-	✓	✓	(Koohathongsumrit & Chankham, 2022)
زمان	-	CFPR	-	-	✓	✓	✓	(W. Lu et al., 2022)
حجم حمل و نقل هزینه‌ها، زه انتشار کربن	-	NSGAIII	-	-	✓	✓	✓	(Lu et al., 2022)
ریسک	-	fuzzy risk assessment odel (FRAM), DEA	-	-	-	✓	✓	(Koohathongsumrit & Meethom, 2021)
زمان و تقاضا	-	HRSO, (CA- GA)	✓	-	✓	-	✓	(Zhang et al., 2021)
زمان	✓	NSGA-II	✓	-	-	✓	✓	(Peng et al., 2021)
تقاضا	-	ALNS	-	✓	-		✓	(SteadieSeifi et al., 2021)
تقاضا	-	ECM	✓	-	-	-	✓	(Sun, 2020)
تقاضا (فازی)	-	GA	✓	-	-	-	✓	(Fazayeli et al., 2018)
زمان و	✓	GP	✓	✓	✓	✓	✓	پژوهش حاضر

نویسنده	تابع هدف			کالای فاسد شدنی	پنجره زمانی	رویکرد حل	بهبود سازی استوار	منبع عدم قطع
	هزینه	زمان	انتشار کربن					
هزینه حمل								

رویکردهای حل به اختصار مطابق با متن ذیل است.

ECM: e-constraint method

AHP: analytic hierarchy process

ALNS: Adaptive Large Neighborhood Search algorithm

CA-GA: catastrophic adaptive genetic algorithm

CFPR: consistent fuzzy preference relation method

DD-MSAC: Data-driven Multi-objective Ant Colony algorithm

DEA: Data Envelopment Analysis

FRAM: fuzzy risk assessment model

GA: Genetic algorithm

GP: Goal programming

HRSO: hybrid robust stochastic optimization

MKIGALNS: classical k-shortest path algorithm, the iterative greedy algorithm (IG), and the adaptive large neighborhood search algorithm (ALNS) were improved for the proposed robust random optimization model, resulting in a hybrid heuristic algorithm called MKIGALNS.

NSGA-II: Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II

TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

VIKOR: Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje

VNS: Variable neighborhood search

روش تحقیق

هدف اصلی پژوهش حاضر توسعه مدل ریاضی برای انتخاب مسیر در شبکه حمل و نقل چندوجهی است. از این رو پژوهش حاضر از نظر فلسفه پژوهش از نوع اثبات گرایی است. از منظر هدف یک تحقیق کاربردی با رویکرد قیاسی است. جهت جمع آوری داده های پژوهش، از اطلاعات مرتبط با شبکه های حمل و نقل چندوجهی از گزارش ها، پایگاه های داده و مقالات علمی (داده های ثانویه) استخراج شده است. زمان بندی پژوهش به صورت مقطعی

است، زیرا داده‌ها در یک بازه زمانی مشخص و محدود جمع‌آوری شده‌اند. تحلیل داده‌ها از طریق استفاده از روش‌های عددی و نرم‌افزار GAMS صورت گرفته است.

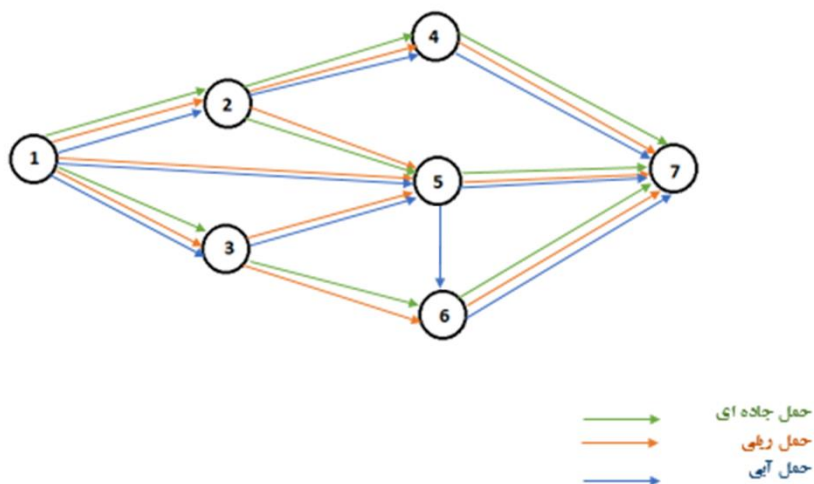
معرفی مدل: در یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی $G = (N, A)$ ، N مجموعه گره و A مجموعه مسیر شبکه‌های G است. در این مدل محموله‌ای از کالاها از یک مبدا مشخص $o \in N$ به یک مقصد مشخص $d \in N$ حمل می‌شود. گره‌های حمل‌ونقل (ایستگاه‌های راه آهن، بنادر و ترمینال‌های باربری) و یال‌ها، مسیرهای شبکه حمل‌ونقل را تشکیل می‌دهند. در این شبکه، حالت‌های حمل‌ونقل (جاده‌ای، ریلی، هوایی و دریایی) در فرآیند حمل‌ونقل مهم هستند. در این مدل تحویل بار می‌بایست در یک بازه زمانی معین (پنجره زمانی نرم) صورت گیرد. بنابراین نقض پنجره زمانی منجر به تحمیل هزینه‌های انبارداری و هزینه تاخیر می‌شود. علاوه بر این کالاها دارای بهترین زمان مصرف و تاریخ انقضا هستند. در فاصله بهترین زمان مصرف و تاریخ انقضا، ارزش کالا به صورت خطی کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. هنگامی که یک شبکه حمل‌ونقل طراحی می‌شود، شرکت حمل‌ونقل بهترین مسیرها و گره‌ها را برای طرح حمل‌ونقل انتخاب می‌کند، تا تحویل به موقع صورت گیرد.

در این مطالعه یک مدل چندهدفه برای به حداقل رساندن انتشار کربن و هزینه‌هایی که در طول فرآیند حمل‌ونقل متحمل می‌شود، حفظ ارزش کالا و افزایش سطح سرویس (زمان حمل‌ونقل مناسب) ایجاد می‌شود. کل هزینه‌های مدل عبارت است از هزینه فرآیند حمل‌ونقل شامل هزینه‌های حمل و هزینه تغییر حالت حمل‌ونقل؛ هزینه انبارداری برای رسیدن زود هنگام و هزینه جریمه تاخیر برای دیر رسیدن کالا. که در آن هزینه انبارداری و هزینه جریمه تاخیر ناشی از نقض پنجره زمانی است. همچنین برای محاسبه ارزش کالا یک مدل ریاضی پیشنهاد شده است. زمان حمل‌ونقل شامل زمان حمل و زمان تغییر حالت حمل‌ونقل است که برای گره‌ها و حالات حمل‌ونقل مختلف به صورت مجزا تعریف می‌شوند.

هدف این مدل انتخاب مسیر بهینه برای حمل کالا از مبدأ به مقصد از طریق شبکه‌های حمل‌ونقل چندوجهی و در عین حال برآورده کردن نیاز زمانی فرستنده است. در این مدل ظرفیت و تقاضا حمل‌ونقل در هر دوره ثابت و هزینه‌ها و زمان غیر قطعی هستند.

محدودیت‌های این مساله شامل، محدودیت پنجره زمانی نرم، زمان دریافت و محدودیت‌های ظرفیت در فرآیندهای حمل‌ونقل و انتقال کالا می‌باشد. حل مساله منجر به تعیین مسیرها و وسیله حمل‌ونقل در شبکه حمل‌ونقل با هدف کاهش هزینه‌ها، حفظ ارزش کالا، کاهش انتشار کربن و کاهش انحراف زمان تحویل به مشتریان خواهد شد. شبکه حمل‌ونقل چندوجهی در شکل 1 نشان داده شده است.

شکل 1- نمای کلی یک شبکه حمل‌ونقل چند وجهی فرضی



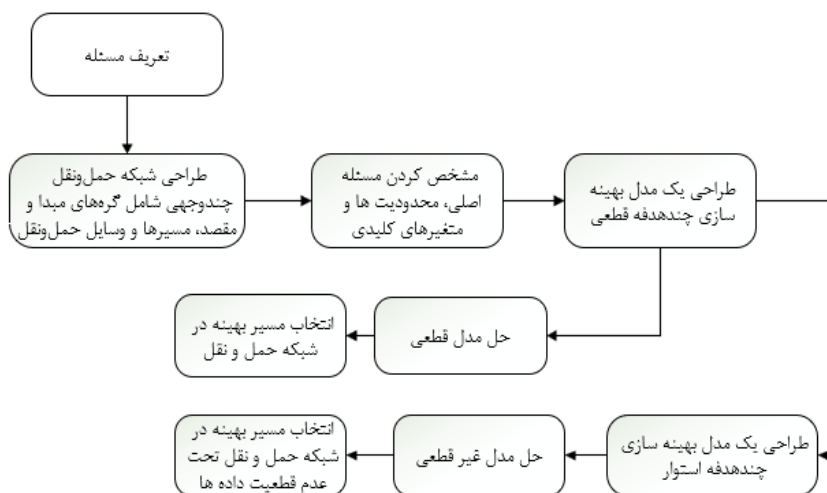
مدل و رویکرد پیشنهادی حل مسئله شامل موارد زیر است:

- ا. مدل ریاضی پیشنهادی: این مدل برای انتخاب مسیر در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی طراحی شده است. مدل شامل دو بخش قطعی و غیرقطعی بوده و در آن، استوارسازی به‌عنوان یک رویکرد بهینه برای مدیریت عدم قطعیت استفاده شده است

ب. رویکرد استوارسازی: این رویکرد در مدل بهینه‌سازی به کار گرفته شده تا بتواند عملکرد قابل اعتمادی در شرایط عدم قطعیت ارائه دهد. مدل ارائه شده دارای ویژگی‌هایی مانند انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات، قابلیت تصمیم‌گیری بهینه و کاهش هزینه‌ها و زمان حمل‌ونقل است.

ج. روش حل مسئله: از مدل برنامه‌ریزی آرمانی استوار برای حل مسئله چندهدفه استفاده شده است. در این مدل، هزینه‌های حمل‌ونقل، انتشار کربن، انحراف زمان ارسال و حفظ ارزش کالا برای کالای فاسد شدنی در نظر گرفته شده‌اند و راه‌حل بهینه پیشنهادی بر اساس ترکیب این معیارها ارائه شده است.

شکل 2- رویکرد حل مسئله



در این مدل شبکه حمل و نقل چندوجهی مفروض ترکیبی از تعدادی گره در مناطق مختلف است که یک دوره‌ای مدل‌سازی می‌شود. دو مدل برنامه‌ریزی قطعی و غیر قطعی ارائه می‌شود.

مفروضات مدل

- کالا در یک زمان و در یک دسته کامل حمل می‌شود و به صورت قطعه‌ای قابل حمل نیست.
- حمل و نقل بین دو گره باید فقط از یک مسیر و یک حالت حمل و نقل استفاده شود.
- تعداد دفعاتی که محموله کالا از یک گره حمل می‌شود نباید از یک بار تجاوز شود.
- مجموع زمان حمل محموله کالا نباید از زمان مجاز ارسال بیشتر شود.
- ارزش کالا به صورت خطی از محدوده پنجره زمانی تا زمان مجاز ارسال کاهش می‌یابد.
- حالت بهینه این است که کالا در محدوده پنجره زمانی به مقصد برسد.
- تقاضا و ظرفیت حمل قطعی و هزینه‌ها و زمان ارسال کالا غیر قطعی است.

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

N : مجموعه گره‌ها (همه گره‌ها از جمله گره شروع و گره پایانی)

K : مجموعه حالات حمل و نقل

پارامترهای مدل

: مقدار کل کالاهایی که باید در این مدل حمل و نقل چندوجهی حمل شوند

D
(تقاضا)

: حداکثر ظرفیت انتقال بین گره انتقال i و j با استفاده از حالت انتقال k

q_{ij}^k

هزینه حمل و نقل واحد از گره i به گره j با حالت حمل و نقل k	ct_{ij}^k
هزینه تغییر حالت حمل و نقل از حالت k به حالت l در گره i	ctr_i^{kl}
هزینه واحد انبارداری برای تحویل زود هنگام کالا (هزینه تعجیل)	c_p
هزینه جریمه تاخیر واحد برای دیر رسیدن کالا	c_s
ارزش واحد کالا	λ
مسافت پیموده شده حمل و نقل از گره i به گره j با حالت حمل و نقل k	d_{ij}^k
زمان حمل و نقل از گره i به گره j با حالت حمل و نقل k	Tt_{ij}^k
زمان تغییر حالت حمل و نقل از حالت k به حالت l در گره i	Ttr_i^{kl}
حداقل زمان دریافت مجاز کالا (حد پایین پنجره زمانی نرم)	T_{min}
حداکثر زمان دریافت مجاز کالا (حد بالا پنجره زمانی نرم)	T_{max}
زمان مجاز ارسال کالا طی فرآیند حمل و نقل (حد بالا پنجره زمانی سخت)	T_e
تاریخ انقضا کالا	T_x
واحد انتشار دی اکسید کربن در واحد مسافت طی شده در حالت حمل و نقل k	e^k

متغیرهای تصمیم گیری

X_{ij}^k : برابر است با 1، اگر از گره i به گره j با حالت حمل و نقل k جابه جایی صورت گیرد، در غیر این صورت 0

Y_i^{kl} : برابر است با 1، اگر در گره i حالت حمل و نقل از k به l تغییر کند، در غیر این صورت 0

توابع هدف: مدل حمل و نقل چندوجهی ایجاد شده در این مطالعه چهار هدف بهینه سازی را در نظر می گیرد:

$$\begin{aligned} \min TC = & D. \sum_i \sum_{j>i} \sum_k d_{ij}^k . Ct^k . X_{ij}^k \\ & + D \sum_i \sum_k \sum_{l \neq k} Ctr^{kl} Y_i^{kl} + C_p . D . \max \left(\left(T_{min} \right. \right. \\ & - \left(\sum_i \sum_{j>i} \sum_k d_{ij}^k . Tt^k X_{ij}^k \right. \\ & \left. \left. + D . \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} Ttr^{kl} Y_i^{kl} \right) , 0 \right) \\ & + C_s . D . \max \left(\left(\left(\sum_i \sum_{j>i} \sum_k d_{ij}^k . Tt^k X_{ij}^k \right. \right. \right. \\ & \left. \left. + D . \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} Ttr^{kl} Y_i^{kl} \right) - T_{max} \right) , 0 \right) \end{aligned} \quad \text{رابطه 1}$$

$$\text{Max} V = \begin{cases} V & t \leq T_{max} \\ V - \frac{V}{T_x - T_{max}} (t - T_{max}) & T_{max} < t < T_x \\ 0 & t > T_x \end{cases} \quad \text{رابطه 2}$$

$$\min EE = \sum_i \sum_{j>i} \sum_k D . e^k . X_{ij}^k . d_{ij}^k \quad \text{رابطه 3}$$

$$\begin{aligned} \min TD = & \max (T_{min} \\ & - \sum_i \sum_{j>i} \sum_k d_{ij}^k . Tt_{ij}^k X_{ij}^k + D . \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} Ttr_i^{kl} Y_i^{kl} , 0) \\ & + \max (\sum_i \sum_{j>i} \sum_k d_{ij}^k . Tt_{ij}^k X_{ij}^k + D . \sum_i \sum_k \sum_{l \neq k} Ttr_i^{kl} Y_i^{kl} \\ & - T_{max} , 0) \end{aligned} \quad \text{رابطه 4}$$

رابطه 1 کل هزینه‌های حمل‌ونقل شامل هزینه فرآیند حمل‌ونقل شامل هزینه‌های حمل‌ونقل بین گره‌ها و هزینه تغییر حالت حمل‌ونقل، هزینه‌های جریمه ناشی از نقض پنجره زمانی

شامل هزینه انبارداری برای رسیدن زودهنگام کالا و هزینه جریمه برای دیر رسیدن کالا را در بر می گیرد. رابطه 2 ارزش کالا طی زمان را نشان می دهد. چنانچه از ارزش کالا طی زمان به صورت خطی کاسته شود، برای بیان ارزش کالا به صورت ریاضی از یک تابع چند بخشی استفاده می شود. D مقدار کالا و λ ارزش واحد کالا است. $V = D \times \lambda$ و T_x تاریخ انقضا محصول و T_{max} حد بالای پنجره زمانی سخت است. رابطه 3 میزان انتشار کربن را طی فرآیند حمل و نقل محاسبه می کند. این مقدار تابعی از میزان انتشار دی اکسید کربن در واحد مسافت طی شده در حالت های مختلف حمل و نقل، میزان بار حمل شده و مسافت طی شده است. رابطه 4 میزان انحراف مدت زمان حمل و نقل بین گره ها و زمان تغییر حالت حمل و نقل از زمان تحویل را به عنوان انحراف زمان تحویل تعریف می کند.

محدودیت های مدل

$$\sum_{j>l} \sum_k X_{ij}^k \leq 1 \quad \text{رابطه 5}$$

$$\sum_l Y_j^{kl} \leq \sum_{i<j} X_{ij}^k \quad \text{رابطه 6}$$

$$\sum_{i<j} \sum_k X_{ij}^k = \sum_{z>j} \sum_k X_{jz}^k \quad \text{رابطه 7}$$

$$D \times X_{ij}^k \leq q_{ij}^k \quad \text{رابطه 8}$$

$$\sum_{j>1} \sum_k X_{oj}^k = 1 \quad \text{رابطه 9}$$

$$\sum_{i<d} \sum_k X_{id}^k = 1 \quad \text{رابطه 10}$$

$$\sum_{i<j} X_{ij}^k + \sum_{z>j} X_{jz}^l - 1 \leq Y_j^{kl} \quad \text{رابطه 11}$$

$$2 - \sum_{i<j} X_{ij}^k - \sum_{z>j} X_{jz}^k \geq Y_j^{kl} \quad \text{رابطه 12}$$

$$\sum_i \sum_{j>l} \sum_k d_{ij}^k \cdot T t_{ij}^k X_{ij}^k + D \cdot \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} T t_i^{kl} Y_i^{kl} \leq T_e \quad \text{رابطه 13}$$

$$X_{ij}^k, Y_j^{kl} \in \{1, 0\}$$

رابطه 5 اطمینان حاصل می کند که در طول حمل و نقل فقط یک حالت حمل و نقل را می توان بین دو گره مجاور انتخاب کرد. رابطه 6 تضمین می کند که تنها یک حالت حمل و نقل می تواند در هر گره رخ دهد. رابطه 7 تعادل جریان گره ها (ورودی و خروجی هر گره) در شبکه است. رابطه 8 تضمین می کند که هنگام حمل و نقل بین گره ها، حجم بار نمی تواند از محدوده ظرفیت حمل و نقل حالت حمل و نقل انتخاب شده تجاوز کند. رابطه 9 و رابطه 10 نشان می دهد که گره شروع (مبدأ) و گره پایان (مقصد) باید در مسیر انتخابی گنجانده شود. رابطه 11 و رابطه 12 تداوم حالت حمل و نقل را در طول شبکه تضمین می کند. رابطه 13 اطمینان حاصل می کند که زمان رسیدن کالا به مقصد قبل از زمان زمان مجاز ارسال کالا (حد بالا پنجره زمانی سخت) است.

مدل برنامه ریزی آرمانی در حالت قطعی

برنامه ریزی آرمانی (GP) یکی از تکنیک های حل مسائل بهینه سازی چند هدفه و یک روش بسیار کارآمد است که نگرش متفاوتی در مورد حل انواع مسائل برنامه ریزی که دارای اهداف چندگانه و متعارض هستند ارائه می کند. برنامه ریزی آرمانی به مینیم کردن انحراف بین آرمان ها و راه حل بهینه می پردازد. تابع هدف مساله اصلی به صورت محدودیت جدید همراه با متغیر کمکی و مقدار آرمان مورد نظر دوباره فرمول بندی می شود. آرمان ها توسط تصمیم گیرنده تعیین می شوند. متغیرهای کمکی متغیرهای انحراف از آرمان نامیده می شود. هدف برنامه ریزی آرمانی حداقل کردن انحراف هر یک از اهداف از سطح مشخص آرمان های مربوط به آنهاست (De Oliveira et al., 2003) در برنامه ریزی آرمانی برای هر تابع هدف $f_j(x)$ آرمان g_i تعریف می شود. سپس، انحراف از آرمان ها به حداقل می رسد. مساله بهینه سازی فرموله شده به صورت مدل زیر است:

$$\text{Min}Z = \sum_{j=1}^k (d_j^- + d_j^+)$$

$$s. t: A(x) \approx B$$

$$f_i(x) + d_j^- - d_j^+ = g_i(x) \quad \forall j$$

$$d_j^- \times d_j^+ = 0 \quad \forall j$$

$$X, d_j^-, d_j^+ \geq 0 \quad \forall j$$

$$\approx \text{ can be } \leq \text{ or } \geq \text{ or } =$$

برای اهداف از نوع سود متغیر انحرافی منفی و برای اهداف از نوع هزینه متغیر انحرافی مثبت در تابع هدف مینیمم می‌گردد. (معماریانی، 1378).

سه نوع برنامه ریزی آرمانی برای روش حل عبارتند از :

برنامه‌ریزی آرمانی وزنی (WGP) ، که با نام برنامه‌ریزی آرمانی ارشمیدسی نیز شناخته می‌شود. برنامه‌ریزی آرمانی لکسیکوگرافی (LGP)، که با نام برنامه‌ریزی آرمانی غیر ارشمیدسی یا پیشگیرانه نیز شناخته می‌شود و برنامه‌ریزی آرمانی MINMAX (MGP)، با نام برنامه‌ریزی چیشف یا فازی نیز شناخته می‌شود. (Romero, 2004)

در مقاله حاضر، از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی وزنی برای حل یک مدل چندهدفه پیچیده در زمینه انتخاب مسیر در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی استفاده شده است. در این مدل چندهدفه، چهار هدف به صورت زیر مدنظر قرار گرفته‌اند:

1- حداقل سازی هزینه کل حمل‌ونقل (TC)

2- حداکثر کردن ارزش کالا (V)

3- حداقل سازی میزان انتشار دی‌اکسید کربن (EE)

4- حداقل کردن انحراف زمان تحویل (TD)

هدف به حداقل رساندن مجموع (وزن دار) انحرافات نامطلوب (آرمان‌ها از راه حل بهینه) است. آرمان‌ها (Goals) مقادیر ایده‌آلی هستند که برای هر تابع هدف تعیین می‌شوند. آرمان 1 (g_1) هزینه‌های شبکه حمل‌ونقل، آرمان 2 (g_2) ارزش کالا، آرمان 3 (g_3) انتشار کربن و آرمان 4 (g_4) انحراف زمان تحویل تعریف شده است. در مدل ارائه‌شده، آرمان‌ها از طریق حل تک‌هدفه هر تابع (به صورت مجزا) محاسبه و سپس در مدل برنامه‌ریزی آرمانی به کار گرفته شده‌اند. از آنجاییکه توابع هدف اول (هزینه‌های شبکه حمل‌ونقل) و سوم (انتشار کربن) و چهارم (انحراف زمان تحویل) از نوع مینیمم سازی است، در مدل برنامه‌ریزی آرمانی متناظر با آن متغیر انحراف منفی از آرمان و تابع هدف دوم (ارزش کالا) ماکزیمم سازی است در مدل برنامه‌ریزی آرمانی متغیر انحراف مثبت از آرمان تعریف می‌شود. در این پژوهش از برنامه‌ریزی آرمانی وزنی (WGP) با وزن‌های برابر استفاده شده است. مدل برنامه‌ریزی آرمانی به صورت زیر خواهد بود.

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^m w_i d_i$$

s. t:

$$TC - d_1 = g_1$$

$$V + d_2 = g_2$$

$$E - d_3 = g_3$$

$$TD - d_4 = g_4$$

$$d_1, d_2, d_3, d_4, \geq 0$$

(روابط 5 – 13) and system constraint

مدل فوق یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی قطعی است که در آن m اندیس تابع هدف $(m=1,2,3,4)$ ، مقدار آرمان g_m ، متغیرانحراف از آرمان m ام d_m ، متغیرانحراف از آرمان m ام است. این اهداف در قالب یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی با متغیرهای انحراف مثبت و منفی تعریف شده‌اند. ساختار مدل با ادبیات کلاسیک برنامه‌ریزی آرمانی مطابقت دارد، جایی که هر هدف دارای سطح آرمان مشخص است و مدل تلاش می‌کند مجموع انحراف از این آرمان‌ها را حداقل نماید. مدل پیشنهادی مقاله حاضر با توجه به ترکیب چند تابع هدف، آرمان‌ها، استفاده از متغیرهای انحراف و تلفیق آن با برنامه‌ریزی استوار، کاملاً منطبق بر ساختار استاندارد برنامه‌ریزی آرمانی است. (Lu & Tsai2024) مدل فوق یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی قطعی است که در آن m اندیس تابع هدف $(m=1,2,3,4)$ ، مقدار آرمان g_m ، متغیرانحراف از آرمان m ام d_m ، متغیرانحراف از آرمان m ام است.

مدل برنامه‌ریزی استوار مساله

یکی از رویکردهای بهینه‌سازی استوار رویکرد برتسیماس و سیم است که برای حل مسائل بهینه‌سازی در حضور عدم قطعیت‌های پارامترهای مسئله ارائه شده است. در ادامه مدل استوار برتسیماس و سیم به طور مختصر شرح داده می‌شود. برتسیماس و سیم رویکردی برای کنترل سطح محافظه کاری جواب پیشنهاد کردند و دارای این مزیت است که منجر به یک مدل بهینه‌سازی خطی می‌شود. بنابراین از این رویکرد می‌توان به صورت مستقیم برای مدل‌های بهینه‌سازی گسسته نیز استفاده کرد مدل برنامه‌ریزی اسمی (1-2) را در نظر بگیرید.

$$\begin{aligned} \text{Max} Z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{s. t: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq b_i & \forall i = 1, 2, \dots, m \\ x_j &\geq 0 & \forall j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

رابطه 14

در صورتیکه پارامترهای b_i شامل اعداد قطعی و پارامترهای a_{ij} و c_j شامل داده‌های غیرقطعی باشد. با فرض اینکه هر کدام از c_j ها به صورت یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع متقارن و کراندار $\tilde{c}_j$ در بازه $[c_j - d_j, c_j + d_j]$ مقدار بگیرد که در آن c_j و d_j به ترتیب مقدار اسمی و حداکثر انحراف از مقدار اسمی ضرایب تابع هدف را نشان دهد و هر کدام از ضرایب a_{ij} به صورت یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع متقارن و کراندار $\tilde{a}_{ij}$ مدل می‌شود و در بازه $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ مقدار گیرد که a_{ij} و $\hat{a}_{ij}$ به ترتیب مقدار اسمی و حداکثر انحراف از مقدار اسمی را نشان می‌دهد. همچنین J_i مجموعه پارامترهای نادقیق در محدودیت i ام و J_0 مجموعه پارامترهای نادقیق در تابع هدف در نظر گرفته شود.

بر تسمیس و سیم در راستای تحقق هدف استواری جواب پارامتر Γ_i را برای هر محدودیت i معرفی کردند که بودجه عدم قطعیت¹ نامیده می‌شود. پارامتر Γ_i در بازه پارامتر $[0, |\Gamma_i|]$ مقدار می‌گیرد به طوری که $|\Gamma_i|$ بیانگر تعداد ضرایب فنی غیردقیق در محدودیت i ام است. نقش پارامتر Γ_i در محدودیت‌ها تنظیم میزان استواری در مقابل سطح محافظه کاری جواب است و هرچه بیشتر باشد، سطح محافظه کاری جواب افزایش می‌یابد. همچنین جهت تحقق استواری جواب مدل پارامتر Γ_0 سطح استوار بودن تابع هدف را کنترل می‌کند، این پارامتر در بازه $[0, |J_0|]$ مقدار می‌گیرد، به طوری که $|J_0|$ بیانگر تعداد ضرایب متغیر تصمیم غیرقطعی در تابع هدف است. بنابراین همتای استوار بر تسمیس و سیم برای مدل (1-2) با فرض غیرقطعی بودن ضرایب فنی و ضرایب متغیرهای تصمیم در تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Max}Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j - z_0 \Gamma_0 - \sum_{j=1}^n p_{0j}$$

رابطه 15

¹Budget Of Uncertainty

$$\begin{array}{ll}
\text{s.t.: } \sum_{i=1}^n a_{ij} x_j + z_j \Gamma_i + \sum_{i=1}^n p_{ij} \leq b_i & \forall i = 1, 2, \dots, m \\
z_0 + p_{0j} \geq d_j y_j & \forall j = 1, 2, \dots, n \\
z_i + p_{ij} \geq \hat{a}_{ij} y_j & \forall i = 1, 2, \dots, m \\
& \forall j = 1, 2, \dots, n \\
-y_j \leq x_j \leq y_j & \forall j = 1, 2, \dots, n \\
p_{0j} \geq 0 & \forall j = 1, 2, \dots, n \\
p_{ij} \geq 0 & \forall i = 1, 2, \dots, m \\
& \forall j = 1, 2, \dots, n \\
x_j, y_j \geq 0 & \forall j = 1, 2, \dots, n \\
x_j, y_j \geq 0 & \forall j = 1, 2, \dots, n \\
z_i \geq 0 & \forall i = 1, 2, \dots, m \\
z_0 \geq 0 &
\end{array}$$

اگر n تعداد پارامترهای غیرقطعی باشد، خواهیم داشت:

$\Gamma=0$ مدل بدون عدم قطعیت و کاملاً قطعی است.

$\Gamma=n$ مدل کاملاً محافظه کار است و فرض می کند که تمامی پارامترها در بدترین حالت خود قرار دارند.

$0 \leq \Gamma \leq n$ حالتی میانه که در آن مدل تنها بخشی از عدم قطعیت ها را لحاظ می کند و تعادلی بین محافظه کاری و کارایی برقرار می شود.

با استفاده از Γ ، قیود مسئله به گونه ای اصلاح می شوند که ضمن در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت، پیچیدگی مسئله به طور قابل توجهی افزایش نیابد. این اصلاح معمولاً از طریق افزودن عباراتی خطی (در مقایسه با روش های غیرخطی پیچیده) انجام می شود.

تعریف پارامترهای غیرقطعی و متغیرهای کمکی

پارامترهای غیرقطعی در این مدل، هزینه‌های حمل و نقل و زمان حمل و نقل در نظر گرفته شده است. برای هر پارامتر غیر قطعی بازه تغییرات خطی به صورت فوق تعریف می‌شوند به پارامترهای مدل $\hat{Tt}_{ij}^k, \hat{Ctr}_i^{kl}, \hat{Ttr}_i^{kl}, \hat{Ct}_{ij}^k$ اضافه می‌شود.

همچنین پارامترهای Γ_1, Γ_0 سطح محافظه‌کاری را نشان می‌دهد. Γ_0 سطح استوار بودن تابع هدف هزینه‌های حمل و نقل و Γ_1 سطح استوار بودن زمان حمل و نقل را نشان می‌دهد. $P1_i^{kl}, P2_{ij}^k, P3_{ij}^k, P4_i^{kl}, P5_{ij}^k, P6_i^{kl}, \theta_i^{kl}, \omega_{ij}^k, z_1, z_0$ متغیرهای کمکی برای مدیریت عدم قطعیت هستند.

همتای استوار توابع هدف

همتای استوار برتسیمس و سیم توابع هزینه‌های حمل و نقل و انحراف زمان تحویل و محدودیت زمان مجاز ارسال با فرض غیر قطعی بودن هزینه و زمان حمل به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned}
min TC = & D. \sum_i \sum_{j>i} \sum_k d_{ij}^k. Ct_{ij}^k. X_{ij}^k \\
& + D \sum_i \sum_k \sum_{l \neq k} ctr_i^{kl} Y_i^{kl} + C_p. D. max \left(\left(T_{min} \right. \right. \\
& - \left(\sum_i \sum_{j>i} \sum_k Tt_{ij}^k X_{ij}^k \right. \\
& \left. \left. + D. \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} Ttr_i^{kl} Y_i^{kl} \right) \right), 0 \left. \right)
\end{aligned}$$

رابطه 16

$$\begin{aligned}
& + C_s. D. max \left(\left(\left(\sum_i \sum_{j>i} \sum_k Tt_{ij}^k X_{ij}^k \right. \right. \right. \\
& \left. \left. + D \sum_i \sum_k \sum_{l \neq k} Ttr_i^{kl} Y_i^{kl} \right) - T_{max} \right), 0 \left. \right) + Z_0 \Gamma_0 \\
& - \sum_i \sum_{j>i} \sum_k P1_i^{kl} + \sum_i \sum_j \sum_k P2_{ij}^k + \sum_i \sum_j \sum_k P3_{ij}^k \\
& + \sum_i \sum_{j>i} \sum_k P4_i^{kl}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
min TD = & max (T_{min} - \sum_i \sum_{j>i} \sum_k Tt_{ij}^k X_{ij}^k + D. \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} Ttr_i^{kl} Y_i^{kl}, 0) \\
& + max \left(\sum_i \sum_{j>i} \sum_k Tt_{ij}^k X_{ij}^k + D. \sum_i \sum_k \sum_{l \neq k} Ttr_i^{kl} Y_i^{kl} \right. \\
& \left. - T_{max}, 0 \right) + z_1 \Gamma_1 + \sum_i \sum_{j>i} \sum_k P5_i^{kl} + \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} P6_{ij}^k
\end{aligned}$$

رابطه 17

$$\begin{aligned}
& \sum_i \sum_{j>i} \sum_k Tt_{ij}^k X_{ij}^k + D. \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} Ttr_i^{kl} Y_i^{kl} + z_1 \Gamma_1 \\
& + \sum_i \sum_{j>i} \sum_k P5_i^{kl} + \sum_i \sum_j \sum_{l \neq k} P6_{ij}^k \leq T_e
\end{aligned}$$

رابطه 18

محدودیت‌های زیر به محدودیت‌های مدل اضافه می‌شود:

$$z_0 + P1_i^{kl} \geq \widehat{Tr}_i^{kl} \cdot \theta_i^{kl} \quad \text{رابطه 19}$$

$$z_0 + P2_{ij}^k \geq \widehat{Tt}_{ij}^k \cdot \omega_{ij}^k \quad \text{رابطه 20}$$

$$z_0 + P3_{ij}^k \geq \widehat{Ct}_{ij}^k \cdot \omega_{ij}^k \quad \text{رابطه 21}$$

$$z_0 + P4_i^{kl} \geq \widehat{Ct}_i^{kl} \cdot \theta_i^{kl} \quad \text{رابطه 22}$$

$$z_1 + P5_i^{kl} \geq \widehat{Tr}_i^{kl} \cdot \theta_i^{kl} \quad \text{رابطه 23}$$

$$z_1 + P6_{ij}^k \geq \widehat{Tt}_{ij}^k \cdot \omega_{ij}^k \quad \text{رابطه 24}$$

$$-\omega_{ij}^k \leq X_{ij}^k \leq \omega_{ij}^k \quad \text{رابطه 25}$$

$$-\theta_i^{kl} \leq Y_i^{kl} \leq \theta_i^{kl} \quad \text{رابطه 26}$$

$$\theta_i^{kl}, \omega_{ij}^k, z_1, z_0, P1_i^{kl}, P2_{ij}^k, P3_{ij}^k, P4_i^{kl}, P5_i^{kl}, P6_{ij}^k \geq 0 \quad \text{رابطه 27}$$

برای نشان دادن کاربردی بودن مدل، حل مدل پیشنهادی با یک شبکه حمل‌ونقل چندوجهی انجام می‌شود. این مثال موردی شامل 15 شهر و 3 حالت حمل و نقل است. داده‌های این مسئله به صورت کتابخانه‌ای و از سناریوی عددی مقاله (Zhang et al., 2021)، گردآوری شده است، که در ادامه به پارامترهای مدل اشاره می‌شود.

جدول 2. پارامترهای مربوط به ظرفیت حمل و مسافت بین گره‌ها

مسیر	ظرفیت حمل (تن) - مسافت (کیلومتر)	مسیر	ظرفیت حمل (تن) - مسافت (کیلومتر)
1-2	(400;160;180)-[105;875;604]	7-10	(--;220;150)-[--;614;675]
1-3	(500;220;170)-[422;1338;986]	8-11	(--;240;240)-[--;998;942]
2-4	(200;180;250)-[337;1264;1156]	8-12	(--;250;160)-[--;1497;1356]
2-5	(--;210;180)-[--;949;793]	8-13	(--;250;180)-[--;1328;1206]
3-6	(200;210;170)-[658;1159;932]	9-11	(--;170;190)-[--;349;366]

مسیر	ظرفیت حمل (تن) - مسافت (کیلومتر)	مسیر	ظرفیت حمل (تن) - مسافت (کیلومتر)
3-7	-(400;180;170) [1322;1492;1285]	9-12	-(926;775;240;150)
4-8	-(807;728;200;230)	9-13	-(814;695;230;240)
4-9	-(817;743;200;200)	10-11	-(668;446;240;150)
4-10	-(1162;1056;250;170)	10-12	-(497;529;526;200;230;170)
5-8	-(250;220;190) [398;1173;1066]	10-13	-(1000;190;160) [1026;495;410]
5-9	-(1247;993;190;160)	11-15	-(2139;1976;0;170;220)
5-10	-(1291;1181;230;210)	12-13	-(612;568;491;230;250;160)
6-8	-(811;821;240;180)	12-14	-(190;190;190) [1168;1452;1304]
6-9	-(572;595;641;200;170;170)	12-15	-(1846;1774;0;160;180)
6-10	-(976;846;150;210)	13-14	-(697;938;840;400;150;160)
7-8	-(457;473;220;240)	13-15	-(1278;1288;0;160;150)
7-9	-(295;318;160;210)	14-15	-(946;1032;0;240;150)

در جدول 2 پارامترهای مربوط به ظرفیت حمل و نقل و مسافت نشان داده شده‌اند و -- به معنای آن است که بین دو گره ارتباطی وجود ندارد. جدول 3 شامل پارامترهای مربوط به هزینه و زمان تغییر حالت حمل و نقل می‌باشد.

جدول ۳. هزینه و زمان تغییر حالت حمل و نقل

روش حمل و نقل	حمل و نقل جاده ای	حمل و نقل ریلی	حمل و نقل آبی
---------------	-------------------	----------------	---------------

هزینه	زمان	هزینه	زمان	هزینه	زمان	(یوان/تن) - (ساعت/هزارتن)
0	0	8	30	9	50	حمل و نقل جاده ای
8	30	0	0	10	60	حمل و نقل ریلی
9	50	10	60	0	0	حمل و نقل آبی

جدول 4 نشان دهنده پارامترهای مربوط به هر یک از حالات حمل و نقل می باشد.

جدول 4- پارامترهای حالت حمل و نقل

شرح	واحد	حمل و نقل جاده ای	حمل و نقل ریلی	حمل و نقل آبی
هزینه حمل و نقل	یوان/(تن-کیلومتر)	0/526	0/392	0/09
سرعت متوسط	کیلومتر/ساعت	80	60	30
واحد انتشار کربن	کیلوگرم/(تن-کیلومتر)	0/0071	0/0042	0/0012

هزینه واحد انبارداری برای تحویل زود هنگام کالا 25 واحد/(تن-ساعت) و هزینه جریمه تاخیر واحد برای دیر رسیدن کالا 50 واحد/(تن-ساعت) در نظر گرفته می شود. حد پایین پنجره زمانی نرم 60 ساعت، حد بالا پنجره زمانی نرم 70 ساعت، حد بالا پنجره زمانی سخت 100 ساعت و مدت انقضا محصول 140 ساعت می باشد.

مدل برنامه ریزی آرمانی استوار

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m w_i d_i$$

s. t

$$TCR - d_1 = g_1$$

$$VR + d_2 = g_2$$

$$ER - d_3 = g_3$$

$$TDR - d_4 = g_4$$

$$d_1, d_2, d_3, d_4 \geq 0$$

and system constraint (19 – 27)

حل مثال با پارامترهای قطعی

برای حل این مثال ابتدا آرمان‌ها محاسبه شده است، بدین ترتیب که مساله بدون در نظر گرفتن سایر توابع، با بهینه سازی یک تابع هدف حل شده و مقدار تابع هدف بهینه به عنوان آن آرمان در نظر گرفته شده است. سپس با برنامه ریزی آرمانی مقدار انحراف از هر آرمان محاسبه شده است.

جدول ۵. مسیر بهینه برای یک هدف واحد

زمان	هدف	واحد	مقدار تابع	مسیر	حالت حمل و نقل	حمل و نقل (ساعت)
67/8	هزینه حمل و نقل	یوان	210,263	15-13-9-4-2-1	آبی-آبی-جاده‌ای-جاده‌ای-ریلی	
67/03	ارزش کالا	یوان	1,600,000	15-12-10-5-2-1	آبی-آبی-جاده‌ای-	

جاده‌ای-جاده‌ای

انتشار کربن	کیلوگرم	1,723	15-13-9-6-3-1	آبی-آبی-آبی - جاده‌ای-جاده‌ای	99/7
انحراف زمان تحويل	ساعت	0	15-13-10-4-2-1	آبی-آبی-جاده‌ای- جاده‌ای-ریلی	68/2

G_i ها مقدار آرمان i ام و b_i ها میزان انحراف از آرمان‌ها می‌باشند. G_1 مقدار آرمان TC تابع هزینه‌های حمل‌ونقل، G_2 مقدار آرمان V تابع ارزش کالا، G_3 مقدار آرمان E تابع انتشار کربن و G_4 مقدار آرمان TD تابع انحراف از زمان تحويل کالا است. خروجی حل این مساله مسیر و حالت حمل و نقل و مقدار توابع تعریف شده است. با مفروضات و محدودیت‌های تعریف شده و پارامترهای شرح داده شده، نتایج حل با نرم افزار GAMS، مطابق جداول ذیل است.

جدول 6. میزان تحقق هر آرمان

تابع هدف	مقدار بهینه تابع هدف	مقدار آرمان	مقدار انحراف	میزان تحقق آرمان
هزینه حمل‌ونقل	210,263	210,263	0	%100
ارزش کالا	1,600,000	1,600,000	0	%100
انتشار کربن	2,577	1,723	854	%67
انحراف زمان تحويل	0	0	0	%100

حل مثال با پارامترهای غیرقطعی

$\widehat{Ct}_{ij}^k, \widehat{Tr}_i^{kl}, \widehat{Ct}_i^{kl}, \widehat{Tt}_{ij}^k$ حداکثر انحراف از هر پارامتر قطعی متناظر 10% مقدار آن در نظر گرفته می‌شود. در این مثال در مجموع 12 پارامتر غیر قطعی وجود دارد که در توابع هدف و محدودیت‌ها تاثیر می‌گذارد. بنابراین پارامترهای I_0 و I_1 ، در بازه [1 و 12] قرار می‌گیرد. جواب بهینه حاصل از حل مدل استوار برتسیمس و سیم برای مقادیر مختلف Γ به صورت

جدول 7 است. با توجه به اینکه مسئله 12 بار حل شده است و تعداد متغیرها زیاد است، از مقادیر سایر متغیرها صرف نظر می شود.

آماده انتشار

جدول 7- مقادیر آرمان‌ها در حالت‌های مختلف سطح حفاظت

زمان حمل	حالت حمل	مسیر	TD	EE	V	TC	سطح حفاظت
6/8 7	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	0	2,57 7	1,600,00 0	210,263	$\Gamma=0$
7/0 0	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	0	3,18 2	1,600,00 0	237,229	$\Gamma=1$
7/0 0	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	0	3,18 2	1,600,00 0	259,119	$\Gamma=2$
7/4 3	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	3	3,18 2	1,522,60 6	287,683	$\Gamma=3$
7/9 6	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	7	3,18 2	1,443,29 1	315,046	$\Gamma=4$
8/3 0	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	10	3,18 2	1,365,12 0	340,089	$\Gamma=5$
8/4 3	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	13	3,18 2	1,294,72 0	364,733	$\Gamma=6$
8/9 5	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	1 6	3,18 2	1,237,57 7	384,735	$\Gamma=7$
8/3 8	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	1 8	3,18 2	1,180,66 3	404,658	$\Gamma=8$

زمان حمل	حالت حمل	مسیر	TD	EE	V	TC	سطح حفاظت
9/8 0	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	2 1	3,18 2	1,125,34 9	424,420	$\Gamma=9$
9/1 3	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- ریلی	1-2-4-9- 13-15	2 3	3,18 2	1,072,32 0	443,782	$\Gamma=10$
9/5 6	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- جاده‌ای	1-2-4-9- 11-15	2 6	3,58 9	1,047,74 9	479,400	$\Gamma=11$
9/1 8	دریایی-دریایی- جاده‌ای-جاده‌ای- جاده‌ای	1-2-4-9- 11-15	2 9	3,58 9	996,549	497,162	$\Gamma=12$

جدول 8 نشان دهنده مقادیر انحراف از آرمان‌ها در حالت‌های مختلف سطح حفاظت است.

جدول 8- مقادیر انحراف از آرمان‌ها در حالت‌های مختلف سطح حفاظت

سطح حفاظت	b1	b2	b3	b4
$\Gamma=0$	0	0	854	0
$\Gamma=1$	9,234	0	1,169	0
$\Gamma=2$	0	0	1,169	0
$\Gamma=3$	0	0	1,142	0
$\Gamma=4$	0	0	1,142	0
$\Gamma=5$	0	0	1,142	0
$\Gamma=6$	0	0	1,142	0
$\Gamma=7$	0	0	1,142	0
$\Gamma=8$	0	0	847	0
$\Gamma=9$	0	0	604	0

سطح حفاظت	$b1$	$b2$	$b3$	$b4$
$\Gamma=10$	0	0	604	0
$\Gamma=11$	0	26,629	0	1
$\Gamma=12$	0	26400	0	1/2

مقادیر توابع هدف در حالت‌های مختلف سطح حفاظت (مقدار Γ) در جدول 9 نشان داده شده است.

جدول 9- مقادیر توابع هدف در حالت‌های مختلف سطح حفاظت

سطح حفاظت	TC	V	EE	TD
$\Gamma=0$	210,263	1,600,000	1,723	0
$\Gamma=1$	227,995	1,600,000	2,013	0
$\Gamma=2$	259,119	1,600,000	2,013	0
$\Gamma=3$	287,683	1,522,606	2,040	3/4
$\Gamma=4$	315,046	1,443,291	2,040	6/9
$\Gamma=5$	340,089	1,365,120	2,040	10/3
$\Gamma=6$	364,733	1,294,720	2,040	13/4
$\Gamma=7$	384,735	1,237,577	2,040	15/9
$\Gamma=8$	404,658	1,180,663	2,335	18/3
$\Gamma=9$	424,420	1,125,349	2,577	20/8
$\Gamma=10$	443,782	1,072,320	2,577	23/1
$\Gamma=11$	479,400	1,021,120	3,589	25/3
$\Gamma=12$	497,162	970,149	3,589	27/6

همانطور که در جدول 9 ملاحظه می‌شود، با افزایش سطح حفاظت مقادیر توابع هدف بدتر می‌شود. هزینه‌های حمل و نقل، انتشار کربن و انحراف از زمان تحویل افزایش و ارزش

کالا کاهش می‌یابد. این موضوع به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند که چنانچه بخواهند عدم قطعیت بیشتری را برای مدل در نظر بگیرند، پاسخ‌های محافظه‌کارانه تری دریافت خواهد نمود.

نتایج مدل قطعی نشان داد که مدل قادر است مسیر بهینه را با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف مانند هزینه حمل‌ونقل، ارزش کالا، انتشار کربن و زمان تحویل، تعیین کند. حل مدل با پارامترهای غیرقطعی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که با افزایش سطح حفاظت (Γ)، هزینه‌های حمل‌ونقل افزایش یافته و ارزش کالا کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در مدل‌های تصمیم‌گیری است، چرا که عدم قطعیت‌ها می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج نهایی داشته باشند. با این حال، مدل ارائه شده توانست در شرایط عدم قطعیت نیز عملکرد مناسبی از خود نشان دهد و مسیرهای بهینه را با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف تعیین کند.

اعتبارسنجی مدل

اعتبار مدل به معنی سنجش تطابق مدل با دنیای واقعی است و شامل ارزیابی توانایی مدل در بازنمایی دقیق پدیده‌های واقعی می‌شود. اعتبارسنجی معمولاً با استفاده از داده‌های واقعی، مقایسه نتایج با عملکرد واقعی یا تحلیل مفهومی مدل انجام می‌شود. در مقابل، تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis) یک ابزار برای بررسی پایداری مدل نسبت به تغییر در پارامترهای کلیدی است. این تحلیل، سطح انعطاف‌پذیری و مقاومت مدل در برابر نوسانات داده‌ها را نشان می‌دهد، اما به تنهایی برای اعتبار مدل کافی نیست.

اعتبار مدل در این مقاله با روش‌های زیر بررسی شده است:

- استفاده از داده‌های واقعی و سناریوهای عددی برای ارزیابی عملکرد مدل
- بررسی انسجام ساختاری مدل و تطابق خروجی‌های آن با محدودیت‌های تعریف شده

• تحلیل حساسیت برای ارزیابی پایداری مدل در برابر تغییرات پارامترهای ورودی

برای بررسی اعتبار مدل، از داده‌های واقعی و سناریوهای عددی استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از (Zhang et al., 2021) استخراج شده‌اند که به عنوان یک مرجع معتبر در حوزه حمل و نقل چندوجهی می‌باشد. نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است مسیرهای بهینه را با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و اهداف چندگانه (مانند کاهش هزینه‌ها، کاهش انتشار کربن و حفظ ارزش کالا) ارائه دهد. حل مدل و مشخص شدن مقادیر متغیرهای تصمیم نشان‌دهنده انسجام ساختاری و امکان‌پذیری مدل است. یکی از معیارهای اصلی اعتبارسنجی در مدل‌سازی ریاضی، توانایی مدل در ارائه یک راه‌حل موجه و بهینه است. علاوه بر این، نتایج مدل با منطق مسئله و محدودیت‌های تعریف شده سازگار می‌باشد. همچنین مدل پیشنهادی با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی حل شده است که یکی از روش‌های معتبر برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است. این روش به طور گسترده در مطالعات مرتبط با بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته و اعتبار آن تأیید شده است. همچنین تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی نشان می‌دهد که مدل در برابر تغییرات پارامترهای ورودی رفتار پایداری دارد و خروجی‌های آن منطقی و قابل اعتماد هستند. بنابراین، حل موفق مدل، سازگاری نتایج با چارچوب مسئله و همچنین پایداری آن تحت تغییرات پارامترها، نشان‌دهنده کفایت و اعتبار مدل ارائه شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در مرور ادبیات، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه حمل و نقل چندوجهی و بهینه‌سازی مسیر بررسی شده است. بسیاری از مطالعات پیشین بر روی مدل‌های قطعی متمرکز بودند که در آنها پارامترها به صورت دقیق و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌سازی شده‌اند. برخی

از تحقیقات نیز از روش‌های فازی یا تصادفی برای مدیریت عدم قطعیت استفاده کرده‌اند. روش‌های حل، متمرکز بر رویکردهای حل قطعی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری بوده است. مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که هزینه‌های مرتبط با حمل‌ونقل کالا، علاوه بر هزینه حمل‌ونقل واحد کالا و هزینه تغییر حالت حمل‌ونقل شامل هزینه انبارداری برای تحویل زود هنگام کالا و هزینه جریمه تاخیر برای دیر رسیدن کالا می‌شود.

مدل ریاضی ارائه شده با پارامترهای قطعی و عدم قطعیت با رویکرد بهینه‌سازی استوار از طریق یک مثال عددی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با ترکیب روش‌های مختلف حمل‌ونقل و بهینه‌سازی مسیرها، هزینه‌های کل کاهش خواهد یافت. این کاهش به دلیل کاهش زمان‌های اضافی و استفاده بهینه از ظرفیت‌ها حاصل شده است. همچنین با به کارگیری پنجره زمانی و کاهش زمان تخطی از زمان تحویل، رضایت مشتریان نسبت به مدل‌های سنتی بهبود خواهد یافت. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش سطح حفاظت (Γ)، هزینه‌های حمل‌ونقل افزایش یافته و ارزش کالا کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش نشان می‌دهد که مدل بهینه‌سازی استوار قادر است مسیرهایی را پیشنهاد دهد که در شرایط عدم قطعیت نیز پایداری و کارایی بالایی داشته باشند. در نظر گرفتن عامل فسادپذیری کالاها به‌طور مؤثری در مدل در نظر گرفته شده است که باعث کاهش ضایعات می‌شود. همچنین مدل پیشنهادی موجب بهبود عملکرد سیستم حمل‌ونقل در شرایط عدم قطعیت، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری و ارائه راهکاری قابل اجرا برای صنایع مختلف می‌شود.

با توجه به پیشرفت‌های فناوری در حوزه حمل‌ونقل، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از تأثیر فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی (AI) برای نظارت بر وضعیت وسایل نقلیه، شرایط محیطی و بهبود کارایی و امنیت شبکه‌های حمل‌ونقل چندوجهی استفاده کرد. همچنین استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی زمان سفر، شناسایی الگوهای ترافیکی و بهینه‌سازی مسیرها پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، در نظر گرفتن اختلال به عنوان مثال بحران انرژی و جنگ در مسئله مسیریابی حمل و نقل می‌تواند برنامه‌ریزی مراکز لجستیک‌ها برای حمل و نقل محموله را بهبود بخشد.

1) تعارض منافع

نویسندگان تعارض منافع ندارند.

ORCID

Maryam Tajik		https://orcid.org/0009-0008-1614-7396
Khavesh		
Maryam Daneshvar		https://orcid.org/0000-0001-5119-8158
Seyed Hosein		https://orcid.org/0000-0003-2084-7244
Razavi Haji Agha		

منابع

1. ارشادی، محمد مهدی، مومنی شریف آباد، مهسا، ارشادی، محمد جواد، عزیزی، امیر، و بهزادی پور، سمانه. (1402). مدل سازی چند هدفه مسیریابی سبز با استفاده از الگوریتم ترکیبی یادگیری ماشین حداکثری و برنامه ریزی ژنتیک. مدیریت زنجیره تأمین، (81) 25، 17-41. [20.1001.1.20089198.1402.25.81.2.0](https://doi.org/10.22089/198.1402.25.81.2.0)
2. افندی زاده، شهریار، گلشن خواص، رضا، نیکزاد، محمد حسن و بیگدلی، حمید. (1403). ساخت مدل بهینه سازی حمل و نقل ترکیبی در زنجیره تامین کالا. پژوهشنامه حمل و نقل، (آماده انتشار). https://www.trijournal.ir/article_209483.html
3. برادران، وحید و آذری خواه، ارمغان. (1399). ارائه مدل چند هدفه مسیریابی در شبکه سیستم های حمل و نقل عمومی چندوجهی درون شهری. مطالعات مدیریت صنعتی، (57) 18، 345-375. <https://doi.org/10.22054/jims.2018.25088.1864.375-345>
4. حبیب زاده بیژنی، سحر و صاحبی، هادی. (1403). طراحی شبکه حمل و نقل پسماندهای صنعتی خطرناک با در نظر گرفتن ریسک وابسته به زمان. پژوهشنامه حمل و نقل، 21(4)، 379-392. <https://doi.org/10.22034/tri.2021.246098.2807>
5. حسن پور، حسینعلی؛ فتاحی، حسن و خلیلی، حسین. (1402). حمل و نقل چندوجهی: رویکردها، فرآیند شکل گیری، مزایا، معایب و محدودیت های پیاده سازی. مدیریت زنجیره تأمین، 25(81)، 117-132. <https://civilica.com/doc/1942311/>
6. ربانی، یوسف و سپهری، محمد مهدی و ذگردی، سید حسام الدین، 1387، مساله مسیریابی وسیله نقلیه متصل به حمل و نقل چندوجهی رویکرد یکپارچه. پژوهشنامه حمل و نقل، 5(4)، 307-318. <https://sid.ir/paper/83674/fa>
7. رحیمی، امیرمسعود، یادگاری، بهناز و ابوطالبی اصفهانی، محسن. (1403). توسعه الگوریتم ترکیبی ازدحام گربه ها با عملگرهای ژنتیکی برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با محدودیت پنجره زمانی. مجله مهندسی عمران شریف، 40(4)، 95-85. <https://doi.org/10.24200/j30.2024.63335.3268>
8. عباسی عقدا، علی، موحدی، محمد مهدی، و شایان نیا، سیداحمد. (1401). طراحی شبکه زنجیره تامین با رویکرد مسیریابی وسیله نقلیه و پنجره زمانی و استفاده از الگوریتم

- جستجوی نیروی گرانثی. اندیشه آمد، 21(81)، 21-44.
- <https://sid.ir/paper/1036866/en>
9. علی نژاد، حامد، یعقوبی، سعید و حسینی مطلق، سید مهدی. (1401). ارائه یک رویکرد فازی برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با گذاشت و برداشت همزمان و پنجره‌های زمانی با استفاده از الگوریتم PSO بهبود یافته (مطالعه موردی شرکت فراورده‌های لبنی رامک). *مطالعات مدیریت صنعتی*، 64(20)، 215-250.
- <https://doi.org/10.22054/jims.2020.22463.1778>
10. علی نژاد، علیرضا، کاظمی، ابوالفضل و کریمی، مرضیه. (1399). ارائه یک مدل چند هدفه برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی با - در نظر گرفتن حداقل ریسک و حداکثر پوشش تقاضا. *مطالعات مدیریت صنعتی*، 58(18)، 105-138.
- <https://doi.org/10.22054/jims.2020.36793.2184>
11. معماریانی، عزیزا... (1378). روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی فازی. *فصلنامه دانش مدیریت*، 46(12)، 23-34.
- https://jmk.ut.ac.ir/article_13462_88566f0e31a92fb7d60325aa71bdf11.pdf?lang=en
12. نعمت‌نیا، رسول، خادمی، مریم، فتحی، کیامرث و سردار، سهیلا. (1404). مسیریابی مناسب وسایط نقلیه همراه با مکان‌یابی هاب و پنجره زمانی به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری (مورد مطالعه: شرکت دخانیات). *پژوهشنامه حمل و نقل*، 2(22)، 501-518.
- <https://doi.org/10.22034/tri.2024.447410.3234>

Reference

1. De Oliveira, F., Volpi, N. M. P., & Sanquetta, C. R. (2003). Goal programming in a planning problem. *Applied mathematics and computation*, 140(1), 165-178. [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(02)00220-5)
2. Elbert, R., Müller, J. P., & Rentschler, J. (2020). Tactical network planning and design in multimodal transportation—A systematic literature review. *Research in Transportation Business & Management*, 35, 100462. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100462>
3. Fazayeli, S., Eydi, A., & Kamalabadi, I. N. (2018). Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm.

- Computers & Industrial Engineering*, 119, 233–246.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.041>
4. Ge, Y., Sun, Y., & Zhang, C. (2024). Modeling a Multimodal Routing Problem with Flexible Time Window in a Multi-Uncertainty Environment. *Systems*, 12(6), 212.
<https://doi.org/10.3390/systems12060212> .
 5. Guo, F., Xu, Y., Huang, Z., & Wu, Y. (2024). Collaborative optimization of routing and storage strategy of multi-period multimodal transport in an uncertain environment. *Computers & Operations Research*, 167, 106676.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106676>
 6. Koohathongsumrit, N., & Chankham, W. (2022). A hybrid approach of fuzzy risk assessment-based incenter of centroid and MCDM methods for multimodal transportation route selection. *Cogent Engineering*, 9(1), 2091672.
<https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2091672>
 7. Koohathongsumrit, N., & Chankham, W. (2023). Route selection in multimodal supply chains: A fuzzy risk assessment model-BWM-MARCOS framework. *Applied Soft Computing*, 137, 110167.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110167>
 8. Koohathongsumrit, N., & Meethom, W. (2021). An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. *Expert Systems with Applications*, 171, 114342.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114342>
 9. Li, L., Zhang, Q., Zhang, T., Zou, Y., & Zhao, X. (2023). Optimum Route and Transport Mode Selection of Multimodal Transport with Time Window under Uncertain Conditions. *Mathematics*, 11(14), 3244. <https://doi.org/10.3390/math11143244>
 10. Lu, W., Choi, S.-B., & Yeo, G.-T. (2022). Resilient route selection of oversized cargo transport: the case of South Korea–Kazakhstan. *The International Journal of Logistics Management*, 33(2), 410–430.
<https://doi.org/10.1108/IJLM-11-2020-0445>
 11. Lu, Y., Chen, F., & Zhang, P. (2022). Multi objective Optimization of Multimodal Transportation Route Problem Under Uncertainty. *Engineering Letters*, 30. (4).
 12. Pang, Y., Pan, S., & Ballot, E. (2023). Robust optimization for perishable product distribution under uncertainty of multimodal transportation services. *IFAC-Papers Online*, 56(2), 7620–7625.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1159>
 13. Peng, Y., Gao, S. H., Yu, D., Xiao, Y. P., & Luo, Y. J. (2023). Multi-objective optimization for multimodal transportation routing problem

- with stochastic transportation time based on data-driven approaches. *RAIRO-Operations Research*, 57(4), 1745–1765. <https://doi.org/10.1051/ro/2023090>
14. Peng, Y., Yong, P., & Luo, Y. (2021). The route problem of multimodal transportation with timetable under uncertainty: multi-objective robust optimization model and heuristic approach. *RAIRO - Operations Research*, 55, S3035–S3050. <https://doi.org/10.1051/ro/2020110>
 15. Romero, C. (2004). A general structure of achievement function for a goal programming model. *European Journal of Operational Research*, 153(3), 675–686. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00793-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00793-2)
 16. SteadieSeifi, M., Dellaert, N., & Van Woensel, T. (2021). Multi-modal transport of perishable products with demand uncertainty and empty repositioning: A scenario-based rolling horizon framework. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 10, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2021.100044>
 17. Sun, Y. (2020). A fuzzy multi-objective routing model for managing hazardous materials door-to-door transportation in the road-rail multimodal network with uncertain demand and improved service level. *IEEE Access*, 8, 172808–172828. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025315>
 18. Udomwannakhet, J., Vajarodaya, P., Manicho, S., Kaewfak, K., Ruiz, J. B., & Ammarapala, V. (2018). A review of multimodal transportation optimization model. *5th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)*, <https://doi.org/10.1109/ICBIR.2018.8391217>
 19. Zhang, H., Huang, Q., Ma, L., & Zhang, Z. (2024). Sparrow search algorithm with adaptive t distribution for multi-objective low-carbon multimodal transportation planning problem with fuzzy demand and fuzzy time. *Expert Systems with Applications*, 238, 122042. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122042>
 20. Zhang, X., Jin, F.-Y., Yuan, X.-M., & Zhang, H.-Y. (2021). Low-carbon multimodal transportation path optimization under dual uncertainty of demand and time. *Sustainability*, 13(15), 8180. <https://doi.org/10.3390/su13158180>
 21. Zhu, C., & Zhu, X. (2022). Multi-objective path-decision model of multimodal transport considering uncertain conditions and carbon emission policies. *Symmetry*, 14(2), 221. <https://doi.org/10.3390/sym14020221>
 22. Zhu, W., Wang, H., & Zhang, X. (2021). Synergy evaluation model of container multimodal transport based on BP neural network.

Reference [In Persian]

1. Abbasi Aghda, A., Movahedi, M.M., & Shayannia, S.A. (2022). Designing supply chain network using vehicle's routing approach and timeline and search of gravity force algorithm. *Andisheh Amad*, 21(81), 21-44. [In Persian] <https://sid.ir/paper/1036866/en>
2. Afandizadeh, S., Golshan Khawas, R., Nikzad, M., & Bigdeli Rad, H. (2024). A combined transportation optimization model in commodity supply chain. *Journal of Transportation Research*, -. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/tri.2024.478664.3276>
3. Ainezhad, a., Kazemi, A., & Karimi, M. (2020). A Multi-Objective Model for Location-Routing Problem Considering Minimal Risk and Maximal Demand Covering. *Industrial Management Studies*, 18(58), 105–138. [In Persian] <https://doi.org/10.22054/jims.2020.36793.2184>
4. Alinezhad, S., & Hosseini-Motalgh, S.-M. (2022). A Fuzzy Approach for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery and Time Windows using Improved PSO (Case Study). *Industrial Management Studies*, 20(64), 215–250. [In Persian] <https://doi.org/10.22054/jims.2020.22463.1778>
5. Baradaran, V., & Azarikhah, A. (2020). A Mathematical Multi-Objective Model for Routing in the Multi-Modal Public Transportation Network. *Industrial Management Studies*, 18(57), 345–375. [In Persian] <https://doi.org/10.22054/jims.2018.25088.1864>
6. Ershadi, M.M, Momeni Sharifabad, M., Ershadi, M.J., Azizi, A.& Behzadipour, S. (2024). Multi-Objective Modeling of Green Vehicle Routing Problem Using a Hybrid Extreme Learning Machine (ELM) and Genetic Programming (GP). *supply chain management*, 25(81),17-41. [In Persian] [20.1001.1.20089198.1402.25.81.2.0](https://doi.org/10.22001.1.20089198.1402.25.81.2.0)
7. Habibzadeh Bijani, S., & Sahebi, H. (2024). Dangerous Industrial Waste Transportation Network Design Considering Time-Dependent Risk. *Journal of Transportation Research*, 21(4), 379–392. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/tri.2021.246098.2807>
8. Hassanpour, H.A., Fatahi, H.& Khalili, H. (2024). Multimodal Transportation: Approaches, Formation Process, Benefits, Defects and Constraints of Implementation. *Supply Chain Management*, 25(81), 117-132. [In Persian] <https://civilica.com/doc/1942311/>

9. Memariyani, A. (1999). Fuzzy goal programming methods. *Journal of management knowledge*, 46, 23–34. [In Persian].
https://jmk.ut.ac.ir/article_13462_88566f0e31a92fb7d60325aa71bdf11.pdf?lang=en
10. Nematniya, R., Khademi, M., Fathi, K., & Sardar, S. (2025). Proper Routing of Vehicles Along with Hub Location and Time Window with the Help of Innovative Algorithms (Case Study: Tobacco Company). *Journal of Transportation Research*, 22(2), 501–518. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/tri.2024.447410.3234>
11. Rabani, Y., Sepehri, M.M., & Zegordi, S.H.A.D. (2009). Vrp Contiguous to Multimodal Transportation Problem: An Integrated Approach. *Journal Of Transportation Research*, 5(4 (17)), 307-318. [In Persian]. <https://sid.ir/paper/83674/fa>
12. Rahimi, A. M., Yadegari, B., & Aboutalebi Esfahani, M. (2025). Innovative Hybrid Algorithm for Solving Vehicle Routing Problem with Time Window. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 40(4), 85–95. [In Persian] <https://doi.org/10.24200/j30.2024.63335.3268>