Journal of Industrial Innovations
https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

Risk-Averse and Low-Carbon Optimization of Prefabricated Steel Component Supply Chain with Selective 4PL Collaboration

Behnam Karimi [a], **Mohammad Mohammadpour Omran** [b*], **Hadi Sahebi** [c]

[a] Department of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran. karimi_be@ind.iust.ac.ir
[b] Department of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran. omran@iust.ac.ir
[c] Department of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran. hadi_sahebi@iust.ac.ir

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Karimi B, Mohammadpour Omran M, Sahebi H. Risk-Averse and Low-Carbon Optimization of Prefabricated Steel Component Supply Chain with Selective 4PL Collaboration. Journal of Industrial Innovations. 2026; 4(3):120-143.

https://doi.org/10.22034/jii.2026.737502

KEYWORDS

Construction supply chain;
Prefabricated steel components;
Fourth-party logistics;
CVaR;
Carbon emissions.

ABSTRACT

Prefabricated steel construction projects require an integrated supply chain because off-site fabrication, component transportation, temporary storage, installation sequencing, and site constraints are tightly interdependent. Delays in critical components such as columns, main beams, and connection plates may interrupt installation activities, increase project costs, and generate cascading delays. This study develops a scenario-based mixed-integer linear programming model for risk-averse and low-carbon optimization of the prefabricated steel component supply chain with selective fourth-party logistics (4PL) collaboration. The model simultaneously determines supplier selection, hub activation, direct or hub-based transportation routes, fleet allocation, shipment quantities, hub inventory levels, and installation scheduling decisions. Uncertainty in transportation costs, delivery times, fleet capacity, and route risks is represented through operational scenarios, while severe losses under adverse scenarios are controlled by conditional value-at-risk. A normalized weighted objective combines cost, installation delay, logistics risk, and tail risk, and a hard carbon-emission constraint ensures environmental feasibility. The Tehran case study uses a transparent combination of project-based data, expert-calibrated parameters, and scenario assumptions. Results show that selective 4PL collaboration outperforms both direct transportation and full 4PL collaboration by reducing expected cost, installation delay, logistics risk, and CVaR while satisfying the emission limit. The main managerial insight is that 4PL should be applied to critical, high-risk, and sequence-sensitive components rather than uniformly to all items.

Extended Abstract

1. Introduction

Prefabricated steel construction improves productivity, quality, and delivery speed by fabricating components including columns, beams, braces, plates, and connections off-site and installing them sequentially. Although prefabrication reduces on-site operations, it creates an interdependent supply chain requiring coordination among production, transportation, storage, delivery, and installation. In prefabricated steel projects, the late arrival of a critical component can interrupt installation and delay subsequent activities. Therefore, supply chain decisions should be integrated with installation planning rather than treated only as supplier selection or transportation decisions.

Fourth-party logistics can support this coordination by integrating suppliers, carriers, hubs, information flows, and delivery plans. However, using fourth-party logistics for all components is not necessarily economical or environmentally efficient. Critical, heavy, bulky, or time-sensitive components may benefit from consolidation, temporary storage, and coordinated

* Corresponding author.
E-mail address: omran@iust.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22034/jii.2026.737502
Received: May 19, 2026; Received in revised form: July 9, 2026; Accepted: July 13, 2026.
Article type: Research Paper

delivery, while less critical components may be transported directly from factories to the site. This motivates selective fourth-party logistics collaboration, where the model determines when direct delivery is preferable and when a logistics hub should be used. Prefabricated steel supply chains also face uncertainty in transportation costs, delivery times, fleet capacity, congestion, and route risks. Accordingly, this study develops a risk-averse and low-carbon mixed-integer linear programming model for optimizing the supply chain and installation of prefabricated steel components with selective fourth-party logistics collaboration under uncertainty.

The contribution of this study is to connect four decisions usually modeled separately: integrated supply and installation planning, selective 4PL routing, scenario-based risk control through CVaR, and carbon-constrained logistics. This structure clarifies when hub-based coordination is beneficial and when direct delivery remains preferable.

2. Methodology

The proposed model is formulated as a scenario-based mixed-integer linear programming model. The network includes component factories, fourth-party logistics hubs, installation zones, vehicle types, planning periods, installation activities, and uncertainty scenarios. Components can be delivered through two routes: direct transportation from factories to installation zones, or transportation through a fourth-party logistics hub followed by delivery to the project site. The model decides the appropriate route for each component, zone, and period.

The main decision variables include factory selection, hub activation, route selection, shipment quantities, hub inventory levels, activity start times, installation delays, and auxiliary variables for conditional value-at-risk. The model integrates strategic decisions, such as factory selection and hub activation, with operational decisions, such as shipment quantities, inventory, and installation timing. The objective structure includes expected supply chain cost, expected installation delay, expected logistics risk, and conditional value-at-risk of total scenario loss. Cost includes production, transportation, hub activation, logistics service, and inventory holding costs. Delay is calculated from deviations between actual and planned activity start times, weighted by activity importance. Logistics risk reflects route-related risk.

To combine objectives with different units, a normalized weighted-sum method is used. Risk aversion is incorporated by defining scenario loss as a combination of cost, delay, and logistics risk, and conditional value-at-risk is embedded using linear auxiliary variables. Carbon emissions are calculated based on transported quantity, route distance, and vehicle-specific emission factors. A hard carbon emission constraint is imposed to ensure environmental feasibility. The model also includes constraints for factory capacity, hub capacity, fleet capacity, inventory balance, route selection, hub activation, demand satisfaction, component availability, precedence, delay calculation, emission limitation, and variable domains.

3. Results

The model is evaluated using a case study based on a steel construction project in Tehran. The case includes three potential factories, two fourth-party logistics hubs, three installation zones, two vehicle types, five component groups, ten weekly planning periods, and four uncertainty scenarios. The component groups include columns, main beams, secondary beams, braces, and connection plates. The scenarios represent normal conditions, moderate traffic and cost increase, fleet capacity shortage, and severe route disruption.

Three logistics strategies are compared. The first is direct transportation without fourth-party logistics, in which all components are shipped directly from factories to installation zones. The second is full fourth-party logistics collaboration, in which all components pass through hubs. The third is selective collaboration, in which the model decides whether each component should be transported directly or through a hub. The results show that selective collaboration provides the best overall performance. Compared with direct transportation, it reduces expected supply chain cost from 47,850 to 43,210 million IRR and expected installation delay from 8.6 to 3.7 working days. The normalized logistics risk decreases from 100 to 69.1, and conditional value-at-risk decreases from 68,400 to 51,000 million IRR.

The results also show that full fourth-party logistics collaboration is not always best. Although it improves delivery reliability and reduces delay compared with direct transportation, forcing all components to pass through hubs may increase two-stage transportation and carbon emissions. Selective collaboration keeps emissions at 7.78 tons of carbon dioxide equivalent, below the predefined limit. The optimal solution assigns 64.4% of components to hub-based routes and 35.6% to direct delivery. Critical components such as columns and connection plates have the highest hub-based share because their delay can disrupt the installation sequence. In contrast, secondary beams are more often delivered directly due to lower criticality and greater delivery flexibility. Sensitivity analysis shows that increasing the weight of conditional value-at-risk increases hub use, lowers tail risk, and reduces delay. Tightening the carbon limit shifts decisions toward shorter or more emission-efficient routes.

4. Conclusion

This study proposed a risk-averse and low-carbon optimization model for supply chain and installation planning of prefabricated steel components with selective fourth-party logistics collaboration. The model integrates factory selection, hub activation, transportation routing, fleet allocation, shipment planning, inventory control, installation scheduling, delay management, logistics risk, and carbon emission control in a unified framework. By incorporating conditional value-at-risk, the model controls severe losses under adverse scenarios. By imposing a carbon constraint, it ensures environmental feasibility.

The findings demonstrate that selective collaboration outperforms both direct transportation and full hub-based collaboration. Direct transportation is simple but vulnerable to disruptions, while full collaboration may increase cost and emissions when all components are forced through hubs. Selective collaboration provides a balanced solution by assigning critical and high-risk components to hub-based routes and allowing less critical components to be delivered directly. The proposed approach can help project managers, steel contractors, component manufacturers, carriers, and fourth-party logistics providers design resilient, cost-efficient, and environmentally responsible logistics plans for urban prefabricated steel projects.

Future research may incorporate crane capacity, crew scheduling, real-time tracking, building information modeling, and dynamic re-optimization.

نوآوری‌های صنعتی، دوره ۴، شماره ۳، سال ۱۴۰۵، صفحات ۱۲۰ تا ۱۴۳

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

بهینه‌سازی ریسک‌گریز و کم‌کربن زنجیره تأمین قطعات فولادی پیش‌ساخته با مشارکت انتخابی لجستیک طرف چهارم

بهنام کریمی[الف]، محمد محمدپور عمران[ب*] ، هادی صاحبی[ج]

[الف] گروه لجستیک و زنجیره تامین، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. karimi_be@ind.iust.ac.ir

[ب] گروه لجستیک و زنجیره تامین، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. omran@iust.ac.ir

[ج] گروه مهندسی سیستم های هوشمند، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. hadi_sahebi@iust.ac.ir

واژگان کلیدی

زنجیره تأمین ساخت‌وساز؛ سازه فولادی پیش‌ساخته؛ لجستیک طرف چهارم؛ معیارCVaR ؛ انتشار کربن.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

چکیده

پروژه‌های سازه فولادی پیش‌ساخته به دلیل پیوند مستقیم میان تولید کارخانه‌ای، حمل قطعات، دپوی موقت، توالی نصب و محدودیت‌های کارگاهی، نیازمند مدیریت یکپارچه زنجیره تأمین هستند. تأخیر در تحویل قطعات بحرانی مانند ستون‌ها، تیرهای اصلی و اتصالات می‌تواند موجب توقف عملیات نصب، افزایش هزینه و ایجاد تأخیر زنجیره‌ای در برنامه پروژه شود. این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، سناریومحور، ریسک‌گریز و کم‌کربن برای بهینه‌سازی هم‌زمان زنجیره تأمین و نصب قطعات فولادی پیش‌ساخته با مشارکت انتخابی لجستیک طرف چهارم ارائه می‌کند. مدل پیشنهادی تصمیماتی شامل انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب‌های 4PL، انتخاب مسیر مستقیم یا مسیر مبتنی بر 4PL، تخصیص ناوگان، مقدار حمل، موجودی هاب و زمان‌بندی نصب را به‌صورت یکپارچه تعیین می‌کند. عدم‌قطعیت در هزینه حمل، زمان تحویل، ظرفیت ناوگان و ریسک مسیرها از طریق سناریوهای عملیاتی لحاظ شده و برای کنترل زیان‌های شدید در سناریوهای بحرانی از معیار ارزش در معرض ریسک شرطی استفاده می‌شود. همچنین، تابع هدف نرمال‌شده و وزن‌دار برای ترکیب هزینه، تأخیر، ریسک لجستیکی و CVaR به کار گرفته شده و محدودیت انتشار کربن به‌عنوان الزام زیست‌محیطی سخت در مدل وارد می‌شود. مطالعه موردی با تفکیک داده‌های مبتنی بر پروژه، داده‌های کالیبره‌شده توسط خبرگان و مفروضات سناریویی انجام شد. نتایج نشان داد مشارکت انتخابی4PL نسبت به حمل مستقیم و مشارکت کامل 4PL، هزینه مورد انتظار، تأخیر نصب، ریسک لجستیکی و مقدار CVaR را کاهش داده و سقف انتشار کربن را رعایت می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد ارزش‌آفرینی 4PL زمانی بیشینه است که برای قطعات بحرانی، پرریسک و حساس به‌توالی نصب به‌صورت انتخابی و داده‌محور به کار گرفته شود.

۱- مقدمه

صنعت ساخت‌وساز در سال‌های اخیر با چالش‌هایی مانند افزایش هزینه‌های اجرایی، طولانی‌شدن زمان تحویل پروژه، ناپایداری جریان تأمین مصالح و قطعات، محدودیت‌های زیست‌محیطی و دشواری هماهنگی میان ذی‌نفعان مواجه بوده است. در پاسخ به این چالش‌ها، روش‌های صنعتی‌سازی و ساخت خارج از سایت، به‌ویژه ساخت‌وساز پیش‌ساخته و مدولار، به‌عنوان راهکاری

* نویسنده مسئول؛

آدرس پست الکترونیک: omran@iust.ac.ir

برای افزایش بهره‌وری، ارتقای کیفیت، کاهش فعالیت‌های کارگاهی و تسریع اجرا مورد توجه قرار گرفته‌اند. زوهوریان و همکاران [۱] در مرور جامع خود بر ظرفیت ساخت‌وساز مدولار برای بهبود کیفیت و کنترل فرآیند تأکید کرده‌اند. همچنین، نسارنوبری و همکاران [۲] با مرور نظام‌مند زنجیره تأمین ساخت خارج از سایت نشان داده‌اند که هماهنگی میان بازیگران، جریان اطلاعات و لجستیک از عوامل کلیدی موفقیت این رویکرد است. سایر مطالعات نیز چالش‌های زنجیره تأمین، موانع پایداری و نقش فناوری‌های هوشمند در لجستیک ساخت خارج از سایت را برجسته کرده‌اند [۳-۵].

زنجیره تأمین قطعات پیش‌ساخته فولادی در مقایسه با زنجیره تأمین مصالح متداول ساختمانی پیچیدگی بیشتری دارد. در پروژه‌های سازه فولادی، قطعاتی مانند ستون‌ها، تیرها، بادبندها، خرپاها و اتصالات در کارخانه تولید شده و باید مطابق با برنامه نصب، محدودیت حمل، ظرفیت دپو و توالی اجرایی به کارگاه منتقل شوند. ژانگ و همکاران [۶] بر ضرورت توسعه نظریه یکپارچگی زنجیره تأمین در ساخت خارج از سایت تأکید کرده‌اند. همچنین، مطالعات مرتبط با مدل‌سازی ساخت خارج از سایت، رفتارهای حاکمیتی در زنجیره تأمین، راهبردهای پیش‌ساختگی، مدیریت سه‌سطحی زنجیره تأمین، طراحی شبکه یکپارچه تولید و ساخت، و زمان‌بندی تحت عدم‌قطعیت نشان می‌دهند که هماهنگی تولید، حمل، ذخیره‌سازی و نصب برای کاهش تأخیر و افزایش کارایی پروژه ضروری است [۷-۱۲].

در پروژه‌های سازه فولادی پیش‌ساخته، مسئله اصلی صرفاً انتخاب تأمین‌کننده یا کمینه‌سازی هزینه حمل نیست، بلکه تصمیم‌گیری هم‌زمان درباره انتخاب کارخانه، مسیر انتقال، زمان تحویل، مراکز تجمیع، تخصیص ناوگان، ظرفیت دپو و کنترل تأخیر نصب مطرح است. عرب‌زاد و همکاران [۱۳] نشان داده‌اند که ترکیب تصمیمات مکان‌یابی، موجودی، انتخاب مد حمل و ارائه‌دهندگان لجستیکی بر عملکرد شبکه توزیع اثرگذار است. مطالعات دیگر نیز نقش قراردادهای لجستیکی، تأمین مالی، شبکه‌های هاب و اسپوک، توزیع چندمحصولی و لجستیک معکوس را در بهبود عملکرد زنجیره تأمین بررسی کرده‌اند [۱۴-۱۹]. در ادامه، غفاری‌نسب و همکاران [۲۰] مدل طراحی شبکه هاب و اسپوک را برای ارائه‌دهندگان 3PL توسعه دادند و هو و همکاران [۲۱] تصمیمات اندازه ناوگان، مکان و ظرفیت هاب را با درنظرگرفتن ازدحام جاده‌ای بررسی کردند. پژوهش‌های دیگر در حوزه 3PL نیز اهمیت معیارهای پایداری، تمرکززدایی، زنجیره تأمین سبز، کاهش انتشار، توزیع شهری، عدم‌قطعیت، یکپارچگی اطلاعات، مکان‌یابی ـ موجودی، اختلالات و یکپارچه‌سازی تصمیمات تولید و توزیع را نشان داده‌اند [۲۲-۳۱].

یکی از رویکردهای نوین برای افزایش هماهنگی در زنجیره‌های تأمین پیچیده، استفاده از لجستیک طرف چهارم است. برخلاف لجستیک طرف سوم که عمدتاً بر اجرای عملیات مشخصی مانند حمل، انبارداری یا توزیع متمرکز است، لجستیک طرف چهارم نقش یکپارچه‌ساز و هماهنگ‌کننده کل زنجیره تأمین را بر عهده دارد. لئو و همکاران [۳۲] مسئله تخصیص منابع و زمان‌بندی فعالیت‌ها را در لجستیک طرف چهارم بررسی کردند. هوانگ و همکاران [۳۳] طراحی شبکه زنجیره تأمین را از منظر 4PL و با درنظرگرفتن رفتار روان‌شناختی مشتری مطالعه کردند. همچنین، وانگ و همکاران [۳۴] طراحی شبکه 4PL را با هدف بیشینه‌سازی رضایت تأمین‌کنندگان و مشتریان بررسی کردند و یین و همکاران [۳۵] طراحی شبکه 4PL را با محدودیت زمان خدمت و تقاضای تصادفی توسعه دادند. پژوهش‌های جدیدتر نیز نشان داده‌اند که طراحی شبکه 4PL تحت عدم‌قطعیت، جهش تقاضا و برون‌سپاری موقت می‌تواند عملکرد زنجیره تأمین را در شرایط ناپایدار بهبود دهد [۳۶-۳۸]. در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، مدل‌های حلقه‌بسته نیز نشان داده‌اند که ترکیب تصمیمات مکان‌یابی، جریان مواد، ظرفیت و سیاست‌های عملیاتی می‌تواند مبنای مناسبی برای توسعه مدل‌های جامع‌تر زنجیره تأمین فراهم کند [۳۹].

با وجود ظرفیت‌های بالقوه لجستیک طرف چهارم، به‌کارگیری آن در پروژه‌های سازه فولادی پیش‌ساخته نباید به‌صورت یک تصمیم کلی در سطح کل پروژه در نظر گرفته شود. در برخی موارد، حمل مستقیم قطعات از کارخانه به سایت پروژه اقتصادی‌تر، سریع‌تر و حتی کم‌کربن‌تر است؛ درحالی‌که برای قطعات سنگین، حجیم، حساس یا دارای توالی نصب پیچیده، استفاده از هاب‌های لجستیک طرف چهارم می‌تواند ریسک تأخیر، ازدحام کارگاه و ناهماهنگی تحویل را کاهش دهد. از سوی دیگر، حمل قطعات فولادی پیش‌ساخته به دلیل وزن و ابعاد زیاد می‌تواند انتشار کربن قابل‌توجهی ایجاد کند و تصمیماتی مانند انتخاب مسیر، نوع ناوگان، استفاده از هاب و زمان‌بندی حمل، مستقیماً بر میزان انتشار اثرگذار هستند. افزون بر این، سناریوهای بحرانی مانند تأخیر

شدید حمل، کمبود ناوگان، افزایش ناگهانی هزینه یا آماده‌نشدن قطعه می‌توانند عملکرد تصمیمات میانگین‌محور را تضعیف کنند؛ ازاین‌رو، معیارهای ریسک‌گریز مانند CVaR برای کنترل زیان‌های شدید در مدل‌های سناریومحور ضروری هستند.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی به زنجیره تأمین ساخت‌وساز خارج از سایت، بهینه‌سازی لجستیک، هماهنگی تولید و نصب، طراحی شبکه‌های لجستیکی، تاب‌آوری و ریسک اختلال پرداخته‌اند، هنوز خلأ قابل‌توجهی در مدل‌سازی هم‌زمان زنجیره تأمین و نصب قطعات پیش‌ساخته فولادی با نقش هماهنگ‌کننده لجستیک طرف چهارم، تصمیم‌گیری انتخابی میان مسیر مستقیم و مسیر 4PL، محدودیت انتشار کربن و کنترل ریسک سناریوهای بحرانی وجود دارد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ریسک‌گریز و کم‌کربن برای زنجیره تأمین قطعات فولادی پیش‌ساخته با مشارکت انتخابی لجستیک طرف چهارم انجام می‌شود. مدل پیشنهادی تصمیماتی مانند انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب، تعیین مسیر حمل، تخصیص ناوگان، برنامه‌ریزی تحویل، کنترل موجودی، مدیریت تأخیر نصب و کنترل ریسک سناریوهای بحرانی را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد.

برای جمع‌بندی نظام‌مند پیشینه و روشن‌سازی جایگاه پژوهش حاضر، جدول ۱ مهم‌ترین جریان‌های مطالعاتی مرتبط را از منظر دامنه تصمیمات، توجه به ریسک، پایداری کربنی و نقش لجستیک طرف چهارم مقایسه می‌کند.

جدول ۱ خلاصه پیشینه و جایگاه پژوهش حاضر

جریان پژوهشی	جریان پژوهشی	تمرکز اصلی	محدودیت نسبت به مسئله حاضر	جایگاه پژوهش حاضر
زنجیره تأمین ساخت خارج از سایت	[۱-۱۲]	هماهنگی تولید، حمل و نصب در ساخت پیش‌ساخته	تمرکز محدود بر قطعات فولادی سنگین، مسیرهای انتخابی و کنترل ریسک دنباله‌ای	یکپارچه‌سازی تأمین و زمان‌بندی نصب قطعات فولادی پیش‌ساخته
طراحی شبکه و لجستیک طرف سوم	[۱۳-۳۱]	مکان‌یابی، موجودی، حمل، هاب و خدمات لجستیکی	نبود نقش هماهنگ‌کننده 4PL و تصمیم انتخابی میان حمل مستقیم و هاب	مدل‌سازی درون‌زای مسیر مستقیم یا مبتنی بر 4PL در سطح قطعه، زون و دوره
شبکه‌های لجستیک طرف چهارم	[۳۲-۳۸]	طراحی شبکه 4PL، تخصیص منابع و خدمت‌رسانی تحت عدم‌قطعیت	عدم اتصال مستقیم تصمیمات 4PL به برنامه نصب و تأخیر پروژه‌های فولادی	پیوند تصمیمات 4PL با توالی نصب، جریمه تأخیر و نیاز قطعات بحرانی
رویکردهای ریسک‌گریز	[۱۰, ۱۲, ۳۰, ۳۶-۳۸]	مدیریت عدم‌قطعیت و اختلال در شبکه‌های زنجیره تأمین	استفاده محدود از معیارهای دنباله‌ای برای سناریوهای بحرانی نصب	به‌کارگیری CVaR برای کنترل زیان‌های شدید ناشی از هزینه، تأخیر و ریسک مسیر
زنجیره تأمین سبز و کم‌کربن	[۲۲, ۲۴-۲۶]	کاهش انتشار، انتخاب مسیر و سیاست‌های سبز	بررسی محدود هم‌زمان کربن، تأخیر نصب و مشارکت انتخابی 4PL	اعمال محدودیت سخت انتشار کربن در کنار بهینه‌سازی هزینه، تأخیر، ریسک و CVaR

بنابراین، بر مبنای مقایسه پیشینه، نوآوری پژوهش در ارائه چارچوبی یکپارچه است که در آن تصمیمات راهبردی و عملیاتی زنجیره تأمین با زمان‌بندی نصب قطعات فولادی پیش‌ساخته به‌صورت هم‌زمان حل می‌شوند. برخلاف رویکردهایی که استفاده از خدمات لجستیکی را به‌صورت کلی و ثابت فرض می‌کنند، در مدل پیشنهادی انتخاب مسیر مستقیم یا مسیر مبتنی بر 4PL در سطح هر قطعه، زون نصب و دوره زمانی به‌صورت درون‌زا تعیین می‌شود. افزون بر این، ترکیب معیار CVaR با محدودیت سخت انتشار کربن موجب می‌شود مدل علاوه بر کاهش هزینه مورد انتظار، نسبت به سناریوهای بحرانی و الزامات زیست‌محیطی نیز حساس باشد. بنابراین، سهم اصلی پژوهش در اتصال تصمیمات انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب، تخصیص ناوگان، کنترل موجودی، برنامه نصب، ریسک دنباله‌ای و انتشار کربن در یک مدل MILP سناریو محور برای پروژه‌های سازه فولادی پیش‌ساخته است.

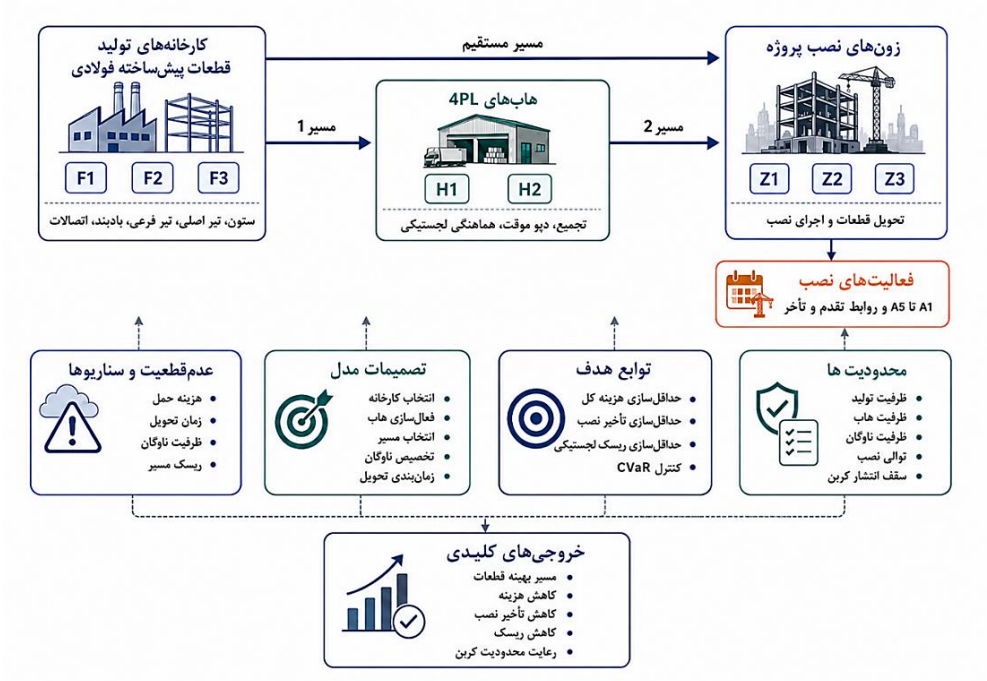
۲- روش‌شناسی پژوهش و توسعه مدل ریاضی

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی سناریومحور است. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین و نصب قطعات پیش‌ساخته فولادی با مشارکت لجستیک طرف چهارم ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی تصمیماتی مانند انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب‌های 4PL، تعیین مسیر حمل، تخصیص ناوگان، برنامه‌ریزی تحویل، کنترل موجودی، رعایت توالی نصب و مدیریت ریسک را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. در این مدل، استفاده از 4PL برای همه قطعات اجباری نیست، بلکه بر اساس هزینه، زمان، ظرفیت، ریسک، انتشار کربن و پیامدهای تأخیر نصب تعیین می‌شود. همچنین، عدم‌قطعیت‌های عملیاتی از طریق سناریوها لحاظ شده و برای کنترل ریسک سناریوهای بحرانی از معیار CVaR و برای رعایت الزامات زیست‌محیطی از محدودیت انتشار کربن استفاده می‌شود.

۲-۱- بیان مسئله تحقیق

مسئله موردبررسی شامل یک شبکه زنجیره تأمین چندسطحی برای قطعات پیش‌ساخته فولادی است. همان‌طور که در شکل۱ نشان داده شده است، در این شبکه تعدادی کارخانه یا تولیدکننده، قطعاتی مانند ستون، تیر، بادبند، خرپا، اتصالات و اجزای مدولار فولادی را تولید می‌کنند. این قطعات پس از تولید باید متناسب با برنامه زمان‌بندی نصب، محدودیت‌های حمل و نیاز هر زون، به بخش‌های مختلف پروژه منتقل شوند.

برای انتقال قطعات، دو مسیر اصلی در نظر گرفته می‌شود: مسیر مستقیم از کارخانه به محل پروژه و مسیر مبتنی بر لجستیک طرف چهارم که در آن قطعات ابتدا به هاب 4PL منتقل‌شده و پس از تجمیع، کنترل، زمان‌بندی و هماهنگی لجستیکی، در زمان مناسب به محل نصب ارسال می‌شوند. مسیر دوم برای قطعات حجیم، سنگین، حساس به‌توالی نصب یا نیازمند هماهنگی چندمنبعی می‌تواند موجب کاهش ریسک تأخیر، کاهش ازدحام کارگاه و افزایش قابلیت اطمینان تحویل شود. ازآنجاکه تأخیر در تحویل یک قطعه بحرانی می‌تواند فعالیت‌های نصب وابسته را نیز متأخر کند، مدل پیشنهادی علاوه بر تصمیمات زنجیره تأمین، توالی نصب قطعات را نیز لحاظ می‌کند و در نتیجه به‌عنوان یک مدل یکپارچه زنجیره تأمین و نصب عمل می‌نماید .این نوع صورت‌بندی با جریان پژوهش‌های مکان‌یابی- مسیریابی چندسطحی هم‌راستا است، با این تفاوت که در این پژوهش تصمیم مسیر به برنامه نصب و نقش هماهنگ‌کننده 4PL متصل می‌شود [۴۰].



شکل ۱ ساختار شماتیک مسئله تحت بررسی

۲- ۲- مفروضات

برای توسعه مدل ریاضی، مفروضات در نظر گرفته‌شده برای مطالعه حاضر به شرح زیر است:

- پروژه شامل چند زون نصب است و هر زون به تعدادی قطعه پیش‌ساخته فولادی نیاز دارد.
- قطعات در کارخانه‌های خارج از سایت تولیدشده و از مسیر مستقیم یا مسیر مبتنی بر 4PL به پروژه منتقل می‌شوند.
- هاب‌های 4PL برای تجمیع، کنترل، دپوی موقت و توزیع قطعات استفاده می‌شوند.
- ظرفیت تولید کارخانه‌ها، ظرفیت هاب‌ها و ظرفیت ناوگان حمل‌ونقل محدود است.
- برنامه نصب شامل فعالیت‌هایی با روابط تقدم و تأخر است.
- هر فعالیت نصب فقط پس از دسترسی به قطعات موردنیاز خود آغاز می‌شود.
- هزینه حمل، زمان تحویل، ظرفیت ناوگان و ریسک مسیرها تحت عدم‌قطعیت سناریومحور قرار دارند.
- تصمیمات راهبردی مانند انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب و انتخاب مسیر پیش از تحقق سناریوها اتخاذ می‌شوند.
- تصمیمات عملیاتی مانند مقدار حمل، موجودی هاب، زمان شروع نصب و تأخیر در هر سناریو تعیین می‌شوند.
- انتشار کربن حمل در هر سناریو محاسبه‌شده و از سقف مجاز تجاوز نمی‌کند.
- معیار CVaR برای کنترل زیان‌های شدید سناریوهای بحرانی در مدل لحاظ می‌شود.

۲- ۳- مدل ریاضی مسئله

برای صورت‌بندی دقیق مدل ریاضی، در این بخش ابتدا مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مورداستفاده در مدل معرفی می‌شوند تا ساختار شبکه زنجیره تأمین، روابط میان اجزا و تصمیمات بهینه‌سازی به‌صورت منسجم و قابل‌پیگیری تبیین گردد.

جدول ۲ اندیس‌ها، پارامترها، و متغیرها

اندیس‌ها	
$i \in I$	مجموعه کارخانه‌ها یا تولیدکنندگان قطعات پیش‌ساخته فولادی
$h \in H$	مجموعه هاب‌ها یا مراکز تجمیع 4PL
$p \in P$	مجموعه زون‌ها یا محل‌های نصب در پروژه
$c \in C$	مجموعه انواع قطعات پیش‌ساخته فولادی
$t \in T$	مجموعه دوره‌های زمانی برنامه‌ریزی
$k \in K$	مجموعه ناوگان‌ها یا شرکت‌های حمل‌ونقل تحت هماهنگی 4PL
$a \in A$	مجموعه فعالیت‌های نصب قطعات فولادی
$\omega \in \Omega$	مجموعه سناریوهای عدم‌قطعیت
پارامترها	
π_ω	احتمال وقوع سناریوی ω
q_{ac}	مقدار قطعه c موردنیاز برای اجرای فعالیت نصب a
$p(\mathrm{a})$	زون نصب مرتبط با فعالیت a
$\bar{s}_a$	زمان برنامه‌ریزی‌شده شروع فعالیت نصب a
dur_a	مدت‌زمان اجرای فعالیت نصب a
$Pred(\mathrm{a})$	مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیاز فعالیت a
p_a	ضریب اهمیت یا جریمه تأخیر فعالیت نصب a
c_{ic}^{prod}	هزینه تولید یا خرید هر واحد قطعه c از کارخانه i
$c_{ihck}^{1\omega}$	هزینه حمل هر واحد قطعه c از کارخانه i به هاب h توسط ناوگان k در سناریوی ω
$c_{hpck}^{2\omega}$	هزینه حمل هر واحد قطعه c از هاب h به زون p توسط ناوگان k در سناریوی ω
$c_{ipck}^{D\omega}$	هزینه حمل مستقیم هر واحد قطعه c از کارخانه i به زون p توسط ناوگان k در سناریوی ω
f_h	هزینه ثابت فعال‌سازی هاب 4PL شماره h
f_{pct}^{4PL}	هزینه ثابت استفاده از خدمات 4PL برای قطعه cدر زون p و دوره t
c_{hc}^{inv}	هزینه نگهداری هر واحد قطعه c در هاب h

Cap^F_{ict}	ظرفیت تولید کارخانه i برای قطعه c در دوره t
Cap^H_h	ظرفیت نگهداری هاب h
Cap^K_{kt}	ظرفیت ناوگان k در دوره t
e^1_{ihck}	ضریب انتشار کربن برای حمل قطعه c از کارخانه i به هاب h توسط ناوگان k
e^2_{hpck}	ضریب انتشار کربن برای حمل قطعه c از هاب h به زون p توسط ناوگان k
e^D_{ipck}	ضریب انتشار کربن برای حمل مستقیم قطعه c از کارخانه i به زون p توسط ناوگان k
$r^{1\omega}_{ihck}$	ضریب ریسک مسیر کارخانه i به هاب h برای قطعه c توسط ناوگان k در سناریوی ω
$r^{2\omega}_{hpck}$	ضریب ریسک مسیر هاب h به زون p برای قطعه c توسط ناوگان k در سناریوی ω
$r^{D\omega}_{ipck}$	ضریب ریسک مسیر مستقیم کارخانه i به زون p برای قطعه c توسط ناوگان k در سناریوی ω
E^{max}	حداکثر سطح مجاز انتشار کربن
β	سطح اطمینان معیار CVaR
M	عدد بزرگ برای خطی‌سازی محدودیت‌های منطقی

متغیرهای تصمیم

x^{ω}_{ihctk}	مقدار قطعه c که از کارخانه i به هاب h در دوره t توسط ناوگان k و در سناریوی ω حمل می‌شود.
y^{ω}_{hpctk}	مقدار قطعه c که از هاب h به زون p در دوره t توسط ناوگان k و در سناریوی ω حمل می‌شود.
r^{ω}_{ipctk}	مقدار قطعه c که به‌صورت مستقیم از کارخانه i به زون p در دوره t توسط ناوگان k و در سناریوی ω حمل می‌شود
I^{ω}_{hct}	موجودی قطعه c در هاب h در پایان دوره t و در سناریوی ω
U_i	متغیر دودویی انتخاب کارخانه i؛ اگر کارخانه انتخاب شود برابر ۱، در غیر این صورت برابر ۰.
V_h	متغیر دودویی فعال‌سازی هاب h؛ اگر هاب فعال شود برابر ۱، در غیر این صورت برابر ۰.
G_{pct}	متغیر دودویی انتخاب مسیر 4PL برای قطعه c در زون p و دوره t. اگر مقدار آن برابر ۱ باشد، قطعه از مسیر 4PL منتقل می‌شود؛ در غیر این صورت مسیر مستقیم انتخاب می‌گردد.
z^{ω}_{at}	متغیر دودویی شروع فعالیت نصب a در دوره t و سناریوی ω
D^{ω}_a	میزان تأخیر فعالیت نصب a در سناریوی ω
η	متغیر VaR یا آستانه زیان در معیار CVaR
ξ_{ω}	متغیر مازاد زیان سناریوی ω نسبت به مقدار η

در این زیربخش، مدل ریاضی پیشنهادی برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین و نصب قطعات پیش‌ساخته فولادی با مشارکت 4PL ارائه می‌شود. مدل از نوع برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط، سناریومحور و ریسک‌گریز است و به‌گونه‌ای طراحی‌شده که تصمیمات انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب 4PL، انتخاب مسیر مستقیم یا مسیر مبتنی بر 4PL، تخصیص ناوگان، مقدار حمل، موجودی هاب، زمان شروع فعالیت‌های نصب، تأخیر نصب، ریسک لجستیکی و محدودیت انتشار کربن را به‌صورت هم‌زمان در نظر گیرد. در مدل حاضر، تصمیمات راهبردی مانند انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب و انتخاب مسیر 4PL قبل از تحقق سناریوها اتخاذ می‌شوند، درحالی‌که تصمیمات عملیاتی مانند مقدار حمل، موجودی، زمان شروع نصب و تأخیر نصب در هر سناریو تعیین می‌گردند.

$$Min\ Z_1 = \sum_{\omega\in\Omega} \pi_\omega TC_\omega \quad (۱)$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{\omega\in\Omega} \pi_\omega TD_\omega \quad (۲)$$

$$Min\ Z_3 = \sum_{\omega\in\Omega} \pi_\omega LR_\omega \quad (۳)$$

$$Min\ Z_4 = CVaR_\beta \quad (۴)$$

به‌طوری‌که:

$$TC_\omega = \sum_i \sum_c \sum_t c_{ic}^{prod} \left(\sum_h \sum_k x_{ihctk}^\omega + \sum_p \sum_k r_{ipctk}^\omega \right) + \sum_i \sum_h \sum_c \sum_t \sum_k c_{ihck}^{1\omega} x_{ihctk}^\omega + \sum_h \sum_p \sum_c \sum_t \sum_k c_{hpck}^{2\omega} y_{hpctk}^\omega + \sum_i \sum_p \sum_c \sum_t \sum_k c_{ipck}^{D\omega} r_{ipctk}^\omega + \sum_h f_h V_h + \sum_p \sum_c \sum_t f_{pct}^{4PL} G_{pct} + \sum_h \sum_c \sum_t c_{hc}^{inv} I_{hct}^\omega \quad (۵)$$

$$TD_\omega = \sum_{a \in A} \rho_a D_a^\omega \quad (۶)$$

$$LR_\omega = \sum_i \sum_h \sum_c \sum_t \sum_k r_{ihck}^{1\omega} x_{ihctk}^\omega + \sum_h \sum_p \sum_c \sum_t \sum_k r_{hpck}^{2\omega} y_{hpctk}^\omega + \sum_i \sum_p \sum_c \sum_t \sum_k r_{ipck}^{D} r_{ipctk}^\omega \quad (۷)$$

$$EM_\omega = \sum_i \sum_h \sum_c \sum_t \sum_k e_{ihck}^{1\omega} x_{ihctk}^\omega + \sum_h \sum_p \sum_c \sum_t \sum_k e_{hpck}^{2\omega} y_{hpctk}^\omega + \sum_i \sum_p \sum_c \sum_t \sum_k e_{ipck}^{D} r_{ipctk}^\omega \quad (۸)$$

$$\mathrm{L}_\omega = TC_\omega + \lambda_D TD_\omega + \lambda_R LR_\omega \quad (۹)$$

$$\xi_\omega \geq \mathrm{L}_\omega - \eta \qquad \forall\, \omega \in \Omega \quad (۱۰)$$

$$\xi_\omega \geq 0 \qquad \forall\, \omega \in \Omega \quad (۱۱)$$

$$CVaR_\beta = \eta + \frac{1}{1-\beta} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega \xi_\omega \quad (۱۲)$$

محدودیت‌های مدل به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sum_h \sum_k x_{ihctk}^\omega + \sum_p \sum_k r_{ipctk}^\omega \leq Cap_{ict}^F U_i \qquad \forall i, c, t, \omega \quad (۱۳)$$

$$I_{hct}^\omega = I_{hct-1}^\omega + \sum_i \sum_k x_{ihctk}^\omega - \sum_p \sum_k y_{hpctk}^\omega \qquad \forall h, c, t, \omega \quad (۱۴)$$

$$\sum_c I_{hct}^\omega \leq Cap_h^H V_h \qquad \forall h, t, \omega \quad (۱۵)$$

$$\sum_i \sum_h \sum_c x_{ihctk}^\omega + \sum_h \sum_p \sum_c y_{hpctk}^\omega + \sum_i \sum_p \sum_c r_{ipctk}^\omega \leq Cap_{kt}^K \qquad \forall k, t, \omega \quad (۱۶)$$

$$\sum_h \sum_k y_{hpctk}^\omega \leq M G_{pct} \qquad \forall p, c, t, \omega \quad (۱۷)$$

$$\sum_i \sum_k r^{\omega}_{ipctk} \le M\left(1 - G_{pct}\right) \qquad \forall p, c, t, \omega \qquad (۱۸)$$

$$\sum_i \sum_k x^{\omega}_{ihctk} \le MV_h \qquad \forall h, c, t, \omega \qquad (۱۹)$$

$$\sum_P \sum_k y^{\omega}_{hpctk} \le MV_h \qquad \forall h, c, t, \omega \qquad (۲۰)$$

$$\sum_t \left(\sum_h \sum_k y^{\omega}_{hpctk} + \sum_i \sum_k r^{\omega}_{ipctk} \right) = \sum_{a:p(\mathrm{a})=p} q_{ac} \qquad \forall p, c, \omega \qquad (۲۱)$$

$$\sum_t z^{\omega}_{at} = 1 \qquad \forall a, \omega \qquad (۲۲)$$

$$\sum_{\tau \le t} \left(\sum_h \sum_k y^{\omega}_{hpc\tau k} + \sum_i \sum_k r^{\omega}_{ipc\tau k} \right) \ge \sum_{a:p(\mathrm{a})=p} q_{ac} \sum_{\tau \le t} z^{\omega}_{a\tau} \qquad \forall p, c, t, \omega \qquad (۲۳)$$

$$\sum_t t z^{\omega}_{at} \ge \sum_t (t + dur_b) z^{\omega}_{bt} \qquad \forall a, \omega, b \in Pred(a) \qquad (۲۴)$$

$$D^{\omega}_a \ge \sum_t t z^{\omega}_{at} - \bar{s}_a \qquad \forall a, \omega \qquad (۲۵)$$

$$D^{\omega}_a \ge 0 \qquad \forall a, \omega \qquad (۲۶)$$

$$EM_{\omega} \le E^{max} \qquad \forall \omega \qquad (۲۷)$$

$$x^{\omega}_{ihctk}, y^{\omega}_{hpctk}, r^{\omega}_{ipctk}, I^{\omega}_{hct}, D^{\omega}_a, \xi_{\omega} \ge 0 \qquad (۲۸)$$

$$U_i, V_h, G_{pct}, z^{\omega}_{at} \in \{0,1\} \qquad (۲۹)$$

$$\eta \ge 0 \qquad (۳۰)$$

روابط (۱) تا (۴) توابع هدف اصلی مدل را نشان می‌دهند. رابطه (۱) هزینه مورد انتظار زنجیره تأمین، رابطه (۲) تأخیر مورد انتظار نصب، رابطه (۳) ریسک لجستیکی مورد انتظار و رابطه (۴) مقدار CVaR را حداقل می‌کند. روابط (۵) تا (۹) اجزای محاسباتی مدل را تعریف می‌کنند؛ به‌طوری‌که رابطه (۵) هزینه کل هر سناریو، رابطه (۶) جریمه تأخیر نصب، رابطه (۷) ریسک لجستیکی، رابطه (۸) انتشار کربن و رابطه (۹) زیان کل سناریویی را محاسبه می‌کند. همچنین، روابط (۱۰) تا (۱۲) برای محاسبه معیار CVaR به کار می‌روند تا مدل نسبت به سناریوهای بحرانی و زیان‌های شدید حساس باشد.

روابط (۱۳) تا (۲۰) محدودیت‌های اصلی شبکه زنجیره تأمین را بیان می‌کنند. رابطه (۱۳) ظرفیت تولید کارخانه‌ها، رابطه (۱۴) تراز موجودی هاب‌ها، رابطه (۱۵) ظرفیت نگهداری هاب‌ها و رابطه (۱۶) ظرفیت ناوگان حمل‌ونقل را کنترل می‌کند. روابط (۱۷) و (۱۸) انتخاب مسیر مستقیم یا مسیر مبتنی بر 4PL را مدل‌سازی کرده و روابط (۱۹) و (۲۰) تضمین می‌کنند که فقط هاب‌های فعال‌شده امکان دریافت و ارسال قطعات را داشته باشند.

روابط (۲۱) تا (۲۷) ارتباط زنجیره تأمین با برنامه نصب و الزامات زیست‌محیطی را برقرار می‌کنند. رابطه (۲۱) تأمین کامل نیاز قطعات هر زون، رابطه (۲۲) شروع هر فعالیت نصب در یک دوره مشخص و رابطه (۲۳) دسترسی به قطعات پیش از آغاز نصب را تضمین می‌کند. رابطه (۲۴) روابط تقدم و تأخر فعالیت‌های نصب را مدل‌سازی کرده و روابط (۲۵) و (۲۶) مقدار تأخیر نصب و نامنفی‌بودن آن را مشخص می‌کنند. رابطه (۲۷) نیز سقف انتشار کربن را اعمال می‌کند تا راهکار نهایی با الزامات زنجیره تأمین کم‌کربن سازگار باشد.

در نهایت، روابط (۲۸) تا (۳۰) دامنه متغیرهای مدل را تعیین می‌کنند. رابطه (۲۸) نامنفی‌بودن متغیرهای پیوسته، رابطه (۲۹) دودویی‌بودن متغیرهای انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب، انتخاب مسیر و شروع نصب، و رابطه (۳۰) نامنفی‌بودن متغیر η

را تضمین می‌کند. درمجموع، روابط (۱) تا (۳۰) یک مدل یکپارچه، سناریومحور و ریسک‌گریز برای طراحی زنجیره تأمین و نصب قطعات پیش‌ساخته فولادی ارائه می‌دهند که اثر مشارکت انتخابی 4PL را بر هزینه، تأخیر، ریسک، انتشار کربن و برنامه نصب به‌صورت هم‌زمان ارزیابی می‌کند.

۳- روش حل مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی از نوع برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط، چندهدفه، سناریومحور و ریسک‌گریز است. ازآنجاکه توابع هدف مدل شامل مؤلفه‌هایی با مقیاس‌های متفاوت، مانند هزینه، تأخیر نصب، ریسک لجستیکی و CVaR هستند، حل مستقیم مدل چندهدفه می‌تواند موجب غلبه یک مؤلفه بر سایر اهداف شود. بنابراین، در این بخش ابتدا روش تبدیل مدل چندهدفه به مدل تک‌هدفه نرمال‌شده ارائه می‌شود. سپس، نحوه پیاده‌سازی و حل مدل بیان شده و در نهایت، راهبردهای مقایسه‌ای و شاخص‌های ارزیابی معرفی می‌شوند. روابط اصلی مدل، محدودیت‌ها، معیار CVaR و محدودیت انتشار کربن در بخش مدل ریاضی ارائه‌شده‌اند و در این بخش فقط نحوه استفاده از آن‌ها در فرآیند حل تشریح می‌شود. از منظر برخورد با عدم‌قطعیت و انعطاف‌پذیری شبکه، مطالعات بهینه‌سازی مقاوم زنجیره تأمین پایدار نیز نشان می‌دهند که ترکیب پایداری، سناریوهای عملیاتی و انعطاف‌پذیری تصمیمات برای افزایش قابلیت اجرای مدل ضروری است [۴۱].

۳-۱- تبدیل مدل چندهدفه به مدل تک‌هدفه نرمال‌شده

برای حل مدل، از روش مجموع وزنی نرمال‌شده استفاده می‌شود. در این روش، هر مؤلفه تابع هدف بر مقدار مرجع متناظر خود تقسیم می‌شود تا اهداف مختلف در مقیاس قابل‌مقایسه قرار گیرند. سپس، مؤلفه‌های نرمال‌شده با استفاده از وزن‌های ترجیحی تصمیم‌گیرنده در قالب یک تابع هدف واحد ترکیب می‌شوند. تابع هدف تک‌هدفه معادل به‌صورت رابطه (۳۱) تعریف می‌شود: همچنین، در مطالعات چندهدفه زنجیره تأمین پایدار، ترکیب هم‌زمان معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و منابع مشترک نشان داده است که وزن‌دهی و مقایسه متوازن اهداف می‌تواند نقش مهمی در استخراج راهکارهای اجرایی داشته باشد [۴۲].

$$Min\ Z = \ w_1 \frac{\sum_{\omega\in\Omega}\pi_\omega TC_\omega}{\overline{TC}} + w_2 \frac{\sum_{\omega\in\Omega}\pi_\omega TD_\omega}{\overline{TD}} + w_3 \frac{\sum_{\omega\in\Omega}\pi_\omega LR_\omega}{\overline{LR}} + w_4 \frac{CVaR_\beta}{\bar{L}} \quad (۳۱)$$

به‌طوری‌که:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$$

در رابطه (۳۱)، TC_ω هزینه کل زنجیره تأمین در سناریوی ω، TD_ω تأخیر نصب در سناریوی ω، LR_ω ریسک لجستیکی در سناریوی ω و $CVaR_\beta$ مقدار ارزش در معرض ریسک شرطی در سطح اطمینان β است. همچنین، w_1، w_2، w_3 و w_4 به‌ترتیب وزن‌های مربوط به هزینه، تأخیر، ریسک لجستیکی و CVaR هستند. همچنین، $\overline{TC}$، $\overline{TD}$ ، $\overline{LR}$ و $\bar{L}$ مقادیر مرجع نرمال‌سازی را نشان می‌دهند. رابطه (۳۲) نیز تضمین می‌کند که مجموع وزن‌های تابع هدف برابر با یک باشد. این تبدیل باعث می‌شود مدل چندهدفه در قالب یک مدل تک‌هدفه قابل‌حل با ساختار MILP قرار گیرد.

در فرآیند نرمال‌سازی، برای هر مؤلفه تابع هدف یک مقدار مرجع از حل‌های تک‌هدفه و راهبردهای پایه استخراج شد؛ به این معنا که ابتدا مدل با تمرکز جداگانه بر هزینه، تأخیر، ریسک و CVaR حل و بازه تغییرات هر شاخص تعیین گردید. سپس مقدار هر شاخص بر مقدار مرجع متناظر تقسیم شد تا شاخص‌های دارای واحدهای متفاوت در مقیاسی بدون بعد و قابل‌مقایسه قرار گیرند. وزن‌ها نیز با رویکرد متوازن و مبتنی بر نظر خبرگان اجرایی تعیین شدند؛ به‌گونه‌ای که کاهش هزینه اهمیت بیشتری دارد، اما کنترل تأخیر نصب، ریسک لجستیکی و زیان سناریوهای بحرانی نیز در تصمیم نهایی اثرگذار باقی می‌مانند.

۳-۲- پیاده‌سازی و فرآیند حل

در فرآیند حل، ابتدا داده‌های مربوط به کارخانه‌ها، هاب‌های 4PL، زون‌های نصب، قطعات فولادی، ناوگان حمل‌ونقل، ظرفیت‌ها، هزینه‌ها، ضرایب ریسک، ضرایب انتشار، روابط تقدم و تأخر و سناریوهای عدم‌قطعیت وارد مدل می‌شوند. سپس، مدل با تابع هدف نرمال‌شده رابطه (۳۱) و محدودیت‌های ارائه‌شده در بخش مدل ریاضی حل‌شده و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم

استخراج می‌گردد.

ماهیت خطی روابط مدل باعث می‌شود که با وجود متغیرهای دودویی و پیوسته، مدل نهایی همچنان در قالب برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط باقی بماند. خروجی‌های اصلی حل شامل کارخانه‌های منتخب، هاب‌های فعال، مسیر حمل هر گروه قطعه، مقدار حمل، موجودی هاب‌ها، زمان شروع فعالیت‌های نصب، مقدار تأخیر، ریسک سناریویی، مقدار CVaR و سطح انتشار کربن است. این خروجی‌ها در بخش نتایج محاسباتی برای تحلیل عملکرد مدل مورداستفاده قرار می‌گیرند.

۳-۳- راهبردهای مقایسه‌ای و شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، سه راهبرد لجستیکی تعریف می‌شود. در راهبرد نخست، حالت بدون مشارکت 4PL در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، هیچ هابی فعال نشده و تمام قطعات به‌صورت مستقیم از کارخانه‌ها به زون‌های نصب ارسال می‌شوند. این وضعیت با روابط (۳۳) و (۳۴) اعمال می‌گردد:

$$V_h = 0 \qquad \forall\, h \in H \qquad (۳۳)$$

$$G_{pct} = 0 \qquad \forall\, p, c, t \qquad (۳۴)$$

در راهبرد دوم، مشارکت کامل 4PL بررسی می‌شود. در این حالت، همه قطعات الزاماً از مسیر مبتنی بر هاب‌های 4PL عبور می‌کنند و حمل مستقیم مجاز نیست. این راهبرد با تثبیت متغیر مسیر مطابق رابطه (۳۵) اعمال می‌شود:

$$G_{pct} = 1 \qquad \forall\, p, c, t \qquad (۳۵)$$

راهبرد سوم، مشارکت انتخابی 4PL است که ساختار اصلی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این حالت، مقدار G_{pct} از پیش تثبیت نمی‌شود و مدل برای هر قطعه، زون نصب و دوره زمانی تصمیم می‌گیرد که مسیر مستقیم مناسب‌تر است یا مسیر مبتنی بر 4PL. این راهبرد امکان می‌دهد قطعات بحرانی و پر ریسک از طریق 4PL مدیریت شوند و قطعات کم ریسک‌تر یا دارای مسیر مستقیم اقتصادی‌تر، مستقیماً به پروژه ارسال گردند.

برای مقایسه سه راهبرد فوق، شاخص‌های عملکردی شامل هزینه مورد انتظار، تأخیر مورد انتظار نصب، ریسک مورد انتظار لجستیکی، انتشار کربن مورد انتظار، مقدار CVaR، سطح خدمت تحویل به‌موقع و سهم استفاده از مسیر 4PL محاسبه می‌شوند. چهار شاخص اصلی مطابق روابط (۳۶) تا (۳۹) تعریف می‌شوند:

$$ETC = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega TC_\omega \qquad (۳۶)$$

$$ETD = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega TD_\omega \qquad (۳۷)$$

$$ELR = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega LR_\omega \qquad (۳۸)$$

$$EEM = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega EM_\omega \qquad (۳۹)$$

در روابط (۳۶) تا (۳۹)، ETC، ETD، ELR و EEM به‌ترتیب هزینه مورد انتظار، تأخیر مورد انتظار نصب، ریسک مورد انتظار لجستیکی و انتشار کربن مورد انتظار را نشان می‌دهند. این شاخص‌ها مبنای مقایسه راهبردهای بدون 4PL، مشارکت کامل 4PL و مشارکت انتخابی 4PL در بخش نتایج محاسباتی قرار می‌گیرند.

۳-۴- کنترل اعتبار خروجی‌ها

پس از حل مدل، خروجی‌ها از نظر منطقی و اجرایی کنترل می‌شوند. نخست، بررسی می‌شود که مقدار قطعات تحویل‌شده با نیاز زون‌های نصب سازگار باشد. دوم، هیچ فعالیت نصب نباید پیش از تحویل قطعات موردنیاز خود آغاز شود. سوم، محدودیت‌های ظرفیت تولید، ظرفیت هاب و ظرفیت ناوگان باید در همه سناریوها رعایت شوند. چهارم، میزان انتشار کربن در

هر سناریو نباید از سقف مجاز تعیین‌شده تجاوز کند.

در نهایت، خروجی‌های مدل برای تحلیل عملکرد آماده می‌شوند. این کنترل‌ها کمک می‌کنند اطمینان حاصل شود که راهکار نهایی نه‌تنها از نظر ریاضی بهینه است، بلکه با منطق اجرایی پروژه‌های سازه فولادی پیش‌ساخته نیز سازگاری دارد. بنابراین، روش حل پیشنهادی امکان ارزیابی هم‌زمان اثر تصمیمات لجستیکی بر هزینه، تأخیر نصب، ریسک، CVaR و انتشار کربن را فراهم می‌سازد.

۴-مطالعه موردی و داده‌های ورودی مدل

برای ارزیابی کاربردپذیری مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی بر اساس یک پروژه سازه فولادی شهری در تهران طراحی شد. این پروژه به دلیل کاربری اداری، اسکلت فلزی پیچ و مهره‌ای، تعدد طبقات و محدودیت‌های حمل، دپو و نصب، نمونه‌ای مناسب برای بررسی زنجیره تأمین قطعات فولادی پیش‌ساخته با مشارکت لجستیک طرف چهارم است. داده‌های مطالعه موردی از چهار منبع شامل اطلاعات واقعی و فنی پروژه، داده‌های محاسباتی مبتنی بر فاصله و تن-کیلومتر، قضاوت خبرگان اجرایی و مفروضات سناریویی کالیبره‌شده گردآوری شد. برای افزایش شفافیت، منشأ داده‌ها و سطح اتکای پارامترهای اصلی در جدول۳ گزارش شده است.

جدول ۳ منشأ داده‌ها و سطح اتکای پارامترهای مطالعه موردی

گروه پارامترها	منشأ داده	سطح اتکا	نحوه استفاده در مدل
مشخصات کلی پروژه، نوع سازه، محدوده اجرا، زون‌بندی و توالی کلی نصب	مستندات فنی در دسترس و ساختار واقعی پروژه	واقعی/مبتنی بر پروژه	تعریف زون‌های نصب، فعالیت‌ها و روابط تقدم و تأخر
فاصله مسیرها، مقدار تن-کیلومتر، انتشار حمل و هزینه پایه حمل	محاسبات شبکه حمل با استفاده از فاصله، نوع ناوگان و ضرایب انتشار	محاسباتی	محاسبه هزینه حمل و انتشار کربن برای مسیر مستقیم و مسیر 4PL
اهمیت قطعات، جریمه تأخیر، ریسک مسیر، مناسب‌بودن هاب‌ها و الگوی تحویل	مصاحبه و قضاوت خبرگان اجرایی و لجستیکی	خبرگی/کالیبره‌شده	تعیین ضرایب جریمه، ضرایب ریسک و نقش عملیاتی هاب‌ها
ظرفیت دقیق کارخانه‌ها و هاب‌ها، ضرایب سناریویی، احتمال سناریوها و سقف کربن	مفروضات عددی سازگار با پروژه‌های مشابه و تنظیم برای تحلیل مدل	فرضی کنترل‌شده	ایجاد نمونه قابل‌حل و انجام تحلیل حساسیت
وزن‌های تابع هدف و سطح اطمینان CVaR	ترکیب قضاوت خبرگان و رویکرد متوازن تصمیم‌گیری	خبرگی/تحلیلی	ترکیب اهداف و کنترل ریسک دنباله‌ای

بر این اساس، نتایج عددی مطالعه موردی باید به‌عنوان یک ارزیابی کاربردی و کالیبره‌شده از رفتار مدل تفسیر شود؛ به‌گونه‌ای که پارامترهای مبتنی بر پروژه چارچوب واقعی مسئله را تشکیل می‌دهند و پارامترهای فرضی کنترل‌شده برای تکمیل داده‌های محرمانه یا غیرقابل‌دسترس و سنجش پایداری تصمیمات به‌کاررفته‌اند.

۴-۱-ساختار شبکه زنجیره تأمین و داده‌های پایه

شبکه زنجیره تأمین موردمطالعه شامل سه کارخانه تولید قطعات پیش‌ساخته فولادی، دو هاب بالقوه 4PL، سه زون نصب در پروژه، دو نوع ناوگان حمل‌ونقل و پنج گروه اصلی قطعات فولادی است. در این شبکه، قطعات فولادی پس از تولید در کارخانه‌ها می‌توانند به دو روش به پروژه منتقل شوند. در روش نخست، قطعات به‌صورت مستقیم از کارخانه به زون نصب ارسال می‌شوند. در روش دوم، قطعات ابتدا وارد هاب 4PL شده و پس از تجمیع، کنترل، دپوی موقت و هماهنگی لجستیکی، در زمان مناسب به زون نصب منتقل می‌شوند.

طبق جدول ۴، زون‌های نصب پروژه بر اساس توالی اجرای سازه و موقعیت قطعات در ساختمان تعریف شدند. زون اول شامل بخش‌های زیرزمین و قطعات سنگین ابتدایی، زون دوم شامل طبقات میانی و قطعات اصلی سازه، و زون سوم شامل طبقات بالاتر

و قطعات تکمیلی در نظر گرفته شد.

جدول ۴ تعریف زون‌های نصب و محدوده اجرایی آن‌ها در پروژه موردمطالعه

زون نصب	محدوده اجرایی	توضیح
Z1	طبقات زیرزمین و فونداسیون فلزی	شامل قطعات سنگین ابتدایی و ستون‌های پایه
Z2	طبقات همکف تا چهارم	شامل ستون‌ها، تیرهای اصلی و بادبندها
Z3	طبقات پنجم تا هشتم	شامل تیرهای فرعی، اتصالات و قطعات تکمیلی

با توجه به زیربنای پروژه و ماهیت اسکلت فلزی پیچ و مهره‌ای، وزن کل قطعات فولادی موردنیاز برای نمونه عددی برابر با ۵۲۰ تن فرض شد. این مقدار به پنج گروه قطعه شامل ستون‌ها، تیرهای اصلی، تیرهای فرعی، بادبندها و اتصالات تقسیم گردید. جدول ۵ ترکیب قطعات موردنیاز را نشان می‌دهد.

جدول ۵ مشخصات گروه‌های اصلی قطعات پیش‌ساخته فولادی

نوع قطعه	نماد	مقدار کل، تن	سهم از کل، درصد	اهمیت نصب
ستون‌های فولادی	C1	۱۶۰	۳۰ /۸	بسیار زیاد
تیرهای اصلی	C2	۱۵۰	۲۸ /۸	بسیار زیاد
تیرهای فرعی	C3	۱۱۰	۲۱/۲	متوسط
بادبندها و اعضای پایداری	C4	۵۵	۱۰/۶	زیاد
اتصالات، پلیت‌ها و قطعات تکمیلی	C5	۴۵	۸/۶	زیاد
جمع		۵۲۰	۱۰۰	

سه کارخانه تولید قطعات فولادی به‌عنوان تأمین‌کنندگان بالقوه در نظر گرفته شدند. این کارخانه‌ها در محدوده‌های صنعتی پیرامون تهران مستقر شده‌اند که در جدول ۶ ویژگی‌های آن‌ها بیان گردیده است.

جدول ۶ داده‌های پایه کارخانه‌های کاندید تولید قطعات فولادی

کارخانه	موقعیت	فاصله تقریبی تا پروژه، کیلومتر	ظرفیت کل تولید، تن	هزینه ساخت هر تن، میلیون ریال
F1	جنوب تهران، محدوده شمس‌آباد	۵۵	۲۳۰	۲۲۵۰
F2	استان البرز، محدوده اشتهارد	۱۰۵	۲۱۰	۲۱۹۰
F3	محدوده قم	۱۴۵	۱۸۰	۲۱۴۰

همچنین همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده‌شده است، دو هاب بالقوه 4PL نیز برای تجمیع، دپوی موقت و ارسال مرحله‌ای قطعات به پروژه تعریف شدند. هاب اول ظرفیت بیشتری داشته و برای قطعات سنگین مناسب‌تر فرض شد؛ درحالی‌که هاب دوم به پروژه نزدیک‌تر بوده و برای تحویل‌های مرحله‌ای و قطعات حساس به زمان مناسب‌تر در نظر گرفته شد.

جدول ۷ داده‌های پایه هاب‌های کاندید لجستیک طرف چهارم

هاب 4PL	موقعیت فرضی	ظرفیت دپو، تن	هزینه ثابت فعال‌سازی، میلیون ریال	فاصله تا پروژه، کیلومتر
H1	جنوب تهران، نزدیک محور شمس‌آباد	۲۶۰	۴۲۰۰	۶۰
H2	غرب تهران، نزدیک محور مخصوص کرج	۱۸۰	۳۶۰۰	۳۵

طبق جدول ۸، برای حمل قطعات، دو نوع ناوگان در نظر گرفته شد. ناوگان اول شامل تریلر کفی سنگین برای حمل قطعات حجیم و سنگین و ناوگان دوم شامل کامیون کفی متوسط برای ارسال‌های مرحله‌ای و قطعات کوچک‌تر است.

جدول ۸ ظرفیت، هزینه حمل و ضریب انتشار ناوگان‌های مورد استفاده

نوع ناوگان	نماد	ظرفیت هر سفر، تن	ظرفیت دوره‌ای، تن	هزینه حمل پایه، میلیون ریال بر تن-کیلومتر	ضریب انتشار، کیلوگرم CO_{2e} بر تن-کیلومتر
تریلر کفی سنگین	K1	۲۴	۱۲۰	۰/۰۵۵	۰/۱۱۵
کامیون کفی متوسط	K2	۱۶	۸۰	۰/۰۷۰	۰/۱۵۵

در محاسبه انتشار کربن، از منطق تن-کیلومتر استفاده شد؛ یعنی انتشار ناشی از حمل هر جریان قطعه بر اساس حاصل‌ضرب مقدار حمل، فاصله مسیر و ضریب انتشار ناوگان مربوط محاسبه گردید. این رویکرد امکان مقایسه مسیر مستقیم و مسیر مبتنی بر 4PL را از منظر زیست‌محیطی فراهم می‌سازد.

۴-۲- برنامه نصب، سناریوهای عدم‌قطعیت و پارامترهای حل

افق برنامه‌ریزی مطالعه موردی برابر با ۱۰ دوره هفتگی در نظر گرفته شد. برنامه نصب به‌گونه‌ای تعریف شد که ابتدا قطعات اصلی طبقات پایین، سپس قطعات اصلی و پایداری طبقات میانی و در نهایت قطعات تکمیلی و تیرهای فرعی طبقات بالاتر نصب شوند. فعالیت‌های نصب و داده‌های مرتبط با آن‌ها در جدول ۹ ارائه شده‌اند.

جدول ۹ فعالیت‌های نصب، زمان شروع برنامه‌ای و ضرایب جریمه تأخیر

فعالیت نصب	نماد	قطعات اصلی موردنیاز	زون نصب	زمان شروع برنامه‌ای، هفته	مدت اجرا، هفته	جریمه تأخیر، میلیون ریال بر هفته
نصب ستون‌های طبقات زیرزمین	A1	C1	Z1	۱	۲	۱۴۵۰
نصب تیرهای اصلی طبقات زیرزمین	A2	C2	Z1	۳	۲	۱۳۲۰
نصب ستون‌های طبقات میانی	A3	C1	Z2	۴	۲	۱۳۸۰
نصب تیرهای اصلی و بادبندها	A4	C2, C4	Z2	۵	۲	۱۲۶۰
نصب تیرهای فرعی و اتصالات	A5	C3, C5	Z3	۷	۳	۹۸۰

روابط تقدم و تأخر فعالیت‌ها مطابق توالی اجرایی سازه فولادی در نظر گرفته شد. بر این اساس، فعالیت A2 پس از A1، فعالیت A3 پس از A2، فعالیت A4 پس از A3 و فعالیت A5 پس از A4 قابل شروع است. این ساختار باعث می‌شود تأخیر در تحویل قطعات فعالیت‌های ابتدایی، اثر مستقیم بر فعالیت‌های بعدی داشته باشد و نقش هماهنگی زنجیره تأمین با برنامه نصب برجسته شود.

بر اساس جدول ۱۰، برای لحاظ‌کردن عدم‌قطعیت، چهار سناریو تعریف شد. این سناریوها شرایط عادی، افزایش هزینه و ترافیک متوسط، کمبود ظرفیت ناوگان و اختلال بحرانی در مسیرهای حمل را پوشش می‌دهند. در هر سناریو، هزینه حمل، زمان تحویل و ریسک مسیر با ضرایب تعدیل مشخص می‌شوند.

جدول ۱۰ ساختار سناریوهای عدم‌قطعیت در مطالعه موردی

سناریو	توضیح	احتمال وقوع	ضریب هزینه حمل	ضریب زمان تحویل	ضریب ریسک مسیر
S1	شرایط عادی	۰/۴۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
S2	افزایش هزینه و ترافیک متوسط	۰/۲۵	۱/۱۲	۱/۱۸	۱/۲۰
S3	کمبود ظرفیت ناوگان	۰/۲۰	۱/۲۰	۱/۲۵	۱/۳۵
S4	اختلال بحرانی در مسیر حمل	۰/۱۵	۱/۳۵	۱/۵۵	۱/۷۰

سناریوی چهارم به‌عنوان سناریوی بحرانی تعریف شد. اگرچه احتمال وقوع این سناریو نسبت به شرایط عادی کمتر است، اما اثر آن بر هزینه، تأخیر نصب و سطح خدمت می‌تواند قابل توجه باشد. به همین دلیل، معیار CVaR در مدل برای کنترل زیان‌های شدید ناشی از چنین سناریوهایی به کار گرفته شد.

در تنظیمات حل مدل، سطح اطمینانCVaR، یعنی β برابر با ۹۵ درصد، در نظر گرفته شد. همچنین، سقف مجاز انتشار کربن برای هر سناریو برابر با ۸ تن معادل دی‌اکسید کربن تعیین گردید ($E^{max} = 8$ ton CO2eE)

وزن‌های تابع هدف بر اساس رویکرد متوازن، نظر خبرگان اجرایی پروژه‌های فولادی پیش‌ساخته و اهمیت نسبی چهار معیار هزینه، تأخیر، ریسک و CVaR تعیین شدند که در جدول۱۱ نشان داده‌شده است. این وزن‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که مدل تنها بر کاهش هزینه متمرکز نباشد و به کنترل تأخیر نصب و زیان سناریوهای بحرانی نیز اهمیت دهد. همچنین، برای بررسی

اتکای نتایج به این وزن‌ها، تحلیل حساسیت نسبت به وزن CVaR در بخش نتایج ارائه می‌شود.

جدول ۱۱ مقادیر وزن‌دهی به مؤلفه‌های تابع هدف

مؤلفه تابع هدف	وزن
هزینه کل مورد انتظار	۰/۳۵
تأخیر نصب مورد انتظار	۰/۲۵
ریسک لجستیکی مورد انتظار	۰/۲۰
CVaR زیان کل	۰/۲۰

۴-۳- راهبردهای مقایسه‌ای و نحوه آماده‌سازی داده‌ها برای حل مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، سه راهبرد لجستیکی تعریف شد. در راهبرد نخست، یعنی حالت بدون مشارکت 4PL، هیچ هابی فعال نمی‌شود و تمام قطعات به‌صورت مستقیم از کارخانه‌ها به زون‌های نصب ارسال می‌شوند. راهبرد دوم، مشارکت کامل 4PL است که در آن همه قطعات ابتدا وارد هاب‌های 4PL شده و سپس به زون‌های نصب منتقل می‌شوند. این حالت اگرچه می‌تواند کنترل بیشتری بر جریان قطعات ایجاد کند، اما ممکن است به دلیل حمل دومرحله‌ای، هزینه و انتشار کربن را افزایش دهد. راهبرد سوم، مشارکت انتخابی 4PL است که در آن مدل برای هر قطعه، زون نصب و دوره زمانی تصمیم می‌گیرد که حمل مستقیم مناسب‌تر است یا مسیر مبتنی بر 4PL.

برای آماده‌سازی داده‌ها، فاصله تقریبی میان کارخانه‌ها، هاب‌ها و پروژه تعیین شد و هزینه حمل هر مسیر بر اساس فاصله، مقدار حمل، نوع ناوگان و ضریب سناریویی محاسبه گردید. ضرایب ریسک مسیر نیز با توجه به طول مسیر، ورود به محدوده شهری، احتمال ترافیک و حساسیت قطعه به تأخیر تعیین شدند. انتشار کربن مسیرها نیز بر مبنای منطق تن-کیلومتر و مطابق با رابطه (۸) در مدل ریاضی محاسبه شد. بر این اساس، داده‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شدند که امکان مقایسه سه راهبرد بدون 4PL، مشارکت کامل 4PL و مشارکت انتخابی 4PL از نظر هزینه، تأخیر، ریسک، CVaR و انتشار کربن فراهم شود. در ادبیات حمل‌ونقل نیز اثر مسیرهای چندگانه، ظرفیت‌های متفاوت و هزینه‌های ثابت حمل از عوامل مؤثر بر تصمیم‌گیری مسیر و ناوگان شناخته‌شده است [۴۳].

۵-نتایج محاسباتی و تحلیل یافته‌ها

در این بخش، نتایج حل مدل پیشنهادی برای مطالعه موردی ارائه و تحلیل می‌شود. برای ارزیابی عملکرد مدل، سه راهبرد بدون مشارکت لجستیک طرف چهارم، مشارکت کامل لجستیک طرف چهارم و مشارکت انتخابی لجستیک طرف چهارم با یکدیگر مقایسه می‌شوند. مدل در نرم‌افزار GAMS نسخه ۲۴.۱.۲ و با حل‌کننده CPLEX نسخه ۱۲.۶پیاده‌سازی شده و آزمایش‌ها بر روی پردازنده Intel® Core™ i7 با ۴ گیگابایت RAM اجرا شده است. شاخص‌های ارزیابی شامل هزینه مورد انتظار، تأخیر نصب، ریسک لجستیکی، مقدار CVaR، انتشار کربن، سطح خدمت، الگوی انتخاب کارخانه‌ها، فعال‌سازی هاب‌ها و سهم مسیر لجستیک طرف چهارم است. نتایج نشان می‌دهد که مشارکت انتخابی لجستیک طرف چهارم می‌تواند تعادل مناسب‌تری میان هزینه، زمان، ریسک و پایداری زیست‌محیطی ایجاد کند. اطلاعات ابعاد مدل و عملکرد حل نمونه عددی در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲ ابعاد مدل و عملکرد حل برای نمونه عددی

شاخص محاسباتی	مقدار گزارش‌شده	توضیح
تعداد متغیرهای کل	۹/۱۷۸	شامل متغیرهای پیوسته حمل، موجودی، تأخیر و متغیرهای کمکی CVaR
تعداد متغیرهای دودویی	۳۵۵	انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب، انتخاب مسیر و شروع فعالیت نصب
تعداد محدودیت‌ها	۵/۸۶۴	شامل ظرفیت، تراز موجودی، انتخاب مسیر، تأمین تقاضا، تقدم و تأخر، انتشار و CVaR
گپ بهینگی نهایی	۰/۰۸٪	اختلاف نسبی جواب بهینه گزارش‌شده توسط حل‌کننده
زمان حل	۶۷/۴ ثانیه	برای نمونه عددی پایه با چهار سناریو

۵-۱- مقایسه عملکرد راهبردهای لجستیکی

برای ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی، ابتدا سه راهبرد اصلی زنجیره تأمین با یکدیگر مقایسه شدند. در راهبرد نخست، هیچ‌یک از هاب‌های 4PL فعال نمی‌شوند و تمام قطعات به‌صورت مستقیم از کارخانه‌ها به زون‌های نصب ارسال می‌گردند. در راهبرد دوم، تمام قطعات الزاماً از مسیر هاب‌های 4PL عبور می‌کنند. در راهبرد سوم، مدل پیشنهادی آزاد است که برای هر نوع قطعه، هر زون نصب و هر دوره زمانی، میان مسیر مستقیم و مسیر مبتنی بر 4PL تصمیم‌گیری کند. نتایج کلی مقایسه این سه راهبرد در جدول۱۳ ارائه شده است.

جدول ۱۳ مقایسه عملکرد سه راهبرد لجستیکی

شاخص عملکرد	بدون 4PL	مشارکت کامل 4PL	مشارکت انتخابی4PL
هزینه مورد انتظار زنجیره تأمین (میلیون ریال)	۴۷/۸۵۰	۴۵/۹۳۰	۴۳/۲۱۰
تأخیر مورد انتظار نصب (هفته)	۱/۲۳	۰/۷۰	۰/۵۳
تأخیر مورد انتظار نصب (روز کاری)	۸/۶	۴/۹	۳/۷
ریسک لجستیکی نرمال‌شده	۱۰۰/۰	۷۸/۴	۶۹/۱
CVaR زیان کل (میلیون ریال)	۶۸/۴۰۰	۵۷/۲۰۰	۵۱/۰۰۰
انتشار کربن مورد انتظار (تن CO2e)	۸/۴۲	۹/۱۰	۷/۷۸
سطح خدمت تحویل به‌موقع	۹۱/۲٪	۹۵/۸٪	۹۷/۱٪

بر اساس نتایج جدول ۱۳، راهبرد مشارکت انتخابی 4PL بهترین عملکرد کلی را در میان سه راهبرد دارد. در این حالت، هزینه مورد انتظار زنجیره تأمین به ۴۳/۲۱۰ میلیون ریال می‌رسد که نسبت به حالت بدون 4PL حدود ۹.۷ درصد و نسبت به مشارکت کامل 4PL حدود۵.۹ درصد کمتر است. همچنین، تأخیر مورد انتظار نصب از ۸.۶ روز کاری در حمل مستقیم و ۴.۹ روز کاری در مشارکت کامل، به ۳/۷ روز کاری کاهش می‌یابد. این کاهش نشان می‌دهد انتخاب هدفمند مسیر 4PL برای قطعات بحرانی، بدون الزام همه قطعات به حمل دومرحله‌ای، تعادل بهتری میان هزینه و قابلیت اطمینان ایجاد می‌کند.

از منظر ریسک نیز، شاخص ریسک لجستیکی نرمال‌شده از ۱۰۰.۰ در حالت بدون 4PL به ۶۹/۱ در حالت مشارکت انتخابی کاهش یافته و مقدار CVaR زیان کل نیز با ۵۱/۰۰۰ میلیون ریال کمترین مقدار را در میان سه راهبرد دارد. از نظر زیست‌محیطی، مشارکت کامل 4PL به دلیل عبور همه جریان‌ها از هاب و افزایش حمل دومرحله‌ای، بیشترین انتشار را ایجاد می‌کند؛ در مقابل، مشارکت انتخابی با ترکیب مسیرهای مستقیم کوتاه‌تر و مسیرهای هاب‌محور برای قطعات حساس، انتشار را در سطح ۷/۷۸ تن CO2e نگه می‌دارد.

۵-۲- تحلیل تصمیمات بهینه، انتخاب مسیر و حساسیت مدل

پس از مقایسه کلی راهبردها، تصمیمات بهینه مدل در حالت مشارکت انتخابی 4PL موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل از هر سه کارخانه برای تأمین قطعات استفاده کرده است، اما سهم کارخانه‌ها بر اساس ترکیبی از هزینه تولید، فاصله تا پروژه، ظرفیت تولید، ریسک مسیر و اثر قطعات بر برنامه نصب متفاوت است. جدول ۱۴ سهم هر کارخانه از کل تأمین را نشان می‌دهد.

جدول ۱۴ الگوی بهینه انتخاب کارخانه‌ها در حالت مشارکت انتخابی 4PL

کارخانه	مقدار تأمین (تن)	سهم از کل تأمین
F1	۲۲۵	۴۳/۳٪
F2	۱۸۵	۳۵/۶٪
F3	۱۱۰	۲۱/۱٪
جمع	۵۲۰	۱۰۰٪

بر اساس جدول ۱۴، کارخانه F1 بیشترین سهم تأمین را دارد. این موضوع عمدتاً ناشی از فاصله کمتر این کارخانه تا پروژه و هاب H1 و در نتیجه هزینه و ریسک حمل پایین‌تر است. کارخانه F2 نیز به دلیل ظرفیت مناسب و موقعیت نسبی مطلوب در شبکه، سهم قابل‌توجهی از تأمین تیرهای اصلی و قطعات میانی را برعهده‌گرفته است. کارخانه F3 با وجود فاصله بیشتر تا پروژه، به دلیل هزینه تولید پایین‌تر، برای بخشی از قطعات کم‌حساس‌تر انتخاب شده است. این نتیجه نشان می‌دهد مدل صرفاً ارزان‌ترین کارخانه را انتخاب نمی‌کند، بلکه مجموعه‌ای از معیارهای اقتصادی، عملیاتی و ریسک‌محور را به‌صورت هم‌زمان در تصمیم‌گیری لحاظ می‌کند.

نتایج فعال‌سازی هاب‌ها نیز نشان داد که هر دو هاب 4PL در راهکار بهینه فعال شده‌اند، اما نقش آن‌ها در شبکه متفاوت است. جدول۱۵ مقدار عبوری از هر هاب و نقش اصلی آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱۵ الگوی فعال‌سازی و استفاده از هاب‌های 4PL

هاب 4PL	مقدار عبوری از هاب (تن)	نقش اصلی در شبکه
H1	۲۱۰	تجمیع قطعات سنگین و ستون‌ها
H2	۱۲۵	ارسال مرحله‌ای قطعات حساس به زمان
جمع مسیر 4PL	۳۳۵	

مطابق جدول ۱۵، هاب H1 به دلیل ظرفیت بالاتر، برای تجمیع و مدیریت قطعات سنگین مانند ستون‌ها و بخشی از تیرهای اصلی انتخاب شده است. در مقابل، هاب H2 به دلیل فاصله کمتر تا پروژه، برای تحویل‌های مرحله‌ای و قطعات حساس به زمان مناسب‌تر بوده است. این نتیجه نشان می‌دهد هاب‌های 4PL لزوماً نقش یکسانی در شبکه ندارند و مدل، نقش هر هاب را بر اساس ظرفیت، موقعیت مکانی، نوع قطعه و حساسیت زمانی تعیین می‌کند.

در ادامه، الگوی انتخاب مسیر برای هر گروه قطعه بررسی شد. جدول۱۶ مقدار قطعات حمل‌شده از مسیر 4PL و مسیر مستقیم را نشان می‌دهد.

جدول ۱۶ الگوی بهینه انتخاب مسیر بر اساس نوع قطعه

نوع قطعه	مقدار کل (تن)	مقدار از مسیر 4PL (تن)	مقدار حمل مستقیم (تن)	سهم مسیر 4PL
ستون‌ها	۱۶۰	۱۲۵	۳۵	۷۸/۱٪
تیرهای اصلی	۱۵۰	۹۸	۵۲	۶۵/۳٪
تیرهای فرعی	۱۱۰	۴۴	۶۶	۴۰/۰٪
بادبندها	۵۵	۳۰	۲۵	۵۴/۵٪
اتصالات و پلیت‌ها	۴۵	۳۸	۷	۸۴/۴٪
جمع	۵۲۰	۳۳۵	۱۸۵	۶۴/۴٪

نتایج جدول ۱۶ نشان می‌دهد که ستون‌ها و اتصالات بیشترین سهم استفاده از مسیر 4PL را دارند. ستون‌ها به دلیل وزن بالا، نیاز به هماهنگی حمل سنگین و اثر مستقیم بر شروع فعالیت‌های بعدی نصب، قطعاتی بحرانی محسوب می‌شوند. اتصالات و پلیت‌ها نیز با وجود وزن کمتر، از نظر توالی نصب بسیار حساس هستند؛ زیرا نبود یک اتصال کوچک می‌تواند نصب ستون یا تیر اصلی را متوقف کند. بنابراین، مدل برای این گروه‌ها مسیر 4PL را ترجیح می‌دهد تا از طریق تجمیع، کنترل، دپوی موقت و ارسال مرحله‌ای، احتمال توقف فعالیت نصب کاهش یابد.

در مقابل، تیرهای فرعی سهم بیشتری از حمل مستقیم دارند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل برای قطعاتی که حساسیت کمتری نسبت به توالی نصب دارند یا امکان ارسال مستقیم آن‌ها از نظر هزینه و کربن مناسب‌تر است، استفاده از 4PL را ضروری نمی‌داند .بنابراین، تصمیم استفاده از 4PL در مدل پیشنهادی فقط تابع وزن قطعه نیست، بلکه هم‌زمان به اهمیت نصب، ریسک مسیر، فاصله، ظرفیت هاب، جریمه تأخیر و محدودیت انتشار کربن وابسته است.

برای بررسی نقش ریسک‌گریزی در تصمیمات مدل، تحلیل حساسیت نسبت به وزن CVaR انجام شد. نتایج این تحلیل در جدول ۱۷ ارائه شده است.

جدول ۱۷ تحلیل حساسیت نسبت به وزن CVaR

وزن CVaR	هزینه مورد انتظار (میلیون ریال)	CVaR زیان کل (میلیون ریال)	تأخیر مورد انتظار (روز کاری)	سهم مسیر4PL
۰.۱۰	۴۲/۷۸۰	۵۵/۹۰۰	۴/۸	۵۶٪
۰.۲۰	۴۳/۲۱۰	۵۱/۰۰۰	۳/۷	۶۴٪
۰.۳۰	۴۴/۰۶۰	۴۸/۷۰۰	۳/۱	۷۱٪

بر اساس جدول۱۷ ، افزایش وزن CVaR باعث افزایش سهم استفاده از مسیر 4PL می‌شود. زمانی که وزن CVaR از ۰.۱۰ به ۰.۳۰ افزایش می‌یابد، سهم مسیر 4PL از ۵۶ درصد به ۷۱ درصد می‌رسد .این نتیجه نشان می‌دهد که مدل در شرایط ریسک‌گریزتر، تمایل بیشتری به استفاده از هاب‌های 4PL ، دپوی موقت و ارسال مرحله‌ای قطعات دارد. در نتیجه، مقدار CVaR از ۵۵,۹۰۰ به ۴۸,۷۰۰ میلیون ریال و تأخیر مورد انتظار از ۴.۸ به ۳.۱ روز کاری کاهش می‌یابد، هرچند هزینه مورد انتظار به دلیل افزایش هماهنگی و حمل هاب‌محور کمی بیشتر می‌شود.

تحلیل حساسیت نسبت به سقف انتشار کربن نیز در جدول ۱۸ ارائه شده است.

جدول ۱۸ تحلیل حساسیت نسبت به سقف انتشار کربن

سقف انتشار کربن (تن CO2e)	هزینه مورد انتظار (میلیون ریال)	انتشار واقعی (تن CO2e)	تأخیر مورد انتظار (روز کاری)	سهم مسیر 4PL
۷/۵	۴۴/۳۸۰	۷/۴۹	۴/۲	۵۸٪
۸/۰	۴۳/۲۱۰	۷/۷۸	۳/۷	۶۴٪
۸/۵	۴۲/۷۶۰	۸/۲۱	۳/۵	۶۷٪

نتایج جدول ۱۸ نشان می‌دهد که سخت‌گیرانه‌تر شدن سقف انتشار کربن باعث افزایش هزینه مورد انتظار و کاهش سهم استفاده از مسیر 4PL می‌شود. زمانی که سقف انتشار از ۸.۵ به ۷.۵ تن کاهش می‌یابد، مدل ناچار می‌شود برخی از حمل‌های دومرحله‌ای را حذف کرده و از مسیرهای مستقیم کوتاه‌تر یا ترکیب‌های حمل کم‌انتشارتر استفاده کند. این رفتار نشان می‌دهد محدودیت کربن، مدل را از انتخاب صرفاً ریسک‌گاه یا هزینه‌گاه بازمی‌دارد و تصمیمات را به سمت راهکارهای سازگارتر با الزامات زیست‌محیطی هدایت می‌کند.

برای ارزیابی اثر ظرفیت هاب‌ها بر پایداری راهکار، ظرفیت هر دو هاب 4PL در سه سطح ۸۰ ، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد مقدار پایه تغییر داده شد. نتایج در جدول ۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۱۹ تحلیل حساسیت نسبت به ظرفیت هاب‌های4PL

ضریب ظرفیت هاب‌ها	هزینه مورد انتظار (میلیون ریال)	CVaR زیان کل (میلیون ریال)	تأخیر مورد انتظار (روز کاری)	سهم مسیر4PL
۸۰٪	۴۴/۷۲۰	۵۳/۸۰۰	۴/۵	۵۵٪
۱۰۰٪	۴۳/۲۱۰	۵۱/۰۰۰	۳/۷	۶۴٪
۱۲۰٪	۴۲/۸۶۰	۵۰/۳۰۰	۳/۵	۶۶٪

کاهش ظرفیت هاب‌ها به ۸۰ درصد، سهم مسیر 4PL را کم کرده و باعث افزایش هزینه، تأخیر و CVaR می‌شود؛ زیرا بخشی از قطعات بحرانی ناچار به استفاده از مسیرهای مستقیم یا برنامه‌های حمل کم‌انعطاف‌تر می‌شوند. افزایش ظرفیت تا ۱۲۰ درصد، عملکرد را بهبود می‌دهد، اما مقدار بهبود نسبت به حالت پایه محدود است؛ بنابراین، توسعه ظرفیت هاب زمانی توجیه‌پذیر است که با قطعات بحرانی و محدودیت نصب هم‌راستا باشد.

در مجموع، تحلیل تصمیمات بهینه و حساسیت مدل نشان می‌دهد که 4PL زمانی بیشترین ارزش را ایجاد می‌کند که به‌صورت هدفمند برای قطعات بحرانی، پر ریسک یا حساس به‌توالی نصب مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که CVaR، محدودیت انتشار کربن و ظرفیت هاب‌ها سه عامل کلیدی در جهت‌دهی رفتار مدل هستند؛ CVaR مدل را به سمت راهکارهای ایمن‌تر، محدودیت کربن آن را به سمت مسیرهای کم‌انتشارتر و ظرفیت هاب‌ها آن را به سمت سطح مناسب هماهنگی و دپوی موقت هدایت می‌کند.

۵-۳- بحث یافته‌ها و پیامدهای مدیریتی

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت زنجیره تأمین قطعات پیش‌ساخته فولادی در پروژه‌های شهری، تنها با کاهش هزینه حمل یا انتخاب ارزان‌ترین کارخانه امکان‌پذیر نیست. قطعات باید متناسب با توالی نصب، ظرفیت دپوی کارگاه، محدودیت ناوگان، شرایط ترافیکی و ریسک مسیرها منتقل شوند؛ زیرا تأخیر در قطعات بحرانی می‌تواند موجب توقف نصب و تأخیر زنجیره‌ای شود. نتایج نشان داد که حمل مستقیم، اگرچه ساده‌تر است، در برابر اختلالات آسیب‌پذیرتر بوده و مشارکت کامل لجستیک طرف چهارم نیز به دلیل افزایش حمل دومرحله‌ای، هزینه و انتشار کربن، همیشه بهینه نیست. بنابراین، استفاده انتخابی از لجستیک طرف چهارم بر اساس ویژگی قطعات، اهمیت نصب، ریسک مسیر و محدودیت‌های زیست‌محیطی مناسب‌تر است.

از منظر مدیریتی، تصمیم‌گیری درباره استفاده از لجستیک طرف چهارم باید در سطح قطعه و فعالیت نصب انجام شود. قطعاتی مانند ستون‌ها و اتصالات به دلیل نقش بحرانی در توالی نصب، وابستگی بالا به کنترل کیفیت تحویل و هزینه زیاد توقف کارگاه، برای مسیر4PL مناسب‌ترند؛ درحالی‌که برای قطعات کم‌حساس‌تر مانند تیرهای فرعی، حمل مستقیم می‌تواند اقتصادی‌تر و کم‌کربن‌تر باشد. همچنین، اتصال برنامه تأمین به برنامه نصب موجب می‌شود پیمانکار بتواند ظرفیت هاب، نوع ناوگان و زمان ارسال را پیش از ایجاد گلوگاه تنظیم کند. برای شرکت‌های 4PL نیز نتایج نشان می‌دهد ارزش پیشنهادی اصلی در ارائه یک خدمت یکسان برای همه قطعات نیست، بلکه در طراحی بسته‌های خدمت تفکیکی برای قطعات بحرانی، تحویل‌های مرحله‌ای و سناریوهای پرریسک است.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

پروژه‌های سازه فولادی پیش‌ساخته به دلیل وابستگی میان تولید کارخانه‌ای، حمل قطعات، دپوی موقت، توالی نصب و محدودیت‌های کارگاه، نیازمند مدیریت یکپارچه زنجیره تأمین هستند. در این پروژه‌ها، تأخیر در تحویل قطعات بحرانی می‌تواند فعالیت‌های نصب را متوقف کرده و تأخیر زنجیره‌ای ایجاد کند. بنابراین، تصمیمات تأمین و حمل باید هم‌زمان هزینه، زمان، ریسک، ظرفیت، انتشار کربن و برنامه نصب را در نظر گیرند.

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط، سناریومحور و ریسک‌گریز برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین و نصب قطعات پیش‌ساخته فولادی با مشارکت لجستیک طرف چهارم ارائه شد. مدل پیشنهادی تصمیماتی مانند انتخاب کارخانه، فعال‌سازی هاب، تعیین مسیر حمل، تخصیص ناوگان، کنترل موجودی، رعایت تقدم و تأخر نصب و محاسبه تأخیر فعالیت‌ها را یکپارچه می‌کند. همچنین، عدم‌قطعیت‌های عملیاتی از طریق سناریوها لحاظ شده و برای کنترل ریسک سناریوهای بحرانی از CVaR و برای رعایت پایداری از محدودیت انتشار کربن استفاده شده است.

نتایج مطالعه موردی نشان داد که مشارکت انتخابی لجستیک طرف چهارم نسبت به دو راهبرد بدون لجستیک طرف چهارم و مشارکت کامل لجستیک طرف چهارم عملکرد بهتری دارد. حمل مستقیم، ریسک و تأخیر بیشتری ایجاد می‌کند و مشارکت کامل نیز به دلیل عبور همه قطعات از هاب، می‌تواند حمل دومرحله‌ای و انتشار کربن را افزایش دهد. در مقابل، مشارکت انتخابی قطعات بحرانی را از مسیر لجستیک طرف چهارم مدیریت کرده و قطعات کم‌ریسک‌تر را مستقیماً به کارگاه ارسال می‌کند.

دستاورد اصلی پژوهش، ارائه چارچوبی یکپارچه برای تصمیم‌گیری هم‌زمان درباره زنجیره تأمین و نصب قطعات پیش‌ساخته فولادی است که در آن نقش لجستیک طرف چهارم به‌صورت انتخابی و درون‌زا مدل‌سازی می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد ارزش‌آفرینی لجستیک طرف چهارم در مدیریت یکسان همه قطعات نیست، بلکه در شناسایی نقاط بحرانی زنجیره، تخصیص هاب به قطعات پرریسک، کاهش زیان‌های دنباله‌ای و حفظ سقف انتشار کربن است. برای توسعه آتی، می‌توان ظرفیت جرثقیل،

زمان‌بندی اکیپ‌های نصب، ردیابی برخط قطعات، مدل‌سازی BIM، عدم‌قطعیت پویا و باز بهینه‌سازی در حین اجرا را به مدل اضافه کرد.

مراجع

[1] Zohourian M, Pamidimukkala A, Kermanshachi S, et al. Modular construction: A comprehensive review. Buildings. 2025. https://doi.org/10.3390/buildings15122020

[2] Nesarnobari S, Shahzad WM, et al. Offsite construction supply chain management: A scientometric analysis and systematic literature review. Architectural Engineering and Design Management. 2025. https://doi.org/10.1080/17452007.2024.2381497

[3] Li CZ, Wen S, Yi W, Wu H, Tam VWY. Offsite construction supply chain challenges: An integrated overview. Journal of Construction Engineering and Management. 2024. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-14444

[4] Badran H, Arif M, Alam M, Alaqad M, et al. Sustainability-based barriers to adopting offsite construction in Jordan. Engineering, Construction and Architectural Management. 2026. https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2025-0601

[5] Yin L, Zhong RY, Besklubova S, Yang Y, Wang J, et al. Off-site construction logistics in the context of smart BIM: Current practice, challenges and future perspectives. Computers & Industrial Engineering. 2026. https://doi.org/10.2139/ssrn.5564629

[6] Zhang B, Prado G, Rischmoller L, et al. Towards a Supply Chain Integration Theory in Offsite Construction: Insights From Industry Practices. Proceedings of the International Group for Lean Construction. 2025. https://doi.org/10.24928/2025/0214

[7] Yousef M, Eltoukhy AEE, Mostafa AKA, et al. Modelling in Off-Site Construction Supply Chain Management: Future Directions for Cleaner Modular Integrated Construction. Journal of Cleaner Production. 2021.

[8] Liu G, Qin Z, Wu H, Jia L, Zhuo J. Optimizing process efficiency in prefabricated building supply chain: The role of hybrid governance behaviors in reducing transaction costs. Engineering, Construction and Architectural Management. 2026. https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2024-0992

[9] Said H, Cao J. Optimizing Building Prefabrication Strategies by Balancing Modularity and Complicatedness. Journal of Construction Engineering and Management. 2026. https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-17877

[10] Salari SAS, Mahmoudi H, Aghsami A, Jolai F, Jolai S, et al. Off-Site construction Three-Echelon supply chain management with stochastic constraints: A modelling approach. Buildings. 2022. https://doi.org/10.3390/buildings12020119

[11] Helli SS, Mokhtari H, Dehnavi S. A mathematical modelling for integrated construction and production supply chain network design. Scientific Reports. 2025. https://doi.org/10.1038/s41598-025-21137-9

[12] Cheng H, Huang SK, Lin C. Optimal scheduling of off-site construction supply chains under uncertainty using deep recurrent Q-learning. International Journal of Construction Management. 2026. https://doi.org/10.1080/15623599.2026.2632970

[13] Arabzad SM, Ghorbani M, Tavakkoli-Moghaddam R. An evolutionary algorithm for a new multi-objective location-inventory model in a distribution network with transportation modes and third-party logistics providers. International Journal of Production Research. 2015;53:1038-1050. https://doi.org/10.1080/00207543.2014.938836

[14] Heydari J, Bakhshi A. Contracts between an e-retailer and a third party logistics provider to expand home delivery capacity. Computers & Industrial Engineering. 2021:107763. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107763

[15] Hua S, et al. Benefits of third-party logistics firms as financing providers. European Journal of Operational Research. 2021;294:174-187. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.024

[16] Zäpfel G, Wasner M. Planning and optimization of hub-and-spoke transportation networks of cooperative third-party logistics providers. International Journal of Production Economics. 2002;78:207-220. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00152-3

[17] Chong L, Kennedy D, Chan WM. Direct shipping logistic planning for a hub-and-spoke network with given discrete intershipment times. International Transactions in Operational Research. 2006;13:17-32. https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2006.00531.x

[18] Lee D-H, Bian W, Dong M. Multiproduct distribution network design of third-party logistics providers with reverse logistics operations. Transportation Research Record. 2007;2008:26-33. https://doi.org/10.3141/2008-04

[19] Lee H, et al. Designing an integrated logistics network in a supply chain system. KSCE Journal of Civil Engineering. 2013;17:806-814. https://doi.org/10.1007/s12205-013-0087-5

[20] Ghaffari-Nasab N, Ghazanfari M, Teimoury E. Hub-and-spoke logistics network design for third party logistics service providers. International Journal of Management Science and Engineering Management. 2016;11:49-61. https://doi.org/10.1080/17509653.2014.992994

[21] Hu L, et al. Joint design of fleet size, hub locations, and hub capacities for third-party logistics networks with road congestion constraints. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2018;118:568-588. https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.09.002

[22] Tosarkani BM, Amin SH. A multi-objective model to configure an electronic reverse logistics network and third party selection. Journal of Cleaner Production. 2018;198:662-682. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.056

[23] Giannoccaro I. Centralized vs. decentralized supply chains: The importance of decision maker's cognitive ability and resistance to change. Industrial Marketing Management. 2018;73:59-69. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2018.01.034

[24] Mahmoudi A, et al. Product pricing problem in green and non-green multi-channel supply chains under government intervention and in the presence of third-party logistics companies. Computers & Industrial Engineering. 2021;159:107490. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107490

[25] Jamali M-B, Rasti-Barzoki M. A game theoretic approach to investigate the effects of third-party logistics in a sustainable supply chain by reducing delivery time and carbon emissions. Journal of Cleaner Production. 2019;235:636-649. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.348

[26] Vincent FY, Lin S-W, Gunawan A. Design of a two-echelon freight distribution system in an urban area considering third-party logistics and loading–unloading zones. Applied Soft Computing. 2020;97:106707. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106707

[27] Asoodeh M, Mirzapour Al-e-hashem SMJ. An Interactive Possibilistic Programming Approach to Designing a 3PL Supply Chain Network Under Uncertainty. Journal of Quality Engineering and Production Optimization. 2019;4:127-152.

[28] Jayaram J, Tan K-C. Supply chain integration with third-party logistics providers. International Journal of Production Economics. 2010;125:262-271. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.02.014

[29] Li Y, Guo H, Zhang Y. An integrated location-inventory problem in a closed-loop supply chain with third-party logistics. International Journal of Production Research. 2018;56:3462-3481. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1338781

[30] Abbasi S, Saboury A, Jabalameli MS. Reliable supply chain network design for 3PL providers using consolidation hubs under disruption risks considering product perishability: An application to a pharmaceutical distribution network. Computers & Industrial Engineering. 2021;152:107019. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107019

[31] Darvish M, Coelho LC. Sequential versus integrated optimization: Production, location, inventory control, and distribution. European Journal of Operational Research. 2018;268:203-214. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.028

[32] Liu Q, et al. Novel multi-objective resource allocation and activity scheduling for fourth party logistics. Computers & Operations Research. 2014;44:42-51. https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.10.010

[33] Huang M, et al. Supply chain network design considering customer psychological behavior—a 4PL perspective. Computers & Industrial Engineering. 2021;159:107484. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107484

[34] Wang H, et al. Network design for maximizing service satisfaction of suppliers and customers under limited budget for industry innovator fourth-party logistics. Computers & Industrial Engineering. 2021;158:107404. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107404

[35] Yin M, et al. Fourth-party logistics network design with service time constraint under stochastic demand. Journal of Intelligent Manufacturing. 2021:1-25.

[36] Yin M, et al. Fourth-Party Logistics Network Design under Uncertainty Environment. Computers & Industrial Engineering. 2022:108002. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108002

[37] Jiang S, et al. Fourth-party logistics network design with demand surge: A greedy scenario-reduction and scenario-price based decomposition algorithm. International Journal of Production Economics. 2024;269:109135. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109135

[38] Yin M, et al. Multi-period fourth-party logistics network design with the temporary outsourcing service under demand uncertainty. Computers & Operations Research. 2024;164:106564. https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106564

[39] Golmohammadi AM, Hajizadeh Ebrahimi F, Sahraeian R, Abedsoltan H. Closed-loop Supply Chain Network Design: A Comprehensive Mathematical Model and Approximate Solution Method. International Journal of Engineering. 2025;38:2334-2346. https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.10a.10

[40] Golmohammadi A, Norouzi A. An Efficient Imperialist Competitive Algorithm for Solving Location Routing Problem in the Multi-Level Supply Chain Under Fuzzy and Probabilistic Condition. Industrial Innovations. 2023;1:83-101. https://doi.org/10.52547/JII.1.1.83

[41] Goli A, Babaee Tirkolaee E, Golmohammadi A-M, Atan Z, Weber G-W, Ali SS. A robust optimization model to design an IoT-based sustainable supply chain network with flexibility. Central European Journal for Operations Research. 2025;33:1025-1046. https://doi.org/10.1007/s10100-023-00870-4

[42] Golmohammadi AM, Abedsoltan H, Goli A, Ali I. Multi-objective Dragonfly Algorithm for Optimizing a Sustainable Supply Chain under Resource Sharing Conditions. Computers & Industrial Engineering. 2024;187:109837. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109837

[43] Fakhrzad MB, Goodarzian F, Golmohammadi AM. Addressing a Fixed Charge Transportation Problem with Multi-route and Different Capacities by Novel Hybrid Meta-heuristics. Journal of Industrial and Systems Engineering. 2019;12:167-184.