



Original Article

## Robust Scenario-Based Modeling for Green-Resilient Supply Chain Considering Backup Supplier and Hub Location-Allocation (Case Study: Automotive Industry)

Nasir Ahmadpoor\*<sup>ID</sup>  
Salahuddin Ghasimi\*\*<sup>ID</sup>  
Kamyar Chalaki\*\*\*<sup>ID</sup>  
Heirsh Soltanpanah\*\*\*\*<sup>ID</sup>

### Extended Abstract

**Introduction and Purpose:** Implementing environmental requirements along with reducing logistics costs, selecting sustainable suppliers, and appropriately managing disruptions are among the critical and challenging issues in optimal supply chain management. These issues are especially important in sensitive and complex industries such as the automotive industry, because these industries require precise, coherent, and practical planning throughout their supply chains to maintain their survival, compete in global markets, and grow sustainably. The main objective of this study is to present a multi-objective, robust, scenario-based optimization model that is capable of designing a green, resilient, and flexible network with multi-product, multi-cycle, multi-material, and multi-level characteristics, while effectively managing uncertainties in supply and demand.

**Methods:** The issues of location and allocation of hubs and the greenness of the primary and backup suppliers were considered in the network design. Efforts have also been made to reduce costs, meet environmental standards, and increase resilience in network objectives and limitations. The scenario-based robust optimization approach was used in the mathematical model to deal with supply and demand uncertainties. In order to solve the multi-objective problem, 10 small and medium problems were solved by the augmented  $\epsilon$ -constraint method and 10 large problems were solved by the NSGAI and MOPSO algorithms, and the results were evaluated and analyzed from different perspectives. The parameters of the metaheuristic algorithms were determined based on the Taguchi method. Also, the metaheuristic algorithms used were compared with each other based on 5 criteria: error, time, diversity, spacing, and MID.

Received: Sep. 03, 2024; Revised: Feb. 19, 2025; Accepted: May. 27, 2025; Published Online: Jul. 02, 2025.

\* Ph.D. Student, Department of Industrial Management, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.

\*\* Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.

Corresponding Author: [s.ghasimi@iausdj.ac.ir](mailto:s.ghasimi@iausdj.ac.ir)

\*\*\* Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.

\*\*\*\* Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.

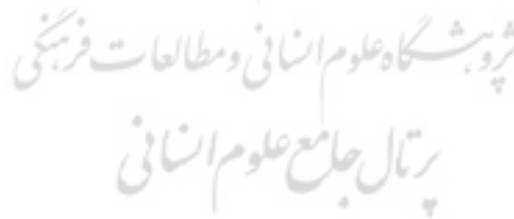


### Original Article

**Results and discussion:** The findings show that the NSGAI algorithm achieves the best results according to the evaluation criteria. The computational results reveal that the proposed network configuration could respond to customer demand green and resiliently. A case study in the automotive industry was presented to determine how the proposed model can meet actual requirements. The location of the hubs, the allocation amount, and their associated distribution centers were considered for Iran Khodro Company. Finally, sensitivity analysis was performed based on several important parameters, and the prediction of the results was described.

**Conclusions:** The results showed that the proposed model minimizes the pollution emitted by the chain members and the fixed and variable costs associated with the members, which include the cost of contracting with the main and supporting suppliers, the cost of establishing the hub, the cost of product production, and the costs of transferring between the chain members. Also, the use of the supporting supplier has been able to greatly improve the resilience of the chain in dealing with disruptions. The designed network has increased the resilience of Iran Khodro Company against these disruptions and can help the company's senior managers to improve the performance of the automotive industry chain. Based on our findings, the capacity of suppliers and hubs is very important, and their disruption will cause changes in network strategies. Our proposed model can help Iran Khodro company achieve some goals such as timely supply of products according to customer needs, optimal use of resources, reducing costs, and increasing flexibility.

**Keywords:** Green Supply Chain; Resilient Supply Chain; Backup Supplier; Hub Location and Allocation; Multi-Objective Optimization; Scenario-Based Robustness.



**How to Cite:** Ahmadpoor, Nasir; Ghasimi, Salahuddin; Chalaki, Kamyar; Soltanpanah, Heirsh (2025). Scenario-based robust modeling for green-resilient supply chain considering backup supplier and hub location-allocation (case study: automotive industry). *Ind. Manag. Persp.*, 15(2), 120-157 (*In Persian*).



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication

license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## مدلسازی استوار مبتنی بر سناریو برای زنجیره تأمین سبز- تاب‌آور با در نظر گرفتن تأمین‌کننده پشتیبان و مکان‌یابی و تخصیص هاب (مطالعه موردی: صنعت خودرو)

•<sup>ID</sup> نصیر احمدپور  
\*\*<sup>ID</sup> صلاح‌الدین قسیمي  
\*\*\*<sup>ID</sup> کامیار چالاکی  
\*\*\*\*<sup>ID</sup> هیرش سلطان‌پناه

### چکیده گسترده

**مقدمه و اهداف:** اجرای الزامات زیست محیطی به همراه کاهش هزینه‌های لجستیکی، انتخاب تأمین‌کنندگان پایدار و مدیریت مناسب اختلالات، از جمله مسائل حیاتی و چالش‌برانگیز در مدیریت بهینه زنجیره تأمین به شمار می‌روند. این موضوعات به ویژه در صنایع حساس و با ماهیت پیچیده مانند صنعت خودرو اهمیت دوچندانی پیدا می‌کنند، چرا که این صنایع برای حفظ تداوم حیات، رقابت در بازارهای جهانی و رشد پایدار، ملزم به برنامه‌ریزی‌های دقیق، منسجم و کاربردی در سراسر زنجیره تأمین خود هستند. هدف اصلی این مطالعه ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه و استوار، مبتنی بر سناریو است که قادر باشد شبکه‌ای سبز، تاب‌آور و انعطاف‌پذیر را با ویژگی‌های چند محصولی، چند دوره‌ای، چند مواد اولیه و چند سطحی طراحی کند و در عین حال، عدم قطعیت‌های موجود در عرضه و تقاضا را به طور مؤثری مدیریت نماید.

**روش‌ها:** مسائل مکان‌یابی و تخصیص هاب و سبز بودن تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان در طراحی شبکه در نظر گرفته شدند. همچنین کاهش هزینه‌ها، برآوردن معیارهای محیط زیست و افزایش تاب‌آوری در اهداف و محدودیت‌های شبکه گنجانده شده است. برای مقابله با عدم قطعیت‌های عرضه و تقاضا، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شد. به منظور حل مسئله چندهدفه ۱۰ مسئله کوچک و متوسط از طریق روش محدودیت اسپیلون تقویت‌شده و ۱۰ مسأله بزرگ توسط الگوریتم‌های NSGAI و MOPSO حل گردید و نتایج حاصله از دیدگاه‌های مختلف ارزیابی و تحلیل شدند. پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری بر اساس روش تاگوچی تعیین شدند. همچنین الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده بر اساس ۵ معیار خطا، زمان، Diversity، Spacing و MID با یکدیگر مقایسه شدند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱.

\* دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران  
\*\* استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

s.ghasimi@iausdj.ac.ir: نویسنده مسئول

\*\*\* استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران  
\*\*\*\* دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

**یافته‌ها:** نتایج نشان می‌دهد که NSGAI الگوریتمی است که با توجه به معیارهای ارزیابی بهترین نتیجه را به دست می‌آورد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که پیکربندی شبکه پیشنهادی می‌تواند به تقاضای مشتریان خود به شیوه‌ای سبز و تاب‌آور پاسخ دهد. یک مطالعه موردی در صنعت خودرو ارائه گردید تا مشخص شود چگونه مدل پیشنهادی می‌تواند نیازهای واقعی را پاسخ دهد. محل استقرار هاب‌ها، میزان تخصیص و مراکز توزیع مرتبط با آنها برای شرکت ایران خودرو در نظر گرفته شدند. در نهایت، تحلیل حساسیت بر اساس چندین پارامتر با اهمیت انجام شد و پیش‌بینی نتایج تشریح گردید.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی آلودگی انتشار یافته توسط اعضای زنجیره و هزینه‌های ثابت و متغیر مرتبط با اعضا که شامل هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان، هزینه تأسیس هاب، هزینه تولید محصول و هزینه‌های انتقال بین اعضای زنجیره می‌باشد را به حداقل می‌رساند. همچنین به کارگیری تأمین‌کننده پشتیبان تا حد زیادی توانسته است تاب‌آوری زنجیره را در مقابله با اختلالات ارتقا دهد. شبکه طراحی شده تاب‌آوری شرکت ایران خودرو را در مقابل این اختلالات افزایش داده است و می‌تواند مدیران ارشد شرکت را به منظور ارتقای عملکرد زنجیره صنعت خودرو کمک نماید. بر اساس یافته‌های ما، اهمیت ظرفیت تأمین‌کنندگان و هاب‌ها بسیار برجسته است و اختلال در آنها سبب تغییر در راهبردهای شبکه می‌شود. مدل پیشنهادی ما می‌تواند شرکت ایران خودرو را در جهت دستیابی به برخی اهداف از قبیل عرضه به موقع محصولات منطبق با نیاز مشتری، استفاده بهینه از منابع، کاهش هزینه‌ها و افزایش تاب‌آوری کمک نماید.

**کلیدواژه‌ها:** زنجیره تأمین سبز؛ زنجیره تأمین تاب‌آور؛ تأمین‌کننده پشتیبان؛ مکان‌یابی و تخصیص هاب؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو.

ژورنال علمی و مطالعات فرهنگی  
رتال جامع علوم انسانی

**استناددهی:** احمدپور، نصیر؛ قسیم، صلاح‌الدین؛ چالاک، کامیار؛ سلطان‌پناه، هیرش (۱۴۰۴). مدل‌سازی استوار مبتنی بر سناریو برای زنجیره تأمین سبز- تاب‌آور با در نظر گرفتن تأمین‌کننده پشتیبان و مکان‌یابی و تخصیص هاب (مطالعه موردی: صنعت خودرو). چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۵(۲)، ۱۲۰-۱۵۷.



## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، پدیده جهانی‌سازی به شدت بر شیوه مدیریت شرکت‌ها در هر دو سطوح استراتژیک و عملیاتی تأثیر گذاشته است [۲۵]. دغدغه‌های اصلی مدیران شرکت‌ها عبارتند از: ۱- کاهش هزینه‌های تولید در هنگام رشد و توسعه اقتصادی، ۲- در نظر گرفتن مسائل محیط زیست مانند اثرات کربن و ۳- چالش‌های منتج‌شده از گسترش مرزهای زنجیره تأمین از قبیل ریسک‌ها، اختلالات، تأمین‌کنندگان و مکان-یابی شبکه‌های توزیع و غیره [۷۱، ۳۹، ۳۶].

علاء و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۴) اذعان کردند که نگرانی‌های زیست محیطی در کشورهای در حال توسعه روند افزایشی داشته و در نتیجه مدیریت هزینه‌های زنجیره تأمین با چالش‌های جدی مواجه شده است. چنین چالش‌هایی اغلب از سوی مصرف‌کنندگان نهایی و دولت‌ها بر شرکت‌ها تحمیل می‌شوند. به عبارتی، توجه به جنبه‌های محیط زیست و رقابت‌پذیری، شرکت‌ها را وادار می‌کند که رویکردهای مدیریتی مختلفی را در خصوص اقدامات استراتژیکی و عملیاتی (از قبیل حمل و نقل، قرارداد با تأمین‌کنندگان، انتخاب فناوری‌های تولید، مکان‌یابی تسهیلات و غیره) خود به کار گیرند [۱، ۱۴، ۶۶، ۷۶]. در این راستا، شرکت‌ها تلاش می‌کنند تا بر استراتژی‌های توسعه سبز تمرکز کنند تا بتوانند فشارهای محیطی و فرآیندهای داخلی را مدیریت نمایند. در واقع، زنجیره تأمین سبز به دنبال ارتقای سود اقتصادی از طریق ایجاد منافع محیط زیست و کاهش ریسک‌های مرتبط با آن است [۴۷].

چالش عمده دیگر در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین، اختلالات ایجادشده در زنجیره است که بر توانایی زنجیره تأمین در ارائه خدمات و محصولات نهایی تأثیر می‌گذارد [۷۷]. به عبارتی، زنجیره تأمین در لحظه‌ای که باید نسبت به اختلالات واکنش مناسب نشان دهد تا به اهداف خود برسد، ناتوان می‌شود. در دهه‌های گذشته، این به کرات مشاهده شده است و هزینه‌های قابل توجهی را بر شرکت‌ها تحمیل کرده است [۴۴، ۶۶]. مدل طراحی مرسوم برای این حالت از زنجیره تأمین، مدل تاب‌آوری است که می‌تواند در مقابل اختلالات شدید و وضعیت‌های حاد از قبیل اختلال در عرضه، تقاضا، حمل و نقل، میزان تولید، تحویل به بازار و ظرفیت تسهیلات را پشتیبانی کند [۱۸، ۷۶].

طی دهه‌های اخیر، مسئله مکان‌یابی هاب‌ها (واسطه‌های توزیع) با هدف طراحی انواع شبکه‌های توزیع (از قبیل جابه‌جایی، حمل و نقل کالا، جمع‌آوری و توزیع محصولات، مخابره اطلاعات و غیره) به عنوان یکی از مهمترین مسائل در زمینه شبکه‌های زنجیره تأمین شناخته شده است [۳۰، ۳۷، ۵۱]. مسئله مکان‌یابی هاب و تخصیص به تعیین نقاط ترابری غیرمستقیم در یک شبکه توزیع و تخصیص نقاط مبدأ و مقصد به هاب‌ها اشاره دارد. کالاهای و محصولات از نقاط مبدأ به وسیله هاب‌ها جمع‌آوری شده، جابه‌جایی میان هاب‌های مدنظر صورت می‌گیرد و در نهایت، توزیع محصولات توسط هاب‌ها با تجمیع جریان‌هایی که دارای مقاصد یکسان هستند، به سوی مقاصد انجام می‌شود. با توجه به مفروضات هر مسئله، تعداد هاب‌هایی که انتخاب می‌شوند و نحوه تخصیص به آنها بسته به نوع مسئله، متفاوت است [۶۲].

به دنبال رویکردها و تصمیمات استراتژیک در طراحی شبکه زنجیره تأمین، انتخاب تأمین‌کننده مناسب موضوع دیگری است که توجه به آن برای افزایش رقابت‌پذیری زنجیره تأمین ضرورت دارد [۲۲، ۵۶]. در حقیقت، انتخاب مجموعه مناسبی از تأمین‌کنندگان برای ارتباط پایدار امری بسیار مهم و حیاتی برای موفقیت یک زنجیره تأمین است. از آنجا که شرکت‌های تولیدی وابستگی زیادی به تأمین‌کنندگان خود دارند، پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم تصمیم‌گیری درباره انتخاب تأمین‌کنندگان به طور واضح نمایان می‌شود [۴۵]. از آنجا که هزینه تأمین مواد اولیه بخش بزرگی از بهای تمام شده محصول را در بر می‌گیرد [۲۸]، انتخاب تأمین‌کنندگان مناسب می‌تواند نقشی کلیدی و با اهمیت در کارایی و اثربخشی زنجیره ایجاد نماید و رقابت‌پذیری شرکت در حوزه‌های کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری و انعطاف‌پذیری را ارتقا دهد [۳۸].

در این مطالعه، یک مدل ریاضی چند هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز و تاب‌آور در شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن مناسب‌ترین تأمین‌کننده و مکان‌یابی هاب‌های توزیع فرموله‌بندی می‌شود که ما شبکه پیشنهادی را بر اساس داده‌های صنعت خودرو ارزیابی کردیم. از آنجا که شرکت‌های اندکی در صنعت خودروسازی در ایران وجود دارد و محل این شرکت‌ها در یک منطقه از کشور متمرکز شده‌اند،

لذا توجه به هزینه‌های انتقال محصولات تولیدی به سایر مناطق کشور و نحوه انتقال می‌تواند موضوع مهمی به نظر برسد. همچنین با توجه به اینکه همواره شرکت‌های خودروسازی ایرانی در برآورده نمودن تقاضای بازار با اختلال مواجه بودند و بخشی از این اختلال به دلیل عدم تأمین به موقع قطعات می‌باشد، لذا انتخاب مناسب‌ترین تأمین‌کنندگان در شرایط اختلال می‌تواند در کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین خودرو مؤثر باشد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه صنعت خودرو یک صنعت مادر محسوب می‌شود و با حساسیت‌های زیادی در ایران مواجه است، دولت توجه ویژه‌ای در خصوص انطباق محصولات و فعالیت‌های این صنعت با معیارهای محیط زیست دارد.

با توجه به مباحث فوق‌الذکر و به بهترین دانش از نویسندگان، شکاف مطالعاتی بر اساس توصیف ادبیات مربوطه نشان می‌دهد که در مطالعات گذشته موارد زیر به طور کامل و اثربخش بررسی نشده‌اند

- هیچ یک از مطالعات قبلی بر مسئله زنجیره تأمین سبز و تاب‌آور در شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن دو مفهوم مکان‌یابی و تخصیص هاب‌های توزیع و تأمین‌کننده پشتیبان تمرکز نکرده‌اند
- در مطالعات گذشته در حوزه تاب‌آوری شبکه، اختلالات احتمالی از قبیل ظرفیت تأمین‌کنندگان، تقاضا و ظرفیت هاب‌ها به طور همزمان کمتر دیده شده‌اند. در این راستا، ما مدل ریاضی را بر اساس بهینه‌سازی استوار سناریو محور فرموله‌بندی می‌کنیم. هدف پژوهشگران در قالب حداقل‌سازی دو تابع هدف به شرح زیر فرموله‌بندی می‌شود:
- تابع هدف اول شامل هزینه‌های ثابت زنجیره تأمین (هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان و هزینه تأسیس هاب)، هزینه‌های متغیر زنجیره تأمین (هزینه خرید مواد اولیه و هزینه یک واحد تولید محصول) و هزینه‌های انتقال بین اعضای زنجیره است
- تابع هدف دوم شامل آلودگی انتشار یافته توسط تولیدکنندگان و آلودگی انتشار یافته به دلیل انتقال محصول بین اعضای زنجیره تأمین است

در نهایت به منظور حل مسئله چندهدفه از روش محدودیت اسیلون تقویت شده در مسائل کوچک و از تکنیک‌های فراابتکاری در مسائل متوسط و بزرگ استفاده می‌شود. بهینه‌سازی چندهدفه نشان‌دهنده دسته مهمی از تکنیک‌های بهینه‌سازی است که می‌تواند به طور مستقیم برای حل تعداد زیادی از مسائل عملی و دنیای واقعی به کار گرفته شود [۲۶، ۷۴]. بسیاری از روش‌های حل مسائل چندهدفه مبتنی بر رویکردهای فراابتکاری توسط محققان در سال‌های اخیر پیشنهاد و به کار گرفته شده‌اند که در این مطالعه از الگوریتم‌های NSGAI و MOPSO برای حل مسئله تحقیق استفاده می‌شود و کارایی این دو تکنیک در حل مسئله تحقیق با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

ادامه تحقیق حاضر به شرح زیر سازمان‌دهی می‌گردد. در بخش ۲، ادبیات مرتبط با موضوع تحقیق تشریح می‌شود. در بخش ۳ به روش‌شناسی پژوهش که شامل مفروضات مسئله، مدل ریاضی و رویکردهای حل مسئله است اشاره می‌گردد. بخش ۴ به تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش اختصاص دارد که شامل آزمایش‌های محاسباتی، مطالعه موردی و تحلیل حساسیت به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی است. در نهایت، بخش ۵ با نتیجه‌گیری و پیشنهادهای تحقیق به پایان می‌رسد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

**زنجیره تأمین سبز.** اسدخانی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) بیان کردند که در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی در فرآیندهای مدیریت زنجیره تأمین (شامل طراحی، انتخاب و منبع‌یابی مواد، ساخت و تولید، تحویل محصول نهایی به مشتری و مدیریت محصول پس از مصرف و طی شدن عمر مفید آن) به معنای زنجیره تأمین سبز است. سبز شدن زنجیره تأمین به معنای ترکیب معیارهای زیست محیطی با تصمیم‌گیری‌های سازمانی و روابط بلندمدت با اعضای زنجیره است [۵، ۱۲، ۲۴]. زنجیره تأمین سبز عبارت است از مجموعه اقدامات داخلی و خارجی بنگاه در سراسر زنجیره تأمین که به بهبود عملکرد محیط زیست و جلوگیری از ایجاد آلودگی منجر می‌شود [۷۷]. زنجیره تأمین سبز به عنوان یک رویکرد

مدیریتی است که به دنبال حداقل کردن اثرات زیست محیطی محصولات سازمان می‌باشد [۷]. نورجانی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) معتقدند فلسفه زنجیره تأمین سبز به چگونگی استفاده شرکت‌ها از تأمین‌کنندگان، تکنولوژی و توانایی خود برای یکپارچه‌سازی چالش‌های زیست محیطی و افزایش مزیت رقابتی اشاره دارد [۶۷]. آنها چالش‌های محیط زیستی را در قالب میزان مصرف انرژی و انتشار آلودگی توسط اعضای زنجیره به منظور هرگونه فعالیت در سراسر زنجیره در قالب تولید، انتقال و مصارف بعد از فروش تعریف کردند. با توجه به مطالب فوق‌الذکر، در این تحقیق به منظور دستیابی به یک مدل زنجیره تأمین سبز در دنیای واقعی به حداقل‌سازی انتشار کربن توسط تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان و نیز جابه‌جایی‌های صورت گرفته در زنجیره تأکید شده است

**زنجیره تأمین تاب‌آور.** افزایش روزافزون اختلالات، توجه مدیران را برای محافظت از زنجیره تأمین در برابر عدم قطعیت‌ها ضروری می‌کند [۸، ۲۴، ۸۴]. مطالعاتی مختلفی به قابلیت بازگشت زنجیره تأمین به حالت معمول در مواجهه با رویدادهای مخرب و اختلال‌ها برای حفظ عملکرد شبکه اشاره کردند [۳۹، ۷۳]. کلیبی و مارتل<sup>۲</sup> (۲۰۱۲) تعدادی از روش‌های مدل‌سازی تاب‌آوری را برای توزیع در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه کردند که از جمله می‌توان به مدل‌سازی استوار سناریو محور اشاره نمود. آنها همچنین شاخص‌های مختلف اندازه‌گیری تاب‌آوری را برای ارزیابی مدل‌های پیشنهادی معرفی کردند [۵۴]. شین و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۳) از دو استراتژی کاهش ریسک به عنوان تقویت‌کننده و پیش‌بینی‌کننده موجودی همه اعضای زنجیره برای اختلالات تصادفی در یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی مختلط دو مرحله‌ای استفاده کردند [۷۰]. مینا و سرماه<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) تأمین‌کنندگان پشتیبان در شبکه را در نظر گرفتند تا با ریسک‌های اختلال تأمین‌کننده در مسئله تخصیص سفارش مقابله کنند [۶۰]. ساویک<sup>۵</sup> (۲۰۱۴) انعطاف‌پذیری را با نگه داشتن موجودی ایمنی در مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش اعمال کرد. با توجه به مباحث مطروحه، ما به منظور ارتقای تاب‌آوری زنجیره به در نظر گرفتن تأمین‌کننده پشتیبان و سناریوسازی در خصوص ظرفیت و موجودی انبار اعضای زنجیره و تقاضا تمرکز کردیم [۷۹].

**مکان‌یابی هاب.** مکان‌یابی و تخصیص هاب و تصمیم‌گیری در خصوص تسهیلات از مسائل بسیار مهم در مدیریت زنجیره تأمین محسوب می‌شود [۲۹، ۵۲]. این تصمیم یک تخصیص غیر قابل برگشت سرمایه شرکت است و اغلب روی معیارهای اساسی عملکرد زنجیره تأمین از قبیل زمان تأخیر، موجودی، پاسخگویی در برابر تغییرات تقاضا، انعطاف‌پذیری و کیفیت تأثیر زیادی دارد [۲۱]. ضروری است که در رابطه با مکان‌یابی مؤثر و تصمیم‌گیری در این زمینه، مدیران هریک از مکان‌های بالقوه و تأثیر آنها بر عملکرد زنجیره مانند زمان تأخیر، هزینه، موجودی و پاسخگویی را ارزیابی کنند [۵۹]. تسهیلات باید بتوانند مشتریان را برای مدت زمان طولانی سرویس دهند به طوری که تغییرات در تقاضای مشتریان را تا حدی پیش‌بینی کرده باشند، زیرا ممکن است در طول زمان به دلیل تغییر شرایط، تقاضای بعضی از مشتریان افزایش یافته و بعضی دیگر کاهش یابد. بنابراین، با توجه به محدودیت هر هاب در انتقال یا برآوردن تقاضاها، تسهیلات موجود ممکن است نتوانند به طور پیوسته سرویس مناسب و کافی را فراهم کنند [۵۳، ۵۵]. علاوه بر آن با توجه به مقدار سفارش، فاصله مشتری و تولیدکننده از هاب تخصیص یافته به آنها نیز باید مورد اهمیت و توجه قرار گیرند. برای چنین مسائلی به مکان‌یابی و تخصیص اولیه برای تسهیلات و همچنین طراحی جهت مکان‌یابی هاب‌ها (بررسی بهینه بودن موقعیت هر تسهیل با توجه به محدودیت‌های موجود) با هدف مینیمم کردن هزینه‌های تخصیص هر تسهیل به گره‌های غیر هاب نیاز داریم [۳۰]. تخصیص هاب‌ها به دو صورت تکی و چندگانه است [۲۹]. در تخصیص چندگانه، جریان‌های ورودی و خروجی به یک نقطه می‌توانند از چند هاب مختلف تأمین شوند [۵۵]. به طور کلی، مهم‌ترین موارد درباره مسائل مکان-یابی به شرح زیر است [۳]:

- کدام یک از تسهیلات باید مورد استفاده قرار گیرد یا تأسیس شود (به لحاظ موقعیت مکانی)؟
- کدام مشتری باید از کدام تسهیلات سرویس دریافت کند تا هزینه به حداقل برسد؟

1. Nurjanni et al  
2. Klibi & Martel  
3. Qin et al  
4. Meena & Sarmah  
5. Sawik

در این مطالعه به منظور دستیابی به یک مدل در دنیای واقعی و برآوردن سیاست‌ها در صنعت خودرو، تصمیمات مربوط به هاب‌ها بر اساس تعداد، محل، ظرفیت و رویکرد تک تخصیص مدلسازی شده است

**انتخاب تأمین‌کننده.** انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش از آنها یکی از موضوعات مهم در مدیریت زنجیره تأمین هستند، زیرا عملکرد تأمین‌کننده بر کیفیت کالا و خدمات و رقابت‌پذیری همه اعضای زنجیره تأثیر می‌گذارد [۲]. به طور ویژه، در مدیریت زنجیره تأمین سبز انتخاب تأمین‌کننده بر انتشار کربن اثر می‌گذارد که در نتیجه سبز بودن زنجیره تأمین را تعیین می‌کند [۸۳]. موضوع مهم دیگر، نحوه تخصیص سفارش از تأمین‌کنندگان است، زیرا این امر مستقیماً هزینه‌های خرید را تعیین می‌کند و بر هزینه کل زنجیره و رقابت‌پذیری آن اثر می‌گذارد [۸، ۵۸]. مطالعات گذشته نشان دادند هنگامی که شرکت‌ها قصد دارند تاب‌آوری زنجیره را از طریق حوزه تأمین‌کنندگان افزایش دهند، آنها در ابتدا ریسک‌های مرتبط با تأمین‌کنندگان را شناسایی می‌کنند و سپس راه‌حل‌های مرتبط با مدیریت ریسک‌ها و ارتقای انعطاف‌پذیری از قبیل سطح‌بندی تأمین‌کنندگان و تأمین‌کننده پشتیبان را به کار می‌گیرند [۵۶]. بنابراین، انتخاب مناسب‌ترین تأمین‌کنندگان و همکاری راهبردی و بلندمدت از اقدامات ضروری در زنجیره تأمین است که نتایج مختلفی از جمله کاهش هزینه‌ها، کاهش ضایعات و دوباره‌کاری، بهبود مستمر کیفیت، برآوردن شاخص‌های محیط زیست و افزایش انعطاف‌پذیری برای برآوردن نیازهای ذینفعان از قبیل سهامداران، مشتریان و دولت را به همراه دارد [۳۲، ۳۴، ۴۳]. در این مطالعه، مدل پیشنهادی ما علاوه بر انتخاب تأمین‌کننده سبز که در مصرف بهینه انرژی و کاهش انتشار کربن در زنجیره کمک می‌کند، به استراتژی در نظر گرفتن تأمین‌کننده پشتیبان به منظور ارتقای تاب‌آوری زنجیره متمرکز شده است

**بهینه‌سازی استوار سناریو محور.** رویکرد استوار یک روش بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت در مسائل ریاضی و حوزه‌های مختلف تحقیق در عملیات است [۴۸]. بهینه‌سازی استوار یک روش مدل‌سازی است که با ابزارهای محاسباتی ترکیب می‌شود تا مسائل بهینه‌سازی را که در آن داده‌های غیرقطعی وجود دارند، پردازش نماید [۸۱]. بر اساس مطالعات گذشته، بهینه‌سازی استوار دارای مدل‌های مختلفی از قبیل استوار شدید<sup>۱</sup> [۹]، استوار محدودشده کاردینالیتی<sup>۲</sup> [۴۱]، استوار قابل تنظیم<sup>۳</sup> [۲۷]، استوار سبک<sup>۴</sup> [۱۷]، استوار پیشمانی<sup>۵</sup> [۴۰]، استوار قابل بازیابی<sup>۶</sup> [۱۵] و استوار مبتنی بر سناریو<sup>۷</sup> [۷۸] است. در این مطالعه، ما از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو استفاده کردیم. رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو تکنیکی برای به دست آوردن راه‌حلی برای بهینه‌سازی قوی و مسائل بهینه‌سازی محدود به شانس بر اساس نمونه‌ای از محدودیت‌ها است [۷۸]. همچنین به استدلال استقرایی در مدلسازی و تصمیم‌گیری مربوط می‌شود. رویکردهای مختلفی به منظور بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو وجود دارد که یکی از آنها به در نظر گرفتن سناریوها در بخش مدلسازی اشاره دارد [۴۷]. در این رویکرد که مطالعه حاضر بر آن منطبق شده است، پارامترهایی که در شرایط عدم قطعیت قرار دارند بر اساس سناریوهای مختلف در مدل ریاضی گنجانده شده‌اند

**بررسی مدل‌های ریاضی مرتبط با تحقیق.** جدول ۱، مدل‌های ریاضی زنجیره تأمین مرتبط با مدل تحقیق که در مطالعات گذشته ارائه شدند را بر اساس ویژگی‌های مختلف نشان می‌دهد.

1. Strict Robustness
2. Cardinality constrained Robustness
3. Adjustable Robustness
4. Light Robustness
5. Regret Robustness
6. Recoverable Robustness
7. Scenario-based Robustness

جدول ۱. بررسی مدل‌های زنجیره تأمین در مطالعات گذشته و تحقیق حاضر

| نویسنده (سال)                                | روش مدل‌سازی | ویژگی‌های مسئله | عدم قطعیت | استراتژی‌های تاب‌آوری | نگرش سبز | رویکرد پاسخ به عدم قطعیت          | رویکرد یافتن جواب بهینه       |
|--|--------------|-----------------|-----------|-----------------------|----------|-----------------------------------|-------------------------------|
| کلیبی و مارتل (۲۰۱۲)                         | MILP         | *               | * *       | *                     |          | بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو | سیمپلکس                       |
| سوئیسال و همکاران <sup>۱</sup> (۲۰۱۴) [۸۰]   | MILP         | *               |           | *                     |          | ---                               | سیمپلکس و محدودیت اپسیلون     |
| فتاحی و همکاران <sup>۲</sup> (۲۰۱۵) [۳۳]     | MILP         | *               | *         | *                     |          | بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو | فراابتکاری                    |
| بورتولینی و همکاران <sup>۳</sup> (۲۰۱۶) [۱۱] | LP           | *               |           |                       |          | ---                               | سیمپلکس و محدودیت اپسیلون     |
| محمد و وانگ <sup>۴</sup> (۲۰۱۷) [۶۳]         | MILP         |                 |           |                       |          | ---                               | سیمپلکس                       |
| محمد و وانگ (۲۰۱۷) [۶۴]                      | MILP         |                 |           |                       | *        | ---                               | سیمپلکس                       |
| یری‌آذر و همکاران <sup>۵</sup> (۲۰۱۷) [۶۹]   | MILP         |                 | *         | *                     |          | بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو | سیمپلکس و تقریب میانگین نمونه |
| کونها و همکاران <sup>۶</sup> (۲۰۱۷) [۲۰]     | MINLP        | *               | *         | *                     |          | بهینه‌سازی تصادفی                 | سیمپلکس و تقریب میانگین نمونه |
| گولپیرا و همکاران <sup>۷</sup> (۲۰۱۷) [۴۲]   | MILP         |                 | *         | *                     | *        | بهینه‌سازی استوار                 | سیمپلکس                       |
| امیری عارف و همکاران <sup>۸</sup> (۲۰۱۸) [۴] | MILP         | *               | *         | *                     |          | بهینه‌سازی استوار                 | سیمپلکس و تقریب میانگین نمونه |
| جبارزاده و همکاران <sup>۹</sup> (۲۰۱۸) [۴۹]  | MILP         |                 | *         | *                     | *        | بهینه‌سازی تصادفی فازی            | سیمپلکس و محدودیت اپسیلون     |
| بوتانی و همکاران <sup>۱۰</sup> (۲۰۱۹) [۱۳]   | MINLP        | *               | *         | *                     |          | بهینه‌سازی استوار                 | فراابتکاری                    |
| زهیری و همکاران <sup>۱۱</sup> (۲۰۲۰)         | MILP         | *               | *         | *                     |          | بهینه‌سازی استوار                 | ابتکاری                       |
| بیوکی و همکاران <sup>۱۲</sup> (۲۰۲۰) [۱۰]    | MILP         | *               | *         | *                     |          | ---                               | فراابتکاری                    |
| فیروزی و همکاران <sup>۱۲</sup> (۲۰۲۰) [۳۵]   | MILP         | *               | *         | *                     |          | بهینه‌سازی استوار                 | سیمپلکس و تقریب میانگین نمونه |

1. Soysal et al.
2. Fattahi et al.
3. Bortolini et al.
4. Mohammed & Wang
5. Pariazar et al.
6. Cunha et al.
7. Golpıra et al.
8. Amiri-Aref et al.
9. Jabbarzadeh et al.
10. Bottani et al.
11. Zahirı et al.
12. Biuki et al.

| نویسنده (سال)                               | روش مدل‌سازی | ویژگی‌های مسئله | عدم قطعیت | استراتژی‌های تاب‌آوری | نگرش سبز | رویکرد پاسخ به عدم قطعیت | رویکرد یافتن جواب بهینه                                  |
|---|--------------|-----------------|-----------|-----------------------|----------|--------------------------|--|
| بوسک‌آبادی و همکاران <sup>۱</sup> (۲۰۲۲)    | MILP         | *               | *         | *                     | *        | مدل‌سازی فازی            | فراابتکاری   |
| صالحی و همکاران <sup>۲</sup> (۲۰۲۲)         | MILP         | *               | *         | *                     | *        | بهینه‌سازی استوار        | سیمپلکس  |
| فروزش و همکاران <sup>۳</sup> (۲۰۲۳)         | MILP         | *               | *         | *                     | *        | بهینه‌سازی استوار فازی   | محدودیت اپسیلون تقویت‌شده                                |
| بادجو و ایراپتریتو <sup>۴</sup> (۲۰۲۴) [۶]  | MILP         | *               | *         | *                     | *        | بهینه‌سازی تصادفی        | محدودیت اپسیلون  |
| صادقی و اخوان نیکی <sup>۵</sup> (۲۰۲۴)      | MILP         | *               | *         | *                     | *        | ---                      | شاخه و کران و فراابتکاری                                 |
| ژنگ و همکاران <sup>۶</sup> (۲۰۲۵) [۸۵]      | MILP         | *               | *         | *                     | *        | رویکرد فازی              | فراابتکاری   |
| فلاحی و همکاران <sup>۷</sup> (۲۰۲۵) [۳۱]    | MILP         | *               | *         | *                     | *        | ---                      | فراابتکاری   |
| مقدس‌پور و همکاران <sup>۸</sup> (۲۰۲۵) [۶۱] | MILP         | *               | *         | *                     | *        | بهینه‌سازی استوار        | تحلیل پوششی داده‌ها و محدودیت اپسیلون تقویت‌شده          |
| تحقیق حاضر                                  | MILP         | *               | *         | *                     | *        | بهینه‌سازی استوار        | محدودیت اپسیلون تقویت‌شده و فراابتکاری (NSGAI) و (MOPSO) |

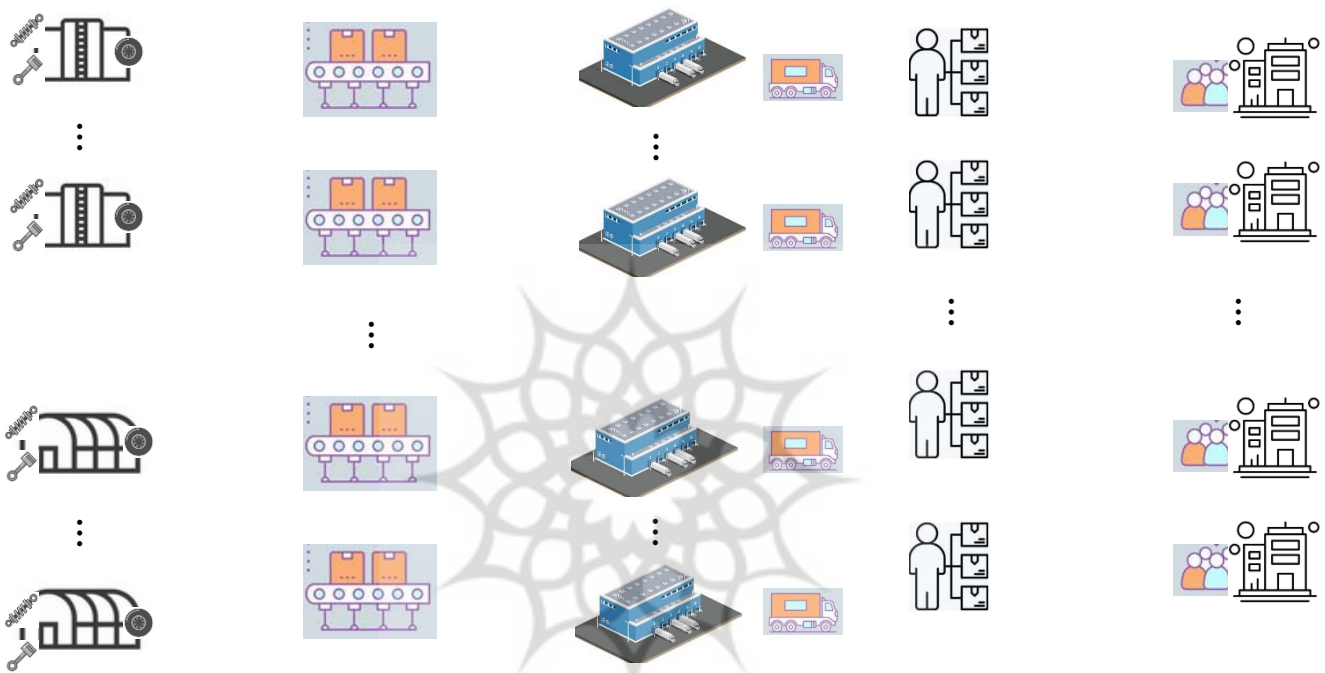
با بررسی مطالعات مرتبط منتشر شده از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۵ درباره طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز- تاب‌آور، ما متوجه شدیم که بسیاری از محققان به مدل‌های ساده تک محصولی، تک دوره‌ای و استفاده از یک ماده اولیه تمایل دارند و کمتر به مدل‌های پیچیده که منطبق با واقعیت باشد، توجه شده است. همچنین محققان اندکی همزمان به اختلالات موجود برای انتخاب تأمین‌کنندگان سبز، وجود تأمین‌کنندگان پشتیبان و مکان‌یابی و تخصیص هاب‌های توزیع در شبکه اشاره کردند. در تحقیقات گذشته، توجه به شرایط عدم قطعیت در عرضه و تقاضا به طور همزمان نیز کمتر مشاهده می‌شود. بر این اساس، ما شبکه پیشنهادی را با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی بررسی شده طراحی کردیم تا به مفروضات دنیای واقعی نزدیک‌تر باشد.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

**تعریف مسئله.** در این تحقیق، یک مدل زنجیره تأمین سبز- تاب‌آور با در نظر گرفتن تأمین‌کننده پشتیبان و مکان‌یابی و تخصیص هاب‌ها توسعه داده خواهد شد که مدل پیشنهادی بر اساس داده‌های واقعی در صنعت خودرو ارزیابی می‌گردد. زنجیره تأمین خودرو یک شبکه گسترده

13. Firoozi et al
1. Boskabadi et al
2. Salehi et al
3. Foroozesh et al
4. Badejo & Ierapetrinou
5. Sadeghi & Akhavan Niaki
6. Zheng et al
7. Fallahi et al
8. Moghadaspoor et al

و بنیادین در کشور است و برای به دست آوردن نتایج قابل اعتماد، بهتر است همه موجودیت‌های درون آن به طور همزمان در مدل در نظر گرفته شوند. در این راستا، یک شبکه زنجیره تأمین پنج سطحی (شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، هاب‌ها، مراکز توزیع و مشتریان) در چارچوب شاخص‌های محیط زیست و تاب‌آوری برای صنعت خودرو طراحی شده است. با توجه به ساختار طراحی شده زنجیره صنعت خودرو در ایران، مشتریان نهایی (یعنی مردم) خودرو را از نمایندگی‌ها دریافت می‌کنند و بر این اساس، ما نمایندگی‌ها را به عنوان مشتریان نهایی در نظر گرفتیم. شکل ۱ نمایی شماتیک از زنجیره تأمین صنعت خودرو در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایی شماتیک از زنجیره تأمین صنعت خودرو مورد مطالعه

### مفروضات مسئله. مفروضات زیر به منظور طراحی شبکه در نظر گرفته شده است

- محققان آلودگی‌های انتشاریافته توسط اعضای زنجیره را به عنوان معیار سبز بودن بررسی کرده‌اند
  - به منظور تاب‌آور بودن شبکه در برابر اختلالات، مدل ریاضی بر اساس رویکرد استوار سناریومحور فرموله‌بندی شده است
  - محققان مواد اولیه و کالاهای نهایی را از ابتدا تا انتهای زنجیره در نظر گرفته‌اند
  - شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن چند محصول و چند دوره زمانی طراحی شده است
  - تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان می‌توانند در افق‌های مختلف برنامه‌ریزی فعال یا غیر فعال باشند.
  - به منظور کاهش کل هزینه‌ها و مدیریت صحیح شبکه، هاب‌ها از میان مراکز توزیع انتخاب شده‌اند
  - هاب‌های هر شرکت (تولیدکننده) مختص به خودش است و نمی‌تواند از دیگر شرکت‌ها محصول دریافت نماید.
- مدل ریاضی.** در این بخش، مدل ریاضی پیشنهادی در قالب مجموعه‌ها، اندیس‌ها، پارامترها، اسکالرها، متغیرهای تصمیم، توابع هدف و محدودیت‌ها به شرح ذیل تعریف می‌شود:

**مجموعه‌ها و اندیس‌ها**

- I: مجموعه تأمین‌کنندگان اصلی ( $i \in I$ )  
 J: مجموعه تأمین‌کنندگان پشتیبان ( $j \in J$ )  
 M: مجموعه تولیدکنندگان ( $m \in M$ )  
 D: مجموعه توزیع‌کنندگان ( $d \in D$ )  
 C: مجموعه مشتریان ( $c \in C$ )  
 P: مجموعه محصولات ( $p \in P$ )  
 W: مجموعه مواد اولیه ( $w \in W$ )  
 S: مجموعه سناریو اختلال احتمالی ( $s \in S$ )  
 T: مجموعه دوره‌های زمانی ( $t \in T$ )  
 K: مجموعه هاب‌های سطح اول در مسیر ( $k \in K$ )  
 L: مجموعه هاب‌های سطح دوم در مسیر ( $l \in L$ )

**پارامترها**

- $PC_{iw}$ : قیمت خرید مواد اولیه  $w$  از تأمین‌کننده اصلی  $i$   
 $BC_{jw}$ : قیمت خرید مواد اولیه  $w$  از تأمین‌کننده پشتیبان  $j$   
 $PFC_i$ : هزینه ثابت قرارداد با تأمین‌کننده اصلی  $i$   
 $BFC_j$ : هزینه ثابت قرارداد با تأمین‌کننده پشتیبان  $j$   
 $LC_{pm}$ : هزینه تولید محصول  $p$  توسط تولیدکننده  $m$   
 $\rho_s$ : احتمال اختلال تحت سناریو  $s$   
 $N_i^{st}$ : ظرفیت مختل شده تأمین‌کننده اصلی  $i$  تحت سناریو  $s$  در دوره زمانی  $t$   
 $G_{wp}$ : مقدار مواد اولیه  $w$  برای تولید یک واحد از محصول  $p$   
 $NS_{mw}^{st}$ : تعداد تأمین‌کنندگان برای تولیدکننده  $m$  جهت تأمین مواد اولیه  $w$  تحت سناریو  $s$  در دوره زمانی  $t$   
 $TP_{wim}$ : هزینه حمل و نقل مواد اولیه  $w$  از تأمین‌کننده اصلی  $i$  به تولیدکننده  $m$   
 $TB_{wjm}$ : هزینه حمل و نقل مواد اولیه  $w$  از تأمین‌کننده پشتیبان  $j$  به تولیدکننده  $m$   
 $TM_{pmk}$ : هزینه حمل و نقل محصول  $p$  از تولیدکننده  $m$  به هاب  $k$   
 $TL_{pkl}$ : هزینه حمل و نقل محصول  $p$  بین دو هاب  $k$  و  $l$   
 $TK_{pkd}$ : هزینه حمل و نقل محصول  $p$  از هاب  $k$  به توزیع‌کننده  $d$   
 $TD_{pdc}$ : هزینه حمل و نقل محصول  $p$  از توزیع‌کننده  $d$  به مشتری  $c$   
 $KFC_k$ : هزینه ثابت باز کردن هاب  $k$   
 $CAP_{wi}^{st}$ : ظرفیت تأمین‌کننده اصلی  $i$  برای مواد اولیه  $w$  تحت سناریو  $s$  در دوره زمانی  $t$   
 $CAB_{wj}^{st}$ : ظرفیت تأمین‌کننده پشتیبان  $j$  برای مواد اولیه  $w$  تحت سناریو  $s$  در دوره زمانی  $t$   
 $CAM_{pm}^{st}$ : ظرفیت تولیدکننده  $m$  برای تولید محصول  $p$  تحت سناریو  $s$  در دوره زمانی  $t$   
 $CAK_k^{st}$ : ظرفیت هاب  $k$  تحت سناریو  $s$  در دوره زمانی  $t$   
 $CAD_d^{st}$ : ظرفیت توزیع‌کننده  $d$  تحت سناریو  $s$  در دوره زمانی  $t$

- $\varphi P_{ip}$ : مصرف انرژی تأمین‌کننده اصلی  $i$  در تولید یک واحد محصول  $p$
- $\varphi B_{jp}$ : مصرف انرژی تأمین‌کننده پشتیبان  $j$  در تولید یک واحد محصول  $p$
- $H_{im}$ : آلودگی انتشار یافته از طریق حمل و نقل بین تأمین‌کننده اصلی  $i$  و تولیدکننده  $m$
- $H_{jm}$ : آلودگی انتشار یافته از طریق حمل و نقل بین تأمین‌کننده پشتیبان  $j$  و تولیدکننده  $m$
- $H_{mk}$ : آلودگی انتشار یافته از طریق حمل و نقل بین تولیدکننده  $m$  و هاب  $k$
- $H_{kd}$ : آلودگی انتشار یافته از طریق حمل و نقل بین هاب  $k$  و توزیع‌کننده  $d$
- $H_{dc}$ : آلودگی انتشار یافته از طریق حمل و نقل بین توزیع‌کننده  $d$  و مشتری  $c$
- $GP_{mp}$ : گازهای گلخانه‌ای منتشر شده برای تولید یک واحد محصول  $p$  توسط تولیدکننده  $m$
- $PN_w^S$ : هزینه یک واحد کمبود مواد اولیه  $w$  تحت سناریو  $S$
- $PNC_p^S$ : جریمه (هزینه) یک واحد کمبود محصول  $p$  تحت سناریو  $S$
- $SM_{pm}^{st}$ : موجودی انبار تولیدکننده  $m$  از محصول  $p$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $SK_{pk}^{st}$ : موجودی انبار هاب  $k$  از محصول  $p$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $SD_{pd}^{st}$ : موجودی انبار توزیع‌کننده  $d$  از محصول  $p$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $SP_{wm}^{st}$ : موجودی انبار تولیدکننده  $m$  از مواد اولیه  $w$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$

### اسکالر

- $M$ : عدد مثبت بزرگ
- $\alpha$ : ضریب تخفیف برای مسیرهای بین هاب
- $NUMK$ : تعداد هاب‌های بالقوه در شبکه
- $\mu$ : ضریب انتشار کربن
- $\omega$ : ضریب فناوری در انتشار کربن

### متغیرهای تصمیم

- $L_{pm}^{st}$ : مقدار تولید محصول  $p$  توسط تولیدکننده  $m$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $QP_{wim}^{st}$ : مقدار مواد اولیه  $w$  انتقال یافته از تأمین‌کننده اصلی  $i$  به تولیدکننده  $m$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $QB_{wjm}^{st}$ : مقدار مواد اولیه  $w$  انتقال یافته از تأمین‌کننده پشتیبان  $j$  به تولیدکننده  $m$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $QM_{pmk}^{st}$ : مقدار محصول  $p$  انتقال یافته از تولیدکننده  $m$  به هاب  $k$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $QK_{pkd}^{st}$ : مقدار محصول  $p$  انتقال یافته از هاب  $k$  به توزیع‌کننده  $d$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $QD_{pdc}^{st}$ : مقدار محصول  $p$  انتقال یافته از توزیع‌کننده  $d$  به مشتری  $c$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $D_{pc}^{st}$ : تقاضای مشتری  $c$  برای محصول  $p$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $\theta^S$ : انحراف از میانگین تحت سناریو  $S$
- $U_{mw}^{st}$ : مقدار مواد اولیه مورد نیاز  $w$  توسط تولیدکننده  $m$  برای محصول  $p$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$
- $XPS_{imw}^{st}$ : اگر تأمین‌کننده اصلی  $i$  توسط تولیدکننده  $m$  به منظور خرید مواد اولیه  $w$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$  انتخاب شود، این متغیر می‌شود ۱؛ در غیر این صورت می‌شود صفر
- $XBS_{jmw}^{st}$ : اگر تأمین‌کننده پشتیبان  $j$  توسط تولیدکننده  $m$  به منظور خرید مواد اولیه  $w$  تحت سناریو  $S$  در دوره زمانی  $t$  انتخاب شود، این متغیر می‌شود ۱؛ در غیر این صورت می‌شود صفر

$EK_k$ : اگر گره  $k$  یک هاب باشد و باز شود، این متغیر می شود ۱؛ در غیر این صورت می شود صفر  
 $XM_{mk}$ : اگر تولیدکننده (گره)  $m$  به هاب واقع در گره  $k$  تخصیص داده شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر است  
 $XD_{kd}$ : اگر توزیع کننده (گره)  $d$  به هاب واقع در گره  $k$  تخصیص داده شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر است  
 $XL_{ld}$ : اگر توزیع کننده (گره)  $d$  به هاب واقع در گره  $l$  تخصیص داده شود برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر است  
 $X_{mkld}$ : اگر جریان از گره مبدا (تولیدکننده)  $m$  به گره مقصد (توزیع کننده)  $d$  از گره های هاب در  $k$  و  $l$  منتقل شود برابر با ۱ است و در غیر این صورت برابر با ۰ است

**توابع هدف.** تابع هدف (۱) شامل هزینه های ثابت زنجیره تأمین، هزینه های متغیر زنجیره تأمین و هزینه های انتقال بین اعضای زنجیره است. هزینه های ثابت شامل هزینه قرارداد با تأمین کنندگان اصلی و پشتیبان و هزینه تأسیس هاب است. هزینه های متغیر شامل هزینه خرید مواد اولیه و هزینه یک واحد تولید محصول است. هزینه های انتقال بین اعضای زنجیره شامل هزینه های انتقال از تأمین کننده به تولیدکننده، از تولیدکننده به هاب ها، از هاب ها به توزیع کننده و از توزیع کننده به مشتری است.  $0 \leq \alpha \leq 1$  نشان دهنده ضریب تخفیف است. این پارامتر یکی را موثرترین پارامترها در مسئله مکان یابی هاب است. اُکلی<sup>۱</sup> (۱۹۸۷) برای اولین بار از ضریب تخفیف برای مسیرهای بین هاب استفاده کرد. او هزینه مسیرهای بین هاب را در پارامتر  $\alpha$  ضرب کرد تا تأثیر حمل و نقل بین هاب را نشان دهد. از طریق استفاده از این پارامتر، مشتریان به استفاده از مرکز هاب تشویق می شوند [۶۸]. تابع هدف (۲) شامل آلودگی انتشار یافته توسط تأمین کنندگان و تولیدکنندگان و آلودگی انتشار یافته به دلیل انتقال محصولات بین اعضای زنجیره تأمین است. لازم به ذکر است که تولیدکنندگان طی عمر مفید خود آلودگی های مختلفی از قبیل گازهای منواکسید کربن، هیدروکربن و اکسیدهای نیتروژن را بر اساس ضریب فناوری به کاررفته در تولید خودرو منتشر می کنند.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T PFC_i XPS_{imw}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T BFC_j XBS_{jmw}^{st} + \sum_{k=1}^K KFC_k EK_k \right] \\ & + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T PC_{wi} QP_{wim}^{st} XPS_{imw}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T BC_{wj} QB_{wjm}^{st} XBS_{jmw}^{st} \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T LC_{pm} L_{pm}^{st} \right] \\ & + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T TP_{wim} QP_{wim}^{st} XPS_{imw}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T TB_{wjm} QB_{wjm}^{st} XBS_{jmw}^{st} \right. \\ & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T TM_{pmk} QM_{pmk}^{st} EK_k + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l \in K} \alpha TL_{pkl} X_{mkld} \right. \\ & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T TK_{pkd} QK_{pkd}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T TD_{pdc} QD_{pdc}^{st} \right] \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_2 = \mu \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S QP_{wim}^{st} XPS_{imw}^{st} \varphi P_{ip} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S QB_{wjm}^{st} XBS_{jmw}^{st} \varphi B_{jp} \right] \\
 + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \omega \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T GP_{mp} L_{pm}^{st} \right] \\
 + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} QP_{wim}^{st} + \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{jm} QB_{wjm}^{st} \right. \\
 + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T H_{mk} QM_{pmk}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T H_{kd} QD_{pkd}^{st} \\
 \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T H_{dc} QK_{pdc}^{st} \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

**محدودیت‌ها.** محدودیت (۳) تأمین مواد اولیه مورد نیاز برای یک واحد محصول را نشان می‌دهد. با توجه به ضریب میزان اختلال به وجود آمده برای تأمین‌کننده اصلی، مابقی مواد اولیه مورد نیاز توسط تأمین‌کننده پشتیبان تهیه می‌گردد. به عبارتی، محدودیت (۳) تضمین می‌کند که تقاضای تولیدکنندگان از مواد اولیه توسط تأمین‌کنندگان باید تأمین شود. محدودیت‌های (۴) همانند محدودیت (۳) است با این تفاوت که برای اولین دوره زمانی نوشته می‌شود. محدودیت‌های (۵) تا (۷) مربوط به جریان محصولات در بین اعضای زنجیره هستند. محصولات توسط تولیدکنندگان تولید می‌شوند و سپس به هاب‌ها تحویل داده می‌شوند. بر اساس تقاضای هر بخش بازار، محصولات به توزیع‌کنندگان تحویل داده می‌شوند. در نهایت توزیع‌کنندگان محصولات را به مشتریان تحویل می‌دهند. به عبارتی، گره‌هایی وجود دارد که جریان (محصول) از طریق آن از تولیدکننده به توزیع‌کننده منتقل می‌شود. بر اساس این محدودیت‌ها، کل میزان محصول  $p$  ارسال شده به هریک از اعضای زنجیره در یک دوره زمانی به همراه موجودی اول دوره اعضا از آن محصول، برابر با میزان محصول ارسال شده از آن عضو به عضو دیگر به علاوه موجودی آخر دوره است. محدودیت‌های (۸) تا (۱۰) همانند محدودیت‌های (۵) تا (۷) هستند با این تفاوت که برای اولین دوره زمانی نوشته می‌شوند. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) ظرفیت تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان را نشان می‌دهند. همچنین این محدودیت‌ها بیانگر آن است که اگر مواد اولیه به تولیدکننده  $m$  ارسال شود، حتماً باید آن تأمین‌کننده انتخاب شود. محدودیت‌های (۱۳) تا (۱۵) نمایانگر محدودیت‌های ظرفیت برای انتقال بین اعضای زنجیره تأمین (تولیدکنندگان، هاب‌ها و توزیع‌کنندگان) است. به عبارتی، محصولاتی که به اعضای زنجیره تأمین ارسال می‌شود و محصولاتی که از قبل در آنجا وجود دارند، نباید از ظرفیت آنها تجاوز کند. همچنین محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد که اگر محصولی به هاب  $k$  ارسال شود، حتماً باید آن هاب تأسیس شده باشد. محدودیت‌های (۱۶) تا (۱۸) همانند محدودیت‌های (۱۳) تا (۱۵) هستند با این تفاوت که برای اولین دوره زمانی نوشته می‌شوند. محدودیت (۱۹) بیان می‌کند که هر تولیدکننده در هر سناریو و هر دوره باید مواد اولیه مورد نیاز خود را حداقل از یک تأمین‌کننده خریداری کند. محدودیت (۲۰) نشان می‌دهد که تقاضای بازار باید تأمین شود. محدودیت‌های (۲۱) تا (۲۳) حضور تأمین‌کنندگان و هاب‌ها را هنگامی که در زنجیره تأمین فعال می‌شوند، نشان می‌دهند. محدودیت (۲۴) نشان می‌دهد که هاب  $k$  فقط می‌تواند محصولات را از یک تولیدکننده  $m$  دریافت نماید. به عبارتی، گره  $m$  می‌تواند به گره  $k$  اختصاص یابد، اگر گره  $k$  یک هاب باشد. محدودیت (۲۵) تضمین می‌کند که هر توزیع‌کننده (گره غیر هاب) فقط می‌تواند به یک هاب تخصیص یابد. این محدودیت نشان می‌دهد که مسأله ما تک تخصیص است. محدودیت (۲۶) نشان می‌دهد که فقط زمانی جریان می‌تواند از گره  $m$  به گره  $d$  منتقل شود که از گره‌های هاب واقع شده در  $k$  و  $l$  عبور کند. محدودیت (۲۷) اعلام می‌کند که اگر گره (توزیع‌کننده)  $d$  به گره (هاب)  $l$  اختصاص داده شود، یک گره (هاب)  $k$  وجود دارد که گره (تولیدکننده)  $m$  به آن تخصیص داده می‌شود. محدودیت (۲۸) تفسیری مانند

محدودیت (۲۷) ارائه می‌دهد. محدودیت (۲۹) حداکثر تعداد هاب‌های مدل را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۳۰) و (۳۱) به ترتیب متغیرهای مثبت و متغیرهای باینری مدل را نشان می‌دهند.

$$\sum_{i=1}^I (1 - \rho_s) QP_{wim}^{st} + \sum_{j=1}^J QB_{wj m}^{st} + SP_{wm}^{s(t-1)} = L_{pm}^{st} G_{wp} \quad \forall m \in M$$

$$w \in W \quad p \in P \quad s \in S \quad t \in T \quad t > 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I (1 - \rho_s) QP_{wim}^{st} + \sum_{j=1}^J QB_{wj m}^{st} = L_{pm}^{st} G_{wp} \quad \forall m \in M \quad w \in W \quad p \in P \quad s \in S \quad t = 1 \quad (4)$$

$$L_{pm}^{st} + SM_{pm}^{s(t-1)} = \sum_{k=1}^K QM_{pmk}^{st} + SM_{pm}^{st} \quad \forall m \in M \quad p \in P \quad s \in S \quad t \in T \quad t > 1 \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M QM_{pmk}^{st} XM_{mk} + SK_{pk}^{s(t-1)} = \sum_{d=1}^D QK_{pkd}^{st} XD_{kd} + SK_{pk}^{st} \quad \forall k \in K \quad p \in P \quad s \in S \quad t \in T$$

$$> 1 \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K QK_{pkd}^{st} + SD_{pd}^{s(t-1)} = \sum_{c=1}^C QD_{pdc}^{st} + SD_{pd}^{st} \quad \forall d \in D \quad p \in P \quad s \in S \quad t \in T \quad t > 1 \quad (7)$$

$$L_{pm}^{st} = \sum_{k=1}^K QM_{pmk}^{st} + SM_{pm}^{st} \quad \forall m \in M \quad p \in P \quad s \in S \quad t = 1 \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^M QM_{pmk}^{st} XM_{mk} = \sum_{d=1}^D QK_{pkd}^{st} XD_{kd} + SK_{pk}^{st} \quad \forall k \in K \quad p \in P \quad s \in S \quad t = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K QK_{pkd}^{st} = \sum_{c=1}^C QD_{pdc}^{st} + SD_{pd}^{st} \quad \forall d \in D \quad p \in P \quad s \in S \quad t = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M QP_{wim}^{st} \leq \sum_{m=1}^M CAP_{wi}^{st} (1 - N_i^{st}) XPS_{imw}^{st} \quad \forall s \in S \quad w \in W \quad i \in I \quad t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M QB_{wj m}^{st} \leq \sum_{m=1}^M CAB_{wj}^{st} XBS_{jmw}^{st} \quad \forall s \in S \quad w \in W \quad j \in J \quad t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K QM_{pmk}^{st} + \sum_{p=1}^P SM_{pm}^{st} \leq CAM_{pm}^{st} \quad \forall s \in S \quad m \in M \quad t \in T \quad t > 1 \quad (13)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D QK_{pkd}^{st} XM_{mk} + \sum_{p=1}^P SK_{pk}^{st} \leq CAK_k^{st} EK_k \quad \forall s \in S \quad k \in K \quad t \in T \quad t > 1 \quad (14)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C QD_{pdc}^{st} + \sum_{p=1}^P SD_{pd}^{st} \leq CAD_d^{st} \quad \forall s \in S \quad d \in D \quad t \in T \quad t > 1 \quad (15)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K QM_{pmk}^{st} \leq CAM_{pm}^{st} \quad \forall s \in S \quad m \in M \quad t = 1 \quad (16)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D QK_{pkd}^{st} XM_{mk} \leq CAK_k^{st} EK_k \quad \forall s \in S k \in K t = 1 \quad (17)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C QD_{pac}^{st} \leq CAD_d^{st} \quad \forall s \in S d \in D t = 1 \quad (18)$$

$$1 \leq \sum_{i=1}^I XPS_{imw}^{st} + \sum_{j=1}^J XBS_{jmw}^{st} \leq NS_{mw}^{st} \quad \forall s \in S t \in T m \in M w \in W \quad (19)$$

$$\sum_{d=1}^D QD_{pac}^{st} = D_{pc}^{st} \quad \forall s \in S t \in T p \in P c \in C \quad (20)$$

$$\sum_{w=1}^W \sum_{m=1}^M QP_{wim}^{st} \leq \sum_{w=1}^W \sum_{m=1}^M M XPS_{imw}^{st} \quad \forall s \in S t \in T i \in I \quad (21)$$

$$\sum_{w=1}^W \sum_{m=1}^M QB_{wjm}^{st} \leq \sum_{w=1}^W \sum_{m=1}^M M XBS_{jmw}^{st} \quad \forall s \in S t \in T j \in J \quad (22)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D QK_{pkd}^{st} \leq MEK_k \quad \forall s \in S t \in T k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{m=1}^M XM_{mk} \leq EK_k \quad \forall k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^K XD_{kd} = 1 \quad \forall d \in D \quad (25)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L X_{mkld} = 1 \quad \forall t \in T m \in M d \in D \quad (26)$$

$$\sum_{l=1}^L X_{mkld} = XM_{mk} \quad \forall m \in M d \in D k \in K \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{mkld} = XL_{ld} \quad \forall m \in M d \in D l \in L \quad (28)$$

$$\sum_{k=1}^K EK_k \leq NUMK \quad (29)$$

$$XPS_{imw}^{st} XBS_{jmw}^{st} EK_k XM_{mk} XD_{kd} XL_{ld} X_{mkld} \in \{0,1\} \quad (30)$$

$$L_{pm}^{st} D_{pc}^{st} QP_{wim}^{st} QB_{wjm}^{st} QM_{pmk}^{st} QK_{pkd}^{st} QD_{pac}^{st} \geq 0 \quad (31)$$

**خطی سازی شبکه پیشنهادی.** همانطور که مشخص است برخی از محدودیت‌های مدل تحقیق یک معادله غیرخطی هستند که در واقع حاصل ضرب متغیر باینری در متغیر پیوسته را نشان می‌دهند. ما باید اینگونه محدودیت‌ها را خطی کنیم [۱۶]. فرض کنید که متغیر  $x$  از نوع متغیر باینری (صفر و یک) و  $y$  یک متغیر پیوسته باشد و حاصل ضرب آنها با  $q$  ( $q \geq 0$ ) نشان داده شود. در این راستا، می‌توان عبارت غیرخطی را بر اساس معادلات ۳۲ تا ۳۴ خطی کرد. توجه داشته باشید که در این روابط  $M$  نشان‌دهنده یک عدد بسیار بزرگ است

$$q \leq Mx$$

$$(32)$$

$$q \leq y \quad (33)$$

$$q \geq y - M(1 - x) \quad (34)$$

با استفاده از این رویکرد، تابع هدف اول به صورت رابطه ۳۵ خطی می‌شود و محدودیت‌های ۳۶ تا ۵۰ به مدل ریاضی اضافه خواهند شد.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T PFC_i XPS_{imw}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T BFC_j XBS_{jmw}^{st} + \sum_{k=1}^K KFC_k EK_k \right] \\ & + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T PC_{wi} q1_{wim}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T BC_{wj} q2_{wjm}^{st} \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T LC_{pm} L_{pm}^{st} \right] \\ & + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T TP_{wim} q3_{wim}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T TB_{wjm} q4_{wjm}^{st} \right. \\ & + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T TM_{pmk} q5_{pmk}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l \in K} \alpha TL_{pkl} X_{mkl} \\ & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T TK_{pkd} QK_{pkd}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T TD_{pac} QD_{pac}^{st} \right] \quad (35) \end{aligned}$$

$$q1_{wim}^{st} \leq M XPS_{imw}^{st} \quad (36)$$

$$q1_{wim}^{st} \leq QP_{wim}^{st} \quad (37)$$

$$q1_{wim}^{st} \geq QP_{wim}^{st} - M(1 - XPS_{imw}^{st}) \quad (38)$$

$$q2_{wjm}^{st} \leq M XBS_{jmw}^{st} \quad (39)$$

$$q2_{wjm}^{st} \leq QB_{wjm}^{st} \quad (40)$$

$$q2_{wjm}^{st} \geq QB_{wjm}^{st} - M(1 - XBS_{jmw}^{st}) \quad (41)$$

$$q3_{wim}^{st} \leq M XPS_{imw}^{st} \quad (42)$$

$$q3_{wim}^{st} \leq QP_{wim}^{st} \quad (43)$$

$$q3_{wim}^{st} \geq QP_{wim}^{st} - M(1 - XPS_{imw}^{st}) \quad (44)$$

$$q4_{wjm}^{st} \leq M XBS_{jmw}^{st} \quad (45)$$

$$q4_{wjm}^{st} \leq QB_{wjm}^{st} \quad (46)$$

$$q4_{wjm}^{st} \geq QB_{wjm}^{st} - M(1 - XBS_{jmw}^{st}) \quad (47)$$

$$q5_{pmk}^{st} \leq M EK_k \quad (48)$$

$$q5_{pmk}^{st} \leq QM_{pmk}^{st} \quad (49)$$

$$q5_{pmk}^{st} \geq QM_{pmk}^{st} - M(1 - EK_k) \quad (50)$$

تابع هدف دوم به صورت رابطه ۵۱ خطی می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_2 = \mu & \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S q1_{wim}^{st} \varphi P_{ip} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S q2_{wjm}^{st} \varphi B_{jp} \right] \\ & + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \omega \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T GP_{mp} L_{pm}^{st} \right] \\ & + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} QP_{wim}^{st} + \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{jm} QB_{wjm}^{st} \right. \\ & + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T H_{mk} QM_{pmk}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T H_{kd} QD_{pkd}^{st} \\ & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T H_{dc} QK_{pdc}^{st} \right] \quad (51) \end{aligned}$$

به منظور خطی‌سازی محدودیت ۶، روابط ۵۲ تا ۵۵ جایگزین رابطه ۶ می‌شوند.

$$\sum_{m=1}^M q6_{pmk}^{st} + SK_{pk}^{s(t-1)} = \sum_{d=1}^D QK_{pdk}^{st} XD_{kd} + SK_{pk}^{st} \quad \forall k \in K p \in P$$

$$s \in S t \in T t > 1 \quad (52)$$

$$q6_{pmk}^{st} \leq M XM_{mk} \quad (53)$$

$$q6_{pmk}^{st} \leq QM_{pmk}^{st} \quad (54)$$

$$q6_{pmk}^{st} \geq QM_{pmk}^{st} - M(1 - XM_{mk}) \quad (55)$$

به منظور خطی‌سازی محدودیت ۹، روابط ۵۶ تا ۵۹ جایگزین رابطه ۹ می‌شوند.

$$\sum_{m=1}^M q6_{pmk}^{st} = \sum_{d=1}^D q7_{pdk}^{st} + SK_{pk}^{st} \quad \forall k \in K p \in P s \in S t = 1 \quad (56)$$

$$q7_{pdk}^{st} \leq M XD_{kd} \quad (57)$$

$$q7_{pdk}^{st} \leq QK_{pdk}^{st} \quad (58)$$

$$q7_{pdk}^{st} \geq QK_{pdk}^{st} - M(1 - XD_{kd}) \quad (59)$$

برای خطی‌سازی محدودیت ۱۴، روابط ۶۰ تا ۶۳ جایگزین رابطه ۱۴ می‌شوند.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D q8_{pmkd}^{st} + \sum_{p=1}^P SK_{pk}^{st} \leq CAK_k^{st} EK_k \quad \forall s \in S k \in K t \in T t > 1 \quad (60)$$

$$q8_{pmkd}^{st} \leq M XM_{mk} \quad (61)$$

$$q8_{pmkd}^{st} \leq QK_{pdk}^{st} \quad (62)$$

$$q8_{pmkd}^{st} \geq QK_{pdk}^{st} - M(1 - XM_{mk}) \quad (63)$$

محدودیت ۱۷ از طریق جایگزینی رابطه ۶۴ به جای آن خطی می‌گردد. در نهایت، رابطه ۶۵ متغیرهای مثبتی که به مدل اضافه شدند را نشان می‌دهد.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D q8_{pmkd}^{st} \leq CAK_k^{st} EK_k \quad \forall s \in S, k \in K, t = 1 \quad (64)$$

$$q1_{wim}^{st} q2_{wjm}^{st} q3_{wim}^{st} q4_{wjm}^{st} q5_{pmk}^{st} q6_{pmk}^{st} q7_{pkd}^{st} q8_{pmkd}^{st} \geq 0 \quad (65)$$

**مدل بهینه‌سازی استوار.** در مدل پیشنهادی تحقیق حاضر برخی از پارامترها دارای عدم قطعیت هستند. تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که رویکردهای متعددی برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی به کار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به بهینه‌سازی استوار، بهینه‌سازی تصادفی، بهینه‌سازی فازی و رویکردهای ترکیبی اشاره نمود [۴۴]. در این پژوهش از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مقابله با عدم قطعیت و تبدیل مدل پیشنهادی به مدل قطعی استفاده شده است [۷۱]. دلیل به کارگیری رویکرد بهینه‌سازی استوار آن است که این رویکرد به شکل توزیع و یا تابع عضویت داده‌ها وابسته نیست و فقط نیازمند تعیین دامنه تغییرات است. در این روش، مقدار تابع هدف به ازای جواب استوار در تمامی حالت‌های ممکن پارامترهای دارای عدم قطعیت، شونی و نزدیک به مقدار بهینه خود خواهد بود و حداقل انحراف را از حالت بهینه خواهد داشت [۷۱]. در این تحقیق، با توجه به وجود عدم قطعیت در برخی از پارامترهای مدل پیشنهادی از قبیل تأمین مواد اولیه (قطعات)، ظرفیت اعضای زنجیره و تقاضای مشتریان و نیز ماهیت سناریویی داده‌ها از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو پیشنهاد شده توسط مالوی و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۵) استفاده شده است که تابع هدف آن به صورت رابطه ۶۶ است [۶۵].

$$\text{Min} \sum_{s=1}^S \rho_s f(x, y_s) + \sigma \sum_{s=1}^S \rho_s (\gamma_s^+ + \gamma_s^-) + \beta \sum_{s=1}^S \rho_s \tau_s \quad (66)$$

در رابطه ۶۶،  $x$  متغیری است که قبل از مشخص شدن پارامترهای احتمالی باید تعیین شود و نمی‌توان آن را تغییر داد.  $y_s$  متغیر کنترل است که بعد از تعیین سناریو  $s$  مشخص می‌شود.  $\tau_s$  غیرموجه بودن مدل را تحت سناریو  $s$  تعیین می‌کند زیرا به دلیل عدم قطعیت پارامترها، ممکن است مدل برای برخی از سناریوها غیرموجه گردد. در این رابطه،  $\tau_s$  نشان‌دهنده کمبود است که اگر کمبود تحت سناریو  $s$  رخ ندهد،  $\tau_s$  برابر صفر می‌شود و در غیر این صورت مقدار مثبتی از معادله را خواهد گرفت.  $\gamma_s^+ + \gamma_s^-$  از رابطه  $|f(x, y_s) - \sum_{s=1}^S \rho_s f'(x, y_s)|$  حاصل شده که فرمول انحراف معیار است و به منظور خطی‌سازی مدل به کار گرفته شده است. بنابراین اگر  $f(x, y_s)$  از  $\sum_{s=1}^S \rho_s f'(x, y_s)$  بزرگ‌تر باشد،  $\gamma_s^+$  و در غیر این صورت  $\gamma_s^-$  قابل تفسیر است. بدیهی است همواره یکی از مقادیر  $\gamma_s^+$  و  $\gamma_s^-$  صفر است. پارامتر  $\sigma$  وزن تخصیص یافته به واریانس راه حل است که ضریب ریسک در مدل را نشان می‌دهد. پارامتر  $\beta$  وزن تخصیص یافته به کمبود در مدل است که هزینه منفعت (جریمه) بین استواری مدل و راه حل را به نمایش می‌گذارد.

مطابق رویکرد بهینه‌سازی استوار مورد استفاده و مفروضات مدل پیشنهادی، فقط تابع هدف اول دارای عدم قطعیت است، بنابراین تابع هدف استوار مسئله تحقیق حاضر به صورت رابطه ۶۷ بازنویسی می‌شود. به منظور درک بهتر تابع هدف استوار، به جای سمت راست معادله تابع هدف اول مسئله از متغیر کمکی  $\gamma$  استفاده شده است. تابع هدف استوار شامل چهار بخش «هزینه‌های مورد انتظار ثابت، متغیر و انتقال بین اعضای زنجیره تحت سناریوهای مختلف»، «واریانس یا استواری راه حل به ازای تغییر سناریوها»، «استواری مدل به ازای عدم تأمین به موقع مواد اولیه» و «استواری مدل به ازای عدم تقاضای به موقع مشتری» است. رابطه ۶۸ محدودیت استوار است که مقدار تفاضل سناریوها را نشان می‌دهد. به عبارتی، این محدودیت غیر منفی شدن مقدار تابع هدف استوار تحت سناریوهای مختلف را تضمین می‌کند. سایر روابط به دلیل قطعی بودن، بدون تغییر در مدل باقی خواهند ماند. مدل پیشنهادی قطعی شده به شرح زیر است.

$$\begin{aligned}
\text{Min } Z_1 = & \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T PFC_i XPS_{imw}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T BFC_j XBS_{jmw}^{st} + \sum_{k=1}^K KFC_k EK_k \right] \\
& + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T PC_{wi} q1_{wim}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T BC_{wj} q2_{wjm}^{st} \right. \\
& \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T LC_{pm} L_{pm}^{st} \right] \\
& + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T TP_{wim} q3_{wim}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T TB_{wjm} q4_{wjm}^{st} \right. \\
& + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T TM_{pmk} q5_{pmk}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l \in K} \alpha TL_{pkl} X_{mkld} \\
& \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T TK_{pkd} QK_{pkd}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T TD_{pdc} QD_{pdc}^{st} \right] \\
& + \sum_{w=1}^W \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S PN_w^s U_{mwp}^{st} + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T PNC_p^s D_{pc}^{st} + \sigma \sum_{s=1}^S \rho_s (\gamma_s^+ + \gamma_s^-) \\
& + \beta \sum_{s=1}^S \rho_s \tau_s \quad (67)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Min } Z_2 = & \mu \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S q1_{wim}^{st} \varphi P_{ip} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S q2_{wjm}^{st} \varphi B_{jp} \right] \\
& + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \omega \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T GP_{mp} L_{pm}^{st} \right] \\
& + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} QP_{wim}^{st} + \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{jm} QB_{wjm}^{st} \right. \\
& + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T H_{mk} QM_{pmk}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T H_{kd} QD_{pdk}^{st} \\
& \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T H_{dc} QK_{pdc}^{st} \right] \quad (51)
\end{aligned}$$

S.t:

Constrains (3) to (5), (7), (8), (10) to (13), (15), (16), (18) to (30), (36) to (50), (52) to (64),

$$\gamma_s - \sum_{s' \in S} \rho_{s'} \gamma_{s'} + \theta^s \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (68)$$

$$L_{pm}^{st} D_{pc}^{st} \theta^s QP_{wim}^{st} QB_{wjm}^{st} QM_{pmk}^{st} QK_{pkd}^{st} QD_{pdc}^{st} q1_{wim}^{st} q2_{wjm}^{st} q3_{wim}^{st} q4_{wjm}^{st} q5_{pmk}^{st} q6_{pmk}^{st} q7_{pkd}^{st} q8_{pmkd}^{st} \geq 0 \quad (69)$$

**رویکردهای بهینه‌سازی چندهدفه.** بهینه‌سازی چندهدفه نوعی بهینه‌سازی برداری است که در بسیاری از زمینه‌ها از جمله مهندسی، اقتصاد و لجستیک که در آنها باید تصمیمات بهینه به منظور مبادلات بین دو یا چند هدف متضاد اتخاذ شوند، استفاده می‌شود. از جمله روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه می‌توان به روش محدودیت اسیلون اشاره کرد. روش محدودیت اسیلون<sup>۱</sup> یک روش ترجیحی برای ایجاد نواحی پارتو است زیرا منحنی قوی‌تری ایجاد می‌کند [۵۷]. بنابراین، ما از این روش به دلیل اجتناب از موقعیت‌های کمیاب نواحی پارتو که غیرمحدب است و ممکن است در صورت استفاده از روش مجموع وزنی<sup>۲</sup> مشکل‌ساز باشد، استفاده کردیم. از طرفی، به منظور حل مسائل بزرگ که جزء مسائل NP-hard است و زمان محاسبه به طور تصاعدی با اندازه مسئله افزایش می‌یابد، از تکنیک‌های فراابتکاری استفاده کردیم. برای مسائل پیچیده و مسائلی که نمونه‌های بزرگ دارند، تکنیک‌های فراابتکاری در یافتن راه حل بهینه با پیچیدگی زمانی کمتر، بهتر عمل می‌کنند. مزایای خاص و اصلی الگوریتم‌های فراابتکاری تطبیق‌پذیری و انعطاف‌پذیری آنها است که می‌توان آنها را به راحتی تغییر داد تا با نیازهای خاص یک مسئله منطبق شوند [۸۶].

**روش محدودیت اسیلون.** روش محدودیت اسیلون ابتدا توسط هایمز و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۷۱) به منظور بهینه‌سازی مسائل چند هدفه معرفی شد که در آن زیرمجموعه‌ای نماینده از مجموعه پارتو ارائه می‌شود و در اکثر موارد قابل قبول و کافی است. در این روش، تصمیم‌گیرنده یکی از اهداف را به عنوان تابع هدف اصلی برای بهینه‌سازی مدل انتخاب می‌کند و سایر اهداف با محدود شدن به یک ضریب کران بالا، به محدودیت تبدیل می‌شوند. به لحاظ ریاضی، اگر  $f_j(x) \quad j \in \{1, 2, \dots, k\}$  به عنوان تابع هدف اصلی برای بهینه‌سازی انتخاب شود و  $P(\varepsilon_j) \quad j \in \{1, 2, \dots, k\}$  یک فضای راه‌حل امکان‌پذیر باشد، آنگاه رابطه (۷۰) می‌تواند برقرار باشد

$$\min \{f_j(x) \quad j \in \{1, 2, \dots, k\}; f_j(x) \leq \varepsilon_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} \quad i \neq j; x \in S\} \quad (70)$$

روش محدودیت اسیلون دارای مزایا و ضعف‌های مختلف است. به عنوان مثال، این روش می‌تواند به نقاط کارآمد در منحنی پارتو غیر محدب دست یابد که تصمیم‌گیری را تسهیل می‌کند. با این حال، تصمیم‌گیرنده می‌تواند کران‌های بالای  $\varepsilon_i$  را برای تحقق بهینه پارتو ضعیف تغییر دهد. بنابراین، این می‌تواند یک ضعف باشد، زیرا تصمیم‌گیرنده باید کران‌های بالای مناسب را برای مقادیر  $\varepsilon_i$  انتخاب کند. علاوه بر این، اگر تعداد توابع هدف افزایش یابد، این روش کارایی خود را از دست می‌دهد. در گذشته مطالعات مختلفی بر توسعه روش محدودیت اسیلون تمرکز کردند. ترکیب مطالعات گذشته می‌تواند به عنوان تلاشی برای اثربخشی و تقویت بیشتر روش محدودیت اسیلون برای تولید راه‌حل‌های بهینه پارتو در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه باشد [۵۷، ۵۳]. این روش می‌تواند از تولید راه‌حل‌های بهینه پارتو ضعیف جلوگیری کند و فرآیند حل را از طریق حذف تکرارهای اضافی، تسریع نماید.

**روش محدودیت اسیلون تقویت‌شده.** راه‌حل بهینه (رابطه ۷۰) در صورتی تضمین می‌شود که یک راه‌حل کارآمد باشد. بر این اساس، بدیهی است که مقادیر متغیرهای کمبود یا مازاد همه قیود تابع هدف  $k - 1$  مرتبط فقط باید مساوی با صفر باشد. در غیر این صورت، در هیچ شرایط دیگری راه‌حل کارآمد حاصل نمی‌شود. با توجه به بحث فوق‌الذکر، مدل مبتنی بر کمبود (روابط ۷۱ و ۷۲) پیشنهاد شده است

1. epsilon-constraint  
2. weighted sum method  
3. Haimes et al

$$\min Z = f_j(x) - \alpha \left( \frac{S_1}{|f_1^+(x) - f_1^-(x)|} + \dots + \frac{S_{j-1}}{|f_{j-1}^+(x) - f_{j-1}^-(x)|} + \frac{S_{j+1}}{|f_{j+1}^+(x) - f_{j+1}^-(x)|} + \dots + \frac{S_{k-1}}{|f_{k-1}^+(x) - f_{k-1}^-(x)|} \right) \quad (71)$$

s.t:

$$f_i(x) + s_i = f_i^+(x) - \varepsilon_i |f_i^+(x) - f_i^-(x)| \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} \quad i \neq j \quad (72)$$

$$X \in S$$

$$s_i \in \mathcal{R}^+ \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} \quad i \neq j$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

$$\alpha \in [10^{-8} \ 10^{-3}]$$

که روش محدودیت اپسیلون تقویت شده ما، تنها راه‌حل‌های کارآمد تولید می‌کند.

در این تحقیق، ما تابع هدف اول (رابطه ۶۷) را به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفتیم که بهترین و بدترین حالت تابع هدف دوم به ترتیب

در مسائل فرعی ۱ و ۲ ارائه شده است

### • مسأله فرعی ۱: $Z_2^-$

$$\begin{aligned} \min Z_2 = \mu & \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S q1_{wim}^{st} \varphi P_{ip} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S q2_{wjm}^{st} \varphi B_{jp} \right] \\ & + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \omega \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T GP_{mp} L_{pm}^{st} \right] \\ & + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} QP_{wim}^{st} + \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{jm} QB_{wjm}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T H_{mk} QM_{pmk}^{st} \right. \\ & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T H_{kd} QD_{pkd}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T H_{dc} QK_{pdc}^{st} \right] \quad (51) \end{aligned}$$

S.t:

Constrains (3) to (5), (7), (8), (10) to (13), (15), (16), (18) to (30), (36) to (50), (52) to (64), (68), (69)

### • مسأله فرعی ۲: $Z_2^+$

$$\begin{aligned}
\text{Max } Z_2 = \mu & \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S q1_{wim}^{st} \varphi P_{ip} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S q2_{wjm}^{st} \varphi B_{jp} \right] \\
& + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \omega \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T GP_{mp} L_{pm}^{st} \right] \\
& + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{im} QP_{wim}^{st} + \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T H_{jm} QB_{wjm}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T H_{mk} QM_{pmk}^{st} \right. \\
& \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T H_{kd} QD_{pkd}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T H_{dc} QK_{pdc}^{st} \right] \quad (51)
\end{aligned}$$

S.t:

Constrains (3) to (5), (7), (8), (10) to (13), (15), (16), (18) to (30), (36) to (50), (52) to (64), (68), (69)

پس از حل مسأله‌های فرعی ۱ و ۲ برای  $Z_2$ ، بازه تغییرات به‌دست آمده برای تابع هدف دوم ( $Z_2^* \in [Z_2^-, Z_2^+]$ ) حاصل می‌شود. سپس با توجه به روش محدودیت اِپسیلون تقویت‌شده که در بالا توضیح دادیم، مدل ما به یک مسئله تک هدفه به شرح زیر تبدیل می‌گردد که به راحتی قابل حل است. تابع هدف (۷۳) و محدودیت (۷۴) با توجه به روش محدودیت اِپسیلون تقویت‌شده فرموله‌بندی شدند و مدل ریاضی نهایی به شرح زیر است

$$\begin{aligned}
\text{Min } Z_1 = & \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T PFC_i XPS_{imw}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T BFC_j XBS_{jmw}^{st} + \sum_{k=1}^K KFC_k EK_k \right] \\
& + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T PC_{wi} q1_{wim}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T BC_{wj} q2_{wjm}^{st} \right. \\
& \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T LC_{pm} L_{pm}^{st} \right] \\
& + \sum_{s=1}^S \rho_s \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T TP_{wim} q3_{wim}^{st} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T TB_{wjm} q4_{wjm}^{st} \right. \\
& + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T TM_{pmk} q5_{pmk}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{l \in K} \alpha TL_{pkl} X_{mkl} \\
& \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T TK_{pkd} QK_{pkd}^{st} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T TD_{pdc} QD_{pdc}^{st} \right] \\
& + \sum_{w=1}^W \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S PN_w^s U_{mwp}^{st} + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T PNC_p^s D_{pc}^{st} + \sigma \sum_{s=1}^S \rho_s (\gamma_s^+ + \gamma_s^-) + \beta \sum_{s=1}^S \rho_s \tau_s \\
& - \alpha \left( \frac{S_1}{|Z_2^+ - Z_2^-|} \right) \quad (73)
\end{aligned}$$

S.t:

Constrains (3) to (5), (7), (8), (10) to (13), (15), (16), (18) to (30), (36) to (50), (52) to (64), (68), (69)

$$Z_2 + S_1 = Z_2^+ - \varepsilon | Z_2^+ - Z_2^- | \quad (74)$$

**الگوریتم NSGAI.** این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌یابی چند هدفه استفاده می‌شود. در این الگوریتم جواب‌ها بر اساس اینکه چند جواب بهتر از آنها وجود داشته باشند، رتبه‌بندی و مرتب می‌شوند و جوابی که هیچ جواب دیگری به طور قطع بهتر از آن نباشد، از امتیاز بیشتری برخوردار است [۲۳]. همچنین میزان شایستگی و برانزنگی هر جواب بر اساس رتبه آن جواب و عدم غلبه سایر جواب‌ها مشخص می‌شود [۵۰]. در این الگوریتم به منظور آن که پراکندگی جواب‌ها به نحو مطلوب‌تری تنظیم شود و آنها به طور یکنواخت در فضای جستجو توزیع گردند، ما از ویژگی‌های فاصله تراکمی<sup>۱</sup> استفاده کردیم [۸۲]. در هر تکرار الگوریتم NSGAI، تعدادی از جواب‌های نسل باید به عنوان والد انتخاب شوند تا بتوان از طریق عملگرهای تقاطع و جهش که روی آنها انجام می‌شوند، فرزندان جدید تولید نمود. انتخاب والدین با استفاده از عملکرد دودویی انجام می‌شود. به این منظور در ابتدا دو جواب به طور تصادفی از میان جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند و هر کدام از این دو جواب که از دیگری بهتر باشد، نهایتاً به عنوان یک والد انتخاب می‌شود. معیار انتخاب جواب بهتر در این الگوریتم، در درجه اول، «رتبه» و در درجه دوم، «فاصله تراکمی مربوط به هر جواب» است. به عبارتی، ابتدا رتبه دو جواب با هم مقایسه می‌شود و هر کدام از جواب‌ها که دارای رتبه بهتری بود، انتخاب می‌گردد. هرگاه رتبه هر دو جواب برابر بود، آنگاه جوابی که فاصله تراکمی بیشتری دارد، انتخاب می‌گردد. بعد از انتخاب دو والد توسط عملگر انتخاب دودویی، روی آنها عملگر تقاطع را انجام می‌دهیم تا دو فرزند جدید متولد شوند. این اقدام باید تا زمانی که تعداد فرزندان متولد شده به اندازه‌ای که در نظر گرفته شده است برسد، تکرار گردد. در نهایت ما مجموعه‌ای از فرزندان تولید شده را داریم. سپس باید توسط عملگر جهش، تعدادی جمعیت جهش‌یافته تولید شود. برای این منظور ابتدا توسط عملگر انتخاب دودویی، یک عضو از جمعیت اصلی را انتخاب کرده و سپس روی آن عملگر جهش انجام می‌شود و این عمل تا زمانی که تعداد جمعیت جهش‌یافته به اندازه از پیش در نظر گرفته شده برسد، ادامه می‌یابد. در نهایت دو جمعیت جدید تولید شده (یعنی جمعیت فرزندان و جمعیت جهش‌یافته) که باید آنها را با جمعیت اصلی ادغام کرد، حاصل می‌شود. به دلیل اینکه بعد از ادغام جمعیت‌ها، تعداد جمعیت جامعه بیشتر از جمعیت اصلی می‌شود، باید از بین اعضای جامعه ادغام شده به اندازه تعداد جمعیت اصلی، اعضای را انتخاب نمود و از سایر اعضا چشم‌پوشی کرد. طبیعی است که در این مرحله باید اعضای انتخاب شوند که دارای مطلوبیت بیشتر با توجه به مفاهیم غلبه و فاصله تراکمی هستند. این فرآیند تا محقق شدن شرط توقف الگوریتم مورد نظر ادامه می‌یابد [۴۶، ۷۵]. نحوه نمایش جواب‌ها و اجرای الگوریتم NSGAI در تحقیق حاضر به شرح زیر است

به منظور تشکیل جمعیت اولیه، بردار جواب اولیه مسئله به صورت تصادفی بین صفر و یک در ۵ بخش و به صورت تصادفی پیوسته تولید می‌شود (شکل ۲). کروموزوم‌های مسئله ارائه شده از پنج ماتریس جداگانه تشکیل شده است. ابعاد ماتریس اول، تأمین‌کنندگان اصلی و تولیدکنندگان است و نشان می‌دهد که هر تأمین‌کننده اصلی به کدام تولیدکننده مواد اولیه (قطعات یدکی) ارسال می‌کند (شکل ۳). ابعاد ماتریس دوم به تأمین‌کنندگان پشتیبان و تولیدکنندگان اشاره دارد و نشان می‌دهد که هر تأمین‌کننده پشتیبان به کدام تولیدکننده مواد اولیه (قطعات یدکی) ارسال می‌کند. ماتریس سوم به تبادلات بین تولیدکنندگان و هاب‌ها اشاره دارد و نشان می‌دهد که هر هاب به کدام تولیدکننده تخصیص می‌یابد. ماتریس چهارم ارتباط بین هاب‌ها و مراکز توزیع را به نمایش می‌گذارد و در نهایت ابعاد ماتریس پنجم مراکز توزیع و مشتریان را نشان می‌دهد.

در شکل ۲، بخش اول بردار جواب (K1) مشخص می‌کند که تأمین‌کنندگان اصلی ( $i$ ) به کدام تولیدکننده ( $m$ ) مواد اولیه ( $w$ ) را ارسال کرده است، به این معنی که به تعداد  $i \times m \times w$  درایه عدد تصادفی پیوسته بین صفر و یک ایجاد می‌شود. به عنوان مثال اگر  $i = 5$ ،  $m = 3$  و  $w = 4$  باشد، آنگاه ما ۶۰ عدد تصادفی بین صفر و یک داریم. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تأمین‌کننده اصلی اول

تعداد ۲ مواد اولیه را به تولیدکننده اول ارسال کرده است. همچنین تأمین کننده اصلی دوم هیچ گونه مواد اولیه‌ای به تولیدکننده اول ارسال نکرده است

| K1 | K2 | K3 | K4 | K5 |
|----|----|----|----|----|
| ۶۰ | ۴۸ | ۱۶ | ۳۲ | ۴۸ |

شکل ۲. نحوه نمایش بردار جواب ارتباط تأمین کنندگان اصلی با تولیدکنندگان و ارسال مواد اولیه

| تولیدکنندگان       |   | ۲ | ۳ | ۰ |
|--------------------|---|---|---|---|
| تأمین کنندگان اصلی | ۰ | ۰ | ۱ | ۲ |
|                    | ۴ | ۴ | ۲ | ۱ |
|                    | ۳ | ۳ | ۴ | ۰ |
|                    | ۱ | ۱ | ۱ | ۳ |
|                    | ۱ | ۱ | ۱ | ۳ |

$i=5$  تأمین کنندگان اصلی  
 $m=3$  تولیدکنندگان  
 $w=4$  مواد اولیه

شکل ۳. نحوه نمایش جواب ارتباط تأمین کنندگان اصلی با تولیدکنندگان و ارسال مواد اولیه

ابتدا کروموزوم اولیه به طول اندازه جمعیت به صورت تصادفی تولید می‌شود و توابع هدف مدل به عنوان توابع برابری تعیین می‌گردند. سپس عملگرهای انتخاب، ترکیب و جهش به ترتیب در قالب چرخ رولت، حسابی و حقیقی در نظر گرفته شده و اجرا می‌گردند. قابل توجه است که رویکرد جریمه برای اصلاح کروموزوم‌های غیرموجه به کار گرفته شده است. پس از ادغام جمعیت فعلی با کروموزوم‌های ایجاد شده از عملیات ترکیب و جهش، بهترین کروموزوم‌ها انتخاب شده و به نسل بعدی منتقل می‌گردند. در نهایت الگوریتم هنگامی متوقف می‌شود که تعداد تکرارها به پایان رسیده باشد یا تغییری در جواب حاصل نگردد. تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGAI از طریق طراحی آزمایشات با روش تاگوچی انجام شده است.

**الگوریتم MOPSO.** الگوریتم MOPSO برای حل مسائل چند هدفه بکار گرفته شد [۱۹]. در این الگوریتم، هر جواب مانند یک پرنده در فضای جست‌وجو است که ذره نامیده می‌شود. هر ذره دارای بردار سرعتی است که جهت پرواز ذره را مشخص می‌کند. همه ذرات دارای مقادیر برابری هستند. به طور خلاصه، ذرات در فضای جست‌وجو به دنبال بهترین نقطه پرواز می‌کنند. مهم‌ترین بخش در الگوریتم MOPSO، تعیین بهترین ذره جهانی برای ذره  $i$  به منظور از بین بردن جمعیت است. در این الگوریتم، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو وجود دارند که هر ذره باید یکی از آنها را به عنوان gbest خود انتخاب کند که این فرآیند «تعیین بهترین راهنمای محلی» نامیده می‌شود. در الگوریتم MOPSO، ذرات باید با جهت هر تابع هدف سازگار شوند. از این رو، هر ذره در هر گروه دارای pbest خاص خود است، اما gbest هر گروه با gbest گروه‌های دیگر برای تکرارهای بعدی جایگزین می‌شود. به این ترتیب، یک مجموعه پویا برای تبادل ذرات توسط هر تکرار ایجاد می‌شود، ذرات با یکدیگر مقایسه می‌شوند، راه‌حل‌های غیر غالب<sup>۱</sup> ذخیره می‌شوند و بقیه راه‌حل‌ها در پایان هر تکرار حذف می‌شوند [۷۲، ۸۲]. اجرای الگوریتم MOPSO در تحقیق حاضر به شرح زیر است

نحوه نمایش جواب‌ها در الگوریتم MOPSO، مشابه الگوریتم NSGAI است با این تفاوت که در این الگوریتم به جای کروموزوم از ذره استفاده می‌گردد. در ابتدا به منظور ایجاد جمعیت اولیه، همانند فرآیند تولید جمعیت اولیه در الگوریتم NSGAI اقدام می‌کنیم که تعداد ذرات و اندازه آرشیو خارجی نیز تعیین می‌شوند. سپس اعضای نامغلوب را جدا کرده و آنها را در حافظه خارجی ذخیره می‌کنیم. در ادامه فضای هدف کشف شده را سلول‌بندی می‌کنیم و با به کارگیری روش چرخ رولت احتمال انتخاب سلول‌ها تعیین می‌گردد. سپس یکی از اعضای سلول به صورت تصادفی به عنوان رهبر انتخاب می‌گردد. به منظور عملکردهای الگوریتم MOPSO که سرعت یا ارزشمندی هر ذره را نشان می‌دهد،

بهترین جواب هر ذره (pbest) و بهترین جواب کلی یا رهبر (gbest) تعیین می‌شوند. با توجه به ارزش محاسبه‌شده هر ذره، اگر موقعیت جدید ذره، بهترین جواب (رهبر) را مغلوب کند، موقعیت ذره جدید جای بهترین جواب را می‌گیرد و اگر هیچ‌کدام نتوانند همدیگر را مغلوب کنند، یکی از دو موقعیت مورد نظر به طور تصادفی به عنوان رهبر انتخاب می‌شوند. سپس اعضای نامغلوب جمعیت فعلی را به حافظه خارجی اضافه می‌کنیم و اعضای مغلوب و بیش از ظرفیت حافظه خارجی را حذف می‌کنیم. در نهایت الگوریتم هنگامی متوقف می‌شود که تعداد تکرارها به پایان رسیده باشد یا تغییری در جواب حاصل نگردد. تنظیم پارامترهای الگوریتم MOPSO از طریق طراحی آزمایشات با روش تاگوچی انجام شده است.

**طراحی آزمایشات (روش تاگوچی).** نحوه تعیین پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری بر عملکرد این الگوریتم‌ها بسیار تأثیرگذار است. در این راستا، دو ایده کلی برای تعیین بهترین مقادیر پارامترها مطرح شده است [۷۲، ۸۲]: ۱- مقادیر ثابت از ابتدا تا انتهای اجرای الگوریتم و ۲- روش‌های پویا و انطباقی که اجازه تغییر پارامتر را در هنگام اجرای الگوریتم فراهم می‌آورند و با پیشرفت الگوریتم منطبق می‌شوند. از جمله روش‌های پویا و انطباقی که دارای کاربرد و اعتبار بیشتری است، می‌توان به روش تاگوچی اشاره کرد. در روش تاگوچی عوامل به دو دسته اصلی قابل کنترل و نوبز تقسیم می‌شوند. نوبزها عواملی هستند که نمی‌توان هیچ‌گونه کنترلی روی آنها داشت. روش تاگوچی به دنبال تعیین بهترین سطح برای عوامل قابل کنترل و کمینه کردن تأثیرات نوبز است. همچنین این روش اهمیت هر عامل را برحسب تأثیر اصلی آنها روی متغیر پاسخ تعیین می‌کند. روش تاگوچی یک طرح آزمایش قابل اتکا است که مقادیر متغیر پاسخ را به نسبت سیگنال به نوبز ( $\frac{S}{N}$ ) تبدیل می‌کند و هدف اصلی در این روش، حداقل کردن  $\frac{S}{N}$  است.  $\frac{S}{N}$  به مقدار پراکندگی موجود در متغیر پاسخ اشاره می‌کند. در تحقیق حاضر، مراحل اجرای روش تاگوچی به شرح زیر است

۱- نسبت سیگنال به نوبز ( $\frac{S}{N}$ ) برای هر آزمایش محاسبه می‌شود؛ ۲- برای عواملی که تأثیر قابل توجهی بر  $\frac{S}{N}$  دارند، سطح بهینه  $\frac{S}{N}$  را بیشینه می‌کند؛ ۳- برای عواملی که تأثیر بسیار اندکی بر  $\frac{S}{N}$  و تأثیر قابل توجهی بر میانگین متغیر پاسخ دارند، سطح بهینه مقدار تابع هدف را بهینه می‌کند و ۴- برای عواملی که تأثیر بسیار اندکی بر  $\frac{S}{N}$  و میانگین متغیر پاسخ دارند، سطحی که دارای کمترین زمان محاسباتی است، بهینه خواهد بود. در این پژوهش از درصد انحراف نسبی<sup>۱</sup> (RPD) برای نرمال‌سازی مقادیر متغیر پاسخ به منظور هدف کمینه‌سازی استفاده شده است (رابطه ۷۵). در آنجا که کمترین مقدار متغیر پاسخ یک نتیجه مطلوب است، بنابراین نسبت سیگنال به نوبز ( $\frac{S}{N}$ ) طبق رابطه ۷۶ محاسبه می‌گردد.

$$RPD = \left( \frac{Solve_i - Solve_{min}}{Solve_{min}} \right) \times 100 \quad (75)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (76)$$

که در آن داریم:

$Solve_i$ : مقدار تابع هدف  $i$  امین آزمایش

$Solve_{min}$ : بهترین مقدار تابع هدف حاصل شده

$Solve_{min}$ : مقدار متغیر پاسخ در  $i$  امین آزمایش

$n$ : تعداد تکرار

<sup>۱</sup>. Relative Percentage Deviation

#### ۴. تحلیل داده و یافته‌های پژوهش

نتایج محاسباتی. در این بخش، مدل ارائه شده بر اساس ۱۰ مسئله کوچک و متوسط از طریق روش محدودیت افسیلون تقویت شده و ۱۰ مسأله بزرگ توسط الگوریتم‌های NSGAI و MOPSO حل گردید و نتایج حاصله از دیدگاه‌های مختلف ارزیابی و تحلیل شدند. به منظور حل مسائل کوچک و متوسط از نرم افزار GAMS و برای حل مسائل بزرگ از نرم افزار MATLAB استفاده شد و محاسبات توسط لپ تاپ با پردازنده Core i5 1.6 GHZ و رم 8 GB انجام گردید. جدول ۲ ابعاد مسائل کوچک و متوسط را بر اساس تعداد پارامترهای ورودی و مقادیر توابع هدف نشان می‌دهد.

جدول ۲. حل مسائل با ابعاد کوچک و متوسط

| شماره مسئله | پارامترها |         |         |     |     |     |     |     |     |     |     | روش محدودیت افسیلون تقویت شده |
|-------------|-----------|---------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------------------|
|             | $Z_1$     | $Z_2^+$ | $Z_2^-$ | $s$ | $t$ | $w$ | $p$ | $d$ | $m$ | $j$ | $i$ |                               |
| ۱           | ۱۷۲۵۴     | ۲۱۳۳    | ۷۲۴     | ۲   | ۲   | ۴   | ۲   | ۳   | ۲   | ۲   | ۳   | ۴.۷                           |
| ۲           | ۲۰۴۸۷     | ۲۶۷۶    | ۸۱۳     | ۲   | ۲   | ۴   | ۳   | ۳   | ۲   | ۲   | ۴   | ۴.۹                           |
| ۳           | ۲۵۶۱۴     | ۲۹۳۸    | ۸۹۹     | ۲   | ۳   | ۵   | ۴   | ۴   | ۲   | ۳   | ۴   | ۶.۸                           |
| ۴           | ۲۳۴۶۷     | ۴۲۰۵    | ۹۸۰     | ۲   | ۲   | ۴   | ۳   | ۴   | ۲   | ۲   | ۵   | ۶.۵                           |
| ۵           | ۲۸۰۱۵     | ۶۷۱۱    | ۱۱۶۸    | ۳   | ۳   | ۵   | ۴   | ۵   | ۳   | ۳   | ۵   | ۷.۲                           |
| ۶           | ۳۰۱۵۸     | ۸۰۷۴    | ۱۴۹۲    | ۲   | ۳   | ۷   | ۴   | ۵   | ۳   | ۳   | ۶   | ۷.۴                           |
| ۷           | ۳۳۲۹۲     | ۹۹۰۶    | ۱۷۰۳    | ۳   | ۴   | ۷   | ۳   | ۶   | ۳   | ۴   | ۶   | ۷.۷                           |
| ۸           | ۳۴۲۸۶     | ۱۲۰۸۸   | ۱۹۲۵    | ۲   | ۳   | ۸   | ۴   | ۷   | ۳   | ۳   | ۷   | ۷.۶                           |
| ۹           | ۳۵۲۳۹     | ۱۵۷۰۲   | ۲۴۶۹    | ۳   | ۴   | ۹   | ۴   | ۸   | ۴   | ۴   | ۷   | ۷.۹                           |
| ۱۰          | ۳۹۴۷۵     | ۱۹۰۵۴   | ۳۳۷۱    | ۳   | ۵   | ۱۰  | ۴   | ۹   | ۴   | ۵   | ۸   | ۸.۴                           |

به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری از روش تاگوچی استفاده شد. برای الگوریتم NSGAI، پارامترهای جمعیت، تعداد نسل، احتمال ترکیب و احتمال جهش در دو سطح با طرح تاگوچی آزمایش شدند که هرکدام از این آزمایشات ۵ مرتبه تکرار شده است. همچنین برای الگوریتم MOPSO، پارامترهای اندازه جمعیت، تعداد تکرار، ضریب اینرسی، ضریب یادگیری جمعی و ضریب یادگیری فردی در دو سطح با طرح تاگوچی آزمایش شدند که این آزمایشات نیز ۵ مرتبه تکرار شده است. طرح آزمایشات مربوط به هر دو الگوریتم در نرم افزار Minitab اجرا گردید که در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. اندازه جمعیت اولیه ۵۰، تعداد نسل ۲۰۰، احتمال ترکیب ۰.۹، احتمال جهش ۰.۱ و منطق انتخاب رولت به عنوان سطوح بهینه پارامترها برای الگوریتم NSGAI در نظر گرفته شده است. همچنین سطوح بهینه مقدار جمعیت اولیه و مقدار اعضای موجود در خزانه نامغلوب ۵۰، تعداد تکرار ۲۰۰، ضریب اینرسی در حرکت ذرات ۰.۵، ضریب یادگیری جمعی ۱ و ضریب یادگیری فردی ۲ برای الگوریتم MOPSO در نظر گرفته شدند.

جدول ۳. آزمایشات تاگوچی برای پارامترهای الگوریتم NSGAI

| شماره آزمایش | اندازه جمعیت | تعداد نسل | احتمال ترکیب | احتمال جهش |
|--------------|--------------|-----------|--------------|------------|
| ۱            | ۵۰           | ۱۰۰       | ۰.۷          | ۰.۱        |
| ۲            | ۵۰           | ۱۰۰       | ۰.۷          | ۰.۳        |
| ۳            | ۵۰           | ۲۰۰       | ۰.۹          | ۰.۱        |
| ۴            | ۵۰           | ۲۰۰       | ۰.۹          | ۰.۳        |
| ۵            | ۱۰۰          | ۱۰۰       | ۰.۷          | ۰.۱        |
| ۶            | ۱۰۰          | ۱۰۰       | ۰.۷          | ۰.۳        |
| ۷            | ۱۰۰          | ۲۰۰       | ۰.۹          | ۰.۱        |
| ۸            | ۱۰۰          | ۲۰۰       | ۰.۹          | ۰.۳        |

جدول ۴. پارامترهای الگوریتم *MOPSO* و سطوح هر یک از آنها در طراحی آزمایشات تاگوچی

| سطوح | اندازه جمعیت | تعداد تکرار | ضریب اینرسی | ضریب یادگیری جمعی | ضریب یادگیری فردی |
|------|--------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|
| ۱    | ۵۰           | ۲۰۰         | ۰.۵         | ۰.۵               | ۱                 |
| ۲    | ۷۰           | ۱۰۰         | ۰.۷         | ۱                 | ۲                 |

جدول ۵ مقادیر پارامترهای مقیاس شده مدل را به نمایش می‌گذارد. جدول ۶ ابعاد مسائل بزرگ را بر اساس تعداد پارامترهای ورودی و مقادیر توابع هدف نشان می‌دهد. برای مقایسه دو الگوریتم از چهار معیار *Time*، *Diversity*، *Spacing* و *MID* استفاده شد که نتایج آن در جداول ۷ و ۸ گزارش شده است

جدول ۵. مقادیر مقیاس شده پارامترهای مدل

| پارامترها  | دامنه تغییر   | پارامترها      | دامنه تغییر   | پارامترها       | دامنه تغییر  | پارامترها      | دامنه تغییر   |
|------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|----------------|---------------|
| $PC_{iw}$  | (۰.۲، ۱.۰)    | $NS_{mw}^{st}$ | (۱.۵)         | $CAP_{wi}^{st}$ | (۱۰۰۰.۲۰۰۰۰) | $H_{kd}$       | (۰.۵، ۰.۹)    |
| $BC_{jw}$  | (۰.۲۵، ۱.۵)   | $TP_{wim}$     | (۰.۲، ۲.۷)    | $CAB_{wj}^{st}$ | (۲۰۰.۱۷۰۰۰)  | $H_{dc}$       | (۰.۲۰، ۰.۴)   |
| $PFC_i$    | (۱.۰، ۱.۰۰۰)  | $TB_{wjm}$     | (۰.۲۲، ۳)     | $CAM_{pm}^{st}$ | (۲۵۰۰.۲۲۰۰۰) | $GP_{mp}$      | (۰.۰۱۰۰، ۰.۷) |
| $BFC_j$    | (۱۲.۲۵، ۰)    | $TM_{pmk}$     | (۱.۰، ۳.۵)    | $CAK_k^{st}$    | (۵۰۰.۱۵۰۰۰)  | $SP_{wm}^{st}$ | (۱.۱، ۱.۰۰۰)  |
| $LC_{pm}$  | (۱۵۰۰.۴۵۰، ۰) | $TL_{pkl}$     | (۱.۲، ۵)      | $CAD_d^{st}$    | (۲۰.۱۱۰)     | $SM_{pm}^{st}$ | (۲۰۰.۱۰۰۰۰۰)  |
| $\rho_s$   | (۰.۱۵، ۰.۵۵)  | $TK_{pkd}$     | (۱.۵)         | $H_{im}$        | (۱.۵، ۵)     | $SK_{pk}^{st}$ | (۲۰.۱۵۰)      |
| $N_i^{st}$ | (۱.۱، ۰)      | $TD_{pdc}$     | (۰.۵، ۱.۵)    | $H_{jm}$        | (۱.۵، ۷)     | $SD_{pd}^{st}$ | (۱.۶۰)        |
| $G_{wp}$   | (۱.۱، ۶)      | $KFC_k$        | (۲۰۰۰۰.۵۰۰۰۰) | $H_{mk}$        | (۲.۹)        |                |               |

جدول ۶. حل مسائل با ابعاد بزرگ

| شماره مسئله | تعداد پارامترها |          |          |          |          |          |          |          |                       |                       |              |                    |                       | NSGAI                 |              | MOPSO              |  |
|-------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------------|--|
|             | <i>i</i>        | <i>j</i> | <i>m</i> | <i>d</i> | <i>p</i> | <i>w</i> | <i>t</i> | <i>s</i> | <i>Z</i> <sub>2</sub> | <i>Z</i> <sub>1</sub> | زمان (ثانیه) | خطا/ انحراف (درصد) | <i>Z</i> <sub>2</sub> | <i>Z</i> <sub>1</sub> | زمان (ثانیه) | خطا/ انحراف (درصد) |  |
| ۱           | ۱۰              | ۵        | ۴        | ۱۵       | ۵        | ۱۰       | ۴        | ۳        | ۱۱۵۳۴.۲۷              | ۶۱۲۴۷.۲۲              | ۳۰۹.۳        | ۰                  | ۱۱۲۰۸.۴۳              | ۶۱۱۵۴.۶۹              | ۲۴۵.۵        | ۰                  |  |
| ۲           | ۱۰              | ۶        | ۵        | ۱۷       | ۵        | ۱۰       | ۵        | ۳        | ۱۳۹۷۳.۶۸              | ۶۴۲۴۸.۰۴              | ۶۷۵.۸        | ۰                  | ۱۳۰۷۵.۵۶              | ۶۳۸۹۵.۵۸              | ۴۷۳.۱        | ۰                  |  |
| ۳           | ۱۰              | ۷        | ۶        | ۲۰       | ۷        | ۲۰       | ۶        | ۳        | ۱۸۳۵۷.۹۳              | ۶۹۱۹۲.۲۹              | ۹۰.۱۶        | ۰                  | ۱۹۳۱۰.۲۴              | ۶۹۱۸۵.۶۳              | ۸۲۲.۸        | ۰                  |  |
| ۴           | ۲۰              | ۹        | ۷        | ۲۰       | ۷        | ۲۰       | ۶        | ۳        | ۲۳۰۹۴.۴۷              | ۷۵۷۵۳.۰۸              | ۱۳۴۹.۵       | ۰                  | ۲۲۴۱۹.۲۸              | ۷۵۰۹۴.۷۵              | ۱۳۰۵.۹       | ۰.۷۸               |  |
| ۵           | ۲۰              | ۱۰       | ۸        | ۲۲       | ۷        | ۲۵       | ۷        | ۳        | ۲۴۸۰۶.۵۶              | ۷۷۲۰۸.۱۷              | ۱۶۲۷.۶       | ۱.۱۲               | ۲۳۹۶۲.۱۹              | ۷۶۵۹۱.۱۱              | ۱۶۰۸.۲       | ۱.۳۸               |  |
| ۶           | ۲۰              | ۱۱       | ۹        | ۲۵       | ۸        | ۲۵       | ۸        | ۴        | ۲۶۰۹۸.۱۷              | ۸۰۶۲۹.۵۷              | ۱۸۹۵.۵       | ۰.۰۹               | ۲۵۳۸۶.۹۵              | ۸۰۱۵۷.۰۳              | ۱۹۸۲.۴       | ۰                  |  |
| ۷           | ۳۰              | ۱۳       | ۱۰       | ۲۵       | ۸        | ۳۰       | ۸        | ۴        | ۳۳۸۱۵.۰۱              | ۸۸۵۹۸.۶۶              | ۲۱۹۴.۱       | ۰                  | ۳۳۰۷۶.۸               | ۸۷۷۹۷.۹۱              | ۲۱۹۲.۷       | ۰                  |  |
| ۸           | ۴۰              | ۲۰       | ۱۰       | ۳۰       | ۱۰       | ۳۰       | ۱۰       | ۴        | ۳۷۵۵۴.۷۳              | ۹۲۳۷۰.۴۵              | ۲۸۱۷.۲       | ۲.۱۴               | ۳۵۹۳۴.۶۶              | ۹۱۰۸۲.۳۱              | ۲۸۱۱.۶       | ۳.۴۸               |  |
| ۹           | ۵۰              | ۳۰       | ۱۵       | ۴۰       | ۱۲       | ۴۰       | ۱۲       | ۵        | ۴۶۹۱۳.۷۲              | ۱۰۱۲۵۴.۲۸             | ۳۹۴۵.۸       | ۰                  | ۴۶۱۱۹.۳۷              | ۱۰۱۰۵۹.۷۳             | ۳۶۹۱.۲       | ۰                  |  |
| ۱۰          | ۶۰              | ۴۰       | ۱۵       | ۵۰       | ۱۵       | ۵۰       | ۱۵       | ۵        | ۶۹۴۸۵.۳۵              | ۱۲۴۵۷۱.۰۷             | ۵۱۰۷.۴       | ۱.۱۸               | ۶۷۷۰۴.۹۲              | ۱۲۳۲۴.۵۸              | ۴۹۷۳.۵       | ۰                  |  |

جدول ۷. شاخص‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای الگوریتم‌های *MOPSO* و *NSGAI*

| شماره مسئله | MOPSO |         |           |        | NSGAI |         |           |        | انحراف/ خطا |
|-------------|-------|---------|-----------|--------|-------|---------|-----------|--------|-------------|
|             | MID   | Spacing | Diversity | Time   | MID   | Spacing | Diversity | Time   |             |
| ۱           | ۱۷۶۶  | ۹۷۶۹    | ۸۹۷۴      | ۲۱۷۶.۸ | ۱۳۴۱  | ۹۲۰.۲   | ۱۰۰.۲۹    | ۱۷۰۱.۵ | ۰.۴۱        |
| ۲           | ۱۷۷۹  | ۹۷۸۲    | ۸۹۹۲      | ۲۱۹۶.۷ | ۱۳۶۲  | ۹۲۱۱    | ۱۰۰.۳۶    | ۱۷۶۴.۱ | ۰.۴۴        |
| ۳           | ۱۷۸۶  | ۹۸۱۴    | ۹۰۰.۷     | ۲۲۴۹.۶ | ۱۳۸۲  | ۹۲۴۱    | ۱۰۰.۵۲    | ۱۸۲۵.۴ | ۰.۴۹        |
| ۴           | ۱۷۸۹  | ۹۸۳۶    | ۹۰۰.۳     | ۲۳۱۵.۹ | ۱۳۹۴  | ۹۲۵۳    | ۱۰۰.۴۱    | ۱۸۸۸.۶ | ۰.۴۹        |
| ۵           | ۱۸۳۱  | ۹۸۵۳    | ۹۰.۲۱     | ۲۳۹۲.۷ | ۱۴۲۰  | ۹۲۶۱    | ۱۰۰.۵۸    | ۱۹۰۵.۶ | ۰.۴۳        |
| ۶           | ۱۸۴۵  | ۹۸۴۲    | ۹۰.۱۱     | ۲۴۸۱.۵ | ۱۴۴۵  | ۹۲۶۷    | ۱۰۰.۵۸    | ۱۹۸۰.۴ | ۰.۴۶        |
| ۷           | ۱۸۶۹  | ۹۸۷۰    | ۹۰.۲۳     | ۲۵۴۳.۷ | ۱۴۵۳  | ۹۲۷۱    | ۱۰۰.۶۰    | ۲۰۵۹.۹ | ۰.۴۸        |
| ۸           | ۱۸۷۴  | ۹۸۶۶    | ۹۰.۲۱     | ۲۶۶۳.۲ | ۱۴۵۶  | ۹۲۹۴    | ۱۰۰.۵۵    | ۲۱۰۲.۴ | ۰.۴۳        |
| ۹           | ۱۸۹۲  | ۹۸۹۵    | ۹۰.۲۷     | ۲۷۸۰.۳ | ۱۴۷۵  | ۹۳۲۲    | ۱۰۰.۶۸    | ۲۳۴۲.۷ | ۰.۴۲        |
| ۱۰          | ۱۹۲۹  | ۹۹۴۳    | ۹۰.۳۱     | ۳۰۸۳.۶ | ۱۴۸۳  | ۹۳۲۸    | ۱۰۰.۷۳    | ۲۵۳۶.۴ | ۰.۴۵        |

جدول ۸. مقایسه میانگین شاخص‌های برای الگوریتم‌های NSGAI و MOPSO

| الگوریتم      | خطا/ انحراف | Time   | Diversity | Spacing | MID   |
|---------------|-------------|--------|-----------|---------|-------|
| NSGAI         | ۰.۴۵        | ۲۰۱۰.۷ | ۱۰۰.۵۳    | ۹۲۶۵    | ۱۴۲۲  |
| MOPSO         | ۰.۵۶        | ۲۴۸۸.۴ | ۹۰.۱۱     | ۹۸۴۷    | ۱۸۳۶  |
| الگوریتم برتر | NSGAI       | NSGAI  | NSGAI     | NSGAI   | NSGAI |

با توجه به نتایج حاصله در جدول ۸، خطای الگوریتم NSGAI برابر ۰.۴۵ است که نسبت به خطای MOPSO کمتر است. بر این اساس، می‌توان بیان کرد که NSGAI نسبت به MOPSO دارای برتری است. همچنین، عملکرد زمان اجرای NSGAI برابر ۲۰۱۰.۷ است که بسیار مطلوب‌تر از عملکرد زمانی MOPSO ( $Time_{MOPSO} = 24884$ ) است. بر اساس استدلال غلامی زنجانی و همکاران (۲۰۲۱)، هرچه مقدار شاخص Diversity بیشتر باشد، بهتر است. بنابراین الگوریتم NSGAI با Diversity برابر ۱۰۰.۵۳، بهتر از الگوریتم MOPSO است ( $Diversity_{MOPSO} = 9011$ ). همچنین هرچه مقدار شاخص‌های Spacing و MID کمتر باشد، نشان‌دهنده برتری الگوریتم است. بر اساس نتایج حاصله، NSGAI نسبت به MOPSO نتایج بهتری در شاخص‌های Spacing و MID دارد.

**مطالعه موردی.** در این بخش، ما از داده‌های واقعی شرکت ایران خودرو به منظور پیاده‌سازی مدل زنجیره تأمین پیشنهادی استفاده کردیم. همچنین بخشی از پارامترهای مدل که توسط شرکت پوشش داده نشدند از طریق اجماع نظر کارشناسان شرکت تعیین گردیدند. شرکت ایران خودرو با هدف تولید انبوه انواع اتومبیل در سال ۱۳۴۵ تأسیس شد. اگرچه پیشرفت‌های فناورانه و تولید محصولات متنوع این شرکت در سال-های گذشته قابل توجه بوده است، اما این شرکت کمتر توانسته است پاسخگوی نیاز بازار ایران باشد. بدیهی است که از اهداف مهم این شرکت، تعامل پایدار با شرکای کسب و کار به منظور عرضه به موقع محصولات منطبق با نیاز مشتری، استفاده بهینه از منابع، کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری می‌باشد. در این راستا، مدل پیشنهادی می‌تواند شرکت ایران خودرو را در جهت دستیابی به برخی اهداف کمک نماید. جدول ۹ اندازه مسئله واقعی ما را بر اساس پارامترهای ورودی نشان می‌دهد که شامل ۴ تأمین‌کننده اصلی، ۳ تأمین‌کننده پشتیبان، ۲۸ مرکز توزیع و ۳ نوع قطعه است. افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته‌شده برای این مسئله شامل ۱۲ دوره است. مقادیر توابع هدف برای این مسئله با فرض  $s = 1$  و  $\rho_1 = 015$  برابر  $Z_1 = 5729364$  و  $Z_2 = 902811$  است و سایر نتایج در جداول ۱۰ تا ۱۴ نمایش داده می‌شوند.

جدول ۹. اندازه مسئله واقعی بر اساس پارامترها

| تعداد تأمین‌کنندگان اصلی | تعداد تأمین‌کنندگان پشتیبان | تعداد توزیع‌کنندگان | تعداد محصولات | تعداد مواد اولیه (قطعه) | دوره زمانی |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------|-------------------------|------------|
| (i)                      | (j)                         | (d)                 | (p)           | (w)                     | (t)        |
| ۴                        | ۳                           | ۲۸                  | ۱             | ۳                       | ۳          |

جدول ۱۰. مجموعه جواب متغیرهای  $QP_{wim}^{st}$  و  $XPS_{imw}^{st}$  برای شرکت ایران خودرو با فرض  $s = 1$  و  $\rho_1 = 015$ 

| تأمین‌کننده / قطعه | دوره ۱ | دوره ۲ | دوره ۳ |
|--------------------|--------|--------|--------|
| قطعه A             | ۰      | ۲۱۶۹   | ۳۰۳۴   |
| تأمین‌کننده اصلی ۱ | ۹۹۵۲   | ۱۰۵۵۲  | ۷۰۹۳   |
| قطعه B             | ۸۵۶۶   | ۷۶۴۳   | ۱۳۰۵۹  |
| قطعه C             | ۲۲۶۲   | ۱۹۲۰   | ۰      |
| تأمین‌کننده اصلی ۲ | ۰      | ۰      | ۴۱۵۲   |
| قطعه A             | ۴۱۰۹   | ۶۳۰۳   | ۴۹۵۲   |
| قطعه B             | ۲۹۵۳   | ۱۸۱۹   | ۳۵۶۸   |
| تأمین‌کننده اصلی ۳ | ۴۰۳۹   | ۵۰۳۹   | ۵۷۱۴   |
| قطعه C             | ۸۷۳۴   | ۱۳۷۸۲  | ۱۷۲۴۷  |
| قطعه A             | ۳۴۰۸   | ۳۵۹۲   | ۴۰۵۵   |
| تأمین‌کننده اصلی ۴ | ۵۶۳۷   | ۶۳۰۹   | ۷۰۰۶   |
| قطعه B             | ۱۱۱۵۸  | ۸۰۶۳   | ۱۰۲۴۳  |
| قطعه C             |        |        |        |

نکته: در مجموعه جواب‌های حاصله، اگر  $QP_{wjm}^{st}$  بزرگتر از یک باشد، آنگاه  $XPS_{imw}^{st}$  برابر ۱ می‌شود، در غیر این صورت، صفر می‌شود.

جدول ۱۱. مجموعه جواب متغیرهای  $QB_{wjm}^{st}$  و  $XBS_{jmw}^{st}$  برای شرکت ایران خودرو با فرض  $s = 1$  و  $\rho_1 = 0.15$

| دوره ۳ | دوره ۲ | دوره ۱ | تأمین‌کننده / قطعه           |
|--------|--------|--------|------------------------------|
| ۱۰۱۵   | ۷۹۱    | ۱۷۵۱   | قطعه A                       |
| ۰      | ۰      | ۲۷۷۰   | تأمین‌کننده پشتیبان ۱ قطعه B |
| ۴۷۸۶   | ۰      | ۴۹۴۲   | قطعه C                       |
| ۱۲۷۰   | ۱۲۲۹   | ۰      | قطعه A                       |
| ۳۹۶۴   | ۳۴۸۷   | ۰      | تأمین‌کننده پشتیبان ۲ قطعه B |
| ۶۶۶۴   | ۸۶۵۳   | ۲۹۱۴   | قطعه C                       |
| ۲۳۶۳   | ۲۱۵۰   | ۲۰۲۶   | قطعه A                       |
| ۲۶۸۱   | ۱۹۵۳   | ۲۴۰۲   | تأمین‌کننده پشتیبان ۳ قطعه B |
| ۴۲۶۹   | ۱۲۳۶   | ۹۱۷۷   | قطعه C                       |

نکته: در مجموعه جواب‌های حاصله، اگر  $QB_{wjm}^{st}$  بزرگتر از یک باشد، آنگاه  $XBS_{jmw}^{st}$  برابر ۱ می‌شود، در غیر این صورت، صفر می‌شود.

جدول ۱۲. مجموعه جواب متغیرهای  $EK_k$ ،  $XM_{mk}$ ،  $QM_{pmk}^{st}$  و  $QK_{pkd}^{st}$  برای شرکت ایران خودرو در  $t = 1$  با فرض  $s = 1$  و  $\rho_1 = 0.15$

| تولیدکننده          | هاب‌ها (تعداد محصولات اختصاص یافته)   | توزیع کنندگان (تعداد محصولات ارسال شده)   |
|---------------------|---|---|
| تهران (۳۲۹۰)        | تهران (۸۹۱)، قم (۶۵)، قزوین (۱۹۷)، مرکزی (۴۶۰)، اصفهان (۶۲۵)، مازندران (۵۵۹)، گیلان (۴۹۳) | تهران (۸۹۱)، قم (۶۵)، قزوین (۱۹۷)، مرکزی (۴۶۰)، اصفهان (۶۲۵)، مازندران (۵۵۹)، گیلان (۴۹۳)   |
| تهران (شرکت)        | سمنان (۲۰۳۰)  | سمنان (۵۸۹)، گلستان (۵۴۸)، خراسان (۸۹۳)   |
| ایران خودرو (۱۲۴۰۰) | زنجان (۱۹۸۰)، همدان (۱۶۰۰)، یزد (۲۰۷۰)  | زنجان (۴۱۷)، اردبیل (۴۷۵)، آذربایجان غربی (۵۱۴)، آذربایجان شرقی (۵۷۴)<br>همدان (۳۲۰)، کردستان (۳۶۸)، کرمانشاه (۳۵۲)، لرستان (۲۸۸)، ایلام (۲۷۲)              |
|                     | چهارمحال بختیاری (۱۴۳۰)   | یزد (۴۵۷)، فارس (۵۳۸)، کرمان (۴۳۴)، هرمزگان (۳۹۳)، سیستان و بلوچستان (۲۴۸)<br>چهارمحال بختیاری (۲۸۶)، کهگیلویه و بویراحمد (۳۲۸)، خوزستان (۴۱۴)، بوشهر (۴۰۲) |

جدول ۱۳. مجموعه جواب متغیرهای  $EK_k$ ،  $XM_{mk}$ ،  $QM_{pmk}^{st}$  و  $QK_{pkd}^{st}$  برای شرکت ایران خودرو در  $t = 2$  با فرض  $s = 1$  و  $\rho_1 = 0.15$

| تولیدکننده          | هاب   | توزیع کنندگان   |
|---------------------|---|---|
| تهران (۳۶۳۰)        | تهران (۹۸۳)، قم (۷۲)، قزوین (۲۱۷)، مرکزی (۵۰۸)، اصفهان (۶۸۹)، مازندران (۶۱۷)، گیلان (۵۴۴) | تهران (۹۸۳)، قم (۷۲)، قزوین (۲۱۷)، مرکزی (۵۰۸)، اصفهان (۶۸۹)، مازندران (۶۱۷)، گیلان (۵۴۴)   |
| تهران (شرکت)        | سمنان (۲۱۶۰)  | سمنان (۶۲۷)، گلستان (۵۸۳)، خراسان (۹۵۰)   |
| ایران خودرو (۱۳۶۷۰) | زنجان (۲۰۹۰)، همدان (۱۸۱۰)، یزد (۲۱۶۰)  | زنجان (۴۴۰)، اردبیل (۵۰۱)، آذربایجان غربی (۵۴۳)، آذربایجان شرقی (۶۰۶)<br>همدان (۳۶۴)، کردستان (۴۱۶)، کرمانشاه (۳۹۸)، لرستان (۳۲۵)، ایلام (۳۰۷)              |
|                     | چهارمحال بختیاری (۱۸۲۰)   | یزد (۴۷۷)، فارس (۵۶۱)، کرمان (۴۵۳)، هرمزگان (۴۱۰)، سیستان و بلوچستان (۲۵۹)<br>چهارمحال بختیاری (۳۶۶)، کهگیلویه و بویراحمد (۴۱۸)، خوزستان (۵۲۷)، بوشهر (۵۰۹) |

جدول ۱۴. مجموعه جواب متغیرهای  $EK_k$ ،  $XM_{mk}$ ،  $QM_{pmk}^{st}$  و  $QK_{pkd}^{st}$  برای شرکت ایران خودرو در  $t = 3$  با فرض  $s = 1$  و  $\rho_1 = 0.15$

| تولیدکننده    | هاب                     | توزیع‌کنندگان  |
|---------------|-------------------------|--|
| تهران (۳۹۱۰)  | تهران (۳۹۱۰)            | تهران (۱۰۵۹)، قم (۷۸)، قزوین (۲۳۴)، مرکزی (۵۴۷)، اصفهان (۷۴۲)، مازندران (۶۶۴)، گیلان (۵۸۶) |
| تهران (شرکت)  | سمنان (۲۴۱۵)            | سمنان (۷۰۰)، گلستان (۶۵۳)، خراسان (۱۰۶۲)   |
| ایران (خودرو) | زنجان (۲۲۸۰)            | زنجان (۴۷۸)، اردبیل (۵۵۰)، آذربایجان غربی (۵۹۲)، آذربایجان شرقی (۶۶۱)                      |
| (۱۵۳۰۵)       | همدان (۲۱۱۰)            | همدان (۴۲۴)، کردستان (۴۸۵)، کرمانشاه (۴۶۴)، لرستان (۳۷۹)، ایلام (۲۵۸)                      |
|               | یزد (۲۴۳۰)              | یزد (۵۳۴)، فارس (۶۳۴)، کرمان (۵۱۰)، هرمزگان (۴۶۱)، سیستان و بلوچستان (۲۹۱)                 |
|               | چهارمحال بختیاری (۲۱۶۰) | چهارمحال بختیاری (۴۳۲)، کهگیلویه و بویراحمد (۴۹۸)، خوزستان (۶۲۶)، بوشهر (۶۰۴)              |

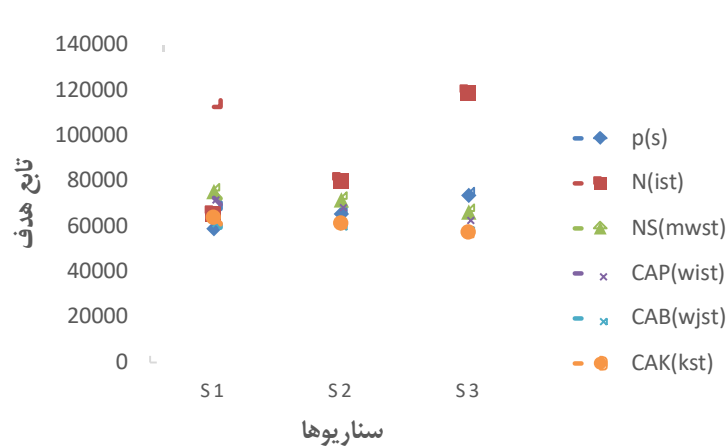
با توجه به جداول ۱۰ و ۱۱، مجموعه جواب متغیرهای  $XPS_{imw}^{st}$ ،  $QP_{wim}^{st}$ ،  $XBS_{jmw}^{st}$  و  $QB_{wjm}^{st}$  برای شرکت ایران خودرو با فرض سناریو  $s = 1$  و  $\rho_1 = 0.15$  برای سه دوره زمانی به دست آمده است. نتایج حاصله، تأمین سه نوع قطعه از چهار تأمین‌کننده اصلی و سه تأمین‌کننده پشتیبان را در سه دوره زمانی نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در دوره اول، شرکت ایران خودرو ۹۹۵۲ قطعه  $B$  و ۸۵۶۶ قطعه  $C$  از تأمین‌کننده اصلی اول و ۱۷۵۱ قطعه  $A$ ، ۲۷۷۰ قطعه  $B$  و ۴۹۴۲ قطعه  $C$  از تأمین‌کننده پشتیبان اول را دریافت کرده است. توجه داشته باشید که شرکت در دوره اول قطعه  $A$  را از تأمین‌کننده اصلی اول سفارش نداده است.

جداول ۱۲ تا ۱۴، هاب‌های ایجادشده، تعداد محصولات تخصیص‌یافته به هاب‌ها و تعداد محصولات ارسال‌شده به مراکز توزیع را با فرض  $s = 1$  و  $\rho_1 = 0.15$  برای سه دوره زمانی نشان می‌دهند. همانگونه که در جدول ۱۲ نمایش داده می‌شود، در دوره اول، شهرهای تهران (۳۲۹۰)، سمنان (۲۰۳۰)، زنجان (۱۹۸۰)، همدان (۱۶۰۰)، یزد (۲۰۷۰) و چهارمحال بختیاری (۱۴۳۰) به عنوان هاب انتخاب شدند که تعداد محصولات تخصیص‌یافته به آنها در داخل پراکنش مشخص شده‌اند. همچنین مراکز توزیع واقع‌شده در شهرهای تهران (۸۹۱)، قم (۶۵)، قزوین (۱۹۷)، مرکزی (۴۶۰)، اصفهان (۶۲۵)، مازندران (۵۵۹)، گیلان (۴۹۳) باید محصولات خود را از هاب تهران دریافت کنند که تعداد محصولات دریافتی هر مرکز توزیع در داخل پراکنش نشان داده شده است.

**بررسی اثر سناریوهای مختلف و تحلیل حساسیت.** تحلیل حساسیت و مقایسه جواب‌های حاصله می‌تواند برای سنجش اعتبار مدل‌های ریاضی مناسب باشد [۴۷]. بر این اساس، ما اثرات مختلف برخی از پارامترهای مدل را بررسی کردیم که در جدول ۱۵ ارائه شده است. شکل ۴ تغییرات تابع هدف به ازای تغییر در پارامترهای مورد نظر در تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد.

جدول ۱۵. مقادیر پارامترهای ورودی و تابع هدف تحت سناریوهای مختلف

| پارامترها       | سناریوها |       |       | مقدار تابع هدف برای هر سناریو |       |       |
|-----------------|----------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|
|                 | $S_1$    | $S_2$ | $S_3$ | $S_1$                         | $S_2$ | $S_3$ |
| $\rho_s$        | ۱۵٪      | ۳۰٪   | ۵۵٪   | ۷۳۶۱۴                         | ۶۵۵۳۹ | ۵۹۰۷۲ |
| $N_i^{st}$      | ۱۰٪      | ۲۰٪   | ۳۰٪   | ۱۱۸۶۳۵                        | ۷۹۸۴۱ | ۶۵۲۴۸ |
| $NS_{mw}^{st}$  | ۵        | ۱۰    | ۱۵    | ۶۶۲۳۸                         | ۷۱۵۹۰ | ۷۵۳۰۸ |
| $CAP_{wi}^{st}$ | ۶۰۰۰     | ۱۲۰۰۰ | ۱۸۰۰۰ | ۶۳۵۸۴                         | ۶۹۱۰۱ | ۷۲۶۴۹ |
| $CAB_{wj}^{st}$ | ۵۰۰۰     | ۱۰۰۰۰ | ۱۵۰۰۰ | ۵۹۳۸۲                         | ۶۰۸۱۷ | ۶۲۰۹۵ |
| $CAK_k^{st}$    | ۲۵۰۰     | ۵۰۰۰  | ۷۵۰۰  | ۵۷۲۴۱                         | ۶۱۳۵۸ | ۶۳۸۸۶ |



شکل ۴. تغییرات تابع هدف به ازای تغییر در پارامترها

بر اساس جدول ۱۵، افزایش پارامتر احتمال اختلال تحت سناریو  $(p_s)$  می‌تواند سبب افزایش تابع هدف گردد. این موضوع منطقی است که اختلال در برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده می‌تواند هزینه‌های زنجیره تأمین را افزایش دهد. همچنین افزایش پارامتر ظرفیت مختل‌شده تأمین‌کننده اصلی  $(N_i^{st})$  مقدار تابع هدف را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. شرکت ایران خودرو بر اساس قراردادهای پایداری که با تأمین‌کنندگان اصلی خود منعقد کرده است، قطعات را با قیمت ارزان‌تری از آنها خریداری می‌کند. بر این اساس، هرگونه اختلال در ظرفیت تأمین‌کنندگان اصلی سبب می‌شود که شرکت قطعات را با قیمت بالاتری از تأمین‌کنندگان پشتیبان خریداری نماید که سبب افزایش هزینه‌ها می‌گردد. دیگر نتایج نشان می‌دهد که افزایش پارامتر تعداد تأمین‌کنندگان  $(NS_{mw}^{st})$  سبب کاهش مقدار تابع هدف می‌گردد. این نشان می‌دهد که هرچه شرکت ایران خودرو سفارشات خود را از تأمین‌کنندگان بیشتری دریافت نماید، می‌تواند هزینه‌های زنجیره تأمین را کاهش دهد. به عبارتی، ممکن است شرکت بتواند تأمین‌کنندگانی را پیدا کند که قیمت قطعات ارزان‌تری داشته باشند.

با توجه به نتایج حاصله، افزایش پارامتر ظرفیت تأمین‌کننده اصلی  $(CAP_{wi}^{st})$  توانسته است مقدار تابع هدف را کاهش دهد که نشان‌دهنده اهمیت تأمین‌کنندگان اصلی در کاهش هزینه‌های زنجیره می‌باشد. این موضوع با توجه به قیمت ارزان‌تر قطعات توسط تأمین‌کنندگان اصلی نسبت به تأمین‌کنندگان پشتیبان کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. نتایج همچنین حاکی از آن است که افزایش پارامتر ظرفیت تأمین‌کننده پشتیبان  $(CAB_{wj}^{st})$  به کاهش مقدار تابع هدف منجر می‌شود. اگرچه این کاهش چندان برجسته نیست اما نمایانگر آن است که اگر تأمین‌کنندگان پشتیبان که قیمت ارزان‌تری نسبت به هم‌نوعان خود دارند بتوانند نیازمندی شرکت را رفع نمایند، آنگاه هزینه‌های زنجیره تأمین کاهش می‌یابد. در نهایت، افزایش پارامتر ظرفیت هاب  $(CAK_k^{st})$  نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد. این نتیجه می‌تواند تعداد هاب‌های ایجادشده را کاهش دهد و سبب کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین گردد.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میزان اثرگذاری پارامتر تعداد تأمین‌کنندگان  $(NS_{mw}^{st})$  روی مقدار تابع هدف از سایر پارامترها بیشتر است. همچنین میزان حساسیت تابع هدف نسبت به پارامتر ظرفیت تأمین‌کنندگان پشتیبان  $(CAB_{wj}^{st})$  از سایر پارامترها کمتر است همان‌طور که از نتایج تحلیل حساسیت مشاهده می‌شود، تغییرات تابع هدف کاملاً مطابق با روند مشخصی انجام شده است و تضادی درون نتایج مشاهده نمی‌شود. به عبارتی، با تغییرات اعمال‌شده در پارامترهای ورودی در هر سناریو، مقدار تابع هدف به صورت منطقی تغییر کرده است که این موضوع دلیلی بر اعتبار مدل پیشنهادی و کارایی روش حل است.

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک مدل چندهدفه استوار زنجیره تأمین سبز- تاب‌آور چند دوره‌ای و چند محصولی با در نظر گرفتن مناسب‌ترین تأمین‌کننده و مکان‌یابی هاب‌های توزیع ارائه گردید. ما چندین مسئله کوچک و متوسط را با استفاده از روش محدودیت افسیلون تقویت‌شده حل نمودیم. همچنین به منظور ارزیابی مسائل بزرگ، الگوریتم‌های فراابتکاری NSGAI و MOPSO در آزمایش‌های عددی با هم مقایسه گردیدند و تعدادی از شاخص‌های عملکردی برای ارزیابی راه‌حل‌های مورد نظر استفاده شدند. با توجه به نتایج، دو الگوریتم در معیارهای مختلف با هم متفاوت هستند که NSGAI عملکرد کلی بهتری نسبت به MOPSO دارد.

یکی از موضوعات اصلی در این تحقیق، در نظر گرفتن هاب‌های توزیع است که می‌تواند برای صنایعی که قصد دارند هزینه‌های توزیع خود را بهینه نمایند، مفید باشد. با این حال، ما صنعت خودرو را در نظر گرفتیم و محل استقرار هاب‌ها، میزان تخصیص و مراکز توزیع مرتبط با آنها را برای شرکت ایران خودرو به عنوان بزرگ‌ترین شرکت این صنعت در ایران تعیین نمودیم. اهداف اصلی مدل پیشنهادی حداقل‌سازی آلودگی انتشار یافته توسط اعضای زنجیره و کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت و متغیر مرتبط با اعضا است که شامل هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان، هزینه تأسیس هاب، هزینه تولید محصول و هزینه‌های انتقال بین اعضای زنجیره می‌باشد. به منظور ارتقای تاب‌آوری و قطعی نمودن مدل، ما از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو در مدل ریاضی استفاده کردیم که سهم برجسته مطالعه را به خود اختصاص می‌دهد. اختلالات عرضه در زنجیره تأمین چالش اصلی هر زنجیره است که مطالعه ما توانسته است از طریق به کارگیری تأمین‌کننده پشتیبان، تا حد زیادی تاب‌آوری زنجیره را در مقابله با این اختلال ارتقا دهد. به لحاظ کاربردی، شبکه پیشنهادی سبب یک برنامه‌ریزی بهینه برای تعداد و زمان انتقال خودروها به سایر مناطق کشور را برای شرکت ایران خودرو فراهم کرده است که به طور مستقیم کاهش هزینه‌های حمل و نقل را در بر می‌گیرد. با این حال، کاهش هزینه‌های غیر مستقیم از قبیل نیروی انسانی درگیر در برنامه‌ریزی انتقال خودروها نیز ملموس و ارزشمند است. از سوی دیگر، تأمین به موقع قطعات با استفاده از رویکرد تأمین‌کننده پشتیبان در شبکه طراحی شده توانسته است اختلالات ایجاد شده در تأمین تقاضای بازار را کاهش دهد. شبکه طراحی شده تاب‌آوری شرکت ایران خودرو را در مقابل این اختلالات افزایش داده است به نحوی که سیاست‌گذاران و مدیران ارشد شرکت می‌توانند ارتقای رضایت بالقوه مشتریان را بدست آورند. در نهایت، شبکه ما از طریق توجه به آلودگی انتشار یافته از تولید و حمل و نقل به شرکت ایران خودرو کمک می‌کند تا در جهت رعایت قوانین زیست محیطی کوشا تر باشد.

مسائل مربوط به طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز و تاب‌آور بسیار متنوع است و از شیوه‌های بسیار مختلفی می‌توان آنها را گسترش داد. با توجه به پیشنهادات زیر، محققان آتی می‌توانند مطالعه حاضر را توسعه دهند.

- استفاده از مفروضات جدید (مانند جریمه تأخیر تحویل، اختلال در حمل و نقل) ممکن است به توسعه مدل‌های موجود کمک کند و آنها را به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر نماید.
- اگرچه برخی پارامترهای غیرقطعی در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند، با این حال، برخی از پارامترهای دیگر (مانند هزینه حمل و نقل و ظرفیت اعضای زنجیره) می‌توانند در محیط عدم قطعیت مطابق با شرایط واقعی تعریف شوند.
- با توجه به محیط عدم قطعیت شبکه‌های زنجیره تأمین در دنیای واقعی، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از سایر رویکردهای بهینه‌سازی در محیط‌های غیر قطعی از قبیل فازی و احتمالی استفاده شود.
- سایر الگوریتم‌های فراابتکاری ممکن است حل مدل پیشنهادی را بهبود دهند که بر این اساس، مقایسه آنها نیز می‌تواند نتایج مفیدی را فراهم آورد.

**تعارض منافع** برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدهی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

## منابع

- Ala, A., Deveci, M., Amani Bani, E., Sadeghi, A. H. (2024). Dynamic capacitated facility location problem in mobile renewable energy charging stations under sustainability consideration. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 41, 100954.
- Ali, H., Zhang, J. (2023). A fuzzy multi-objective decision-making model for global green supplier selection and order allocation under quantity discounts. *Expert Systems with Applications*, 225, 120119.
- Aloullal, A., Saldanha-da-Gama, F., & Todosijević, R. (2023). Multi-period single-allocation hub location-routing: Models and heuristic solutions. *European Journal of Operational Research*.
- Amiri-Aref, M., Klibi, W., & Babai, M. Z. (2018). The multi-sourcing location inventory problem with stochastic demand. *European Journal of Operational Research*, 266(1), 72-87.
- Asadkhani, J., Fallahi, A., & Mokhtari, H. (2022). A sustainable supply chain under VMI-CS agreement with withdrawal policies for imperfect items. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134098.
- Badejo, O., & Irapetritou, M. (2024). Enhancing pharmaceutical supply chain resilience: A multi-objective study with disruption management. *Computers & Chemical Engineering*, 188, 108769.
- Basiri, Z., & Heydari, J. (2017). A mathematical model for green supply chain coordination with substitutable products. *Journal of Cleaner Production*, 145, 232-249.
- Benshasteh A, Sahebi H, Jabal ameli M. (2020). Resilient Petroleum Supply Chain Network Design under Operational & Disruption Risks: A Case Study. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 6(2), 7-56. (In Persian)
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (1999). Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations Research Letters*, 25(1), 1-13.
- Biuki, M., Kazemi, A., & Alinezhad, A. (2020). An integrated location-routing-inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120842.
- Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F. (2016). Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization. *Journal of Food Engineering*, 174, 56-67.
- Boskabadi, A., Mirmozaffari, M., Yazdani, R., & Farahani, A. (2022). Design of a Distribution Network in a Multi-product, Multi-period Green Supply Chain System Under Demand Uncertainty. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 226-237.
- Bottani, E., Murino, T., Schiavo, M., & Akkerman, R. (2019). Resilient food supply chain design: Modelling framework and metaheuristic solution approach. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 177-198.
- Brix-Asala, C., Hahn, R., & Seuring, S. (2016). Reverse logistics and informal valorisation at the Base of the Pyramid: A case study on sustainability synergies and trade-offs. *European Management Journal*, 34(4), 414-423.
- Carrizosa, E., Goerigk, M., & Schöbel, A. (2017). A biobjective approach to recoverable robustness based on location planning. *European Journal of Operational Research*, 261(2), 421-435.
- Chang, C.T., & Chang, C.C. (2000). A linearization method for mixed 0-1 polynomial programs. *Computers & Operations Research* 27, 1005-1016.
- chöbel, A. (2014). Generalized light robustness and the trade-off between robustness and nominal quality. *Mathematical Methods of Operations Research*, 80(2), 161-191.
- Christopher, M., & Lee, H. (2004). Mitigating supply chain risk through improved confidence. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(5), 388-396.
- Coello, C. C. A., & Lechuga, M. (2002). MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. *In Proceedings of the IEEE congress on evolutionary computation*, 2, 1051-1056.
- Cunha, P. S. A., Raupp, F. M. P., & Oliveira, F. (2017). A two-stage stochastic programming model for periodic replenishment control system under demand uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 107, 313-326.
- Da Graça Costa, M., Captivo, M. E., & Clímaco, J. (2008). Capacitated single allocation hub location problem—A bi-criteria approach. *Computers & Operations Research*, 35(11), 3671-3695.
- De Boer, L., Labro, E., & Morlacchi, P. (2001). A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 7(2), 75-89.

23. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
24. Dehghani Sadrabadi, M. H., Makui, A., Ghousi, R., & Jabbarzadeh, A. (2024). Designing a green-resilient closed-loop supply chain to preserve business continuity under interrelated disruptions (a case study of the automotive battery industry). *Computers & Chemical Engineering*, 185, 108675. (In Persian)
25. Di Paola, N., Cosimato, S., & Vona, R. (2023). Be resilient today to be sustainable tomorrow: Different perspectives in global supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 386, 135674.
26. Ding, S., Xia, C., Wang, C., Wu, D., & Zhang, Y. (2017). Multi-objective optimization based ranking prediction for cloud service recommendation. *Decision Support Systems*, 101, 106-114.
27. Ding, T., Bie, Z., Bai, L., & Li, F. (2016). Adjustable robust optimal power flow with the price of robustness for large-scale power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(1), 164-174.
28. Dweiri, F., Kumar, S., Khan, S. A., & Jain, V. (2016). Designing an integrated AHP based decision support system for supplier selection in automotive industry. *Expert Systems with Applications*, 62, 273-283.
29. Espejo, I., Marín, A., Muñoz-Ocaña, J. M., & Rodríguez-Chía, A. M. (2023). A new formulation and branch-and-cut method for single-allocation hub location problems. *Computers & Operations Research*, 155, 106241.
30. Fahmy, S. A., Zaki, A. M., & Gaber, Y. H. (2023). Optimal locations and flow allocations for aggregation hubs in supply chain networks of perishable products. *Socio-Economic Planning Sciences*, 86, 101500.
31. Fallahi, A., Amani Bani, E., & Varmazyar, M. (2025). Towards sustainable scheduling of unrelated parallel batch processors: A multiobjective approach with triple bottom line, classical and data-driven robust optimization. *Computers & Operations Research*, 173, 106863.
32. Fathi Heli Abadi, A., Rad, A., Motameni, A., & Talebi, D. (2023). Designing a Bi-Objective Stochastic Model for a Resilient Supply Chain Network taking into Account Support Supplier and Its Financial and Physical Flows. *Journal of Industrial Management Perspective*, 13(4), 208-248. (In Persian)
33. Fattahi, M., Mahootchi, M., Moattar Husseini, S. M., Keyvanshokoo, E., & Alborzi, F. (2015). Investigating replenishment policies for centralised and decentralised supply chains using stochastic programming approach. *International Journal of Production Research*, 53(1), 41-69.
34. Feng, J., & Gong, Z. (2020). Integrated linguistic entropy weight method and multi-objective programming model for supplier selection and order allocation in a circular economy: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122597.
35. Firoozi, M., Babai, M. Z., Klibi, W., & Ducq, Y. (2020). Distribution planning for multi-echelon networks considering multiple sourcing and lateral transshipments. *International Journal of Production Research*, 58(7), 1968-1986.
36. Foroozesh, N., Karimi, B., Mousavi, S. M., & Mojtahedi, M. (2023). A hybrid decision-making method using robust programming and interval-valued fuzzy sets for sustainable-resilient supply chain network design considering circular economy and technology levels. *Journal of Industrial Information Integration*, 33, 100440.
37. Ghodrathnama, A., Arbabi, H. R., & Azaron, A. (2019). Production planning in industrial townships modeled as hub location-allocation problems considering congestion in manufacturing plants. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 479-501.
38. Ghodsypour, S. H., & O'Brien, C. (2001). The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint. *International Journal of Production Economics*, 73(1), 15-27.
39. Gholami-Zanjani, S. M., Jabalameli, M. S., & Pishvae, M. S. (2021). A resilient-green model for multi-echelon meat supply chain planning. *Computers & Industrial Engineering*, 152, 107018.
40. Goerigk, M., Hamacher, H. W., & Kinscherff, A. (2018). Ranking robustness and its application to evacuation planning. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 837-846.
41. Goetzmann, K.-S., Stiller, S., & Telha, C. (2011). *Optimization over Integers with Robustness in Cost and Few Constraints*. Paper presented at the Approximation and Online Algorithms, Berlin, Heidelberg, 7164, 89-101.
42. Golpîra, H., Najafi, E., Zandieh, M., & Sadi-Nezhad, S. (2017). Robust bi-level optimization for green opportunistic supply chain network design problem against uncertainty and environmental risk. *Computers & Industrial Engineering*, 107, 301-312.
43. Goodarzi, F., Abdollahzadeh, V., & Zeinalnezhad, M. (2022). An integrated multi-criteria decision-making and multi-objective optimization framework for green supplier evaluation and optimal order allocation under uncertainty. *Decision Analytics Journal*, 4, 100087.
44. Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108-141.

45. Gupta, S., Soni, U., & Kumar, G. (2019). Green supplier selection using multi-criterion decision making under fuzzy environment: A case study in automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, 136, 663-680.
46. Haimes, Y.Y., Lasdon, S.S., & Wismer, D.A. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1, 296-297.
47. Hasani, A., Mokhtari, H., & Fattahi, M. (2021). A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: A real-life case study. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123199.
48. Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvaei, M. S. (2022). Stone Paper Closed-Loop Supply Chain Network Design using Robust Stochastic, Possibilistic and Flexible Chance-constrained Programming. *Journal of Industrial Management Perspective*, 12(1), 45-81. (In Persian)
49. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Sabouhi, F. (2018). Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. *International Journal of Production Research*, 56(17), 5945-5968.
50. Jafarian, A., Rabiee, M., & Tavana, M. (2020). A novel multi-objective co-evolutionary approach for supply chain gap analysis with consideration of uncertainties. *International Journal of Production Economics*, 228, 107852.
51. Kartal, Z., Hasgul, S., & Ernst, A. T. (2017). Single allocation p-hub median location and routing problem with simultaneous pick-up and delivery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 108, 141-159.
52. Kazemi, A., Nabil, A. H., & Alinezhad, A. (2016). Developing a Bi-objective Model for Locating and Allocating Decisions in a Three-echelon Supply Chain. *Research in Production and Operations Management*, 7(2), 153-172. (In Persian)
53. Khalili-Damghani, K., & Amiri, M. (2012). Solving binary-state multi-objective reliability redundancy allocation series-parallel problem using efficient epsilon-constraint, multi-start partial bound enumeration algorithm, and DEA. *Reliability Engineering & System Safety*, 103, 35-44.
54. Klibi, W., & Martel, A. (2012). Modeling approaches for the design of resilient supply networks under disruptions. *International Journal of Production Economics*, 135(2), 882-898.
55. Köksalan, M., & Soylu, B. (2010). Bicriteria p-Hub Location Problems and Evolutionary Algorithms. *INFORMS Journal on Computing*, 22(4), 528-542.
56. Lee, E. K., Kim, S., & Kim, S. K. (2001). Supplier selection and management system considering relationships in supply chain management. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), 307-318.
57. Li, J., Li, J., Pardalos, P. M., & Yang, C. (2020). DMAOEA-εC: Decomposition-based many-objective evolutionary algorithm with the ε-constraint framework. *Information Sciences*, 537, 203-226.
58. Lo, H.-W., Liou, J. J. H., Wang, H.-S., & Tsai, Y.-S. (2018). An integrated model for solving problems in green supplier selection and order allocation. *Journal of Cleaner Production*, 190, 339-352.
59. Matsubayashi, N., Umezawa, M., Masuda, Y., & Nishino, H. (2005). A cost allocation problem arising in hub-spoke network systems. *European Journal of Operational Research*, 160(3), 821-838.
60. Meena, P. L., & Sarmah, S. P. (2013). Multiple sourcing under supplier failure risk and quantity discount: A genetic algorithm approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 50, 84-97.
61. Moghadaspoor, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bozorgi-Amiri, A., & Allahviranloo, T. (2025). Energy-resilient closed-loop supply chain design managed by the 3PL provider: A pick-up strategy and data envelopment analysis. *Journal of Industrial Information Integration*, 44, 100763.
62. Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rostami, H. (2011). A multi-objective imperialist competitive algorithm for a capacitated hub covering location problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2(3), 671-688.
63. Mohammed, A., & Wang, Q. (2017a). Developing a meat supply chain network design using a multi-objective possibilistic programming approach. *British Food Journal*, 119(3), 690-706.
64. Mohammed, A., & Wang, Q. (2017b). The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain. *International Journal of Production Economics*, 184, 47-58.
65. Mulvey, J., Vanderbei, R., & Zenios, S. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, 43, 264-281.
66. Nasiri, A., Mansory, A., & Mohammadi, N. (2022). Developing an Integrated Model for Evaluating the Performance of Green and Resilient Suppliers by Combining Path Analysis, Sawara, and TOPSIS Decision-Making Techniques. *Journal of Industrial Management Perspective*, 12(2), 227-251. (In Persian)
67. Nurjanni, K. P., Carvalho, M. S., & Costa, L. (2017). Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. *International Journal of Production Economics*, 183, 421-432.
68. O'Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32(3), 393-404.

69. Pariazar, M., Root, S., & Sir, M. Y. (2017). Supply chain design considering correlated failures and inspection in pharmaceutical and food supply chains. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 123-138.
70. Qin, X., Liu, X., & Tang, L. (2013). A two-stage stochastic mixed-integer program for the capacitated logistics fortification planning under accidental disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, 65(4), 614-623.
71. Qorri, A., Mujkić, Z., & Kraslawski, A. (2018). A conceptual framework for measuring sustainability performance of supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 189, 570-584.
72. Rahimi, S., Abdollahpouri, A., & Moradi, P. (2018). A multi-objective particle swarm optimization algorithm for community detection in complex networks. *Swarm and Evolutionary Computation*, 39, 297-309.
73. Ribeiro, J., & Barbosa-Povoa, A. (2018). Supply Chain Resilience: Definitions and quantitative modelling approaches – A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 109-122.
74. Ruiz, M., Moreno, J., Dorransoro, B., & Rodriguez, D. (2018). Using simulation-based optimization in the context of IT service management change process. *Decision Support Systems*, 112, 35-47.
75. Sadeghi, S., & Akhavan Niaki, S. T. (2024). An analytical decision-making model for integrated green supply chain problems: A computational intelligence solution. *Journal of Cleaner Production*, 464, 142716.
76. Saeed, A., Jian, M., Imran, M., Freen, G., & Rehman Majid, A. (2024). Green-resilient model for smartphone closed-loop supply chain network design: A novel four-valued refined neutrosophic optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 190, 110087. (In Persian)
77. Salehi, S., Zare Mehrjerdi, Y., Sadegheih, A., & Hosseini-Nasab, H. (2022). Designing a resilient and sustainable biomass supply chain network through the optimization approach under uncertainty and the disruption. *Journal of Cleaner Production*, 359, 131741.
78. Salimian, S., & Mousavi, S. M. (2022). A new scenario-based robust optimization approach for organ transplantation network design with queue condition and blood compatibility under climate change. *Journal of Computational Science*, 62, 101742.
79. Sawik, T. (2014). Joint supplier selection and scheduling of customer orders under disruption risks: Single vs. dual sourcing. *Omega*, 43, 83-95.
80. Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & van der Vorst, J. G. A. J. (2014). Modelling food logistics networks with emission considerations: The case of an international beef supply chain. *International Journal of Production Economics*, 152, 57-70.
81. Sun, H., Li, J., Wang, T., & Xue, Y. (2022). A novel scenario-based robust bi-objective optimization model for humanitarian logistics network under risk of disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 157, 102578.
82. Tavana, M., Li, Z., Mobin, M., Komaki, M., & Teymourian, E. (2016). Multi-objective control chart design optimization using NSGA-III and MOPSO enhanced with DEA and TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 50, 17-39.
83. Wong, J.-T. (2020). Dynamic procurement risk management with supplier portfolio selection and order allocation under green market segmentation. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119835.
84. Yazdani, M., Pamucar, D., Erdmann, A., & Toro-Dupouy, L. (2023). Resilient sustainable investment in digital education technology: A stakeholder-centric decision support model under uncertainty. *Technological Forecasting and Social Change*, 188, 122282.
85. Zahiri, B., Suresh, N. C., & de Jong, J. (2020). Resilient hazardous-materials network design under uncertainty and perishability. *Computers & Industrial Engineering*, 143, 106401.
86. Zheng, H., Ye, X., Chen, R., & Chen, Y. (2025). Resilient high-end equipment manufacturing supply chain design with irreplaceable suppliers: An IFTOPSIS-MOMIP hybrid model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 195, 103914.