



Paper Type: Original-Application Paper



Robust Design of an Agile Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network with Different Sales Channels

Elham Kouchaki Tajani¹, Armin Ghane Kanafi^{2,*} , Maryam Daneshmand-Mehr¹, Ali-Asghar Hosseinzadeh²

¹ Department of Industrial Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran; elham_kouchaki@yahoo.com; m.daneshmand@liau.ac.ir.

² Department of Mathematics, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran; arminghane@liau.ac.ir; hosseinzadeh_ali@liau.ac.ir.

Citation:



Kouchaki Tajani, E., Ghane Kanafi, A., Daneshmand-Mehr, M., & Hosseinzadeh, A. A. (2022). Robust design of an agile sustainable closed-loop supply chain network with different sales channels. *Journal of decisions and operations research*, 7(1), 160-210.

Received: 10/07/2021

Reviewed: 03/09/2021

Revised: 22/12/2021

Accepted: 28/11/2021

Purpose: Designing a logistic network is a vital and strategic issue that provides the optimal platform for effective and useful management of supply chain. For this purpose, in this paper, a multi-echelon, multi-product, multi-period and multi-objective sustainable dual-channel closed-loop supply chain network has been designed taking into account the technology of RFID. Simultaneously this model seeks to maximize the profits and social responsibility of the supply chain network while it minimizes the whole delay in delivery time and environmental pollution. Also, because definitive models are incapable of understanding the complexities of real-world applications, so this paper also addresses systemic and environmental uncertainties.

Methodology: In this study, the scenario-based stochastic robust programming optimization technique is used to deal with the uncertainty of the parameters and to deal with the uncertainty of the parameters, and due to the multi-objective model and for validation and model exact solution in small dimensions of a new robust augmented ϵ -constraint method (AUGMECON-R) is used to achieve the best balance between the objectives. Also, since the problem is of np-hard class, two NSGA-II and MOPSO algorithms were used to solve the model in larger dimensions.

Findings: The results show that this model has acceptable efficiency that due to the uncertainty of some parameters.

Originality/Value: The proposed model includes mathematical formulas in a certain and robust state that allows the establishment of several complicated characteristics in the above text along with direct and indirect selling channels and repairing centers and secondary costumers create the new design of supply chain that can be supreme model for the managers and professionals with the wide application especially from strategic view.

Keywords: Closed loop supply chin, Radio Frequency Identification (RFID), Robut optimization, Sales channels.

Corresponding Author: arminghane@liau.ac.ir

 <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1401.7.1.10.5>



Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



طراحی استوار شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار چابک با کانال‌های فروش متفاوت

الهام کوچکی تاجانی^۱، آرمین قانع کنفی^{۲*} ، مریم دانشمند مهر^۱، علی اصغر حسین زاده^۲

^۱ گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

^۲ گروه ریاضی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

چکیده

هدف: طراحی یک شبکه لجستیکی یک مسئله استراتژیکی و حیاتی است که بستر بهینه‌ای برای مدیریت مؤثر و کارآمد زنجیره تأمین فراهم می‌کند. بدین منظور در این مقاله یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار چند رده‌ای، چند محصولی و چند دوره‌ای و چند هدفه با در نظر گرفتن فناوری سیستم شناسایی فرکانس رادیویی طراحی شده است. این مدل به طور هم‌زمان به دنبال حداکثر کردن سود و مسئولیت اجتماعی شبکه زنجیره تأمین است، در حالی که تأخیر کل در زمان تحویل و آلودگی‌های زیست محیطی را به حداقل می‌رساند. همچنین چون مدل‌های قطعی برای فهم پیچیدگی‌های کاربردهای دنیای واقعی ناتوان هستند بنابراین در این مقاله به عدم قطعیت‌های سیستمی و محیطی نیز پرداخته شده است.

روش‌شناسی پژوهش: در این مطالعه برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها از تکنیک بهینه‌سازی استوار تصادفی مبتنی بر سناریو و به دلیل چندهدفه بودن مدل و اعتبارسنجی و حل دقیق مدل در ابعاد کوچک از یک روش جدید بهینه‌سازی اپسیلون محدودیت تعمیم یافته قوی برای رسیدن به بهترین موازنه بین اهداف استفاده شده است. همچنین از آنجایی که مسئله از کلاس *Np-hard* نیز است برای حل مدل در ابعاد بزرگ‌تر از دو الگوریتم *NSGA-II* و *MOPSO* استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج حاصل این مطالعه نشان‌دهنده این است که مدل پیشنهادی و رویکرد حل آن از کارآمدی قابل قبولی برخوردار می‌باشند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: به طور کلی مدل پیشنهادی شامل فرمول‌بندی‌های ریاضی در حالت قطعی و استوار است که اجازه می‌دهد چندین ویژگی پیچیده ذکر شده در متن فوق به همراه در نظر گرفتن کانال‌های فروش مستقیم و غیرمستقیم و مراکز تعمیر و مشتریان ثانویه طرحی جدید از یک زنجیره تأمین حلقه بسته را ایجاد نماید که می‌تواند ابزاری عالی برای مدیران و متخصصان با کاربرد گسترده به‌ویژه از منظر استراتژیک باشد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی استوار، زنجیره تأمین حلقه بسته، سیستم شناسایی فرکانس رادیویی، کانال‌های فروش.

۱- مقدمه

در جهان امروز، شرکت‌های بسیاری برای بهبود و توسعه کسب‌وکار خود به منظور برآورده کردن انتظارات و رضایت مشتری در تلاش‌اند تا بتوانند به طور موفقیت‌آمیزی در محیط‌های رقابتی در حال رشد، به رقابت بپردازند. در این باب مدیریت زنجیره تأمین یکی از جالب‌توجه‌ترین و مهم‌ترین مسائل بین

* نویسنده مسئول



محققان علمی و مدیران صنعت است (رمضانی و همکاران^۱، ۲۰۱۴). زنجیره تأمین دیگر مرکز هزینه نیست. سازمان‌ها اهمیت وجود یک زنجیره تأمین کارآمد و مؤثر را به‌عنوان ابزاری برای ایجاد مزیت رقابتی پایدار تشخیص داده‌اند زیرا در جهان امروز، زنجیره‌های تأمین با یکدیگر رقابت می‌کنند (چان چای چیچیت و همکاران^۲، ۲۰۲۰). به عبارتی مدیریت زنجیره تأمین یکی از اجزای استراتژی‌های رقابتی برای بهره‌وری و سودآوری سازمان است (مرزبند^۳، ۲۰۲۰)؛ بنابراین طراحی شبکه زنجیره تأمین یکی از فعالیت‌های مهم و یک مسئله زیربنایی مدیریت زنجیره تأمین است (ملو و همکاران^۴، ۲۰۰۹) و طراحی مناسب این شبکه منجر به افزایش اثربخشی و کارایی از طریق کاهش هزینه‌های طراحی، کاهش زمان تولید، تخصیص مناسب جریان کالا و غیره خواهد شد (قهرمانی نهر^۵، ۲۰۲۰). همچنین کمبود منابع طبیعی و افزایش میزان آلودگی محیط‌زیست، جوامع مختلف بشری را در مورد آینده زندگی بشر نگران می‌کند. در طول تاریخ، با این وجود این‌که دستاوردهای صنعتی و توسعه، اقتصاد جوامع را بهبود بخشیده است و منجر به نرخ اشتغال بالاتر و مزایایی برای افراد و سازمان‌ها شده است، از طرف دیگر، این امر منجر به پیچیده‌تر شدن مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی شده که باعث توجه بیشتر به پایداری در سال‌های اخیر شده است (احمد و سرکار^۶، ۲۰۱۸). بدین منظور امروزه لحاظ کردن مفهوم پایداری در طراحی شبکه زنجیره تأمین، با توجه به اثرات رو به رشد جهانی و در نتیجه آن افزایش فعالیت‌های انسانی، به موضوع مهمی برای سازمان‌ها، دولت‌ها و مردم به‌ویژه دستداران محیط‌زیست تبدیل شده است. از طرفی مدیریت محصولات پایان استفاده/آخر عمر نه تنها برای عوامل اقتصادی، اجتماعی و محیطی با اهمیت است، می‌تواند روند مصرف کنترل نشده در سراسر جهان که میزان زباله تخلیه‌شده را به میزان نامناسب افزایش می‌دهد، بهبود بخشد (هوانگ و سو^۷، ۲۰۱۳)؛ بنابراین یک زنجیره تأمین کارآمد و مؤثر یک مزیت رقابتی برای شرکت‌ها و کارخانه‌ها است و به آن‌ها کمک می‌کند تا با فشار بازار جهانی کنار بیایند (قهرمانی-نهر و همکاران^۸، ۲۰۲۰).

در سال‌های اخیر، پیشرفت در فناوری اطلاعات باعث شده است که دنیای مجازی کارآمدتر شود. فناوری اطلاعات یک عامل اساسی برای مدیریت مؤثر زنجیره تأمین بوده و هست (رز و همکاران^۹، ۲۰۱۰). فناوری اطلاعات به دلیل توانایی یکپارچه‌سازی داخلی فرآیندهای مختلف و از همه مهم‌تر یکپارچه‌سازی خارجی با تأمین‌کنندگان و مشتریان، تأثیر عمده‌ای بر ماهیت و ساختار زنجیره‌های تأمین داشته است. اینترنت اشیا^{۱۰}، یکی از آخرین تحولات فناوری اطلاعات و یک انقلاب فناوری اطلاعات جدید است که یک تغییر را در چندین زمینه از جمله مدیریت زنجیره تأمین ارائه می‌دهد و شبکه‌ای از اشیاء فیزیکی است که به‌صورت دیجیتال با حس، نظارت و تعامل در یک شرکت و بین شرکت ارتباط دارند و امکان چابکی، دید، ردیابی و به اشتراک‌گذاری اطلاعات برای تسهیل برنامه‌ریزی به‌موقع، کنترل و هماهنگی فرآیندهای زنجیره تأمین را فراهم می‌کند (بن دایا و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۹). اصطلاح اینترنت اشیا برای اولین بار توسط کوین اشتون^{۱۲} در سال ۱۹۹۹ مطرح شد. با استفاده از اینترنت اشیا، کارخانه‌ها و حتی اجسام بی‌جان (مانند ماشین‌ها) می‌توانند برای خود هویت دیجیتال داشته باشند (نوذری و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۱). هوش شی در *IoT* با استفاده از دستگاه‌هایی مانند شناسایی فرکانس رادیویی^{۱۴}، سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی و سایر تجهیزات حسگر در شبکه‌های متصل به اینترنت انجام می‌شود. بهره‌گیری از تکنولوژی‌های ارتباطات و اطلاعات از قبیل *RFID*، ردیابی و پیگیری کالاها در یک زنجیره تأمین را ممکن سازد (کالاتایود و همکاران^{۱۵}، ۲۰۱۸)؛ بنابراین، این ابزار می‌تواند نقش اساسی در چابکی و تسریع فعالیت در زنجیره تأمین داشته و در سازمان ارزش ایجاد کند.

مسئله مهم دیگری که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، در نظر گرفتن چندین کانال فروش در شبکه زنجیره تأمین است. به دلیل تغییر سریع سطح زندگی، مشتریان به دنبال محصولات و خدمات باکیفیت بالاتر هستند و تولیدکنندگانی را که قادر به ارائه گزینه‌های مختلف فروش هستند ترجیح می‌دهند. تعداد فزاینده‌ای از مردم خرید آنلاین را آغاز کرده‌اند، اگرچه برخی هنوز ترجیح می‌دهند از راه‌های سنتی خرید کنند. در نتیجه، بسیاری از کارخانه‌ها کانال‌های مختلفی را برای فروش محصولات به مشتریان در نظر می‌گیرند (رحمانی و همکاران^{۱۶}، ۲۰۲۰).

¹ Ramezani et al.

² Chanchaichujit et al.

³ Marzband

⁴ Melo et al.

⁵ Ghahremani nahr

⁶ Ahmed and Sarkar

⁷ Huang and Su

⁸ Ghahremani-Nahr et al.

⁹ Ross et al.

¹⁰ Internet of Things (IoT)

¹¹ Ben-Daya et al.

¹² Ashton

¹³ Nozari et al.

¹⁴ Radio Frequency Identification (RFID)

¹⁵ Calatayud et al.

¹⁶ Rahmani et al.



همچنین با توجه به اینکه در محیط پویا و پیچیده زنجیره تأمین، از عدم قطعیت به‌عنوان یک نگرانی مهم یاد می‌شود و چالش بزرگی را برای مدیریت زنجیره تأمین ایجاد می‌کند و به کاهش درآمد واقعی منجر می‌شوند بدین منظور بررسی عدم قطعیت‌ها ضرورت می‌یابد. انواع مختلف عدم اطمینان وجود دارد که بر فرآیندهای زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارد. این عدم قطعیت‌ها به دو نوع اصلی، عدم اطمینان محیطی و سیستمی دسته‌بندی می‌شوند. نوع اول شامل عدم اطمینان قبل از فرآیند تولید است، مانند عدم اطمینان در تقاضا و عرضه. نوع دوم مربوط به عدم قطعیت در فرآیند تولید است، مانند عدم اطمینان در کیفیت، زمان تحویل، خرابی سیستم تولید و تغییرات محصول (هو^۱، ۱۹۸۹).

با توجه به مطالب بیان‌شده در این مقاله، یک مدل جدید چندهدفه، چند رده‌ای، چند محصولی و چند دوره‌ای برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار با در نظر گرفتن کانال‌های مختلف فروش و فناوری RFID ارائه خواهد شد. این مدل به‌طور هم‌زمان به دنبال حداکثر کردن سود و مسئولیت اجتماعی شبکه زنجیره تأمین است، در حالی که تأخیر کل در زمان تحویل و آلودگی‌های زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند. به‌علاوه از آنجایی که طبیعت پویای زنجیره تأمین و افق بلندمدت مسئله طراحی شبکه، درجه بالایی از عدم قطعیت‌ها را به این نوع مسائل تحمیل می‌کند، در این مقاله به هر دو نوع عدم قطعیت‌های سیستمی و محیطی پرداخته خواهد شد و برای مقابله با پارامترهای عدم قطعیت‌های محیطی و سیستمی، مسئله مذکور را بر اساس برنامه‌ریزی استوار تصادفی مبتنی بر سناریو مدل‌سازی خواهیم نمود و برای حل و اعتبارسنجی مدل در ابعاد کوچک از روش جدید بهینه‌سازی اپسیلون محدودیت تعمیم‌یافته قوی برای رسیدن به بهترین موازنه بین اهداف و برای حل مدل در ابعاد بزرگ‌تر و به دلیل NP-HARD بودن مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO استفاده خواهیم نمود. بدین ترتیب برای ارائه مدل پیشنهادی ساختار بقیه مقاله به این شرح است که در بخش دوم به مروری از ادبیات مرتبط با مقاله خواهیم پرداخت. در بخش سوم به تعریف پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود و بر اساس آن‌ها مدل‌های ارائه‌شده تشریح می‌گردد. بخش چهارم به بیان مثال عددی و الگوریتم‌های حل و نتایج محاسباتی و تجزیه و تحلیل آن اختصاص می‌یابد و در بخش پنجم بینش مدیریتی و در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیق‌های آتی ارائه می‌شود.

۲- بررسی ادبیات

آگاهی عمومی توجه روزافزون را به لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته معطوف کرده است. زنجیره تأمین حلقه بسته زمانی ایجاد می‌شود که لجستیک معکوس و زنجیره تأمین کلاسیک به‌طور هم‌زمان مورد توجه قرار گیرند. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در مورد زنجیره تأمین‌های حلقه بسته و طراحی آن انجام‌شده است که مرتبط‌ترین آن‌ها به مقاله حاضر در ادامه ارائه‌شده است.

صفاری و همکاران^۲ (۲۰۱۵) کاهش انتشارات کربن و هزینه‌های شبکه تحت شرایط عدم قطعیت تقاضای مشتری برای یک زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر گرفتند و مدل را توسط یک الگوریتم ژنتیک حل نمودند. رویمین و همکاران^۳ (۲۰۱۶) به‌منظور به حداقل رساندن هزینه اقتصادی و تأثیر محیط‌زیست، یک مسئله استوار برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته سبز دو هدفه ارائه دادند. صفایی و همکاران^۴ (۲۰۱۷) از MILP برای مدل‌سازی چندین تأمین‌کننده و واحدهای تولیدی استفاده کرده و روش بهینه‌سازی استوار مالوی را برای مقابله با عدم قطعیت تقاضا در بخش بازیافت مقوا به کار گرفتند. مدل آن‌ها سود شبکه را به حداکثر رسانده و میزان مطلوب خروجی کاغذ و مقوا را تعیین می‌کند. در این مقاله به بازیافت کنندگان توصیه شد که یک مرکز بازیافت اضافه کنند یا تولید اضافه‌کار را در یک مرکز موجود در نظر بگیرند و فقط کاغذهای قابل بازیافت را جمع کنند. پایدار و همکاران^۵ (۲۰۱۷)، روش بهینه‌سازی استوار مالوی را برای مقابله با عدم اطمینان در جمع‌آوری روغن موتور استفاده نمودند. روغن خام ماده اولیه گران‌قیمت و تجدید ناپذیری است که در تولید روغن موتور استفاده می‌شود. روغن موتور استفاده‌شده، اگر به‌درستی بازیافت شود، می‌تواند به کیفیتی مشابه روغن جدید دست یابد. نویسندگان یک شبکه زنجیره تأمین روغن را بهینه کرده و از روش اپسیلون محدودیت توسعه داده‌شده برای بیشترین تولید و به حداقل رساندن خطر جمع‌آوری استفاده کردند، آن‌ها از روش بهینه‌سازی استوار برای رفع عدم اطمینان در جمع‌آوری روغن موتور در مطالعه خود استفاده کردند. قلی‌زاده و همکاران^۶ (۲۰۱۸، ۲۰۲۰) یک زنجیره تأمین حلقه بسته چندلایه چندمحصولی و چند دوره‌ای را ارائه نمودند. هدف از این مدل به حداکثر رساندن مقدار محصولات معکوس و محصولات باعرضه مستقیم است. عبدالعظیمی و همکاران^۷ (۲۰۲۰) برای به حداکثر رساندن زمان تحویل و به حداقل رساندن کل هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی تحت عدم اطمینان برخی از پارامترها، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

¹ Ho

² Saffari et al.

³ Ruimin et al.

⁴ Safaei et al.

⁵ Paydar et al.

⁶ Gholizadeh et al.

⁷ Abdolazimi et al.



چند سطحی را تحت شرایط قطعی و نامشخص طراحی کردند، آن‌ها رویکرد پیشنهادی خود را در یک کارخانه تولید لاستیک مطالعه کردند. اتابکی و همکاران^۱ (۲۰۲۰) یک مدل *MILP* برای زنجیره تأمین حلقه بسته محصولات بادوام با توجه به الگوی اقتصاد دایره‌ای ایجاد نمودند. مدل مربوط برای زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تسهیلات بازیابی متعدد در جریان معکوس برای بازیابی مقدار محصولات برگشتی بود. در کنار هدف اقتصادی، دو انتشار *CO2* و مصرف انرژی نیز تعریف شد و بعد مدل‌های بهینه‌سازی استوار برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو و برنامه‌ریزی احتمالی در ارتباط با هر یک از عدم قطعیت‌ها، تدوین گردید. قلی زاده و فضل اله تبار^۲ (۲۰۲۰) موضوع بهینه‌سازی استوار تصادفی سناریو محور را در زنجیره تأمین حلقه بسته برای صنعت ذوب با در نظر گرفتن آگاهی زیست‌محیطی مصرف‌کننده و عدم قطعیت تقاضا بررسی کردند. ساموئل و همکاران^۳ (۲۰۲۰) یک مدل ریاضی قطعی و یک نوع استوار آن را با در نظر گرفتن پارامتر غیرقطعیت کیفیت نرخ بازگشتی برای شبکه *CLSC* تحت پوشش سیاست کربن ارائه دادند. پایدار و همکاران^۴ (۲۰۱۵) یک مدل یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس شامل مراکز تولید، توزیع، مشتری، جمع‌آوری، انهدام و احیا در شرایط عدم قطعیت توسعه دادند. در این مدل پارامترهای هزینه قطعی نبوده و برای مقابله با آن از روش بهینه‌سازی استوار تحت سناریو استفاده نمودند. هدف مدل مذکور کمینه‌سازی هزینه‌های سیستم و یافتن جوابی استوار است. بهزادی و سیف برقی^۵ (۲۰۱۸) در مقاله‌ای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تأمین‌کننده، مراکز تولید/بازیابی، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری، مراکز دفع و مشتریان را در نظر گرفتند. آن‌ها مدل مدنظرشان را به صورت چند دوره‌ای در نظر گرفتند و از تأمین‌کننده برای تأمین میزان کمبود قطعات استفاده نمودند آن‌ها همچنین فرض نمودند پارامترهای تقاضا، کمیت و کیفیت محصولات برگشتی و هزینه‌های متغیر دارای عدم قطعیت‌اند و برای ارزیابی عدم قطعیت پارامترها از دو رویکرد بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای و بهینه‌سازی استوار استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد کارایی بهینه‌سازی استوار نسبت به بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای در شرایط عدم قطعیت بهتر است. محمدی و سلیمانی^۶ (۲۰۲۰) یک مدل دوهدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز تحت شرایط عدم قطعیت را طراحی نمودند که جنبه‌های زیست‌محیطی را در کنار جنبه‌های اقتصادی در نظر می‌گیرد. نتایج حاکی از آن است که مدل پیشنهادی آن‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت باعث انعطاف‌پذیری هر چه بیشتر مدل در برابر نوسانات بازار، تحولات اجتماعی و سیاسی و غیره شده است همچنین آن‌ها به منظور بررسی کارایی و عملکرد مدل مذکور، آن را بر روی شرکت ایران ترانسفو پیاده‌سازی نمودند. فتح‌اللهی-فرد و همکاران^۷ (۲۰۲۰) یک چارچوب *CLSC* پایدار برای یک سیستم یکپارچه تأمین آب و جمع‌آوری فاضلاب تحت عدم قطعیت ایجاد کردند علاوه بر این، با توجه به روند توسعه پایدار، ابعاد زیست‌محیطی و مزایای اجتماعی سیستم یکپارچه تأمین آب و جمع‌آوری فاضلاب را ارائه نمودند. همچنین برای عملی ساختن یا اصلاح استانداردهای توسعه پایدار در کشورهای در حال توسعه، یک مطالعه موردی در ایران بر روی یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چندهدفه جدید مبتنی بر ابعاد سه‌گانه پایداری اعمال نمودند. یکی دیگر از نوآوری‌های این مطالعه، معرفی یک سنوی چندهدفه بهبودیافته برای حل این مدل پیچیده است.

همچنین برای بهبود کارایی توزیع محصول فاسدشدنی، توفیلوس و همکاران^۸ (۲۰۲۱) برای اولین بار یک فرمول ریاضی مختلط عدد صحیح جدید برای بهینه‌سازی زمان‌بندی کامیون در یک پایانه‌های کراس داکینگ^۹ زنجیره سرد معرفی نمودند. این مدل به‌صراحت پوسیدگی محصولات فاسدشدنی را در طول سرویس کامیون‌های ورودی به تصویر می‌کشد و وجود مناطق ذخیره‌سازی کنترل شده با دما را که به‌طور خاص برای محصولات فاسدشدنی تعیین شده‌اند، در نظر می‌گیرد. این زنجیره به‌عنوان هدف، کل هزینه‌های متحمل شده در طول سرویس کامیون را به حداقل می‌رساند. فلاح‌پور و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای یک چارچوب تصمیم‌فازی را برای بررسی مسئله انتخاب تأمین‌کننده تاب‌آور-پایدار برای مطالعه واقعی در صنعت روغن نخل در مالزی پیشنهاد نمودند. در مرحله اول، معیارهای پایدار مبتنی بر تاب‌آوری برای ارزیابی عملکرد تأمین‌کنندگان در صنعت روغن نخل مالزی بومی‌سازی گردید. بر این اساس، ۳۰ معیار در سه جنبه مختلف (یعنی عمومی، پایدار و تاب‌آوری) با آزمون‌های آماری تعیین گردید. علاوه بر این، یک مدل ابر هیبریدی با استفاده از *FANP*^{۱۱}، *FBWM*^{۱۲}، *FDEMTEL*^{۱۳} و *FIS*^{۱۴} به‌طور هم‌زمان توسعه داده شد تا شایستگی‌های خود را به شیوه‌ای کارآمد به‌کارگیرند. در این چارچوب، در ابتدا، روابط بین معیارها/زیر معیارها به روش *FDEMATEL* به دست آمد، سپس وزن اولیه معیارها/زیر معیارها با روش *FBWM* اندازه‌گیری شد، سپس وزن نهایی معیارها/زیر معیارها با در نظر گرفتن روابط متقابل توسط *FANP* محاسبه

¹ Atabaki et al.

² Gholizadeh and Fazlollahtabar

³ Samuel et al.

⁴ Paydar et al.

⁵ Behzadi and Seifabrghy

⁶ Mohammadi and Soleimani

⁷ Fathollahi-Fard et al.

⁸ Theophilus et al.

⁹ Cross-Docking Terminals (CDTs)

¹⁰ Fallahpour et al.

¹¹ Fuzzy Decision-Making Trial And Evaluation Laboratory (FDEMTEL)

¹² Fuzzy Best Worst Method (FBWM)

¹³ Fuzzy Analytical Network Process (FANP)

¹⁴ Fuzzy Inference System (FIS)



گردید. در نهایت، عملکرد تأمین‌کنندگان با روش *FIS* ارزیابی شد. یافته‌ها حاکی از عملکرد بالای چارچوب پیشنهادی در این مفهوم بود و مهم‌ترین معیارها شامل هزینه از لحاظ عمومی، مصرف منابع به‌عنوان مهم‌ترین معیار پایدار و چابکی به‌عنوان مهم‌ترین معیار تاب‌آوری شناسایی شد. مجتهدی و همکاران^۱ (۲۰۲۱) در مقاله‌ای قابلیت بهینه‌سازی مسئله مدیریت هماهنگ زباله جامد^۲ با اهداف متعدد و محدودیت‌های زندگی واقعی با استفاده از یک *MINLP* چندهدفه جدید نشان دادند. توابع هدف چندگانه *CSWM* اعمال شده در این مطالعه، ملاحظات مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی را برای ایجاد یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه پایدار با در نظر گرفتن ناوگان خودروهایی ناهمگن که در یک شبکه لجستیک چندلایه با اهداف بهینه‌سازی کار می‌کنند، ترکیب می‌کند. یک توسعه و کاربرد کاملاً جدید از بهینه‌ساز مهندسی اجتماعی حافظه تطبیقی سئو^۳ برای حل مدل پیشنهادی به‌ویژه با توجه این به سه هدف خاص ارائه شد. در این راستا، نتایج نشان داد که *AMSEO* به‌طور قابل توجهی بهتر از باز پخت شبیه‌سازی شده^۴ یا خود سئو^۵ عمل می‌کند. در نهایت، صرفه‌جویی بالقوه کلی در هزینه‌های دفع زباله که از طریق افزایش باز یافت قابل‌دستیابی است (که با چارچوب‌بندی مسئله لجستیک در چندین لایه آشکار می‌شود) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یافته‌های اصلی آن‌ها، راه‌حل‌های عملی با استفاده از اهداف پایداری برای *CSWM* و کاربرد و توسعه بیشتر *AMSEO* در بهینه‌سازی مسیریابی است. پاشا و همکاران^۶ (۲۰۲۱) در مقاله‌ای یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه را پیشنهاد می‌کند که به تمام تصمیمات تاکتیکی اصلی حمل‌ونقل کشتی می‌پردازد و امکان استقرار یک ناوگان کشتی ناهمگن را در هر مسیر، با در نظر گرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدشده در طول عملیات حمل‌ونقل کشتی، فراهم می‌کند. هدف مدل، کل سود تولیدشده از عملیات حمل‌ونقل خطی را به حداکثر می‌رساند. همچنین یک الگوریتم اکتشافی مبتنی بر تجزیه در این مطالعه برای حل مدل پیشنهادی و مقابله مؤثر با نمونه‌های مسئله با اندازه بزرگ ارائه شد. آزمایش‌های عددی، انجام‌شده برای تعدادی از مسیرهای حمل‌ونقل کشتی در دنیای واقعی، اثربخشی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای مهتاب و همکاران^۷ (۲۰۲۱) یک مدل لجستیک بشردوستانه مستحکم تصادفی چندهدفه را برای کمک به مقامات مدیریت بلایا در تصمیم‌گیری بهینه قبل و بعد از فاجعه پیشنهاد نمودند. این مدل مکان تأسیسات موقت را شناسایی می‌کند، مقدار کالایی را که باید از قبل تعیین شود، تعیین می‌کند و یک برنامه دقیق برای توزیع کالاها و ارسال وسایل نقلیه ارائه می‌دهد. همچنین ویژگی‌های عدم قطعیت در تقاضا، دسترسی به گره توسط یک روش حمل‌ونقل خاص و وضعیت منابع از پیش تعیین‌شده پس از یک فاجعه نیز در آن در نظر گرفته شده است. فرض دیگر این مقاله، عدالت در توزیع کالاها است. به‌علاوه این مقاله با اضافه کردن جریان وسیله نقلیه و چند دوره‌ای به یک مدل بهینه‌سازی تصادفی استوار، به ادبیات موجود کمک می‌کند و در ادامه برای نشان دادن کاربرد مدل، یک مورد واقعی از یک سیل در بنگلادش را مورد مطالعه قرار می‌دهد، در نهایت، یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی آن‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در تخصیص بهینه منابع کمک کند. فلاح‌پور و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل یکپارچه جدید را برای در نظر گرفتن معیارهای پایداری و صنعت ۴/۰ برای مدیریت انتخاب تأمین‌کننده مطرح نمودند. رویکرد پیشنهادی شامل روش *FIS* و *FBWM* برای ارزیابی انتخاب تأمین‌کنندگان بود. ابتدا، این مطالعه فهرست جامعی از معیارهای صنعت ۴/۰ و پایداری را به همراه تعاریف آن‌ها تعیین می‌کند. سپس، وزن اهمیت هر معیار توسط *FBWM* محاسبه می‌شود. متعاقباً، یک *FIS* دو مرحله‌ای به نامزدی عملکرد تأمین‌کنندگان با توجه به معیارهای پایداری و صنعت ۴/۰ اختصاص داده می‌شود. برای نشان دادن کاربردی بودن مدل یکپارچه آن‌ها، یک مطالعه موردی برای یک شرکت نساجی در ایران ارائه دادند.

در خصوص زنجیره تأمین حلقه بسته با کانال‌های فروش مختلف نیز، چن و همکاران^۸ (۲۰۱۹) یک برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای مدل‌سازی شبکه تولید مجدد برای *CLSC* دو کاناله پیشنهاد کردند. کائود و همکاران^۹ (۲۰۲۰) مدل‌های *CLSC* دو کانالی را برای حل مشکل تجارت الکترونیکی ایجاد کرده‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن دو کانال در *CLSC*، تجزیه و تحلیل حساسیت را برای نشان دادن اثربخشی ادغام تجارت الکترونیکی انجام دادند. رحمانی و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل ریاضی مبتنی بر سیستم دو کاناله برای طراحی یک زنجیره تأمین سبز ارائه نمودند. اولین کانال فروش بر اساس سیستم خرید خرده‌فروشی سنتی است، در حالی که در کانال دوم مشتریان محصولات را مستقیماً از کارخانه خریداری می‌کنند. علاوه بر این به منظور تشویق مدیران به تولید محصولات سبز، سیاست‌های یارانه دولت اعمال شده است. همچنین، به دلیل ماهیت نامشخص برخی پارامترها، از یک رویکرد بهینه‌سازی امکانی استوار استفاده شده است. از آنجاکه حل مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط پیشنهادی برای حل مسئله پیچیده است، آن‌ها یک الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم برای به دست آوردن راه‌حل‌های کارآمد پیشنهاد دادند. رنجبر و صاحبی^{۱۰} (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای یک زنجیره تأمین حلقه بسته

¹ Mojtabehi et al.

² Coordinated Solid Waste Management (CSWM) problem

³ Adaptive Memory of SEO (AMSEO)

⁴ Simulated Annealing (SA)

⁵ Social Engineering Optimizer (SEO)

⁶ Pasha et al.

⁷ Mahtab et al.

⁸ Chen et al.

⁹ Kaoud et al.

¹⁰ Ranjbar and Sahebi



که شامل یک سازنده، یک خرده‌فروش و یک جمع‌آوری‌کننده بخش ثالث است در نظر گرفتند، سازنده هم محصولات جدید را از مواد خام تولید می‌کند و هم محصولات استفاده‌شده جمع‌آوری‌شده را بازسازی می‌کند. سازنده محصولات جدید و محصولات بازسازی‌شده را از طریق خرده‌فروش به بازار عرضه می‌کند و در کانال معکوس، خرده‌فروش و جمع‌آوری‌کننده بخش ثالث به‌طور رقابتی محصولات استفاده‌شده را جمع‌آوری می‌کنند. برای بررسی تصمیمات بهینه قیمت‌گذاری و جمع‌آوری تحت رهبری کانال مختلف، چهار سناریو متفاوت ساخته شد - یک مدل متمرکز و سه مدل غیرمتمرکز شامل رهبری سازنده، رهبری خرده‌فروش و رهبری جمع‌آوری‌کننده بخش ثالث. سپس با استفاده از آنالیز عددی تصمیمات بهینه در سناریوهای مختلف مقایسه شده‌اند و تأثیر شدت رقابت بین دو کانال باز یافت بر متغیرهای تصمیم‌گیری و سود را بررسی نمودند. نتایج نشان داد مدل رهبری خرده‌فروش اغلب مؤثرترین سناریو در زنجیره تأمین حلقه بسته است. تجارت آنلاین به آفلاین^۱ که هدف آن ایجاد تعادل بین فروش آنلاین و آفلاین است می‌تواند به مدیران در انجام مشاغل آنلاین و آفلاین کمک کند. بدین ترتیب، فتح الهی-فرد و همکاران^۲ (۲۰۲۱) در مقاله‌ای برای اولین بار به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته دو کاناله، چند محصولی، چند دوره‌ای، چند رده‌ای تحت عدم قطعیت برای صنعت تاپر پرداختند. برای مقابله با پارامترهای غیرقطعی مسئله (به‌عنوان مثال، قیمت‌ها و تقاضا)، یک رویکرد فازی، به اصطلاح روش Jimenez، استفاده نمودند. همچنین یکی دیگر از نوآوری‌های اصلی آن‌ها، دو الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی جدید با رویه‌های جدید بود. دو الگوریتم اخیر الهام گرفته از طبیعت (یعنی الگوریتم گوزن قرمز^۳ و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ^۴) به ترتیب با الگوریتم ژنتیک^۵ و باز پخت شبیه‌سازی‌شده هیبرید شده‌اند^۶ تا فزاینده تنوع و تشدید را تقویت کنند.

در زمینه به‌کارگیری RFID در زنجیره تأمین حلقه بسته نیز می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. کیم و گلاک^۷ (۲۰۱۴) برای مدیریت کانتینر با استفاده از یک سیستم RFID که در آن حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به خرده‌فروشی انجام می‌شد، در زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده کردند. از پیاده‌سازی سیستم RFID نیز در مسیر بازگشت برای پشتیبانی از ردیابی موقعیت کانتینر در زنجیره تأمین استفاده شد. حاجی پور و همکاران^۸ (۲۰۱۹) یک مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته را با در نظر گرفتن فناوری RFID برای حداقل کردن هم‌زمان اهداف زمان انجام کار، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌صورت تک هدفه ارائه دادند. آن‌ها برای مواجهه با عدم اطمینان مدل از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده کردند. همچنین زاهدی و همکاران^۹ (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای دو رویکرد نوآورانه برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین امداد را با استفاده از اینترنت اشیا برای رسیدگی به موارد مشکوک متعدد در طول یک بیماری همه‌گیر مانند شیوع SARS-COV-2 توسعه دادند. رویکرد اول (رویکرد اولویت‌بندی) حداکثر زمان پاسخ‌دهی آمبولانس‌ها را به حداقل می‌رساند، در حالی که رویکرد دوم (رویکرد تخصیص) کل زمان پاسخ بحرانی را به حداقل می‌رساند. در ادامه به‌منظور نشان دادن جایگاه تحقیق پیش رو نسبت به تحقیقات مهم انجام پذیرفته در سال‌های اخیر مرتبط‌ترین آن‌ها به مدل پیشنهادی مقاله حاضر، در جدول ۱ ارائه می‌گردد.

باید دانست که کنار گذاشتن روش‌های سنتی و استفاده از فناوری‌های نوین در عرصه‌های صنعتی و اقتصادی، زمینه‌ساز بهره‌وری بیشتر است. با توجه به بررسی مطالعات صورت گرفته می‌توان مشاهده نمود استفاده از فناوری‌های RFID در ادبیات مدیریت زنجیره تأمین هنوز محدود است. بیشتر مطالعات بر روی تولید، مدیریت موجودی و مدیریت سفارش و همچنین تصمیمات و مدل‌های مربوط به مسیریابی خودرو متمرکز شده است و در حالی که برنامه‌های کاربردی فناوری RFID برای زنجیره تأمین قبلاً در مطالعات تجربی و صنعتی گرا مورد آزمایش قرار گرفته است، هنوز فرض ردیابی در یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی زنجیره تأمین حلقه بسته به‌طور صریح مورد توجه قرار نگرفته است. بدین ترتیب در این مقاله برای هر یک از گزینه‌های حمل‌ونقل انواع سیستم‌های RFID در نظر گرفته می‌شود که سبب تسریع در معامله اطلاعات می‌شوند. این سیستم‌ها وظیفه رصد سفارش‌ها مشتریان به‌صورت آنلاین را دارند به عبارتی این فناوری با کاهش وقفه‌های زمانی در حمل‌ونقل، پرداخت عوارض الکترونیکی بدون توقف در بزرگراه‌ها و تحویل به‌موقع سفارش و حمل‌ونقل سریع‌تر و حذف حمل‌ونقل‌های نادرست و... موجب کوتاه‌تر شدن زنجیره سفارش و چابکی زنجیره خواهند شد. همچنین همان‌طور که بیان گردید به دلیل تغییر سریع سطح زندگی، مشتریان تولیدکنندگانی را که قادر به ارائه گزینه‌های مختلف فروش هستند ترجیح می‌دهند؛ بنابراین در نظر گرفتن کانال‌های فروش متعدد و مدل‌سازی ریاضی آن از مواردی می‌باشد که اخیراً در زنجیره تأمین مورد توجه قرار گرفته

¹ Online-to-Offline (O2O)

² Fathollahi-Fard et al.

³ Red Deer Algorithm (RDA)

⁴ Whale Optimization Algorithm (WOA)

⁵ Genetic Algorithm (GA)

⁶ Simulated Annealing (SA)

⁷ Kim and Glock

⁸ Hajipour et al.

⁹ Zahedi et al.

است ولی مطالعات معدودی در این زمینه وجود دارد از این شکاف‌های تحقیقاتی به‌عنوان نوآوری تحقیق استفاده شد. بدین سبب در این مقاله به طراحی جدید یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته جدید با کانال‌های فروش متفاوت و فناوری RFID پرداختیم.

جدول ۱- جایگاه تحقیق پیش رو نسبت به تحقیقات پیشین.

Table 1- The position of the present research in relation to the previous researches.

مرجع	زنجیره تأمین حلقه بسته	چند محصولی	چند دورهای	فناوری Rfid	کانال فروش		اهداف	پارامتر غیرقطعی
					مستقیم	غیرمستقیم		
کیم و گلاک، ۲۰۱۴	*	*	*	*	*	*	-حداقل سازی هزینه	
صفاری و همکاران، ۲۰۱۵	*						-حداقل سازی هزینه -حداقل سازی اثرات کربن	-تقاضا
روبین و همکاران، ۲۰۱۶	*	*					-حداقل سازی هزینه -حداقل سازی اثرات زیست‌محیطی	-تقاضا -پارامترهای هزینه
صفایی و همکاران، ۲۰۱۷	*		*				-حداکثر سازی سود	-تقاضا
پایدار و همکاران، ۲۰۱۷	*	*	*				-حداکثر سازی سود -حداقل سازی ریسک خرید محصول استفاده‌شده	-تعداد محصولات برگشتی
قلی زاده و همکاران، ۲۰۱۸	*	*	*				-حداکثر سازی مقدار محصولات معکوس و عرضه مستقیم در شبکه	-تقاضا -نرخ بازگشت محصول
حاجی پور و همکاران، ۲۰۱۹	*	*		*			-حداکثر سازی سود	-تقاضا
چن و همکاران، ۲۰۱۹	*	*		*			-حداکثر سازی سود	
قلی زاده و همکاران، ۲۰۲۰	*	*	*				-حداکثر سازی سود	-تقاضا
عبدالعظیمی و همکاران، ۲۰۲۰	*	*	*				-حداکثر سازی زمان تحویل	-تقاضا
اتابکی و همکاران، ۲۰۲۰	*						-حداقل سازی هزینه -حداقل سازی انتشارات CO2 -حداقل سازی مصرف انرژی	-تقاضا -تعداد محصولات برگشتی -هزینه‌های عملیاتی -نرخ بازیابی
ساموئل و همکاران، ۲۰۲۰	*	*					-حداکثر سازی سود	-کیفیت محصولات برگشتی
کائود و همکاران، ۲۰۲۰	*		*		*		-حداقل سازی هزینه	
رحمانی و همکاران، ۲۰۲۰	*				*		-حداقل سازی هزینه	-تقاضا -هزینه‌های عملیاتی -هزینه‌های انتقال



جدول ۱- ادامه.
Table 1- Continued.

مرجع	زنجیره تأمین حلقه بسته	چند محصولی	چند دوره‌ای	کانال فروش			پارامتر غیر قطعی
				فناوری Rfid	مستقیم	اهداف	
پایدار و همکاران، ۲۰۱۵	*					*	-تقاضا -حداقل سازی هزینه -هزینه حمل و نقل -هزینه ثابت راه اندازی
بهزادی و سیف برقی، ۲۰۱۸	*	*	*			*	-تقاضا -حداقل سازی هزینه -کمیت و کیفیت محصولات برگشتی -هزینه های متغیر
فتح الهی و همکاران، ۲۰۲۰	*			*			-حداقل سازی هزینه -حداقل سازی آلودگی های زیست محیطی -میزان به آبخوان -میزان بارندگی -میزان تبخیر
رنجبر و صاحبی ۲۰۲۰، محمدی و سلیمانی، ۲۰۲۰	*	*	*	*	*	*	-حداقل سازی هزینه -حداقل سازی اثرات کربن -حداقل سازی هزینه
فتح الهی و همکاران، ۲۰۲۱	*	*	*	*	*	*	-حداقل سازی هزینه -تقاضا
این مقاله	*	*	*	*	*	*	-تقاضای مشتریان اولیه و ثانویه -زمان تحویل -حداکثر سازی سود -حداقل سازی کل تاخیر زمان تحویل -حداکثر سازی مسئولیت اجتماعی -حداقل سازی آلودگی های زیست محیطی

به عبارتی می توان گفت که این مقاله اولین تلاش در طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته است که به صورت توأمان چندین ویژگی/مفاهیم پیچیده از جمله استواری به جهت مقابله با عدم قطعیت پارامترها، پایداری (ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی)، فناوری RFID، کانال های مختلف فروش را به صورت چندهدفه، چند دوره ای، چند محصولی را به صورت یک مدل برنامه ریزی ریاضی در نظر می گیرد که این سبب ایجاد طرحی جدید از زنجیره تأمین حلقه بسته می شود. فناوری RFID مورد استفاده در این مقاله می تواند با یکپارچه سازی اطلاعات با مبدأ و مقصد خود، فاصله زمانی بین صدور سفارش تا دریافت سفارش را حداقل کند که این ملاحظات و منظور کردن کانال های فروش مستقیم (آنلاین) و غیر مستقیم، چابکی و پاسخگویی بهتر زنجیره را در هر سطح و به طور خاص برای مشتریان خود رقم می زند و همچنین برای سازمان یک مزیت رقابتی و ارزش ایجاد می کند. بعلاوه کانال های فروش متعدد باعث می شود تا صنایع و شرکت ها به بخش هایی از مشتریان دسترسی پیدا کنند که نمی توانستند از طریق کانال های خرده فروشی سنتی (غیر مستقیم) به آنها دسترسی پیدا کنند.

بعلاوه سیستم ها می توانند فاقد ساختار مشخص، نامعلوم و بسیار پیچیده باشند و بهینه سازی آنها اغلب اوقات نیازمند به کارگیری تکنیک های تحقیق در عملیات است. بدین ترتیب در این مقاله، برای حل دقیق مسائل برنامه ریزی خطی چندهدفه پیشنهادی از یک



رویکرد جدید به نام اپسیلون محدودیت تقویت شده قوی^۱ استفاده خواهیم نمود که یک نوع قوی از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده است؛ و نقاط ضعف نسخه‌های پیشین خود یعنی، مدیریت غیر موثر نقاط ندیر مناسب توابع هدف، مدت زمان قابل توجه را برطرف می‌نماید.

به‌طور خلاصه نکات برجسته این مقاله را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- طراحی و مدل‌سازی جدید یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار به‌صورت قطعی و استوار.
- در نظر گرفتن کانال‌های فروش مختلف (مستقیم (آنلاین) و غیر مستقیم).
- تصمیم‌گیری در مورد انتخاب نوع سیستم RFID برای گزینه‌های حمل و نقل با توجه به دو هدف تأخیر زمان تحویل کل و اقتصادی.
- در نظر گرفتن ویژگی‌های چند محصولی، چند دوره‌ای، چند هدفه و عدم قطعیت پارامترها برای تطبیق بیشتر با واقعیت.
- به‌کارگیری روش جدید اپسیلون محدودیت تصمیم‌یافته قوی ارائه‌شده توسط نیکاس و همکاران در سال ۲۰۲۰، برای حل مدل.
- استفاده از نسخه بهبودیافته از یک الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت، به نام بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) و همچنین الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مغلوب (NSGA-II) برای حل مدل در ابعاد بالاتر.

۳- بیان مسئله

در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح چندهدفه، چنددره‌ای، چند محصولی و چند دوره‌ای برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار با در نظر گرفتن فناوری RFID و عدم قطعیت‌های سیستمی و محیطی ارائه خواهد شد. در جهت روبه‌جلو مواد اولیه از تأمین‌کننده تأمین می‌شود و به مراکز تولید-بازیابی برای تولید محصول جدید ارسال می‌شوند، محصولات جدید تولید شده هم می‌توانند به‌صورت مستقیم (آنلاین) از مراکز تولید-بازیابی و هم به‌صورت غیر مستقیم از مراکز توزیع/مراکز ترکیبی در اختیار مشتریان قرار گیرند. در جهت معکوس محصولات برگشتی از مشتریان بعد از جمع‌آوری برای آزمایش و بررسی به مراکز جمع‌آوری/مراکز ترکیبی ارسال می‌شوند و پس از آزمایش و بررسی در مراکز جمع‌آوری/مراکز ترکیبی، محصولات قابل بازیابی به مراکز تولید/بازیابی، محصولات قابل تعمیر به مراکز تعمیر و از مراکز تعمیر به مشتریان ثانویه و غیر قابل بازیابی و غیر قابل تعمیر به مراکز دفع ارسال می‌شوند.

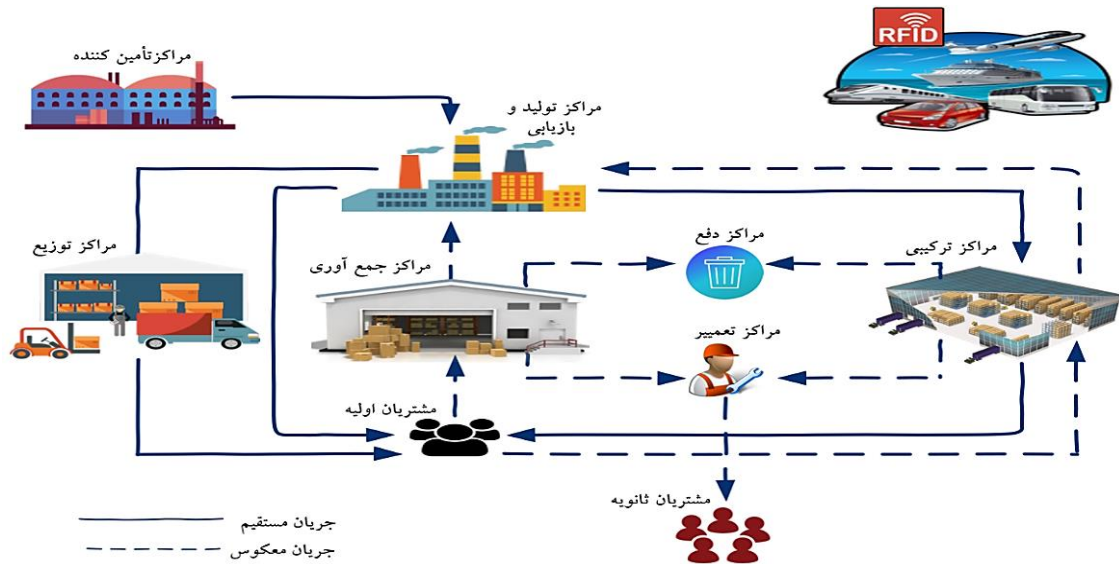
در این زنجیره مراکز ترکیبی هم کار جمع‌آوری و هم کار توزیع را انجام می‌دهند. به عبارتی در این زنجیره پیشنهادی به‌جای اینکه فقط به مراکز پردازش روبه‌جلو (یعنی مراکز توزیع) و مراکز پردازش رو به عقب (یعنی مراکز جمع‌آوری) به‌طور جداگانه پردازیم، مرکز پردازش ترکیبی که در آن دو مرکز توزیع و جمع‌آوری در یک مکان مستقر می‌شوند را نیز در نظر خواهیم گرفت. مرکز پردازش ترکیبی در مقایسه با مراکز جداگانه توزیع یا جمع‌آوری در نتیجه پیامد به اشتراک‌گذاری تجهیزات و زیرساخت‌های بررسی محصول، مزایای بیشتری مانند صرفه‌جویی در هزینه و کاهش آلودگی دارد. از این‌رو در شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی مرکز جمع‌آوری-توزیع-ترکیبی در نظر گرفته شده است تا موجب صرفه‌جویی بیشتر شود. استفاده یا عدم استفاده از مراکز پردازش ترکیبی، به تبدلات هزینه‌های متغیر و ثابت باز بودن بستگی دارد. در شکل ۱ ساختار زنجیره تأمین نشان داده شده است.

این تحقیق شامل چهار هدف حداکثر سازی سود کل زنجیره تأمین، حداکثر سازی مسئولیت اجتماعی که این مسئولیت اجتماعی شامل کلیه شغل‌های ایجاد شده در زنجیره تأمین، کل توسعه اقتصادی حاصل شده از طراحی شبکه زنجیره تأمین به سبب احداث تسهیلات در مناطق محروم و کمتر توسعه‌یافته و حداقل سازی آلودگی‌های حاصل از تولید و تعمیر و انتقال و حداقل سازی کل تأخیرهای زمان تحویل است. در این مقاله چندین وسایل نقلیه وجود دارد که دارای محدودیت زمانی استفاده در تحویل محصول به مشتری‌اند بنابراین لازم است اطلاعات بین وسایل نقلیه و مراکز خیلی سریع منتقل شود، بنابراین در این زنجیره بایستی برای هر یک از ارتباطات موجود بین اعضای زنجیره یک سیستم حمل و نقل در نظر گرفته شود. برای این منظور چندین سیستم حمل و نقل از پیش تعریف شده مورد بررسی قرار گرفته و هرکدام ارتباطات بین اعضای مختلف زنجیره را برقرار می‌کنند. این سیستم‌های حمل و نقل از نظر هزینه و از نظر زمان تحویل باهم متفاوت‌اند که مدیریت زنجیره تأمین باید مناسب‌ترین آن‌ها را از نظر اقتصادی و حداقل تأخیر کل زمان تحویل انتخاب کند. برای این منظور، استفاده از انواع سیستم‌های RFID پیشنهاد می‌شود که سبب تسریع در معامله اطلاعات می‌شوند. این سیستم‌ها که در ناوگان حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد، وظیفه رصد سفارش‌ها مشتریان به‌صورت آنلاین را دارند و تلاش می‌کنند با یک یکپارچه‌سازی اطلاعات با مبدأ

¹ Robust Augmented ϵ -Constraint Method (AUGMECON-R)



و مقصد خود، فاصله زمانی بین صدور سفارش تا دریافت سفارش را حداقل کند. به عبارتی این فناوری با کاهش وقفه های زمانی در حمل و نقل، پرداخت عوارض الکترونیکی بدون توقف در بزرگراه ها و تحویل به موقع سفارش و حمل و نقل سریع تر و حذف حمل و نقل های نادرست و... موجب کوتاه تر شدن زنجیره سفارش خواهد شد. استفاده از چنین سیستم ارتباطی هزینه ای را نیز در پی دارد که زنجیره تأمین باید آن ها را در نظر بگیرد. بدین ترتیب در این تحقیق انواع مختلفی از سیستم های RFID مورد استفاده قرار گرفته که مدیریت زنجیره تأمین بایستی در خصوص انتخاب آن ها تصمیم گیری کند. انتخاب نوع سیستم RFID بر روی دو هدف حداقل تأخیر کل زمان تحویل و اقتصادی اثرگذار است. از نظر چابکی، استفاده از تکنولوژی های بالاتر RFID باعث کاهش زمان های تحویل (بهبود چابکی) می شود. از طرفی دیگر استفاده از تکنولوژی های بالاتر RFID، دارای هزینه اولیه بالاتر بوده و در نتیجه عملکرد اقتصادی زنجیره را ضعیف تر می کند.



شکل ۱- شمای زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی.

Figure 1- Scheme of the proposed closed loop supply chain.

به طور جزئی تر می توان مفروضات این تحقیق را به صورت زیر بیان نمود:

- زنجیره تأمین مورد بررسی چند رده ای، چند محصولی و چند دوره ای و چند هدفه می باشد.
- در این زنجیره مکان های تأمین کنندگان، مشتریان اولیه و مشتریان ثانویه شناخته شده و ثابت می باشد.
- مجموعه نقاط بالقوه ای وجود دارد که می تواند یکی از مراکز تولید-بازایی، مراکز توزیع، جمع آوری، مراکز ترکیبی، مراکز تعمیر و مراکز دفع باشد.
- تمامی مراکز تولید-بازایی، توزیع، جمع آوری، ترکیبی، تعمیر و دفع دارای ظرفیت محدود می باشند.
- انواع تکنولوژی های مختلف برای تولید قابل استفاده می باشد.
- مراکز تولید-بازایی توانایی فروش به صورت مستقیم (آنلاین) و هم به واسطه مراکز توزیع/ مراکز ترکیبی به صورت غیر مستقیم به مشتریان را دارند.
- انواع سیستم های RFID برای سیستم های حمل و نقل مختلف قابل استفاده می باشد. این سیستم بین تمامی اعضای زنجیره در نظر گرفته شده است.
- مراکز ترکیبی امکان توزیع و جمع آوری محصولات را به طور هم زمان دارند.
- کلیه تقاضاهای مشتریان اولیه بایستی تحویل داده شود.

در ادامه تعریف اندیس ها، پارامترها و متغیرهای استفاده شده در فرمول بندی مدل در بخش ۱ از ضمایم آورده شده است و مسئله شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار چابک با کانال های فروش مختلف به صورت زیر مدل سازی می شود:

$$\text{Max Objective 1} = \sum_t (\text{Income}_t - \text{cost}_t). \quad (1)$$

رابطه (۱)، تابع هدف اول که بیشینه‌سازی کل سود زنجیره است که از تفاضل درآمدها از هزینه‌ها به دست می‌آید.

$$\text{Income}_t = \sum_{j,c,p,l} \text{PR}_{cp}^t \text{QJC}_{jcp}^t + \sum_{i,c,p,l} \text{PR}_{cp}^t \text{QIC}_{icpl}^t + \sum_{m,f,p,l} \text{PR}_{fp}^t \text{QMF}_{mfpl}^t. \quad (1.a)$$

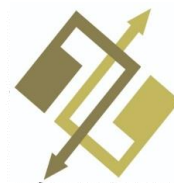
رابطه (۱.a)، درآمدهای حاصل از فروش محصولات در هر دوره را مشخص می‌نماید.

$$\begin{aligned} \text{Cost}_t = & \left(\sum_{i,h} \text{FX}_{ih}^t (X_{ih}^t - X_{ih}^{t-1}) + \sum_j \text{FY}_j^t (Y_j^t - Y_j^{t-1}) + \sum_j \text{FZ}_j^t (Z_j^t - Z_j^{t-1}) + \right. \\ & \left. \sum_j \text{FU}_j^t (U_j^t - U_j^{t-1}) + \sum_k \text{FV}_k^t (V_k^t - V_k^{t-1}) + \sum_m \text{FM}_m^t (VM_m^t - VM_m^{t-1}) + \sum_b \text{FB}_b^t (B_b^t - B_b^{t-1}) \right) \\ & + \left(\sum_{b,i,r,l} \text{QBI}_{bir}^t \text{BC}_{br}^t + \sum_{i,j,p,h,l} \text{QIJ}_{ijpl}^t \text{MC}_{iph}^t + \sum_{i,c,p,h,l} \text{QIC}_{icpl}^t \text{MC}_{iph}^t + \right. \\ & \left. \sum_{j,c,p,l} \text{QJC}_{jcp}^t \text{OC}_{jp}^t + \sum_{j,m,p,l} \text{QJM}_{jmpl}^t \text{OC}_{mp}^t + \sum_{c,j,p,l} \text{QCJ}_{cjpl}^t \text{IC}_{jp}^t + \right. \\ & \left. \sum_{j,i,p,h,l} \text{QJI}_{jip}^t \text{RC}_{iph}^t + \sum_{j,k,p,l} \text{QJK}_{jkpl}^t \text{DC}_{kp}^t + \sum_j \text{INV}_j^t \text{HC}_{jp}^t \right) + \end{aligned} \quad (1.b)$$

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{b,i,r,l} \text{QBI}_{bir}^t \text{CBI}_{bir}^t + \sum_{i,j,p,l} \text{QIJ}_{ijpl}^t \text{CIJ}_{ijpl}^t + \sum_{i,c,p,l} \text{QIC}_{icpl}^t \text{CIC}_{icpl}^t + \right. \\ & \left. \sum_{j,c,p,l} \text{QJC}_{jcp}^t \text{CJC}_{jcp}^t + \sum_{c,j,p,l} \text{QCJ}_{cjpl}^t \text{CCJ}_{cjpl}^t + \sum_{j,i,p,l} \text{QJI}_{jip}^t \text{CJI}_{jip}^t + \right. \\ & \left. \sum_{j,k,p,l} \text{QJK}_{jkpl}^t \text{CJK}_{jkpl}^t + \sum_{j,m,p,l} \text{QJM}_{jmpl}^t \text{CJM}_{jmpl}^t + \sum_{m,f,p,l} \text{QMF}_{mfpl}^t \text{CMF}_{mfpl}^t \right) + \\ & + \left(\sum_{b,i,l,o} \text{OBI}_{bilo}^t \text{FBI}_{bilo}^t + \sum_{i,j,l,o} \text{OIJ}_{ijlo}^t \text{FIJ}_{ijlo}^t + \sum_{i,c,l,o} \text{OIC}_{iclo}^t \text{FIC}_{iclo}^t + \right. \\ & \left. \sum_{j,c,l,o} \text{OJC}_{jclo}^t \text{FJC}_{jclo}^t + \sum_{c,j,l,o} \text{OCJ}_{cjlo}^t \text{FCJ}_{cjlo}^t + \sum_{j,i,l,o} \text{OJI}_{jilo}^t \text{FJI}_{jilo}^t + \right. \\ & \left. \sum_{j,k,l,o} \text{OJK}_{jklo}^t \text{FJK}_{jklo}^t + \sum_{j,m,l,o} \text{OJM}_{jmlo}^t \text{FJM}_{jmlo}^t + \sum_{m,f,l,o} \text{OMF}_{mflo}^t \text{FMF}_{mflo}^t \right). \end{aligned}$$

رابطه (۱.b) کل هزینه‌های هر دوره زنجیره را بیان می‌کند. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های ثابت باز بودن مرکز تولید-بازایی و مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری و مراکز ترکیبی و مراکز دفع و مراکز تعمیر و هزینه ثابت انتخاب یک تأمین‌کننده، هزینه‌های خرید مواد خام از تأمین‌کننده‌ها، هزینه‌های تولید محصولات در مراکز تولید-بازایی، هزینه‌های عملیاتی در مراکز توزیع/ترکیبی، هزینه‌های عملیاتی تعمیر در مراکز تعمیر، هزینه بازرسی و جمع‌آوری محصول در مراکز جمع‌آوری/ترکیبی، هزینه‌های بازایی محصولات در مراکز تولید و بازایی، هزینه دفع، هزینه نگهداری موجودی در مراکز جمع‌آوری/ترکیبی، هزینه‌های انتقال توسط سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل در زنجیره تأمین و در نهایت هزینه ثابت به‌کارگیری انواع سیستم‌های RFID برای سیستم‌های حمل‌ونقل زنجیره تأمین می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min Objective 2} = & \beta \left(\sum_{b \in M_{bilo}^1} \text{OBI}_{bilo}^t (TBI_{bilo}^t - TBI_{bilo}^{t'}) + \right. \\ & + \sum_{i \in M_{ijlo}^2} \text{OIJ}_{ijlo}^t (TIJ_{ijlo}^t - TIJ_{ijlo}^{t'}) \\ & + \sum_{i \in M_{icplo}^3} \text{OIC}_{icplo}^t (TIC_{icplo}^t - TIC_{icplo}^{t'}) + \\ & \left. \sum_{j \in M_{jcpto}^4} \text{OJC}_{jcpto}^t (TJC_{jcpto}^t - TJC_{jcpto}^{t'}) \right) + \end{aligned} \quad (2)$$





$$(1 - \beta) \left(\sum_{c \in M5_{jpl}^t, j, p, l, o, t} OCJ_{cpl}^t (TCJ_{cpl}^t - TCJ_{cpl}^t) + \sum_{j \in M6_{jpl}^t, i, p, l, o, t} OJI_{jlo}^t (TJI_{jpl}^t - TJI_{jpl}^t) + \sum_{j \in M7_{kpl}^t, k, p, l, o, t} OJK_{jkl}^t (TJK_{jkl}^t - TJK_{jkl}^t) + \sum_{j \in M8_{jpl}^t, m, p, l, o, t} OJM_{jml}^t (TJM_{jmpl}^t - TJM_{jmpl}^t) + \sum_{m \in M9_{fpl}^t, f, p, l, o, t} OMF_{mfl}^t (TMF_{mfl}^t - TMF_{fpl}^t) \right)$$

رابطه (۲) تابع هدف دوم یعنی حداقل سازی کل تأخیر زمان تحویل در زنجیره رفت و زنجیره برگشت را نشان می دهد. این زمان وابسته به انتخاب نوع سیستم RFID می باشد. به عبارتی دیگر در این هدف، نوع سیستم RFID تأثیر به سزایی در مقدار این تابع هدف دارد.

$$\begin{aligned} \text{Max Objective 3} = & \zeta_1 \left(\sum_{i, h, t} WX_{ih}^t X_{ih}^t + \sum_{j, t} WY_j^t Y_j^t + \sum_{j, t} WU_j^t U_j^t \right. \\ & \left. + \sum_{j, t} WZ_j^t Z_j^t + \sum_{k, t} WV_k^t V_k^t + \sum_{m, t} WM_m^t VM_m^t \right) \\ & + \zeta_2 \left(\sum_{i, h, t} DX_{ih}^t X_{ih}^t + \sum_{j, t} DY_j^t Y_j^t + \sum_{j, t} DU_j^t U_j^t + \sum_{j, t} DZ_j^t Z_j^t + \sum_{k, t} DV_k^t V_k^t + \sum_{m, t} DM_m^t VM_m^t \right). \end{aligned} \quad (3)$$

رابطه (۳) تابع هدف سوم یعنی حداکثر کردن مسئولیت اجتماعی زنجیره تامین را بیان می کند. این هدف از دو بخش تشکیل می شود. در بخش اول مجموع شغل های ایجاد شده محاسبه می شود. در بخش دوم کل توسعه اقتصادی حاصل از زنجیره تامین محاسبه می شود. برآیند این دو بخش مسئولیت اجتماعی زنجیره را تشکیل می دهد.

$$\begin{aligned} \text{Min Objective 4} = & \sum_{b, i, r, l, t} QBI_{bir}^t EBI_{bir}^t + \\ & \sum_{i, j, p, l, h, t} QIJ_{ijpl}^t (EIJ_{ijpl}^t + EP_{iph}^t) + \sum_{i, c, p, l, h, t} QIC_{icpl}^t (EIC_{icpl}^t + EP_{iph}^t) \\ & + \sum_{j, c, p, l, t} QJC_{jcpl}^t EJC_{jcpl}^t + \sum_{c, j, p, l, t} QCJ_{cjpl}^t ECJ_{cjpl}^t \\ & + \sum_{j, i, p, l, t} QJI_{jipl}^t EJI_{jipl}^t + \sum_{j, k, p, l, t} QJK_{jkpl}^t EJK_{jkpl}^t \\ & + \sum_{j, m, p, l, t} QJM_{jmpl}^t (EJM_{jmpl}^t + ER_{mp}^t) + \sum_{m, f, p, l, t} QMF_{mfpl}^t EMF_{mfpl}^t \end{aligned} \quad (4)$$

رابطه (۴) تابع هدف چهارم، حداقل کردن کل آلودگی های زنجیره تامین را بیان می کند. این آلودگی بر اساس انتقال محصولات بین سطوح مختلف ایجاد می شود و همچنین آلودگی های ناشی از تولید-بازیابی و تعمیر محصول را نیز در نظر می گیرد.

محدودیت ها.

$$\sum_{j, p, l} n_{rp} QIJ_{ijpl}^t + \sum_{c, p, l} n_{rp} QIC_{icpl}^t \leq \sum_{b, l} QBI_{bir}^t + \sum_{j, p, l} n_{rp} QJI_{jipl}^t \quad \forall i, r, t \quad (5)$$

محدودیت (۵) نشان می دهد که در هر دوره مجموع جریان های ورودی به هر مرکز تولید-بازیابی از طرف تمامی تأمین کنندگان و مراکز جمع آوری/ ترکیبی برابر با جریان خروجی از آن مرکز می باشد.

$$INV_{jp}^{t-1} + \sum_{i, l} QIJ_{ijpl}^t = INV_{jp}^t + \sum_{c, l} QJC_{jcpl}^t \quad \forall j, p, t \quad (6)$$

محدودیت (۶) تضمین می کند که برای هر یک از محصولات در هر یک از دوره ها، مجموع جریان وارد شده به هر یک از مراکز توزیع/ مراکز ترکیبی از مراکز تولید-بازیابی و نیز موجودی باقی مانده از دوره های قبل، برابر مجموع جریان حمل شده از توزیع کننده ها/ مراکز ترکیبی به مشتریان اولیه و نیز مابقی موجودی در دوره فعلی می باشد.

$$\sum_{j,l} QJc^t_{jcpl} + \sum_{i,l} QIc^t_{icpl} = D^t_{cp} \quad \forall c,p,t \quad (7)$$

محدودیت (۷) تضمین می‌کند که برای هر محصول در هر دوره، جریان خروجی از مراکز توزیع / مراکز ترکیبی و مراکز تولید-بازیابی به هر مشتری اولیه باید به وسیله تقاضای مشتری اولیه برآورده شود.

$$\sum_{j,l} QcJ^t_{cjpl} = D^t_{cp} RR_p \quad \forall c,p,t \quad (8)$$

محدودیت (۸) ارتباط بین تقاضای تخصیص داده‌شده به مشتریان اولیه و نیز میزان برگشتی از مشتری اولیه به مراکز جمع‌آوری / مراکز ترکیبی را بیان می‌کند.

$$\sum_{i,l} QJi^t_{jipl} = \sum_{c,l} QcJ^t_{cjpl} RXi_p \quad \forall j,p,t \quad (9)$$

محدودیت (۹) تضمین می‌کند که برای هر محصول در هر دوره کل میزان دریافتی از مشتریان اولیه در مراکز جمع‌آوری / مراکز ترکیبی به مراکز تولید-بازیابی که قابل بازیابی می‌باشند، برابر کل میزان ارسال از این مراکز به مراکز تولید-بازیابی ضربدر نرخ بازیابی می‌باشد.

$$\sum_{k,l} QJK^t_{jkpl} = \sum_{c,l} QcJ^t_{cjpl} RXd_p \quad \forall j,p,t \quad (10)$$

محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که برای هر محصول در هر دوره کل میزان دریافتی از مشتریان اولیه در مراکز جمع‌آوری / مراکز ترکیبی به مراکز دفع ارسال می‌شود، برابر کل میزان ارسال از این مراکز به مراکز دفع ضربدر نرخ دفع می‌باشد.

$$\sum_{m,l} QJM^t_{jmpl} = \sum_{c,l} QcJ^t_{cjpl} RXm_p \quad \forall j,p,t \quad (11)$$

محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که برای هر محصول در هر دوره کل میزان دریافتی از مشتریان اولیه در مراکز جمع‌آوری / مراکز ترکیبی به مراکز تعمیر که قابل تعمیر می‌باشند، برابر کل میزان ارسال از این مراکز به مراکز تعمیر ضربدر نرخ تعمیر می‌باشد.

$$\sum_{k,l} QJK^t_{jkpl} + \sum_{i,l} QJI^t_{jipl} + \sum_{m,l} QJM^t_{jmpl} = \sum_{c,l} QcJ^t_{cjpl} \quad \forall j,p,t \quad (12)$$

محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که کل میزان دریافتی از مشتریان اولیه در مراکز جمع‌آوری / مراکز ترکیبی برابر کل میزان ارسالی به هر مراکز تولید-بازیابی برای بازیابی، به مراکز تعمیر برای تعمیر و استفاده مجدد و به هر مراکز دفع برای دفع می‌باشد.

$$\sum_{j,l} QJM^t_{jmpl} = \sum_{f,l} QMF^t_{mfpl} \quad \forall m,p,t \quad (13)$$

محدودیت (۱۳) میزان ارسالی جریان بازگشتی از مراکز جمع‌آوری / مراکز ترکیبی به هر مرکز تعمیر و استفاده مجدد را نشان می‌دهد. به عبارتی مقدار محصول ارسالی برای تعمیر به مراکز تعمیر باید برابر میزان محصولات ارسالی از مراکز تعمیر به مشتریان ثانویه باشد.

$$\sum_{m,l} QMF^t_{mfpl} \leq D^t_{fp} \quad \forall f,p,t \quad (14)$$

محدودیت (۱۴) ارتباط بین تقاضای تخصیص داده‌شده به مشتریان ثانویه و مراکز تعمیر و استفاده مجدد را نشان می‌دهد.

$$\sum_{i,l} QBI^t_{birl} \leq B^t_b CB^t_{br} \quad \forall b,r,t \quad (15)$$

محدودیت (۱۵) تضمین می‌کند که برای هر ماده اولیه در هر دوره، مجموع جریان خروجی از هر تأمین‌کننده به همه مراکز تولید-بازیابی از ظرفیت این تأمین‌کننده مربوطه بیشتر نباشد.

$$\sum_{j,p,l} m_p QIJ^t_{ijpl} + \sum_{c,p,l} m_p QIC^t_{icpl} \leq CX^t_{ih} X^t_{ih} \quad \forall i,h,t \quad (16)$$



محدودیت (۱۶) بیان می‌کند در هر دوره مجموع جریان خروجی از هر مراکز تولید-بازیابی از ظرفیت تولید این مراکز تولید-بازیابی بیشتر نیست.

$$\sum_{j,p,l} m_p QIJ_{ijpl}^t \leq mcont_t CX_{ih}^t X_{ih}^t \quad \forall i, h, t \quad (17)$$

محدودیت (۱۷) بیان می‌کند در هر دوره مجموع جریان خروجی از هر مراکز تولید-بازیابی به مجموع مراکز توزیع/ترکیبی حداکثر برابر میزان ظرفیت در نظر گرفته شده طبق قراردادها با توزیع کنندگان است.

$$\sum_{c,p,l} m_p QIC_{icpl}^t \leq (1 - mcont_t) CX_{ih}^t X_{ih}^t \quad \forall i, h, t \quad (18)$$

محدودیت (۱۸) بیان می‌کند در هر دوره مجموع جریان خروجی از هر مراکز تولید-بازیابی به مجموع مشتریان اولیه حداکثر برابر میزان ظرفیت باقی مانده مراکز تولید-بازیابی است که در هر دوره در قراردادها با توزیع کنندگان نظر گرفته نشده است.

$$\sum_p m_p INV_{jp}^t + \sum_{c,p,l} m_p QJC_{jcpl}^t \leq CY_j^t Y_j^t + CU_j^t U_j^t \quad \forall j, t \quad (19)$$

محدودیت (۱۹) بیان می‌کند که در هر دوره موجودی باقی مانده در هر یک از مراکز توزیع/مرکز ترکیبی از ظرفیت مراکز توزیع/ترکیبی نباید بیشتر باشد.

$$\sum_{c,p,l} m_p QCJ_{cjpl}^t \leq CZ_j^t Z_j^t + CU_j^t U_j^t \quad \forall j, t \quad (20)$$

محدودیت (۲۰) بیان می‌کند که در هر دوره میزان کالای برگشتی مشتریان اولیه به مرکز جمع‌آوری/مراکز ترکیبی از ظرفیتشان نباید بیشتر باشد.

$$\sum_{j,p,l} m_p QJI_{jipl}^t \leq CR_{ih}^t X_{ih}^t \quad \forall i, h, t \quad (21)$$

محدودیت (۲۱) بیان می‌کند که در هر دوره کل میزان محصولات برگشتی به هر مرکز تولید-بازیابی نباید بیشتر از ظرفیت بازیابی در آن مرکز تولید-بازیابی باشد.

$$\sum_{j,p,l} m_p QJK_{jkpl}^t \leq CV_k^t V_k^t \quad \forall k, t \quad (22)$$

محدودیت (۲۲) بیان می‌کند که در هر دوره کل میزان ارسالی از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی به مراکز دفع نباید از ظرفیت این مراکز دفع بیشتر باشد.

$$\sum_{j,p,l} m_p QJM_{jmpl}^t \leq CM_m^t VM_m^t \quad \forall m, t \quad (23)$$

محدودیت (۲۳) بیان می‌کند که در هر دوره کل میزان ارسالی از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی به مراکز تعمیر نباید از ظرفیت این مراکز تعمیر بیشتر باشد.

$$Y_j^t + Z_j^t + U_j^t \leq 1 \quad \forall j, t \quad (24)$$

محدودیت (۲۴) حداکثر تعداد تسهیلاتی که می‌تواند در هر دوره باید باز شود را محدود می‌کند. مطابق این رابطه در هر دوره به ازای هر یکی از مراکز توزیع، جمع‌آوری و ترکیبی را می‌توانیم داشته باشیم.

$$\sum_{l,o} OBI_{bilo}^t \leq 1 \quad \forall b, i, t \quad (25)$$

$$\sum_{l,o} OIJ_{ijlo}^t \leq 1 \quad \forall i, j, t \quad (26)$$





$$\begin{aligned} \sum_{l,o} OIC^t_{iclo} &\leq 1. & \forall i,c,t & \quad (27) \\ \sum_{l,o} OJC^t_{jclo} &\leq 1. & \forall j,c,t & \quad (28) \\ \sum_{l,o} OCJ^t_{cjlo} &\leq 1. & \forall c,j,t & \quad (29) \\ \sum_{l,o} OJI^t_{jilo} &\leq 1. & \forall j,i,t & \quad (30) \\ \sum_I OJK^t_{jklo} &\leq 1. & \forall j,k,t & \quad (31) \\ \sum_{l,o} OJM^t_{jmlo} &\leq 1. & \forall j,m,t & \quad (32) \\ \sum_{l,o} OMF^t_{mflo} &\leq 1. & \forall m,f,t & \quad (33) \end{aligned}$$

محدودیت (۲۵) تا (۳۳) بیان می‌کند که در هر یک از اعضای زنجیره تنها یک سیستم حمل و نقل به منظور حمل محصولات می‌تواند به کار گرفته شود.

$$\begin{aligned} \sum_O OBI^t_{bilo} &\leq \sum_F QBI^t_{birl} & \forall b,i,l,t & \quad (34) \\ \sum_O OIJ^t_{ijlo} &\leq \sum_P QIJ^t_{ijpl} & \forall i,j,l,t & \quad (35) \\ \sum_O OIC^t_{iclo} &\leq \sum_P QIC^t_{icpl} & \forall i,c,l,t & \quad (36) \\ \sum_O OJC^t_{jclo} &\leq \sum_P QJC^t_{jcpl} & \forall j,c,l,t & \quad (37) \\ \sum_O OCJ^t_{cjlo} &\leq \sum_P QCJ^t_{cjpl} & \forall c,j,l,t & \quad (38) \\ \sum_O OJI^t_{jilo} &\leq \sum_P QJI^t_{jipl} & \forall j,i,l,t & \quad (39) \\ \sum_O OJK^t_{jklo} &\leq \sum_P QJK^t_{jkpl} & \forall j,k,l,t & \quad (40) \\ \sum_O OJM^t_{jmlo} &\leq \sum_P QJM^t_{jmpl} & \forall j,m,l,t & \quad (41) \\ \sum_O OMF^t_{mflo} &\leq \sum_P QMF^t_{mfpl} & \forall m,f,l,t & \quad (42) \end{aligned}$$

محدودیت (۳۴) تا (۴۲) اگر هیچ جریان محصولاتی بین هر جفت تسهیلات شبکه وجود نداشته باشد (به عبارتی هیچ پیوندی بین مکان‌ها وجود نداشته باشد) هیچ نوع حمل و نقلی بین تسهیلات مربوطه انتخاب نمی‌شود.

$$\begin{aligned} \sum_F QBI^t_{birl} &\leq BM \times \sum_O OBI^t_{bilo} & \forall b,i,l,t & \quad (43) \\ \sum_P QIJ^t_{ijpl} &\leq BM \times \sum_O OIJ^t_{ijlo} & \forall i,j,l,t & \quad (44) \\ \sum_P QIC^t_{icpl} &\leq BM \times \sum_O OIC^t_{iclo} & \forall i,c,l,t & \quad (45) \\ \sum_P QJC^t_{jcpl} &\leq BM \times \sum_O OJC^t_{jclo} & \forall j,c,l,t & \quad (46) \\ \sum_P QCJ^t_{cjpl} &\leq BM \times \sum_O OCJ^t_{cjlo} & \forall c,j,l,t & \quad (47) \\ \sum_P QJI^t_{jipl} &\leq BM \times \sum_O OJI^t_{jilo} & \forall j,i,l,t & \quad (48) \\ \sum_P QJK^t_{jkpl} &\leq BM \times \sum_O OJK^t_{jklo} & \forall j,k,l,t & \quad (49) \\ \sum_P QJM^t_{jmpl} &\leq BM \times \sum_O OJM^t_{jmlo} & \forall j,m,l,t & \quad (50) \\ \sum_P QMF^t_{mfpl} &\leq BM \times \sum_O OMF^t_{mflo} & \forall m,f,l,t & \quad (51) \end{aligned}$$

محدودیت (۴۳) تا (۵۱) این نکته را بیان می‌کند که سیستم حمل و نقل در بین اعضای از زنجیره که به یکدیگر محصول ارسال می‌کنند به کار گرفته می‌شود.

$$QBI_{bir}^t, QIJ_{ijpl}^t, QIC_{icpl}^t, QJC_{jcpl}^t, QCJ_{cjpl}^t, QJI_{jipl}^t, QJK_{jkpl}^t, QJM_{jmpl}^t, \quad (52)$$

$$QMF_{mfpl}^t, INV_{jp}^t \geq 0. \quad \forall b, i, r, l, t, j, p, c, k, m, f$$

$$B_b^t, X_{ih}^t, Y_j^t, Z_j^t, U_j^t, V_k^t, VM_m^t, OBI_{bilo}^t, OIJ_{ijlo}^t, OIC_{iclo}^t, OJC_{jclo}^t, OCJ_{cjlo}^t, \quad (53)$$

$$, OJI_{jilo}^t, OJK_{jklo}^t, OJM_{jmlo}^t, OMF_{mflo}^t \in \{0, 1\}. \quad \forall c, j, p, b, i, h, k, m, c, l, o, f$$

رابطه‌های (۵۲) و (۵۳) به ترتیب نامنفی بودن و صحیح بودن متغیرهای تصمیم را بیان می‌کنند.

۱-۳- عدم قطعیت در مدل

با توجه به ماهیت نامطمئن داده‌های دنیای واقعی، ارائه روش‌های مناسب برای توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی بر اساس داده‌های نامشخص ضروری است؛ زیرا در مسائل دنیای واقعی، تغییر ناگهانی یکی از داده‌ها هزینه‌های زیادی را برای سیستم به همراه دارد و جواب را غیرممکن و نادرست می‌کند. با توجه به ماهیت عدم اطمینان داده‌ها، روش‌های مختلفی برای مقابله با این عدم قطعیت‌ها وجود دارد. مشهورترین روش‌ها برای پرداختن به عدم اطمینان، بهینه‌سازی تصادفی، بهینه‌سازی فازی و بهینه‌سازی استوار است. که در این تحقیق رویکرد برنامه‌ریزی استوار به کار گرفته خواهد شد.

رویکرد برنامه‌ریزی استوار، رویکرد جدیدی برای مقابله با عدم قطعیت است و هنگامی که داده‌های کافی برای تخمین توزیع احتمال برای پارامترهای نامشخص وجود ندارد به کار گرفته می‌شود که سعی در ارائه جوابی برای مسئله دارد که در برابر عدم قطعیت داده‌ها استوار است. یک جواب استوار در تمام پارامترهای مرتبط با عدم قطعیت شدنی است و مقدار تابع هدف آن دارای حداقل انحراف از مقدار مطلوب آن است. در یک رویکرد استوار، هیچ مشکلی مانند استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی و برنامه‌ریزی فازی وجود ندارد، زیرا نیازی به دانش صریح در مورد تابع توزیع احتمال داده‌های نامشخص و همچنین تابع عضویت آن‌ها نیست؛ بنابراین، در یک برنامه‌ریزی استوار، پیچیدگی مسئله نسبت به دور رویکرد دیگر کاهش می‌یابد. بهینه‌سازی استوار از نظر حل مدل و توانایی سازگاری با سایر مسائل بهینه‌سازی نیز، از رویکردهای تصادفی و فازی آسان‌تر است و همچنین بهینه‌سازی استوار روش ریسک‌گریزی را برای مواجهه با عدم اطمینان داده‌ها فراهم می‌سازد و همچنین برای مواجهه با عدم اطمینان به داده‌های کمتری در مقایسه با رویکرد تصادفی کلاسیک نیاز دارد و درصدد ایجاد یک روش کنترل‌شده و متوازن برای همه پارامترهای نادقیق مسئله و پیدا کردن راه‌حل‌هایی موجه و درعین حال بهینه است.

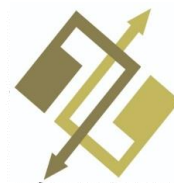
در این راستا مالوی و همکاران^۱ (۱۹۹۵) یک رویکرد بهینه‌سازی استوار ارائه داده‌اند که نسبت به تغییرات داده‌ها حساسیت کمتری دارد. اگرچه این روش محدودیت‌هایی دارد اما در مقایسه با برنامه‌ریزی خطی تصادفی دارای مزایایی است و عموماً کاربردی‌تر است. آن‌ها برای اولی بار دو مفهوم استواری جواب و استواری مدل را در بهینه‌سازی مطرح کردند؛ اگر پاسخ حاصل از مدل بهینه‌سازی برای همه‌ی سناریوهای در نظر گرفته‌شده برای داده‌های ورودی بتواند نزدیک به بهینه باقی بماند این استواری جواب نامیده می‌شود و وقتی که برای همه سناریوهای در نظر گرفته‌شده تقریباً شدنی باشد، استواری مدل نامیده می‌شود. مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & c^T x + d^T y \\ \text{s.t.} \quad & Ax = b \\ & Bx + Cy = e \\ & x \geq 0, y \geq 0 \end{aligned} \quad (54)$$

در این مدل، متغیر x برداری از متغیرهای طراحی (متغیرهای تصمیم) و متغیر y برداری از متغیرهای کنترل است. پارامترهای B و C ماتریس پارامترها و b و e نیز بردار پارامترها هستند. همچنین A و b مشخص و C ، B و e نادقیق هستند. تحقق هر مقدار برای پارامتر

¹ Mulvey et al.





نادقیق یک سناریو نامیده می‌شود که با s نشان داده و احتمال آن با P_s آورده می‌شود ($\sum_{s=1}^S P_s = 1$). برای نمایش مجموعه سناریوها از $\Omega = \{1, 2, \dots, S\}$ استفاده می‌کنیم. ضرایب نادقیق C ، B و e را نیز به صورت B_s ، C_s و e_s و برای هر سناریو $s \in \Omega$ نشان می‌دهیم. همچنین، متغیر کنترل y نیز که در زمان تحقق یک سناریو در معرض تعدیل قرار می‌گیرد، به صورت y_s برای سناریو s نشان داده می‌شود. مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega \rho(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_s) \\ \text{s.t.} \quad & Ax = b \\ & B_s x + C_s y_s + \eta_s = e_s, \quad \forall s \in \Omega \\ & x \geq 0, y_s \geq 0, \eta_s \geq 0. \quad \forall s \in \Omega \end{aligned} \tag{55}$$

به دلیل نادقیق بودن پارامترها، مدل ممکن است برای برخی سناریوها ناموجه باشد. مجموعه $(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_s)$ شامل بردارهای خطا است که اندازه ناموجه بودن در محدودیت‌های کنترل رابطه (55) برای سناریو s را اندازه‌گیری می‌کند. در صورت موجه بودن مدل برای سناریو s ، η_s برابر با صفر خواهد بود؛ در غیر این صورت، η_s در محدودیت دوم رابطه (55) مقدار مثبتی خواهد بود. در مدل بالا، تابع هدف مدل اول ($\xi = c^T x + d^T y$) که می‌تواند تابع سود یا هزینه باشد، تبدیل به متغیر تصادفی به صورت $\xi_s = c^T x + d^T y_s$ با احتمال P_s می‌شود که متوسط آن به ازای سناریوها، سود یا هزینه مورد انتظار نامیده می‌شود. در مدل بالا، تابع هدف دارای دو قسمت شامل استواری جواب و استواری مدل است.

در قسمت اول که استواری جواب را در نظر می‌گیرد، از ξ_s برای نمایش تابع هزینه یا سود استفاده می‌کنیم. انحراف معیار یا $\sigma(\bullet)$ بزرگ برای متغیر تصادفی ξ_s به معنی بالا بودن ریسک این جواب خواهد بود. در این صورت، یک تغییر کوچک در مقدار پارامترهای نادقیق مدل می‌تواند باعث یک تغییر بزرگ در مقدار تابع هدف شود برای این قسمت، مالی و همکاران از رابطه $\sigma(\bullet) = \sum_{s \in \Omega} P_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} P_s \left(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} \xi_{s'} \right)^2$ استفاده کردند که λ وزن تغییرپذیری جواب را نشان می‌دهد. ولی از آنجایی که تابع هدف ارائه شده غیرخطی می‌باشد برای این منظور، یو و لی از یک روش کارا برای خطی سازی تابع هدف استفاده کرده‌اند که مدل به فرم زیر تبدیل گردید:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{s \in \Omega} P_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} P_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} \xi_{s'} \right) + 2 \theta_s \right] \\ \text{s.t.} \quad & \xi_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} \xi_{s'} + \theta_s \geq 0 \\ & \theta_s \geq 0. \end{aligned} \tag{56}$$

در قسمت دوم، از تابع جریمه $(\omega \rho(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_s))$ ، برای دادن جریمه به ناموجه بودن مدل استفاده می‌شود که استواری مدل را اندازه‌گیری می‌کند. ω وزن غیرموجه بودن مدل را نشان می‌دهد و با پارامتر λ تبادل بین استواری جواب و مدل را کنترل می‌کند. در مسئله‌ای که در ادامه آورده خواهد شد، η_s که ناموجه بودن مدل را نشان می‌دهد، تقاضای برآورده نشده در سناریو s خواهد بود. تابع جریمه، مقدار مورد انتظار بردار خطا η_s خواهد بود که به صورت $\rho(\bullet) = \sum_{s \in \Omega} P_s \eta_s$ بیان می‌شود.

در نهایت، مدل برنامه‌ریزی استوار تصادفی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{s \in \Omega} P_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} P_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} \xi_{s'} \right) + 2 \theta_s \right] + \omega \sum_{s \in \Omega} P_s \eta_s \\ \text{s.t.} \quad & Ax = b \\ & B_s x + C_s y_s + \eta_s = e_s, \quad \forall s \in \Omega \\ & \xi_s - \sum_{s' \in \Omega} P_{s'} \xi_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad s \in \Omega \\ & \theta_s \geq 0, x \geq 0, y_s \geq 0, \eta_s \geq 0, \quad \forall s \in \Omega. \end{aligned} \tag{57}$$

بنابراین در ادامه با فرض این که پارامترهای تقاضای اولیه و ثانویه و زمان تحویل دارای عدم قطعیت می باشند برای مدل پیشنهادی قطعی، رویکرد بهینه سازی استوار-تصادفی سناریو محور مالوی و همکاران به کار گرفته خواهد شد که مجموعه ها، پارامترهای و متغیرهای تصمیم مرتبط با این مدل استوار در بخش ۲ ضمایم آورده شده است و بدین ترتیب مدل سازی مسئله طراحی استوار شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار چابک با کانال های فروش متفاوت را به صورت زیر خواهیم داشت:

توابع هدف. تابع هدف اول و دوم و چهارم به دلیل اینکه پارامترهای غیر قطعی در آن تأثیر دارد و متشکل از این پارامترها (تقاضا و زمان تحویل) هستند، مجدداً به صورت بهینه سازی استوار مالوی فرمول بندی می شوند ولی تابع هدف سوم به دلیل اینکه پارامترهای غیر قطعی در آن تأثیر ندارد بدون تغییر می ماند:

$$\begin{aligned} \text{Max Objective 1} = & \sum_s (P_s \xi 1_s) - \left(\sum_{i,h,t} \text{FX}_{ih}^t (X_{ih}^t - X_{ih}^{t-1}) + \sum_{j,t} \text{FY}_j^t (Y_j^t - Y_j^{t-1}) + \sum_{j,t} \text{FZ}_j^t (Z_j^t - Z_j^{t-1}) + \right. \\ & \sum_{j,t} \text{FU}_j^t (U_j^t - U_j^{t-1}) + \sum_{k,t} \text{FV}_k^t (V_k^t - V_k^{t-1}) + \sum_{m,t} \text{FM}_m^t (VM_m^t - VM_m^{t-1}) + \sum_{b,t} \text{FB}_b^t B_b^t \\ & \sum_{b,i,l,o,t,s} \text{OBI}_{bilo}^t \text{FBI}_{bilo} + \sum_{i,l,o,t,s} \text{OIJ}_{ijlo}^t \text{FIJ}_{ijlo} + \sum_{i,c,l,o,t,s} \text{OIC}_{iclos}^t \text{FIC}_{iclo} \\ & \left. + \sum_{j,c,l,o,t,s} \text{OJC}_{jclos}^t \text{FJC}_{jclo} + \sum_{c,j,l,o,t,s} \text{OCJ}_{cjlos}^t \text{FCJ}_{cjlo} + \sum_{j,i,l,o,t,s} \text{OJI}_{jilos}^t \text{FJI}_{jilo} \right) \quad (58) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{j,k,l,o,t,s} \text{OJK}_{jklos}^t \text{FJK}_{jklo} + \sum_{j,m,l,o,t,s} \text{OJM}_{jmlos}^t \text{FJM}_{jmlo} + \sum_{m,l,o,t,s} \text{OMF}_{mflos}^t \text{FMF}_{mflo} \\ & - \lambda 1_s \sum_s P_s \left(\left(\xi 1_s - \sum_{s'} P_{s'} \xi 1_{s'} \right) + 2\theta 1_s \right) - \omega \left(\sum_{c,l,p,t,s} P_s (\eta 1_{cps}^t + \eta 2_{fps}^t) \right). \\ & \xi 1_s = \sum_{j,c,p,l,t,s} \text{PR}_{cp}^t \text{QJC}_{jcpls}^t + \sum_{i,c,p,l,s} \text{PR}_{cp}^t \text{QIC}_{icpls}^t + \sum_{m,l,p,l,t,s} \text{PR}_{fp}^t \text{QMF}_{mfpls}^t \\ & - \left(\sum_{b,i,r,l,t,s} \text{QBI}_{birls}^t \text{BC}_{br}^t + \sum_{i,j,p,h,l,t,s} \text{QUI}_{ijpls}^t \text{MC}_{iph}^t + \sum_{i,c,p,h,l,t,s} \text{QIC}_{icpls}^t \text{MC}_{iph}^t \right. \\ & + \sum_{j,c,p,l,t,s} \text{QJC}_{jcpls}^t \text{OC}_{jp}^t + \sum_{j,m,p,l,t,s} \text{QJM}_{jmpls}^t \text{OC}_{mp}^t + \sum_{c,j,p,l,t,s} \text{QCJ}_{cjpls}^t \text{IC}_{jp}^t \\ & \left. + \sum_{j,i,p,h,l,t,s} \text{QJI}_{jipls}^t \text{RC}_{iph}^t + \sum_{j,k,p,l,t,s} \text{QJK}_{jkpls}^t \text{DC}_{kp}^t + \sum_{j,p,t,s} \text{INV}_{jps}^t \text{HC}_{jp}^t \right) \quad (58.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \left(\sum_{b,i,r,l,t,s} \text{QBI}_{birls}^t \text{CBI}_{birl}^t + \sum_{i,j,p,l,t,s} \text{QUI}_{ijpls}^t \text{CIJ}_{ijpl}^t + \sum_{i,c,p,l,t,s} \text{QIC}_{icpls}^t \text{CIC}_{icpl}^t + \right. \\ & \sum_{j,c,p,l,t,s} \text{QJC}_{jcpls}^t \text{CJC}_{jcpl}^t + \sum_{c,j,p,l,t,s} \text{QCJ}_{cjpls}^t \text{CCJ}_{cjpl}^t + \sum_{j,i,p,l,t,s} \text{QJI}_{jipls}^t \text{CJI}_{jipl}^t \\ & \left. + \sum_{j,k,p,l,t,s} \text{QJK}_{jkpls}^t \text{CJK}_{jkpl}^t + \sum_{j,m,p,l,t,s} \text{QJM}_{jmpls}^t \text{CJM}_{jmpl}^t + \sum_{m,l,p,l,t,s} \text{QMF}_{mfpls}^t \text{CMF}_{mfpl}^t \right). \end{aligned}$$

$$\text{Min Objective 2} = \sum_s P_s \xi 3_s + \lambda 3 \left(\sum_s P_s \left(\xi 3_s - \sum_{s'} P_{s'} \xi 3_{s'} \right) + 2\theta 3_s \right). \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \xi 3_s = & \beta \left(\sum_{b \in M1_{bilo}^t, i,r,l,o,t} \text{OBI}_{bilo}^t (TBI_{birlos}^t - TBI_{irlos}^t) \right. \\ & + \sum_{i \in M2_{ijlo}^t, j,p,l,o,t} \text{OIJ}_{ijlo}^t (TIJ_{ijplos}^t - TIJ_{jplos}^t) + \sum_{i \in M3_{iclos}^t, c,p,l,o,t} \text{OIC}_{iclos}^t (TIC_{icplos}^t - TIC_{cplos}^t) \\ & \left. + \sum_{j \in M4_{jclos}^t, j,c,p,l,o,t} \text{OJC}_{jclos}^t (TJC_{jcplos}^t - TJC_{cplos}^t) \right) \quad (59.a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + (1 - \beta) \left(\sum_{c \in M5_{cjlo}^t, j,p,l,o,t} \text{OCJ}_{cjlo}^t (TCJ_{cjplos}^t - TCJ_{jplos}^t) + \sum_{j \in M6_{jilo}^t, i,p,l,o,t} \text{OJI}_{jilo}^t (TJI_{jiplos}^t - TJI_{iplos}^t) \right. \\ & + \sum_{j \in M7_{jklo}^t, k,p,l,o,t} \text{OJK}_{jklo}^t (TJK_{jkplos}^t - TJK_{kplos}^t) + \sum_{j \in M8_{jmlo}^t, m,p,l,o,t} \text{OJM}_{jmlo}^t (TJM_{jmptos}^t - TJM_{mplos}^t) \\ & \left. + \sum_{m \in M9_{mflo}^t, l,p,l,o,t} \text{OMF}_{mflo}^t (TMF_{mfptos}^t - TMF_{fplos}^t) \right). \end{aligned}$$





$$\text{Min Objective 3} = \zeta_1 \left(\sum_{i,h,t} WX_{ih}^t X_{ih}^t + \sum_{j,t} WY_j^t Y_j^t + \sum_{j,t} WU_j^t U_j^t \right. \\ \left. + \sum_{j,t} WZ_j^t Z_j^t + \sum_{k,t} WV_k^t V_k^t + \sum_{m,t} WM_m^t VM_m^t \right) + \zeta_2 \left(\sum_{i,h,t} DX_{ih}^t X_{ih}^t + \right. \\ \left. \sum_{j,t} DY_j^t Y_j^t + \sum_{j,t} DU_j^t U_j^t + \sum_{j,t} DZ_j^t Z_j^t + \sum_{k,t} DV_k^t V_k^t + \sum_{m,t} DM_m^t VM_m^t \right). \quad (60)$$

$$\text{Min Objective 4} = \sum_s P_s \xi 2_s + \lambda 2 \left(\sum_s p_s \left(\xi 2_s - \sum_{s'} P_{s'} \xi 2_{s'} \right) + 2\theta 2_s \right). \quad (61)$$

$$\xi 2_s = \sum_{b,i,r,l,t,s} QBI_{birls}^t \times EBI_{birl}^t + \sum_{i,j,p,l,h,t,s} QIJ_{ijpls}^t (EIJ_{ijpl}^t + EP_{iph}^t) + \\ \sum_{i,c,p,l,h,t,s} QIC_{icpls}^t (EIC_{icpl}^t + EP_{iph}^t) + \sum_{j,c,p,l,t,s} QJC_{jcpls}^t EJC_{jcpl}^t + \\ \sum_{c,j,p,l,t,s} QCJ_{cjpls}^t ECJ_{cjpl}^t + \sum_{j,i,p,l,t,s} QJI_{jipls}^t EJI_{jipl}^t + \sum_{j,k,p,l,t,s} QJK_{jkpls}^t EJK_{jkpl}^t \\ + \sum_{j,m,p,l,t,s} QJM_{jmpls}^t (EJM_{jmpl}^t + ER_{mp}^t) + \sum_{m,l,p,l,t,s} QMF_{mfpls}^t \times EMF_{mfpl}^t. \quad (61.a)$$

محدودیت‌ها.

$$\sum_{j,p,l} n_{rp} QIJ_{ijpls}^t + \sum_{c,p,l} n_{rp} QIC_{icpls}^t \leq \sum_{b,l} QBI_{birls}^t + \sum_{j,p,l} n_{rp} QJI_{jipls}^t \quad \forall i,r,t,s \quad (62)$$

$$INV_{jps}^{t-1} + \sum_{i,l} QIJ_{ijpls}^t = INV_{jps}^t + \sum_{c,l} QJC_{jcpls}^t \quad \forall j,p,t,s \quad (63)$$

$$\sum_{j,l} QJC_{jcpls}^t + \sum_{i,l} QIC_{icpls}^t = D_{cps}^t + \eta I_{cps}^t \quad \forall c,p,t,s \quad (64)$$

$$\sum_{j,l} QCJ_{cjpls}^t = D_{cps}^t RR_p \quad \forall c,p,t,s \quad (65)$$

$$\sum_{i,l} QJI_{jipls}^t = \sum_{c,l} QCJ_{cjpls}^t RX_{ip} \quad \forall j,p,t,s \quad (66)$$

$$\sum_{k,l} QJK_{jkpls}^t = \sum_{c,l} QCJ_{cjpls}^t RX_{dp} \quad \forall j,p,t,s \quad (67)$$

$$\sum_{m,l} QJM_{jmpls}^t = \sum_{c,l} QCJ_{cjpls}^t RX_{mp} \quad \forall j,p,t,s \quad (68)$$

$$\sum_{k,l} QJK_{jkpls}^t + \sum_{i,l} QJI_{jipls}^t + \sum_{m,l} QJM_{jmpls}^t = \sum_{c,l} QCJ_{cjpls}^t \quad \forall j,p,t,s \quad (69)$$

$$\sum_{j,l} QJM_{jmpls}^t = \sum_{f,l} QMF_{mfpls}^t \quad \forall m,p,t,s \quad (70)$$

$$\sum_{m,l} QMF_{mfpls}^t + \eta 2_{fps}^t \leq D_{fps}^t \quad \forall f,p,t,s \quad (71)$$

$$\sum_{i,l} QBI_{birls}^t \leq B_b^t CB_{br}^t \quad \forall b,r,t,s \quad (72)$$

$$\sum_{j,p,l} m_p QIJ_{ijpls}^t + \sum_{c,p,l} m_p QIC_{icpls}^t \leq CX_{ih}^t X_{ih}^t \quad \forall i,h,t,s \quad (73)$$

$$\sum_{j,p,l} m_p QIJ_{ijpls}^t \leq mcont_t CX_{ih}^t X_{ih}^t \quad \forall i,h,t,s \quad (74)$$

$$\sum_{c,p,l} m_p QIC_{icpls}^t \leq (1 - mcont_t) CX_{ih}^t X_{ih}^t \quad \forall i,h,t,s \quad (75)$$

$$\sum_p m_p INV_{jps}^t + \sum_{c,p,l} m_p QJC_{jcpls}^t \leq CY_j^t Y_j^t + CU_j^t U_j^t \quad \forall j,t,s \quad (76)$$

$$\sum_{c,p,l} m_p QCJ_{cjpls}^t \leq CZ_j^t Z_j^t + CU_j^t U_j^t \quad \forall j,t,s \quad (77)$$

$$\sum_{j,p,l} m_p QJI_{jipls}^t \leq CR_{ih}^t X_{ih}^t \quad \forall i,h,t,s \quad (78)$$

$$\sum_{j,p,l} m_p QJK_{jkpls}^t \leq CV_k^t V_k^t \quad \forall k,t,s \quad (79)$$



$$\sum_{j,p,l} m_p QJM^t_{jmpls} \leq CM^t_m VM^t_m \quad \forall m,t,s \quad (۸۰)$$

$$Y_j^t + Z_j^t + U_j^t \leq 1 \quad \forall j,t \quad (۸۱)$$

$$\sum_{l,o} OBI^t_{bilos} \leq 1 \quad \forall b,i,t \quad (۸۲)$$

$$\sum_{l,o} OIJ^t_{ijlos} \leq 1 \quad \forall i,j,t \quad (۸۳)$$

$$\sum_{l,o} OJC^t_{jclos} \leq 1 \quad \forall j,c,t \quad (۸۴)$$

$$\sum_{l,o} OCJ^t_{cjlos} \leq 1 \quad \forall c,j,t \quad (۸۵)$$

$$\sum_{l,o} OJI^t_{jilos} \leq 1 \quad \forall j,i,t \quad (۸۶)$$

$$\sum_l OJK^t_{jklo} \leq 1 \quad \forall j,k,t \quad (۸۷)$$

$$\sum_{l,o} OJM^t_{jmlos} \leq 1 \quad \forall j,m,t \quad (۸۸)$$

$$\sum_{l,o} OMF^t_{mflos} \leq 1 \quad \forall m,f,t \quad (۸۹)$$

$$\sum_o OBI^t_{bilo} \leq \sum_r QBI^t_{birls} \quad \forall b,i,l,t,s \quad (۹۰)$$

$$\sum_o OIJ^t_{ijlo} \leq \sum_p OIJ^t_{ijpls} \quad \forall i,j,l,t,s \quad (۹۱)$$

$$\sum_o OJC^t_{jclo} \leq \sum_p QJC^t_{jcpls} \quad \forall j,c,l,t,s \quad (۹۲)$$

$$\sum_o OCJ^t_{cjlo} \leq \sum_p QCJ^t_{cjpls} \quad \forall c,j,l,t,s \quad (۹۳)$$

$$\sum_o OJI^t_{jilo} \leq \sum_p QJI^t_{jipls} \quad \forall j,i,l,t,s \quad (۹۴)$$

$$\sum_o OJK^t_{jklo} \leq \sum_p QJK^t_{jkpls} \quad \forall j,k,l,t,s \quad (۹۵)$$

$$\sum_o OJM^t_{jmlo} \leq \sum_p QJM^t_{jmpls} \quad \forall j,m,l,t,s \quad (۹۶)$$

$$\sum_o OMF^t_{mflo} \leq \sum_p QMF^t_{mfpls} \quad \forall m,f,l,t,s \quad (۹۷)$$

$$\sum_r QBI^t_{birls} \leq BM \cdot \sum_o OBI^t_{bilo} \quad \forall b,i,l,t,s \quad (۹۸)$$

$$\sum_p QIJ^t_{ijpls} \leq BM \cdot \sum_o OIJ^t_{ijlo} \quad \forall i,j,l,t,s \quad (۹۹)$$

$$\sum_p QJC^t_{jcpls} \leq BM \cdot \sum_o OJC^t_{jclo} \quad \forall j,c,l,t,s \quad (۱۰۰)$$

$$\sum_p QCJ^t_{cjpls} \leq BM \cdot \sum_o OCJ^t_{cjlo} \quad \forall c,j,l,t,s \quad (۱۰۱)$$

$$\sum_p QJI^t_{jipls} \leq BM \cdot \sum_o OJI^t_{jilo} \quad \forall j,i,l,t,s \quad (۱۰۲)$$

$$\sum_p QJK^t_{jkpls} \leq BM \cdot \sum_o OJK^t_{jklo} \quad \forall j,k,l,t,s \quad (۱۰۳)$$

$$\sum_p QJM^t_{jmpls} \leq BM \cdot \sum_o OJM^t_{jmlo} \quad \forall j,m,l,t,s \quad (۱۰۴)$$

$$\sum_p QMF^t_{mfpls} \leq BM \cdot \sum_o OMF^t_{mflo} \quad \forall m,f,l,t,s \quad (۱۰۵)$$

$$\xi 1_s - \sum_s (P_s, \xi 1_s) + \theta 1_s \geq 0 \quad (۱۰۶)$$

$$\xi 2_s - \sum_s (P_s, \xi 2_s) + \theta 2_s \geq 0 \quad (۱۰۷)$$

$$\xi 3_s - \sum_s P_s, \xi 3_s + \theta 3_s \geq 0 \quad (۱۰۸)$$



$$QBI_{birds}^t, QIJ_{ijpls}^t, QIC_{icpls}^t, QJC_{jcpls}^t, QCJ_{cjpls}^t, \\ QJI_{jipls}^t, QJK_{jkpls}^t, QJM_{jmpls}^t, QMF_{mfpls}^t, INV_{jps}^t \quad (109)$$

$$\eta_{cps}^t, \eta_{fps}^t, \theta_{1s}, \theta_{2s}, \theta_{3s} \geq 0. \quad \forall b, i, r, l, t, j, p, c, k, m, f, s$$

$$B_b^t, X_{ih}^t, Y_j^t, Z_j^t, U_j^t, V_k^t, VM_m^t, OBI_{bilo}^t, OIJ_{ijlo}^t, OIC_{iclo}^t, OJc_{jclo}^t, \quad (110)$$

$$OCJ_{cjlo}^t, OJl_{jilo}^t, OJK_{jkl}^t, OJM_{jmlo}^t, OMF_{mflo}^t \in \{0, 1\}. \quad \forall c, j, p, b, i, h, k, m, c, l, o, f$$

محدودیت‌های (۶۲) تا (۱۰۵) مشابه موارد موجود در مدل قطعی تحت سناریوهای مختلف است. محدودیت‌های (۱۰۶) تا (۱۰۸) برای تبدیل تابع هدف غیرخطی به یک تابع خطی به مدل اضافه می‌شود و محدودیت‌های (۱۰۹) و (۱۱۰) نوع متغیرها و اطمینان از عدم منفی بودن را نشان می‌دهد.

۴- مثال عددی، حل و ارزیابی مدل

۴-۱- حل مسئله با یک رویکرد حل دقیق

در اینجا، دو مثال عددی برای ارزیابی اعتبار و عملکرد مدل پیشنهادی و رویکرد حل ارائه شده است و نتایج مربوط به حل دقیق مسائل طراحی شده با یک روش جدید حل مسائل چندهدفه در بخش بعدی توصیف می‌شود. جدول ۲ اندازه آزمایش طراحی شده را نشان می‌دهد و جدول ۳ داده‌های تصادفی تولید شده بر اساس توزیع یکنواخت را برای پارامترهای مدل نشان می‌دهد. هم‌چنین ۳ سناریو جهت تحلیل نتایج در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲- اندازه آزمایش‌های طراحی شده.

Table 2 - Size of designed experiments.

تعداد مسائل طراحی شده	B	I	J	C	K	M	F	P	R	L	T	H	O
1	2	2	2	6	2	2	4	2	3	2	2	2	2
2	2	3	3	10	2	2	5	2	3	2	4	3	2

همچنین مقادیر $\lambda 1 = 0.2, \lambda 2 = 0.05, \lambda 3 = 0.03, \omega = 20$ در نظر گرفته شده است.

برای حل دقیق مدل‌های چندهدفه روش‌های مختلفی ارائه شده است. در این میان، روش محدودیت اسیلون با انواع مختلفش، در بسیاری از سیستم‌ها و برنامه‌ها به کار گرفته شده است و از آن به‌عنوان روشی قدرتمند برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه یاد شده است. به‌علاوه، این روش بر تکنیک‌های رقابتی نیز ترجیح داده شده است. به این اساس در این مقاله برای حل مسئله مورد نظر، از روش جدید اسیلون محدودیت تعمیم‌یافته قوی^۱ که در سال ۲۰۲۰ توسط نیکاس و همکاران ارائه شد، بهره خواهیم گرفت که یک نوع قوی از روش اسیلون محدودیت تقویت شده است و برای اولین بار در این پژوهش برای حل یک مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته به کار گرفته می‌شود. روش AUGMECON-R با حل مدل‌های کم‌تر در مدت زمان کوتاه‌تر و امکان حل آسان و به‌موقع مسائل سخت یا عملاً غیرممکن با توابع هدف متعدد (با در نظر گرفتن زمان و الزامات پردازشی) بسیار بهتر از نسخه‌های پیشین خود یعنی AUGMECON و AUGMECON 2 عمل می‌کند. به‌علاوه، AUGMECON-R بدون افزایش ناگهانی زمان یا منابع مورد نیاز، با به‌کارگیری کران‌های پایین بسیار کم یا صفر مقدار، محدودیت نقاط نادر ناشناخته را حل می‌کند (نیکاس و همکاران^۲، ۲۰۲۰). در شکل ۲ نمودار الگوریتم AUGMECON-R نشان داده شده است.

¹ Robust augmented ϵ -constraint method (AUGMECON-R)

²Nikas et al.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مدل.

Table 3- Values of model parameters.

$D_{CP}^t \sim u(40,50)$	$FU_j^t \sim u(20,30)$	$TI_{jpl}^t \sim u(5,23)$	$FJM_{jpl}^t \sim u(23,30)$
$D_{jp}^t \sim u(20,30)$	$FV_k^t \sim u(30,40)$	$TIC_{icplo}^t \sim u(5,32)$	$FMF_{mfpl}^t \sim u(18,23)$
$PR_{cp}^t \sim u(150000,300000)$	$FM_m^t \sim u(35,45)$	$TJC_{jcpl}^t \sim u(5,8)$	$WX_{ih}^t \sim u(2,20)$
$PR_{jp}^t \sim u(50000,600000)$	$CBI_{birt}^t \sim u(2,5)$	$TCJ_{jcpl}^t \sim u(5,9)$	$WY_j^t \sim u(20,40)$
$BC_{br}^t \sim u(3,5)$	$CI_{jip}^t \sim u(1,2)$	$TJ_{jip}^t \sim u(5,18)$	$WZ_j^t \sim u(40,60)$
$MC_{iph}^t \sim u(50,100)$	$CIC_{icpl}^t \sim u(2,3)$	$TJK_{jkpl}^t \sim u(9,19)$	$WU_j^t \sim u(20,40)$
$OC_{jp}^t \sim u(2,3)$	$CJC_{jcpl}^t \sim u(3,5)$	$TJM_{jmpl}^t \sim u(5,12)$	$WV_k^t \sim u(20,60)$
$OC_{mp}^t \sim u(3,12)$	$CCJ_{jcpl}^t \sim u(2,8)$	$TMF_{mfpl}^t \sim u(8,23)$	$WM_m^t \sim u(10,40)$
$IC_{jp}^t \sim u(1,3)$	$CJ_{jip}^t \sim u(3,7)$	$TBI_{birt}^t \sim u(2,10)$	$DX_{ih}^t \sim u(200,400)$
$RC_{iph}^t \sim u(1,2)$	$EIC_{icpl}^t \sim u(1,4)$	$TI_{jip}^t \sim u(3,10)$	$DY_j^t \sim u(256,456)$
$DC_{kp}^t \sim u(1,3)$	$EJC_{jcpl}^t \sim u(1,4)$	$TIC_{icplo}^t \sim u(2,10)$	$DZ_j^t \sim u(223,454)$
$HC_{jp}^t \sim u(50,100)$	$ECJ_{jcpl}^t \sim u(1,3)$	$TJC_{jcpl}^t \sim u(3,10)$	$DU_j^t \sim u(234,490)$
$CB_{br}^t \sim u(200000,250000)$	$EJ_{jip}^t \sim u(1,4)$	$TCJ_{jcpl}^t \sim u(3,10)$	$DV_k^t \sim u(202,404)$
$CX_{ih}^t \sim u(400000,500000)$	$EJK_{jkpl}^t \sim u(1,6)$	$TJ_{jip}^t \sim u(1,10)$	$DM_m^t \sim u(442,504)$
$CY_j^t \sim u(500000,1000000)$	$EJM_{jmpl}^t \sim u(1,6)$	$TJK_{jkpl}^t \sim u(4,10)$	$n_{rp}, m_p = 1$
$CZ_j^t \sim u(100000,200000)$	$EMF_{mfpl}^t \sim u(1,3)$	$TJM_{jmpl}^t \sim u(6,10)$	$mcont_t = 0.90$
$CU_j^t \sim u(100000,200000)$	$EP_{iph}^t \sim u(1,3)$	$TMF_{mfpl}^t \sim u(3,10)$	$PR_p = 0.25$
$CR_{ih}^t \sim u(100000,200000)$	$CJM_{jmpl}^t \sim u(2,3)$	$FB_{birt}^t \sim u(10,20)$	$PXi_p = 0.40$
$CV_k^t \sim u(100000,200000)$	$CJK_{jkpl}^t \sim u(4,7)$	$FI_{jip}^t \sim u(10,30)$	$PXm_p = 0.25$
$CM_m^t \sim u(100000,200000)$	$CMF_{mfpl}^t \sim u(1,3)$	$FIC_{icplo}^t \sim u(24,30)$	$PXd_p = 0.35$
$FB_b^t \sim u(20,30)$	$EBI_{birt}^t \sim u(2,5)$	$FJC_{jcpl}^t \sim u(24,45)$	$\beta = 0.5$
$FX_{ih}^t \sim u(50,55)$	$EIJ_{jip}^t \sim u(2,3)$	$FCJ_{jcpl}^t \sim u(30,44)$	$\zeta_1 = 0.5$
$FY_j^t \sim u(30,60)$	$ER_{mp}^t \sim u(1,3)$	$FJ_{jip}^t \sim u(30,48)$	$\zeta_2 = 0.5$
$FZ_j^t \sim u(20,40)$	$TBI_{birt}^t \sim u(5,8)$	$FJK_{jkpl}^t \sim u(20,30)$	$BM = 1000000$

در ادامه مسائل طراحی شده با استفاده از نرم افزار GAMS بر روی رایانه شخصی با پردازنده Intel core i7@ 2.40 GHZ و ۸ گیگابایت RAM کد نویسی و حل گردید و جواب‌های مسئله برای هریک از مسئله‌های طراحی شده در حالت قطعی و استوار سناریو محور به صورت جدول ۴ به دست آمد (مقادیر توابع هدف و زمان حل)؛ که در حالت استوار، سناریو برای پارامترهای غیرقطعی به صورت سه حالت زیاد، متوسط، کم در نظر گرفته شده بود.

جدول ۴- نتایج حاصل از حل مسائل طراحی شده در حالت قطعی و استوار.

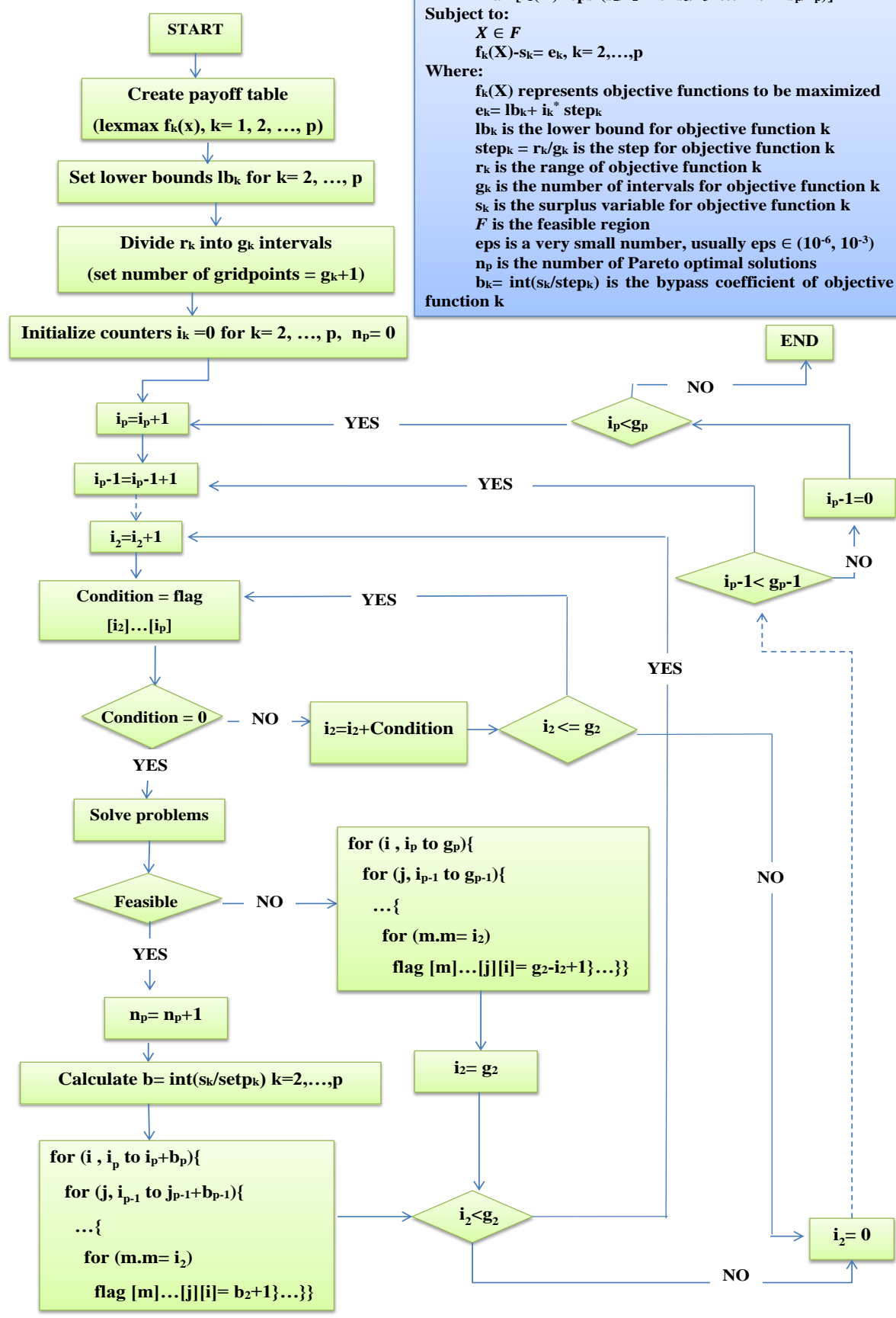
Table 4- Results of solving designed problems in a definite and solid state.

	f1 (سود)	f2 (تأخیر در زمان تحويل)	f3 (مسئولیت اجتماعی)	f4 (آلودگی زیست محیطی)	زمان حل (ثانیه)
مقدار بهینه تابع هدف مدل قطعی مسئله ۱	8031810.443	77.896	3979.118	90760.748	5.351
مقدار بهینه تابع هدف مدل استوار مسئله 1	6213633.721	83.568	10750.278	70622.971	32.146
مقدار بهینه تابع هدف مدل قطعی مسئله ۲	25946770.00	219.272	11696.489	369679.390	6.215
مقدار بهینه تابع هدف مدل استوار مسئله ۲	2112397.322	318.701	34039.266	28701.511	201.939





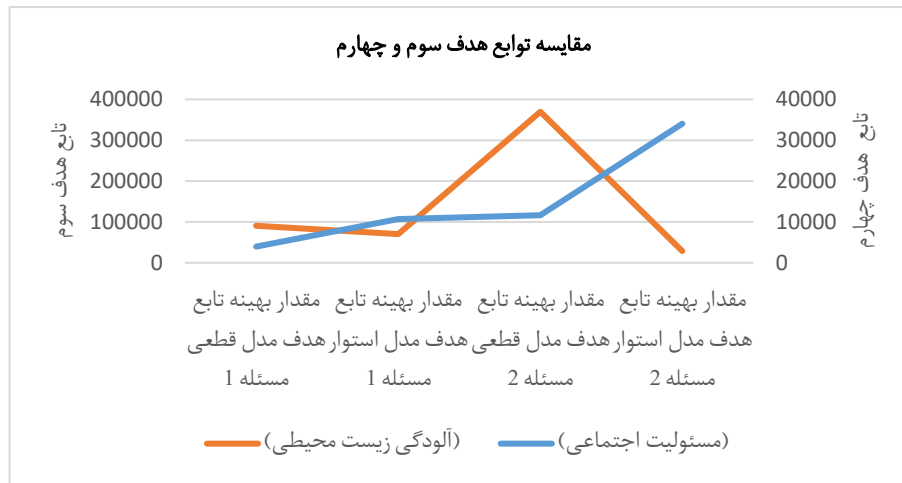
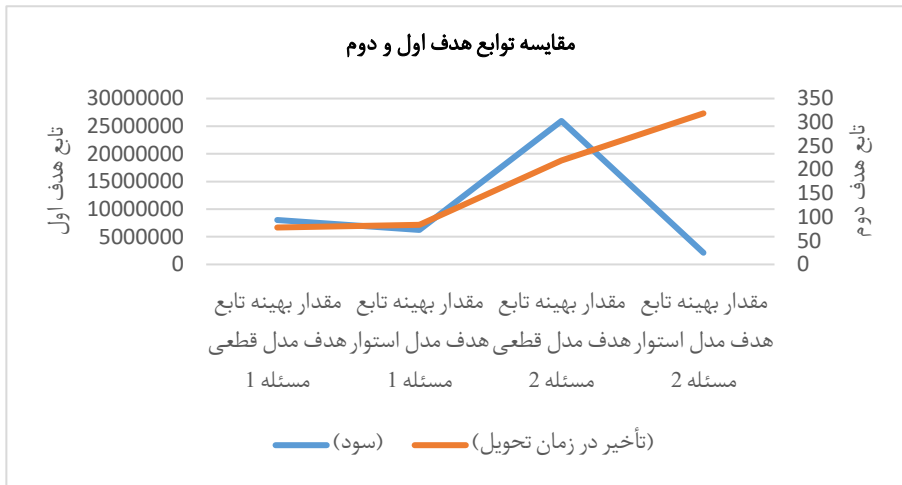
Problem P
 $\text{Max } [f_1(X) + \text{eps}^*(s_2/r_2 + 10^{-1}s_3/r_3 + \dots + 10^{-(2)}s_p/r_p)]$
Subject to:
 $X \in F$
 $f_k(X) - s_k = e_k, k=2, \dots, p$
Where:
 $f_k(X)$ represents objective functions to be maximized
 $e_k = lb_k + i_k^* \text{step}_k$
 lb_k is the lower bound for objective function k
 $\text{step}_k = r_k/g_k$ is the step for objective function k
 r_k is the range of objective function k
 g_k is the number of intervals for objective function k
 s_k is the surplus variable for objective function k
 F is the feasible region
 eps is a very small number, usually $\text{eps} \in (10^{-6}, 10^{-3})$
 n_p is the number of Pareto optimal solutions
 $b_k = \text{int}(s_k/\text{step}_k)$ is the bypass coefficient of objective function k



شکل ۲- نمودار الگوریتم AUGMECON-R.
 Figure 2- Graph of AUGMECON-R algorithm.



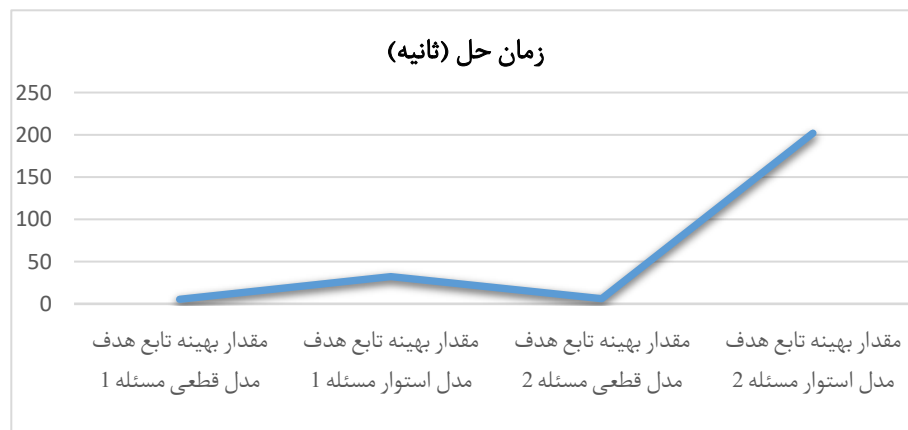
با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۴ مشاهده می شود که جواب مدل در حالت استوار نسبت به حالت قطعی به نحوی بدتر می باشد و این طبیعی است و از این جهت پیاده سازی جواب مدل استوار دارای ریسک به مراتب پایین تری نسبت به مدل های قطعی می باشد. از سایر علل، می توان به محدود شدن منابع در دسترس در حالت استوار اشاره کرد که این امر منجر به دور شدن مقادیر به دست آمده برای توابع هدف از حالت بهینه می گردد. بدیهی است که کنترل سطح استواری امری اجتناب پذیر جهت یافتن سیاست بهینه شبکه می باشد. شکل ۳ این اختلاف اهداف را به صورت شماتیک نمایش می دهد.



شکل ۳- مقایسه توابع هدف.

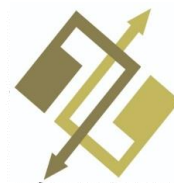
Figure 3- Comparison of objective functions.

شکل ۴ نحوه افزایش زمان حل با توجه به افزایش ابعاد مسئله و همچنین اعمال استوار سازی نمایش می دهد.



شکل ۴- مقایسه زمان حل.

Figure 4- Comparison of solution time.



همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، زمان حل با افزایش ابعاد مسئله و هم‌چنین اعمال استواری به‌شدت افزایش می‌یابد که نشان از پیچیدگی بالای مسئله می‌باشد.

از سوی دیگر هم‌چنین مقادیر مورد انتظار برای هر تابع هدف (متوسط هر تابع هدف) به ازای هر سناریو و هم‌چنین مقادیر e_2 ، e_3 و e_4 در جدول ۵ ارائه می‌گردد.

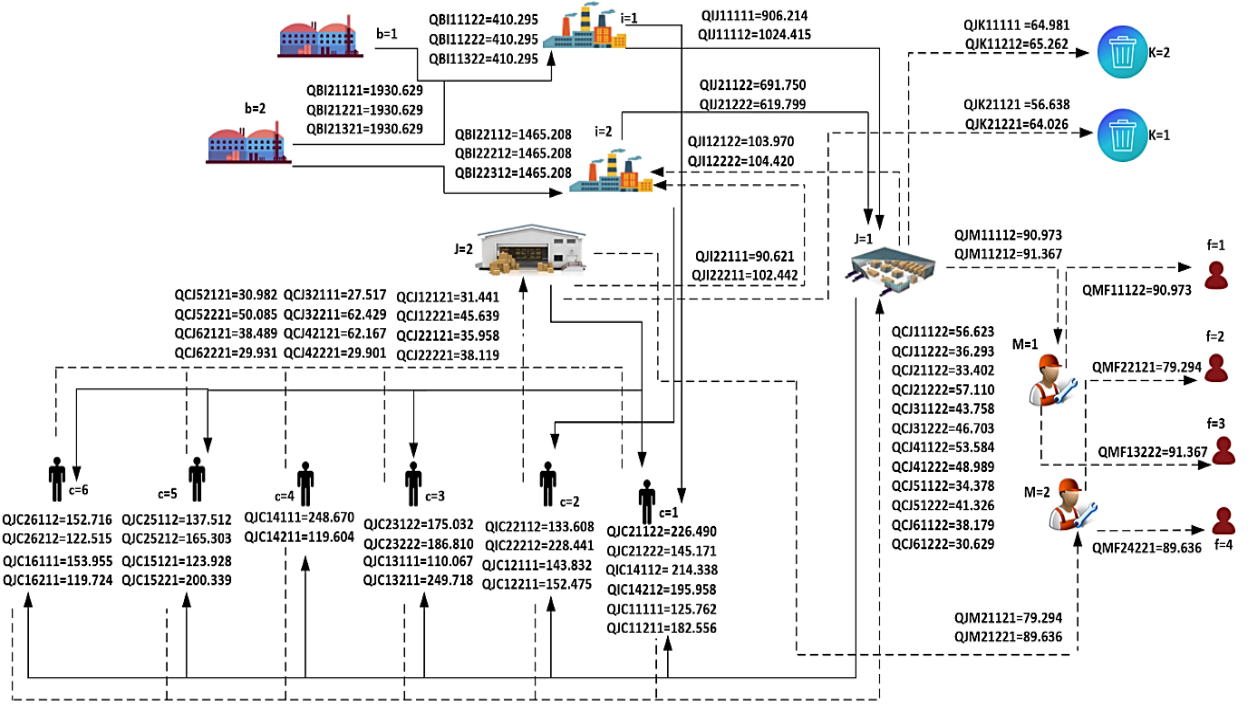
جدول ۵- مقادیر مورد انتظار توابع هدف به ازای هر سناریو و اپسیلون‌ها.

Table 5- Expected values of objective functions for each scenario and epsilons.

مدل استوار مسئله ۱														
مقدار مورد انتظار f1			مقدار مورد انتظار f2			مقدار مورد انتظار f3			مقدار مورد انتظار f4					
$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	e_2	e_3	e_4
3697383.472	2976554.675	761297.349	25.341	34.625	23.411	3583.426	3583.426	3583.426	32593.934	28069.467	7348.565	83.622	9238.495	70622.971
مدل استوار مسئله ۲														
مقدار مورد انتظار f1			مقدار مورد انتظار f2			مقدار مورد انتظار f3			مقدار مورد انتظار f4					
$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	e_2	e_3	e_4
1007203.560	1359553.719	1007203.560	97.343	127.571	93.548	11346.422	11346.422	11346.422	10003.654	10320.504	8080.927	335.003	28789.660	28701.511

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۵ می‌توان مشاهده نمود که مقدار مورد انتظار برای هر تابع هدف برای برخی سناریوها دچار کاهش و برای برخی سناریو دچار افزایش شده است که عامل اصلی بروز این حالت، کاهش یا افزایش مقادیر تقاضا و هم‌چنین زمان‌های تحویل در آن سناریو مورد‌نظر می‌باشد؛ و هم‌چنین برای مسئله ۱ مقدار جریمه نقض قیود برای تابع هدف اول در سناریو اول و دوم و سوم به ترتیب $33778/683$ و $12714/301$ و $674/342$ می‌باشد. برای مسئله ۲ مقدار جریمه نقض قیود برای تابع هدف اول در سناریو اول و دوم و سوم به ترتیب $676062/575$ و $479176/576$ و $106324/366$ می‌باشد؛ که این سبب یک انعطاف‌پذیری در مدل می‌شود و از نشدنی بودن مدل برای هر سناریو جلوگیری می‌کند.

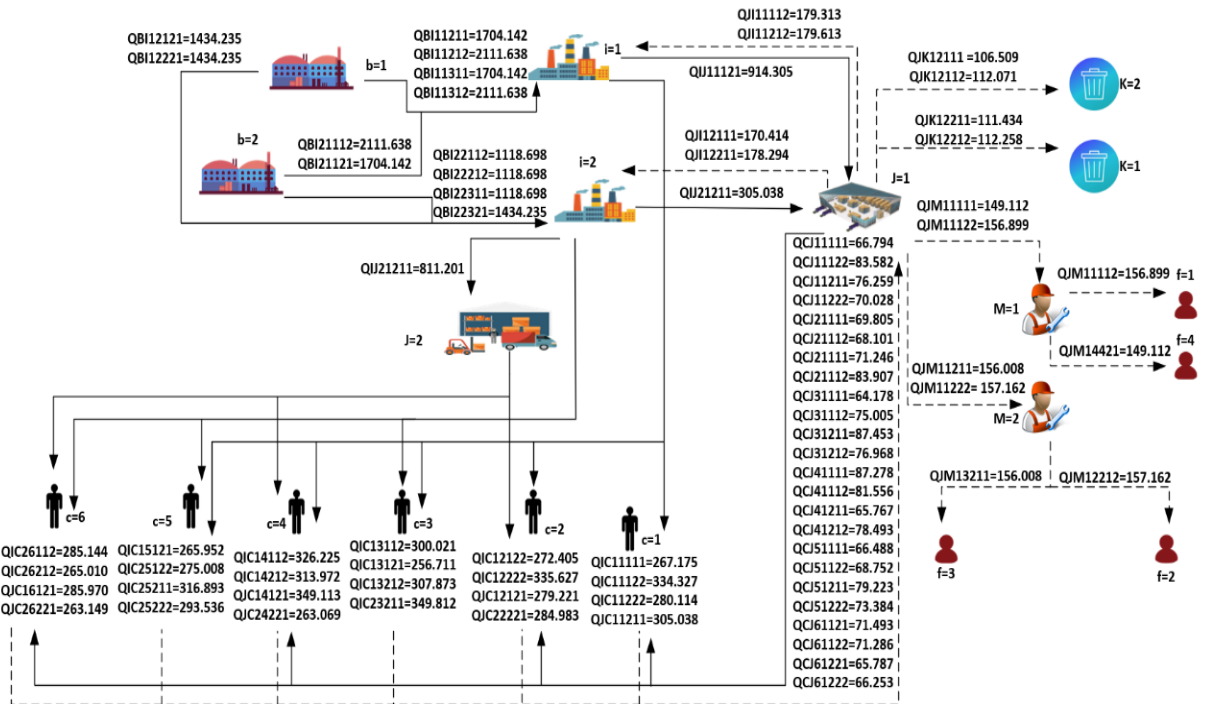
برای درک بهتر جواب به‌دست‌آمده، برای مسئله طراحی شده ۱ و در حالت قطعی شبکه به‌صورت شماتیک به همراه نمایش مقادیر متغیرهای اصلی در شکل ۵ نمایش داده می‌شود. بر اساس شکل ۵، بدیهی است که متدولوژی پیشنهادی پژوهش‌قادر به حل بهینه مسئله و هم‌چنین یافتن جواب بهینه و شدنی می‌باشد. به همین ترتیب برای سایر مسائل چه در حالت قطعی چه در حالت استوار نیز قابلیت طراحی شماتیک شبکه وجود دارد



شکل ۵- نمایش شماتیک جواب به دست آمده برای مسئله ۱ در حالت قطعی.

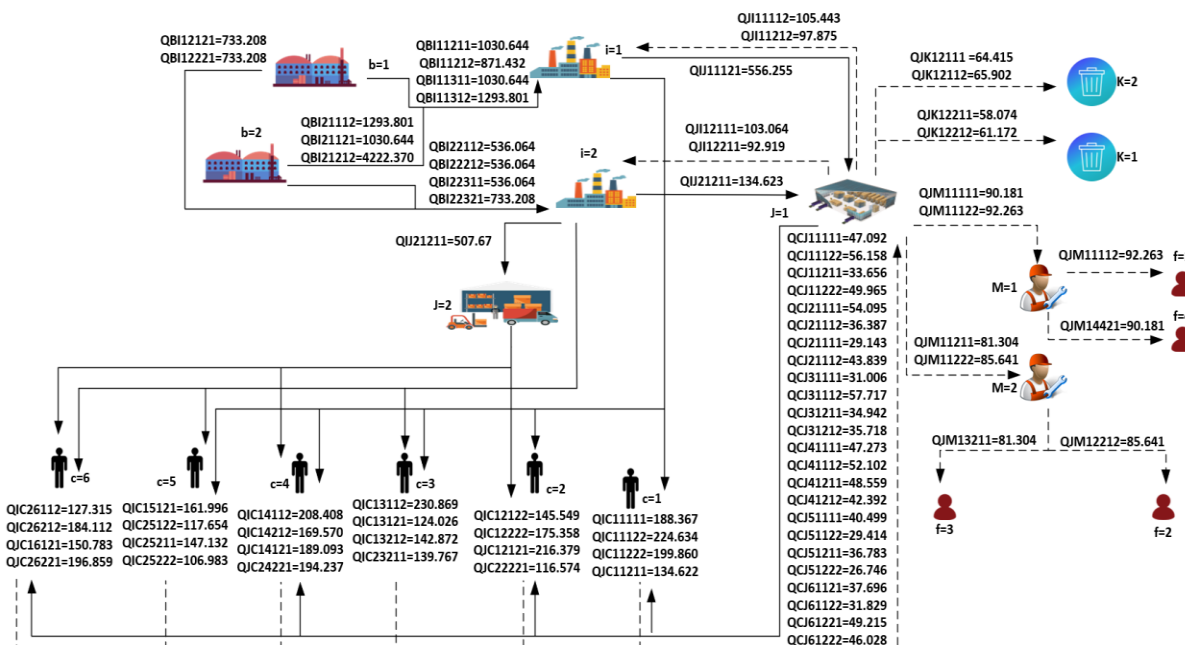
Figure 5- Schematic representation of the answer obtained for Problem 1 in the definite case.

با توجه به شکل ۵ مسیر جریان بهینه محصول و مقدار متغیرهای خروجی به دست آمده در حالت قطعی را می توان دریافت. حال در حالت استوار مسئله ۱، مسیر جریان بهینه محصول و مقدار متغیرهای خروجی در هر سناریو را به صورت های شکل های ۶، ۷ و ۸ خواهیم داشت:



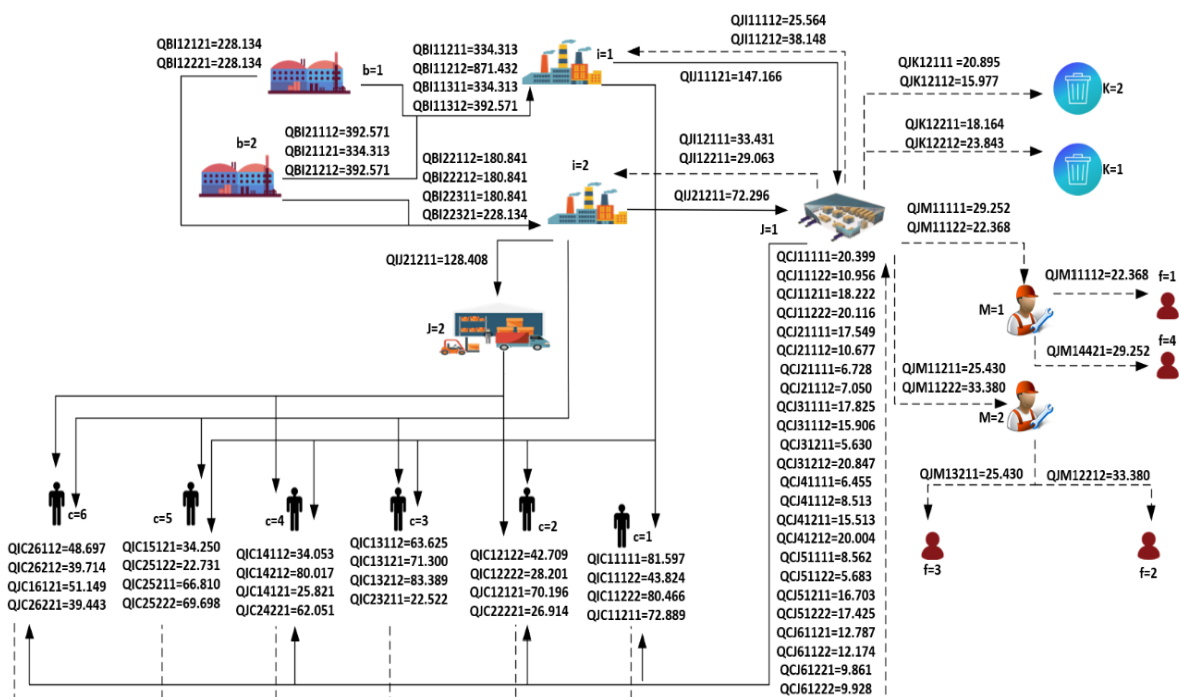
شکل ۶- نمایش شماتیک جواب به دست آمده برای مسئله ۱ در حالت استوار برای سناریو ۱.

Figure 6- Schematic representation of the answer obtained for problem 1 in solid state for scenario 1.



شکل ۷- نمایش شماتیک جواب به دست آمده برای مسئله ۱ در حالت استوار برای سناریو ۲.

Figure 7- Schematic representation of the answer obtained for problem 1 in solid state for scenario 2.



شکل ۸- نمایش شماتیک جواب به دست آمده برای مسئله ۱ در حالت استوار برای سناریو ۳.

Figure 8- Schematic representation of the answer obtained for problem 1 in solid state for scenario 3.

۱-۱-۴- تحلیل حساسیت

در ادامه به جهت مطالعه شرایط دنیای واقعی و رفتار تابع هدف در مقابل تغییرات پارامترها، به اجرای تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای استوار سازی مسئله (استواری حل و استواری جواب) می پردازیم. جهت بررسی میزان حساسیت توابع هدف، پارامترها در بازه کاهش ۱۰۰٪ تا افزایش ۱۰۰٪ بررسی می گردد. حال با اجرای آنالیز حساسیت بر روی مسئله ۱ به عنوان مسئله نمونه، به بررسی تأثیرگذاری این پارامتر بر تابع هدف می پردازیم که نتایج به دست آمده در جدول ۶ مشخص می باشد.

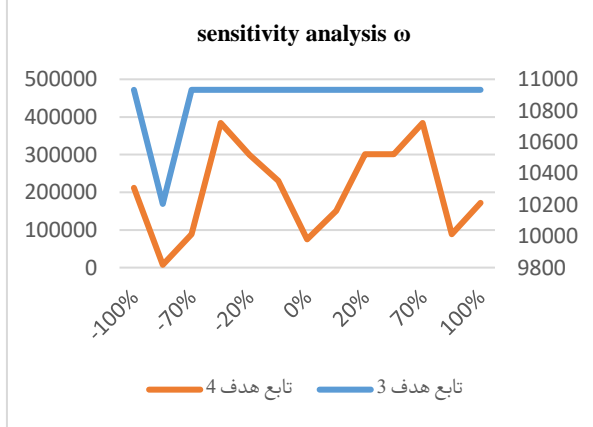
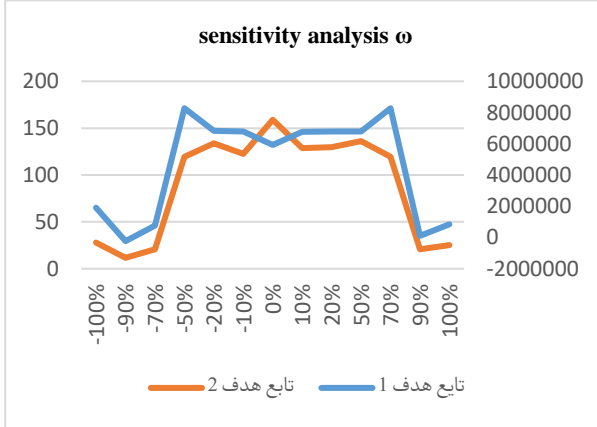
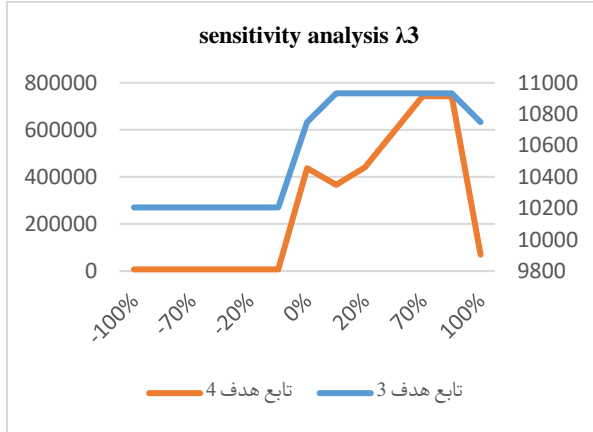
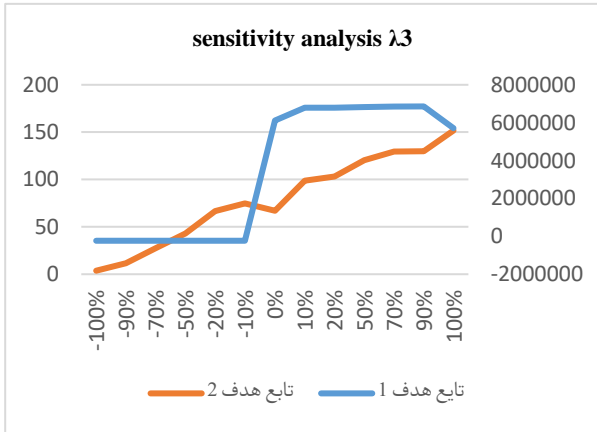
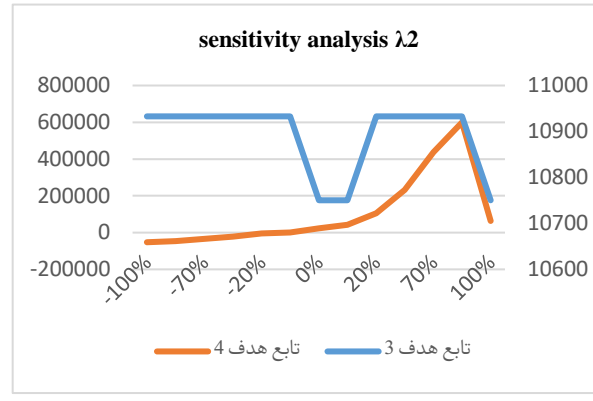
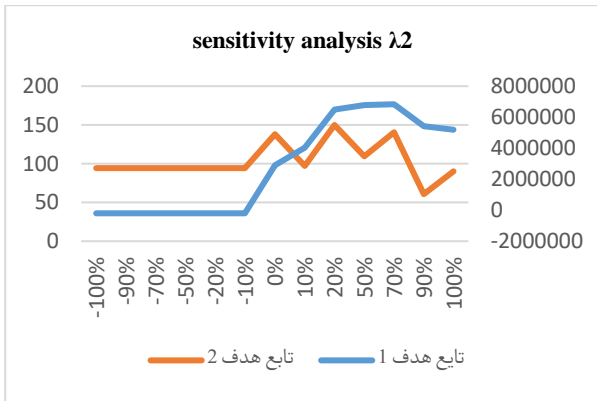
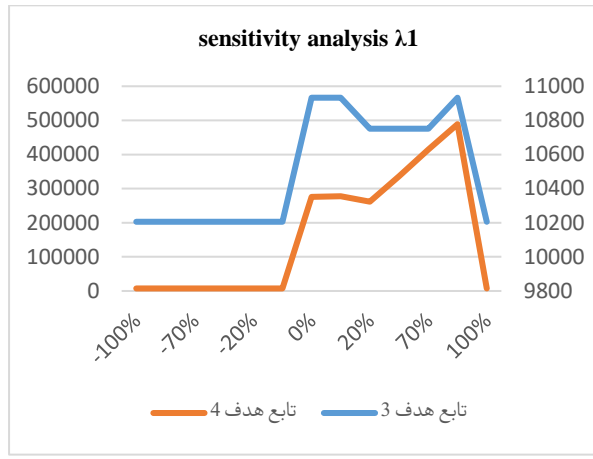
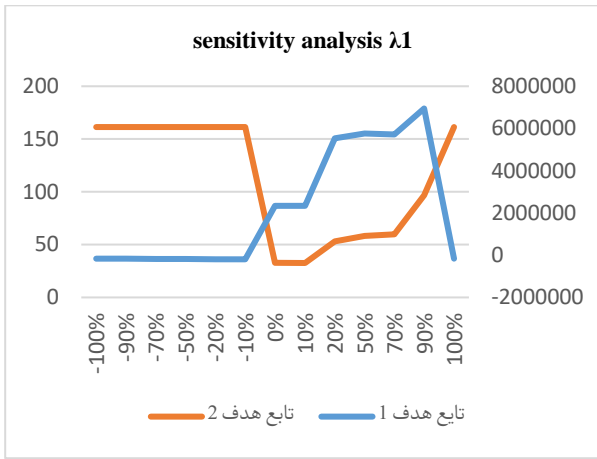
Table 6- Computational results for sensitivity analysis.

بازه تغییرات پارامتر λ_1							
تابع هدف	-100%	-90%	-70%	-50%	-20%	-10%	0%
F1	-165026.814	-168453.763	-175307.66	-182161.556	-192442.401	-195869.35	2341601.835
F2	161.373	161.373	161.373	161.373	161.373	161.373	32.784
F3	10205.714	10205.714	10205.714	10205.714	10205.714	10205.714	10932.858
F4	7392.445	7392.445	7392.445	7392.445	7392.445	7392.445	275915.181
تابع هدف	0%	10%	20%	50%	70%	90%	100%
F1	2341601.835	2342622.561	5538377.211	5763571.773	5722724.992	6947049.341	-165026.814
F2	32.784	32.597	53.07	58.228	59.893	96.703	161.373
F3	10932.858	10932.858	10750.278	10750.278	10750.278	10932.858	10205.714
F4	275915.181	277480.863	261668.738	336557.708	414897.381	488904.887	7392.445
بازه تغییرات پارامتر λ_2							
تابع هدف	-100%	-90%	-70%	-50%	-20%	-10%	0%
F1	-201538.862	-201538.862	-201538.862	-201538.862	-201538.862	-201538.862	2893950.631
F2	94.42	94.42	94.42	94.42	94.42	94.42	137.84
F3	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10750.278
F4	-52400.267	-46482.645	-34647.402	-22812.159	-5059.295	858.327	23470.609
تابع هدف	0%	10%	20%	50%	70%	90%	100%
F1	2893950.631	4033582.813	6492146.013	6786073.444	6833995.145	5416129.561	5182056.601
F2	137.84	97.002	149.925	109.687	140.349	60.672	90.23
F3	10750.278	10750.278	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10750.278
F4	23470.609	41592.992	104797.811	231998.02	437558.206	599267.382	63558.81
بازه تغییرات پارامتر λ_3							
تابع هدف	-100%	-90%	-70%	-50%	-20%	-10%	0%
F1	-233565.782	-233565.782	-233565.782	-233565.782	-233565.782	-233565.782	6121185.947
F2	3.723	11.605	27.37	43.135	66.783	74.665	66.983
F3	10205.714	10205.714	10205.714	10205.714	10205.714	10205.714	10750.278
F4	7392.445	7392.445	7392.445	7392.445	7392.445	7392.445	436972.694
تابع هدف	0%	10%	20%	50%	70%	90%	100%
F1	6121185.947	6784105.793	6798914.789	6828494.052	6850888.742	6850504.232	5714466.542
F2	66.983	98.615	103.218	120.461	129.37	129.806	151.723
F3	10750.278	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10750.278
F4	436972.694	366538.088	441784.463	592277.212	742769.962	742769.962	70364.357
بازه تغییرات پارامتر ω							
تابع هدف	-100%	-90%	-70%	-50%	-20%	-10%	0%
F1	1912729.228	-233565.782	765064.567	8276020.485	6824725.234	6795940.174	5925470.594
F2	27.899	11.605	20.868	119.314	133.941	122.434	158.963
F3	10932.858	10205.714	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858
F4	211590.5	7392.445	88766.929	384082.577	299528.062	230303.192	75197.055
تابع هدف	0%	10%	20%	50%	70%	90%	100%
F1	5925470.594	6767572.562	6789518.519	6792008.78	8276020.485	112298.877	841672.621
F2	158.963	128.633	129.669	136.259	119.314	20.836	25.258
F3	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858	10932.858
F4	75197.055	150422.501	300915.25	300915.25	384082.577	88766.929	172079.359

حال با توجه به نتایج جدول ۶ نمودارهای زیر را خواهیم داشت.

همانطور که از نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت در جدول ۶ و شکل ۹ برمی آید، تبادل میان توابع هدف با توجه به سطوح مختلف استواری جواب و مدل بر اساس تغییرات پارامترهای استواری مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید که تقریباً در تمامی بازه‌ها، توابع هدف حساسیت نسبت بالایی از خود نشان می‌دهند. برای مثال برای λ_1 ، با افزایش آن در بازه ۰ تا ۰٫۰۹، استواری جواب (سود مورد انتظار) افزایش می‌یابد ولی کل جریمه مورد انتظار (استواری مدل) کم کم کاهش می‌یابد تا به صفر می‌رسد و در ۰٫۰۱ استواری جواب کاهش یافته ولی استواری مدل همچنان صفر می‌ماند؛ و با کاهش λ_1 استواری مدل نسبت به تغییرات λ_1 بی تفاوت شده است ولی استواری جواب روندی افزایشی دارد. برای مثال برای ω ، با افزایش ω برای تابع هدف اول از بازه ۰ تا ۰٫۰۹ مقدار استواری مدل صفر خواهد شد ولی مقدار استواری جواب تا ۰٫۰۷ افزایش می‌یابد ولی بعد از آن یعنی در ۰٫۰۹ چون مقدار جریمه کل افزایش می‌یابد در نتیجه استواری جواب کاهش می‌یابد؛ و با کاهش ω در بازه ۰٫۰۱ تا ۰٫۰۹ - مقدار جریمه کل مورد انتظار افت می‌نماید ولی استواری جواب افزایش می‌یابد. و بعد از آن نیز یعنی در ۱- جریمه کل مورد انتظار افزایش و در نتیجه استواری جواب کاهش می‌یابد.





شکل ۹- نتایج آنالیز حساسیت.
Figure 9- Sensitivity analysis results.

همانطور که از نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت در جدول ۶ و شکل ۹ برمی آید، تبادل میان توابع هدف با توجه به سطوح مختلف استواری جواب و مدل بر اساس تغییرات پارامترهای استواری مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید که تقریباً در تمامی بازه‌ها، توابع هدف حساسیت نسبت بالایی از خود نشان می‌دهند.

برای مثال برای λ_1 ، با افزایش آن در بازه ۰ تا ۰/۰۹ استواری جواب (سود مورد انتظار) افزایش می‌یابد ولی کل جریمه مورد انتظار (استواری مدل) کم‌کم کاهش می‌یابد تا به صفر می‌رسد و در ۰/۰۱ استواری جواب کاهش یافته ولی استواری مدل همچنان صفر می‌ماند؛ و با کاهش λ_1 استواری مدل نسبت به تغییرات λ_1 بی تفاوت شده است ولی استواری جواب روندی افزایشی دارد.

و برای مثال برای ω ، با افزایش ω برای تابع هدف اول از بازه ۰ تا ۰/۰۹ مقدار استواری مدل صفر خواهد شد ولی مقدار استواری جواب تا ۰/۰۷ افزایش می‌یابد ولی بعد از آن یعنی در ۰/۰۹ چون مقدار جریمه کل افزایش می‌یابد در نتیجه استواری جواب کاهش می‌یابد؛ و با کاهش ω در بازه ۰/۱- تا ۰/۰۹- مقدار جریمه کل مورد انتظار افت می‌نماید ولی استواری جواب افزایش می‌یابد. و بعد از آن نیز یعنی در ۱- جریمه کل مورد انتظار افزایش و در نتیجه استواری جواب کاهش می‌یابد.

۲-۴- حل مسئله با یک رویکرد فرابتکاری

حال در ادامه برای بررسی مدل در ابعاد بزرگ‌تر و به دلیل *NP-HARD* بودن مسئله از نسخه بهبود یافته از یک الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت، به نام بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (*MOPSO*)^۱ (ابراهام و کندی^۲، ۱۹۹۵) و همچنین الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مغلوب (*NSGA-II*)^۳ (دب و همکاران^۴، ۲۰۰۴) بهره خواهیم گرفت.

۱-۲-۴- نحوه نمایش جواب

از آنجایی که تصمیمات اصلی این مدل از نوع مکان‌یابی و تخصیص می‌باشد، ما از یک ساختار جایگشتی برای تعیین مکان‌یابی و تخصیص استفاده می‌کنیم. همچنین چون در این مسئله چند سطح از زنجیره تأمین بایستی مکان‌یابی و تخصیص یابند، به ازای هر سطح از زنجیره یک رشته جواب طراحی می‌گردد که به شرح زیر است:

تخصیص مرکز توزیع / مرکز ترکیبی به مشتریان. در قدم اول بایستی تعیین شود که کدام مرکز توزیع / مرکز ترکیبی احداث می‌شود و کدام مشتریان به آن‌ها تخصیص پیدا می‌کند. بدین منظور یک جایگشت تصادفی به طول $C+J-I$ طراحی می‌گردد. اگر فرض شود تعداد مرکز توزیع / مرکز ترکیبی برابر ۲ و تعداد مشتریان برابر ۵ باشد، این جایگشت تصادفی طولی برابر ۶ دارد. بردار زیر یک جایگشت تصادفی برای تخصیص مرکز توزیع / مرکز ترکیبی به مشتریان است.

2	3	6	1	5	4
---	---	---	---	---	---

در بردار فوق عدد ۶ که از تعداد مشتریان بزرگ‌تر می‌باشد، جداکننده‌ی بین مشتریان تخصیص یافته به مرکز توزیع / مرکز ترکیبی ۱ و ۲ می‌باشد. بر اساس بردار فوق مشتریان ۲ و ۳ به مرکز توزیع / مرکز ترکیبی ۱ و مشتریان ۱ و ۴ و ۵ به مرکز توزیع / مرکز ترکیبی ۲ تخصیص پیدا کرده‌اند. از آنجایی که به هر دو مرکز توزیع / مرکز ترکیبی، مشتریان تخصیص یافته است لذا این دو مرکز توزیع / مرکز ترکیبی احداث می‌گردند. در صورتی که یکی از مرکز توزیع / مرکز ترکیبی به هیچ مشتری تخصیص نیابد در نتیجه احداث خواهد شد.

6	3	2	1	5	4
---	---	---	---	---	---

تخصیص مرکز تولید / باز یابی به مرکز توزیع / مرکز ترکیبی. یک بردار جایگشتی تصادفی به طول $I+J-I$ در نظر گرفته می‌شود. اگر تعداد مرکز تولید / باز یابی برابر ۲ و تعداد مرکز توزیع / مرکز ترکیبی برابر ۲ باشد، یک بردار جایگشتی به صورت زیر می‌باشد:

3	1	2
---	---	---

¹ Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)
² Berhart and Kennedy

³ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
⁴ Deb et al.





در بردار فوق عدد ۳ جداکننده بین مرکز توزیع/ مرکز ترکیبی تخصیص یافته به مرکز تولید/بازیابی ۱ و ۲ می‌باشد. بر اساس بردار فوق به مرکز تولید/بازیابی ۱ هیچ مرکز توزیع/ مرکز ترکیبی تخصیص نمی‌یابد و در نتیجه مرکز تولید/بازیابی ۱ احداث نمی‌گردد و مرکز توزیع/ مرکز ترکیبی ۱ و ۲ به مرکز تولید/بازیابی ۲ تخصیص می‌یابد.

تخصیص تأمین‌کننده به مرکز تولید/بازیابی. یک بردار جایگشتی تصادفی به طول $B+I-1$ در نظر گرفته می‌شود. اگر تعداد تأمین‌کننده برابر ۲ و تعداد مرکز تولید/بازیابی برابر ۲ باشد، یک بردار جایگشتی به صورت زیر می‌باشد:

2	3	1
---	---	---

در بردار فوق عدد ۳ جداکننده بین مرکز تولید/بازیابی تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان ۱ و ۲ می‌باشد. بر اساس بردار فوق به تأمین‌کننده ۱ به تولیدکننده ۲ و تأمین‌کننده ۲ به تولیدکننده ۱ تخصیص می‌یابد.

بر اساس مثال‌های فوق، سایر بردارهای نمایش جواب به شرح جدول ۷ است:

جدول ۷- بردارهای نمایش جواب.
Table 7- Answer display vectors.

سایز	نوع تخصیص
M+F-1	مرکز تعمیر به مشتری ثانویه
I+C-1	تخصیص مرکز تولید/بازیابی به مشتریان
J+C-1	تخصیص مشتری به مرکز جمع‌آوری /مرکز ترکیبی
I+J-1	تخصیص مرکز جمع‌آوری /مرکز ترکیبی به مرکز تولید/بازیابی
J+K-1	تخصیص مرکز جمع‌آوری /مرکز ترکیبی به مرکز دفع
J+M-1	تخصیص مرکز جمع‌آوری /مرکز ترکیبی به مرکز تعمیر

حال که تمامی تخصیص‌ها و مکان‌یابی‌های لازم به درستی انجام شد حال با توجه به تقاضای مشتریان اولین جریان $+QJC_{jcpl}^t$ مقدار می‌گیرد و به دنبال آن تمامی جریانات بین تسهیلات شکل می‌گیرد.

جهش. به منظور جهش با استفاده از عملگر $Swap$ استفاده می‌شود. در هر بردار از جواب دو عدد انتخاب شده و جای آن‌ها با یکدیگر تعویض می‌گردد.

به طور مثال در کروموزوم فوق نقاط ۶ و ۱ با یکدیگر تعویض می‌گردند:

4	5	1	2	6	3
4	5	6	2	1	3

تقاطع. به منظور اعمال تقاطع از تقاطع تک نقطه‌ای استفاده می‌شود. در این روش یک نقطه تصادفی روی هر بردار جواب از هر دو والد انتخاب گردیده و فرزندان جدید با الحاق طرفین معکوس هر والد به دست می‌آیند.



والد ۱	5	2	6	4	1	3
والد ۲	2	5	4	1	3	6

فرزند ۱	2	5	6	4	1	3
فرزند ۲	5	2	4	1	3	6

۲-۲-۴- معیارهای ارزیابی

اگر یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه (مسئله کمینه‌سازی Z_1) مورد نظر باشد، پرواضح است که هر روش حل که جواب شدنی ارائه دهد که به ازای آن Z_1 کمتر باشد، بهتر است؛ اما در مسئله $MODM$ ، نحوه ارزیابی متفاوت است و نمی‌توان به صورت تک‌هدفه ارزیابی کرد. بر همین اساس، معیارهای زیر را برای ارزیابی روش‌های $MODM$ و مقایسه آن‌ها نسبت به هم تعریف می‌کنیم.

معیار بیشترین گستردگی^۱: طول قطر مکعب فضایی را که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نا مغلوب به کار می‌رود، اندازه‌گیری می‌کند که در رابطه (۱۱۱) محاسبه می‌شود. هر چه این مقدار بزرگ‌تر باشد، بهتر است.

$$Diversity = \sqrt{(maxf_{1i} - minf_{1i})^2 + (maxf_{2i} - minf_{2i})^2} \quad (111)$$

معیار میانگین انحرافات از جواب ایده آل^۲. در این معیار، ابتدا یک جواب ایده‌آل برای مسئله در نظر گرفته می‌شود و سپس میانگین انحرافات مجموعه جواب‌های پارتو از جواب ایده‌آل محاسبه می‌شود. جواب ایده‌آل حالتی است که به طور هم‌زمان هر دو جواب در حالت بهینه خود باشند و یا در مسائل کمینه‌سازی می‌توان مبدأ مختصات رو به عنوان جواب ایده‌آل در نظر گرفت. معادله MID در رابطه (۱۱۲) تعریف می‌شود:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \quad (112)$$

در رابطه‌ی فوق n تعداد جواب‌های پارتو است و مقدار c_i از رابطه‌ی (۱۱۳) محاسبه می‌شود.

$$c_i = \sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2} \quad (113)$$

با توجه به اینکه تابع هدف اول و دوم از نوع مینیمم‌سازی و تابع هدف سوم از نوع ماکزیمم‌سازی است، برای تعیین نقطه‌ی ایده‌آل، تابع هدف ماکزیمم را با معکوس کردن به مینیمم تبدیل کرده و نقطه‌ی (۰ و ۰) را به عنوان نقطه‌ی ایده‌آل در نظر می‌گیریم. واضح است که هرچه معیار MID کمتر باشد، عملکرد الگوریتم بهتر است.

معیار میزان دستیابی دو هدف به طور هم‌زمان^۳. معیار ارزیابی دیگری که در این پژوهش پیشنهاد شده است، RAS است. معادله RAS در رابطه (۱۱۴) نشان داده شده است.

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{1i} - F_i}{F_i} \right) + \left(\frac{f_{2i} - F_i}{F_i} \right)}{n} \quad (114)$$

¹ Maximum Spread or Diversity
² Mean Ideal Distance (MID)

³ Rate of Achievement to Two Objectives Simultaneously (RAS)

معیار گسترش راه حل های نا مغلوب^۱. SNS. به عنوان شاخص تنوع می تواند به صورت زیر بیان شود، بالا بودن مقدار SNS به منزله ی بهتر بودن الگوریتم می باشد که در رابطه (۱۱۵) تعریف می شود (جولای و همکاران^۲، ۲۰۱۳)

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MID - c_i)^2}{n-1}} \quad (115)$$

۳-۲-۴- تنظیم پارامتر



در این پژوهش برای تعیین مقادیر پارامترهای الگوریتم MOPSO از روش تاگوچی استفاده می شود که این روش دو مزیت مهم دارد، اول آنکه نیازی به بررسی تمام آزمایش های ممکن برای عوامل ندارد و تنها کسر مشخصی از آزمایش های بررسی می شوند و دوم آنکه از کسر بررسی شده مقدار مناسبی اطلاعات استخراج می شود و با استفاده از اطلاعاتی نسبت خوب تنظیم عوامل صورت می پذیرد. در روش تاگوچی، عوامل تأثیرگذار بر نتیجه آزمایش به دودسته غیرقابل کنترل (که اصطلاحاً اختلال (N) نامیده می شود) و قابل کنترل (که اصطلاحاً سیگنال (S) نامیده می شود) تقسیم می شود. سپس یک متغیر S/N تعریف می شود که نسبت سیگنال به اختلال است.

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم MOPSO، نخست، برای هر پارامتر سه سطح کم (۱) متوسط (۲) و زیاد (۳)، به طور مجزا برای حل مسائل، تعریف شده است که در جدول ۸ آورده شده است. سپس مجموعه آزمایش های پیشنهادی روش تاگوچی برای شش عامل در دو سطح محاسبه شده است که ۲۷ حالت مختلف توسط روش تاگوچی طراحی می شود که در جدول ۹ معرفی شده اند (لازم به ذکر است که هر آزمایش ۱۰ مرتبه انجام می شود و میانگین آن ها ثبت می شود که این کار جهت کاهش خطای الگوریتم ها انجام می شود و جواب قابل اعتمادتر خواهد شد).

جدول ۸- تعیین سطوح پارامترهای MOPSO.
Table 8- Determining the levels of MOPSO parameters.

	سطح کم	سطح متوسط	سطح زیاد
Max it	100	150	200
NPOP	100	150	200
C1	1	2	4
C2	1	2	4
BETA	1	2	5
GAMA	1	2	5

پس از تعیین سطح برای پارامترهای الگوریتم با استفاده از روش تاگوچی و نرم افزار مینی تب آزمایش های لازم طراحی می شود که در جدول ۹ نشان داده می شود.

جدول ۹- طراحی آزمایش های جهت تنظیم پارامتر.
Table 9 - Design of experiments to adjust the parameter.

	Max it	NPOP	C1	C2	BETA	GAMA
1	150	80	1	1	1	1
2	150	80	1	1	2	2
3	150	80	1	1	5	5
4	150	100	2	2	1	1
5	150	100	2	2	2	2
6	150	100	2	2	5	5
7	150	120	4	4	1	1
8	150	120	4	4	2	2
9	150	120	4	4	5	5
10	200	80	2	4	1	2
11	200	80	2	4	2	5

¹ Spread Of Non-Domainance Solutions (SNS)

² Jolai et al.

Table 9- Continued.

	Max it	NPOP	C1	C2	BETA	GAMA
12	200	80	2	4	5	1
13	200	100	4	1	1	2
14	200	100	4	1	2	5
15	200	100	4	1	5	1
16	200	120	1	2	1	2
17	200	120	1	2	2	5
18	200	120	1	2	5	1
19	250	80	4	2	1	5
20	250	80	4	2	2	1
21	250	80	4	2	5	2
22	250	100	1	4	1	5
23	250	100	1	4	2	1
24	250	100	1	4	5	2
25	250	120	2	1	1	5
26	250	120	2	1	2	1
27	250	120	2	1	5	2

در این بخش شاخص‌هایی را برای تنظیم پارامتر مدنظر است شامل: *MID*, *Diversity*, *RAS* می‌باشد که این شاخص‌ها در قسمت ۲-
 ۴- توضیح داده شده‌اند که پس از ده مرتبه اجرا میانگین به‌عنوان جواب هر آزمایش ارائه می‌شود که در جدول ۱۰ قابل مشاهده است.

جدول ۱۰- مقادیر هر آزمایش.

Table 10- Values of each experiment.

Diversity	MID	RAS
25005.91	95190.94	0.014959
12964.24	89270.69	0.016078
15252.8	88400.33	0.012917
31245.23	89754.42	0.023874
41771.39	90063.85	0.061407
37543.99	91512.53	0.042475
37465.12	106177	0.059679
37959.57	108768.4	0.065159
39603.84	106178.8	0.042854
41721.78	102902.3	0.062234
22556.81	90454.15	0.042494
28853.82	94829.13	0.047364
38272.06	92666.41	0.052358
49287.32	96033.53	0.04552
43461.95	95078.84	0.060243
43781.29	91190.11	0.064589
40071.05	93005.01	0.04274
31232.71	81817.76	0.023097
28086.11	84947.23	0.039228
30168.16	90896.74	0.041193
32535.24	86462.14	0.054772
39466.05	90465.16	0.056671
56793.49	94651.65	0.063023
57648.52	96588.96	0.073255
7942.419	70939.81	0.017421
21303.48	82008.66	0.021061
22732.7	85369.31	0.026185





حال به منظور ایجاد یک خروجی از هر آزمایش با استفاده از روش زیر همه‌ی شاخص‌ها را به یک پاسخ تبدیل خواهد شد؛ بنابراین ابتدا ماهیت هر شاخص مبنی بر منفی (کمتر - بهتر) یا مثبت بودن (بیشتر - بهتر) باید مشخص شود که در این مورد شاخص *Diversity* هرچه بیشتر باشد بهتر است و سایر شاخص‌ها ماهیتی منفی دارند. جدول ۱۱ شاخص‌ها و موقعیت متفاوت که همان آزمایش‌های طراحی شده هستند و با Q_i تعریف می‌شوند را نمایش می‌دهد.

جدول ۱۱- ماهیت شاخص‌ها.

Table 11- The nature of indicators.

$Q_i \sqrt{b^2 - 4ac}$	+	-	-
	x_1 (Diversity)	x_2 (MID)	x_4 (RAS)
Q_1	r_{11}	r_{12}	r_{14}
Q_2	r_{21}	r_{22}	r_{24}
Q_3	r_{31}	r_{32}	r_{34}
⋮	⋮	⋮	⋮
Q_i	r_{ij}	r_{ij}	r_{ij}

که Q_i و x_j به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معیار z -ام و موقعیت i -ام هستند. همچنین r_{ij} برابر با مقداری است که موقعیت i در شاخص z کسب خواهد کرد. در ادامه مقادیر حاصل شده شاخص‌ها را مطابق با فن بی واحد نمودن فازی در معادله‌های (۱۱۶) و (۱۱۷) نرمالیزه می‌شود که جدول ۱۲ شاخص‌های نرمالیزه شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱۲- نرمال‌سازی مقایر شاخص‌ها.

Table 12- Normalization of index values.

0.34329	0.35892	0.96615
0.10103	0.51542	0.94761
0.14707	0.53843	1
0.46881	0.50264	0.81841
0.68058	0.49446	0.19636
0.59553	0.45616	0.51012
0.59395	0.068504	0.22499
0.60389	0	0.13417
0.63697	0.068456	0.50383
0.67958	0.15507	0.18265
0.29402	0.48414	0.50981
0.4207	0.36848	0.42909
0.61018	0.42566	0.34633
0.83179	0.33665	0.45966
0.71459	0.36188	0.21564
0.72102	0.46468	0.14361
0.64637	0.41671	0.50573
0.46856	0.71244	0.83128
0.40526	0.62971	0.56393
0.44714	0.47244	0.53136
0.49476	0.58967	0.30631
0.6342	0.48385	0.27485
0.9828	0.37318	0.16957
1	0.32196	0
0	1	0.92535
0.2688	0.70739	0.86503
0.29755	0.61856	0.78009

در این روش نرمال‌سازی شاخص‌های با ماهیت منفی، ماهیتی مثبت پیدا خواهند کرد. با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی، شاخص‌ها برحسب اهمیت اولویت‌بندی شده و متناسب با آن وزنی برای هر شاخص در نظر گرفته می‌شود که در این پژوهش اهمیت هر وزن از مرجع (جولای و همکاران، ۲۰۱۳) استفاده می‌شود. آنگاه با توجه به ضرایب اهمیت، مجموع وزن شاخص‌های هر آزمایش در معادله (۱۱۸) محاسبه می‌گردد.

$$Response = \sqrt[2]{(MID)^2 + (RAS)^2 + (Diversity)^1} \quad (118)$$

حال بر اساس مقادیر $Response$ هر الگوریتم، نرخ S/N محاسبه شده و بر اساس آن، سطوح هریک از پارامترهای ورودی مشخص می‌گردد. برای این کار ستون $Response$ به دست آمده را به جدول آزمایش‌های معرفی شده توسط روش تاگوچی اضافه می‌کنیم جدول ۱۳ و از فرمول بیشتر-بهرتر تاگوچی برای محاسبه نسبت S/N استفاده می‌شود.

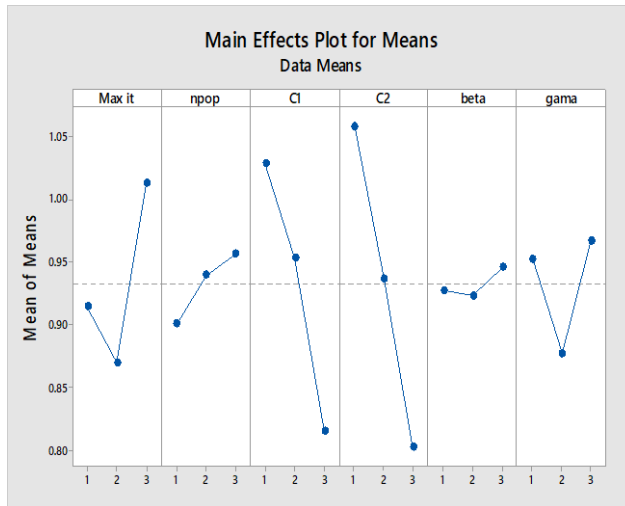
جدول ۱۳- خروجی نهایی جهت تنظیم پارامتر.

Table 13- Final output for parameter adjustment.

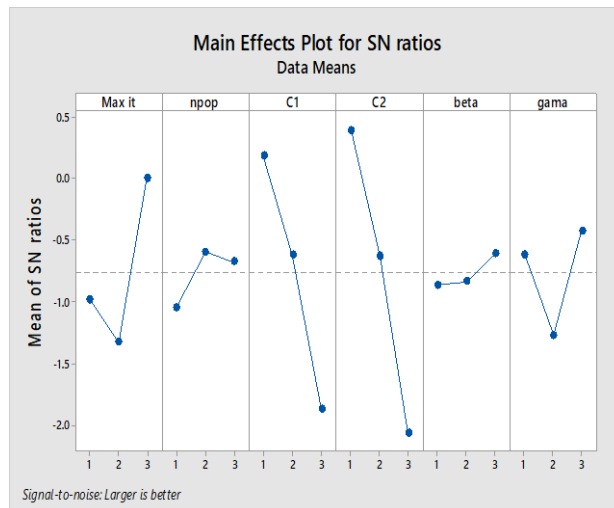
0.34329	0.35892	0.96615	1.0863
0.10103	0.51542	0.94761	1.0834
0.14707	0.53843	1	1.1452
0.46881	0.50264	0.81841	1.0687
0.68058	0.49446	0.19636	0.86385
0.59553	0.45616	0.51012	0.90717
0.59395	0.068504	0.22499	0.63882
0.60389	0	0.13417	0.61862
0.63697	0.068456	0.50383	0.81502
0.67958	0.15507	0.18265	0.72058
0.29402	0.48414	0.50981	0.76207
0.4207	0.36848	0.42909	0.7049
0.61018	0.42566	0.34633	0.82064
0.83179	0.33665	0.45966	1.0082
0.71459	0.36188	0.21564	0.82952
0.72102	0.46468	0.14361	0.86972
0.64637	0.41671	0.50573	0.92044
0.46856	0.71244	0.83128	1.1909
0.40526	0.62971	0.56393	0.93744
0.44714	0.47244	0.53136	0.83993
0.49476	0.58967	0.30631	0.82845
0.6342	0.48385	0.27485	0.84372
0.9828	0.37318	0.16957	1.0649
1	0.32196	0	1.0506
0	1	0.92535	1.3625
0.2688	0.70739	0.86503	1.1493
0.29755	0.61856	0.78009	1.0391

که در نهایت خروجی نرم‌افزار مینی تب به صورت زیر خواهد بود و سطوح پارامترها ارائه می‌شود.





a



b

شکل ۱۰- سطوح پارامترها: a. نمودار اثر میانگین پارامترها بر اساس تابع مطلوبیت؛ b. نمودار اثر میانگین نسبت SN. Figure 10- Parameters levels: a. graph of the average effect of the parameters based on the utility function; b. graph of the average effect of the SN ratio.

جدول ۱۴- نتیجه تنظیم پارامتر MOPSO.

Table 14- MOPSO parameter setting result.

Max it	NPOP	C1	C2	BETA	Gama
200	100	1	1	5	5

به طور مشابه برای الگوریتم NSGAI نیز همین مسیر انجام می شود. پس از تعیین سطح برای پارامترهای الگوریتم با استفاده از روش تاگوچی و نرم افزار مینی تب آزمایش های لازم طراحی می شود که در جدول ۱۵ نشان داده می شود؛ که در نهایت تنظیم پارامتر برای این الگوریتم ارائه می شود.

جدول ۱۵- سطوح برای الگوریتم NSGAI.

Table 15- Levels for NSGAI algorithm.

	1	2	3
Maxit	100	150	200
Npop	50	100	150
PC	0.7	0.75	0.8
PM	0.3	0.25	0.2

جدول ۱۶- آزمایش‌های طراحی‌شده توسط روش تاگوچی.

Table 16- Experiments designed by Taguchi method.

Max iterations	Population size	PC	PM
1	1	1	1
1	2	2	2
1	3	3	3
2	1	2	3
2	2	3	1
2	3	1	2
3	1	3	2
3	2	1	3
3	3	2	1

جدول ۱۷- پارامترهای الگوریتم NSGAI.

Table 17- Parameters of NSGAI algorithm.

Max iterations	Population size	PC	PM
150	150	0.8	0.25

۴-۲-۴- تحلیل و بحث

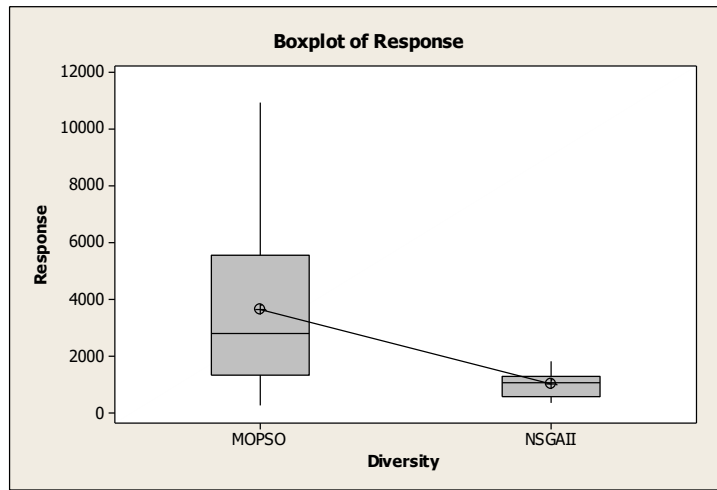
پس از اینکه شاخص‌های ارزیابی قسمت ۲-۲-۴ تعریف شد برای مقایسه الگوریتم‌ها ۲۲ مسئله طراحی شد. سپس هر مسئله به ازای هر الگوریتم ۱۰ مرتبه اجرا و میانگین به‌عنوان جواب نهایی برای هر روش حل گزارش می‌شود که مقادیر همه‌ی شاخص‌ها برای الگوریتم *MOPSO* و *NSGAI* در جدول ۱۸ نشان داده می‌شود. حال با داشتن اطلاعات کافی و بررسی شرط لازم برای انجام آزمون آنووا^۱ در این قسمت تحلیل آماری انجام می‌شود. در این مقاله از آزمون فرض برابری میانگین دو جامعه یک‌طرفه استفاده می‌شود (آزمون توکی). عامل‌ها در اینجا الگوریتم‌ها هستند که مورد بررسی قرار می‌گیرند. باید با توجه به مقدار آماره به‌دست‌آمده در مورد فرض صفر تصمیم‌گیری شود که اگر $\alpha \leq P\text{-Value}$ برقرار باشد آنگاه فرض H_0 (عدم وجود اختلاف معنادار بین میانگین‌های الگوریتم‌ها) رد می‌شود ولی اگر داشته باشیم $\alpha \geq P\text{-Value}$ باشد دلیلی برای رد H_0 وجود نخواهد داشت. در این آزمون مقدار $\alpha = 0.05$ در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله پنج معیار *Diversity*, *Spacing*, *MID*, *RAS*, *SNS* محاسبه شده است.

آنالیز واریانس برای شاخص *Diversity*. با توجه به آزمون فرض که اگر مقدار $\alpha \geq P\text{-Value}$ باشد اختلاف معنادار بین الگوریتم‌ها وجود دارد و اگر خلاف این باشد فرض H_0 مبنی بر برابر بودن میانگین جامعه و نداشتن اختلاف معنادار پذیرفته می‌شود. با توجه به خروجی نرم‌افزار *Minitab* مقدار $P\text{-Value} = 0.0$ است که فرض H_0 رد می‌شود و از نظر شاخص *Diversity* اختلاف معناداری میان الگوریتم‌ها وجود دارد که با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که الگوریتم *MOPSO* بهتر است.

آنالیز واریانس برای شاخص *Spacing*. با توجه به آزمون فرض که اگر مقدار $\alpha \geq P\text{-Value}$ باشد اختلاف معنادار بین الگوریتم‌ها وجود دارد و اگر خلاف این باشد فرض H_0 مبنی بر برابر بودن میانگین جامعه و نداشتن اختلاف معنادار پذیرفته می‌شود. با توجه به خروجی نرم‌افزار *Minitab* مقدار $p\text{-Value} = 0.0$ است که فرض H_0 رد و از نظر شاخص *Spacing* اختلاف معناداری میان الگوریتم‌ها وجود دارد و با توجه به ماهیت شاخص که هرچه کمتر باشد بهتر است *NSGA-II* عملکرد بهتری دارد.

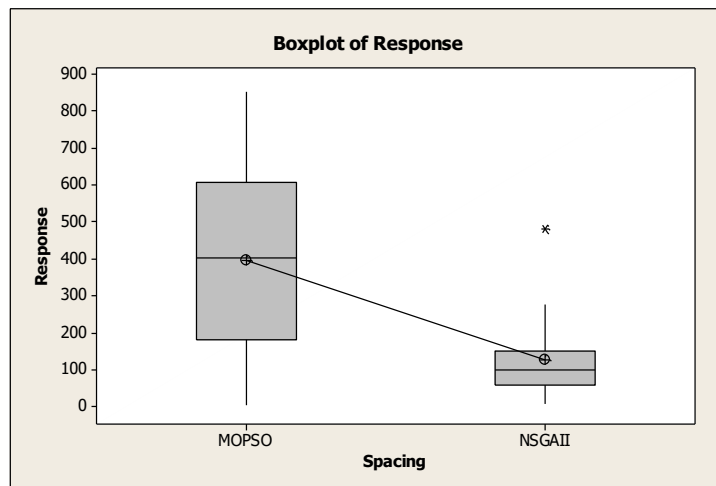


¹ ANOVA



شکل ۱۱- خروجی نرم‌افزار مینی تب برای آزمون آنووا.

Figure 11- Output of mini-tab software for ANOVA test.

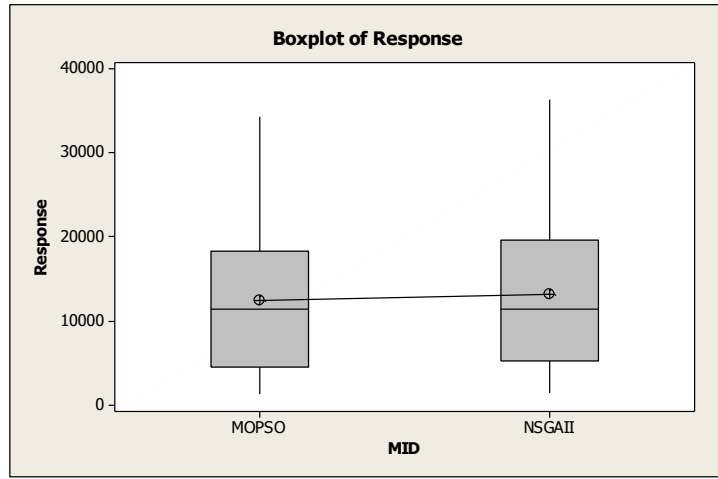


شکل ۱۲- خروجی حاصل از آزمون آنووا.

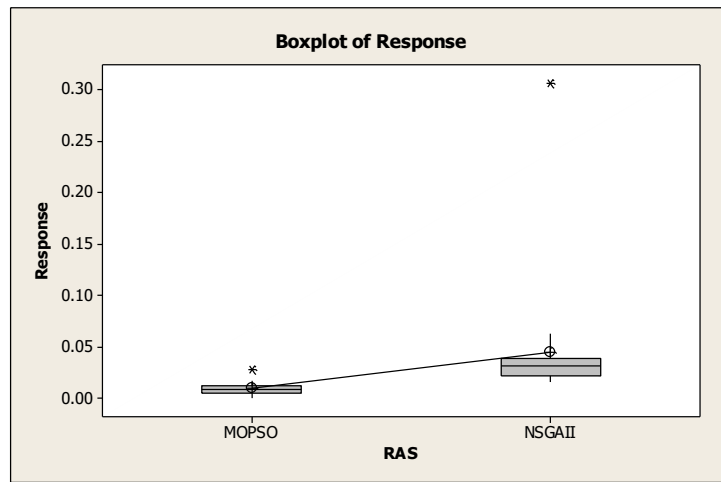
Figure 12- Output from ANOVA test.

آنالیز واریانس برای شاخص *MID*. با توجه به آزمون فرض که اگر مقدار $\alpha \geq P\text{-Value}$ باشد اختلاف معنادار بین الگوریتم‌ها وجود دارد و اگر خلاف این باشد فرض H_0 مبنی بر برابر بودن میانگین جامعه و نداشتن اختلاف معنادار پذیرفته می‌شود. با توجه به خروجی نرم‌افزار Minitab مقدار $P\text{-Value} = 0.769$ است که فرض H_0 رد می‌شود و از نظر شاخص *MID* اختلاف معناداری میان الگوریتم‌ها وجود دارد. شکل ۱۳ نیز این موضوع را تأیید می‌کند. ماهیت شاخص *MID* به گونه‌ای هست که هر چه کمتر باشد بهتر است. قابل ذکر است که الگوریتم *MOPSO* این پژوهش از نظر این شاخص بهتر از الگوریتم *NSGA-II* است.

آنالیز واریانس برای شاخص *RAS*. با توجه به جدول ۱۷ و آزمون فرض که اگر مقدار $\alpha \geq P\text{-Value}$ باشد اختلاف معنادار بین الگوریتم‌ها وجود دارد و اگر خلاف این باشد فرض H_0 مبنی بر برابر بودن میانگین جامعه و نداشتن اختلاف معنادار پذیرفته می‌شود. با توجه به خروجی نرم‌افزار Minitab مقدار $P\text{-Value} = 0.009$ است که فرض H_0 رد و از نظر شاخص *RAS* اختلاف معناداری میان الگوریتم‌ها وجود دارد و الگوریتم *MOPSO* عملکرد بهتری دارد.

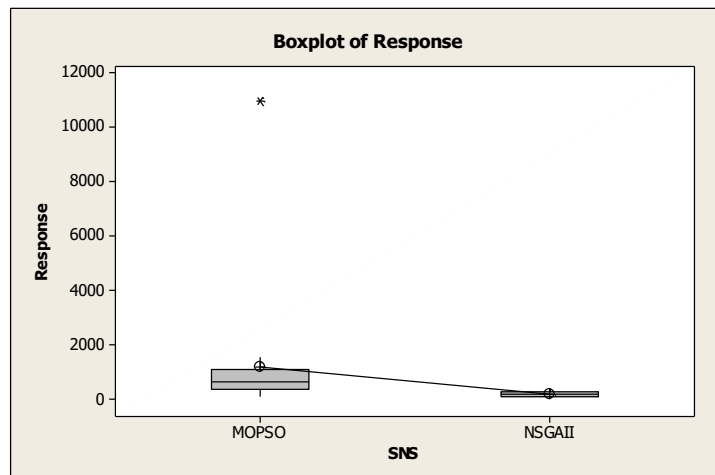


شکل ۱۳- خروجی حاصل از آزمون آنووا.
Figure 13- Output from ANOVA test.



شکل ۱۴ - خروجی حاصل از آزمون آنووا.
Figure 14- Output from ANOVA test.

آنالیز واریانس برای شاخص *SNS*. بررسی شاخص *SNS* نیز با توجه به ماهیت آن و مقدار $P = 0.048$ سنجیده می شود که الگوریتم *MOPSO* عملکرد بهتری دارد.



شکل ۱۵ - خروجی حاصل از آزمون آنووا.
Figure 15- Output from ANOVA test.



در این پژوهش هدف طراحی زنجیره‌ای تأمین در جهت روبه‌جلو شامل مراکز تأمین‌کننده، مراکز تولید-بازیابی، مراکز توزیع/مراکز ترکیبی و مشتریان اولیه بوده و همچنین در جهت معکوس شامل مراکز جمع‌آوری/مراکز ترکیبی، مراکز دفع، مراکز تعمیر و مشتریان ثانویه بوده است. هدف اصلی این مدل به‌طور هم‌زمان حداکثر کردن سود و مسئولیت اجتماعی شبکه زنجیره تأمین تحت شرایط قطعیت و عدم قطعیت بوده، درحالی‌که تأخیر کل در زمان تحویل و آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز کمینه گردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص گردید که مدل پیشنهادی قابلیت ارائه جواب پارتوی مؤثر توسط روش محدودیت افسیلون تقویت‌شده قوی را دارد. به همین ترتیب سیاست‌های بهینه تحت شرایط قطعی و غیرقطعی مورد آنالیز قرار گرفت و بر اساس تفاوت حاصل مابین جواب‌های قطعی و غیرقطعی مشخص گردید که تحلیل شرایط غیرقطعی نقش بسیار مهمی در طراحی شبکه برای مدیران دارد. در واقع، در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و زمان تحویل از جمله مؤلفه‌های جدایی‌ناپذیر در مسئله است و در نظر گرفتن میزان منابع در دسترس جهت یافتن جوابی موجه در سیستم از جمله ضروریات است.

همچنین مدیران کارخانه می‌توانند تصمیم بگیرند که چه مقدار از فروش محصولات خود را به‌صورت مستقیم و چه مقدار از آن را از کانال‌های فروش سنتی به مشتریان خود ارائه دهند؛ و وجود کانال فروش به‌صورت مستقیم به مدیران کمک می‌کند تا پایداری زنجیره را بیشتر ارتقاء دهند. به‌علاوه با توجه به محدودیت استفاده از وسایل نقلیه، به کار بردن این فناوری RFID در زنجیره تأمین به شرکا این امکان را می‌دهد که به‌راحتی بدانند یک محصول در چه مکانی از حیات خود قرار داشته، مکان فعلی آن کجاست و به کجا خواهد رسید و همچنین موجب کاهش وقفه‌های زمانی در حمل‌ونقل و تحویل به‌موقع سفارش و حمل‌ونقل سریع‌تر و حذف حمل‌ونقل‌های نادرست و موجب کوتاه‌تر شدن زنجیره سفارش خواهد شد و طور کلی موجب می‌شود تا مدیران به‌موقع و با اطمینان بیشتر تصمیمات خود را بگیرند.

از سوی دیگر جهت مطالعه شدت تأثیرگذاری پارامترهای استواری و همچنین آنالیز استواری جواب و استواری مدل، آنالیز حساسیت پارامترهای λ_1 ، λ_2 ، λ_3 و w انجام گرفت. رفتار توابع هدف در برابر هر یک از پارامترهای استواری متفاوت بوده که گاهی تا حدود ۱۰۰٪ کاهش یا افزایش را به وجود آورده است. ضروری است تا مدیریت، سطح مناسبی از منابع موردنیاز و پشتیبان را در شرایط عدم قطعیت لحاظ کند تا آمادگی لازم برای مقابله با حجم زیادی از تغییرات در اثر عدم قطعیت را داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

طراحی شبکه زنجیره تأمین یکی از تصمیمات سطح استراتژیک مباحث مدیریت زنجیره تأمین است و طراحی بهینه و مناسب شبکه زنجیره تأمین، اثرات زیادی بر روی عملکرد، بهره‌وری و اثربخشی زنجیره‌های تأمین در رسیدن به اهداف مورد انتظار و برآورده سازی نیازهای مشتریان دارد. در این راستا، در این مقاله، به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار چابک چند رده‌ای، چندمحصولی و چند دوره‌ای و چندهدفه با در نظر گرفتن کانال‌های فروش متفاوت و فناوری سیستم شناسایی فرکانس رادیویی طراحی شده است که به کار بردن این فناوری سیستم شناسایی فرکانس رادیویی در زنجیره تأمین به شرکا این امکان را می‌دهد که به‌راحتی بدانند یک محصول در چه مکانی از حیات خود قرار داشته، مکان فعلی آن کجاست و به کجا خواهد رسید و همچنین موجب کاهش وقفه‌های زمانی در حمل‌ونقل و تحویل به‌موقع سفارش و حمل‌ونقل سریع‌تر و حذف حمل‌ونقل‌های نادرست و موجب کوتاه‌تر شدن زنجیره سفارش خواهد شد. به‌علاوه این مدل به‌طور هم‌زمان به دنبال حداکثر کردن سود و مسئولیت اجتماعی شبکه زنجیره تأمین است درحالی‌که تأخیر کل در زمان تحویل و آلودگی‌های زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند و همچنین برای مواجهه با نوسانات تقاضای مشتریان اولیه و ثانویه و زمان تحویل از برنامه‌ریزی استوار تصادفی سناریو محور استفاده گردید. به دلیل وجود چهار تابع هدف در مدل، برای حل مدل از روش افسیلون محدودیت تعمیم‌یافته قوی استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل، دو مسئله طراحی گردید و در نهایت مدل‌های قطعی و استوار در سه سناریو برای هر مسئله در نرم‌افزار گمز کد نویسی و حل گردید و نتایج و تجزیه‌وتحلیل آن ارائه شد. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده‌ی برتری این مدل است که می‌تواند با در نظر گرفتن عدم قطعیتی که در بعضی از پارامترها وجود دارد مدلی بهینه از لحاظ دستیابی به سود و مسئولیت اجتماعی و کاهش تأخیر در زمان تحویل و آلودگی‌های زیست‌محیطی ارائه دهد و همچنین تعیین می‌کند که کدامیک از تأمین‌کنندگان، کدامیک از مراکز بالقوه تولید-بازیابی، توزیع/ترکیبی، جمع‌آوری/ترکیبی، تعمیر و دفع و کدام سیستم حمل‌ونقل با چه فناوری RFID ایی به کار گرفته شوند و مقدار محصولات حمل شده و موجودی بین هریک از تسهیلات چه مقدار خواهد بود. در این مدل استوار، با به‌کارگیری رویکرد استوار تصادفی سناریو محور، مشکلات مدل‌های غیرقطعی که جواب‌ها نشدنی یا غیر بهینه بودند حل شده است و برای مسائل واقعی نیز



قابل پیاده‌سازی است. در نهایت برای مشاهده رفتار تابع هدف در مقابل تغییرات پارامترها، به اجرای تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای استوار سازی مسئله (استواری جواب و استواری مدل) پرداخته شد و نتایج آن نیز بیان گردید. در ادامه برای حل مدل در ابعاد بزرگ‌تر از دو الگوریتم *MOPSO* و *NSGA-II* استفاده گردید و نتایج آن‌ها با هم مقایسه گردید و در نهایت مشخص گردید که الگوریتم *MOPSO* عملکرد بهتری نسبت به *NSGA-II* دارد. به لحاظ کاربرد این زنجیره تأمین طراحی شده، قابلیت به‌کارگیری در انواع صنایع مختلف و شرکت‌های تولیدی که مواد اولیه و محصولات حاصل از آن قابلیت بازیابی یا نو شدن و همچنین ویژگی تعمیر پذیری را داشته باشند، دارد و همچنین ابزاری برای محققان برای بررسی مسائل جالب تحقیق است.

علاوه بر این، چندین موضوع برای تحقیقات آینده در نظر گرفته می‌شود:

- گسترش ویژگی‌های موجود در مدل این مقاله یا تلفیق ویژگی‌های بیشتر در مدل تا به‌واسطه آن به سناریوهای عملی نزدیک‌تر شود.
- برای تحقیقات آتی می‌توان سیاست‌های جدید کاهش کربن و تولید محصولات سبز و تخفیف در خرید مواد اولیه و محصولات را در نظر گرفت.
- بررسی پارامترهای غیرقطعی با رویکرد برنامه‌ریزی استوار تصادفی سناریو محور و قابلیت اطمینان اجزای موجود به‌صورت توأمان در این مدل پیشنهادی را می‌توان به کار گرفت.
- روش‌های کارآمد دقیق یا فراابتکاری برای مسائل بزرگ در این زمینه را می‌توان توسعه یا به کار گرفت.

تشکر و قدردانی

از کلیه اساتید محترم مربوطه که در انجام پژوهش حاضر کمک نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مالی

پژوهش حاضر از سوی هیچ سازمانی مورد حمایت مالی قرار نگرفته است.

تعارض با منافع

نویسندگان مقاله اظهار داشتند که تضاد منافی وجود ندارد.

منابع

- Abdolazimi, O., Esfandarani, M. S., Salehi, M., & Shishebori, D. (2020). Robust design of a multi-objective closed-loop supply chain by integrating on-time delivery, cost, and environmental aspects, case study of a Tire Factory. *Journal of cleaner production*, 264, 121566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121566>
- Ahmed, W., & Sarkar, B. (2018). Impact of carbon emissions in a sustainable supply chain management for a second generation biofuel. *Journal of cleaner production*, 186, 807-820. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.289>
- Ashton, K. (1999). June 22. That 'Internet of Things' thing. *RFID Journal*. Retrieved from <https://www.itrc.jp/libraries/RFIDjournal-That%20Internet%20of%20Things%20Thing.pdf>
- Atabaki, M. S., Mohammadi, M., & Naderi, B. (2020). New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: towards a circular economy. *Computers & industrial engineering*, 146, 106520. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106520>
- Behzadi, M., & Seifabrghy, M. (2018). Two-stage and robust stochastic optimization of closed-loop supply chain network under uncertainty. *Journal of production and operations management*, 9(2), 77-97. DOI: 10.22108/jpom.2017.92475
- Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahrour, Z. (2019). Internet of things and supply chain management: a literature review. *International journal of production research*, 57(15-16), 4719-4742. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402140>
- Calatayud, A., Mangan, J., & Christopher, M. (2018). The self-thinking supply chain. *Supply chain management: an international journal*, 24(1), 22-38. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0136>
- Chanchaichujit, J., Balasubramanian, S., & Charmaine, N. S. M. (2020). A literature review on the benefit-drivers of RFID implementation in supply chains and its impact on organizational competitive advantage. *Cogent business & management*, 7(1), 1818408. <https://doi.org/10.1080/23311975.2020.1818408>
- Chen, C., Zhang, G., & Xia, Y. (2019). Remanufacturing network design for dual-channel closed-loop supply chain. *Procedia CIRP*, 83, 479-484. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.132>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017
- Eberhart, R. C., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*. IEEE. DOI:10.1109/MHS.1995.494215



- Fallahpour, A., Nayeri, S., Sheikhalishahi, M., Wong, K. Y., Tian, G., & Fathollahi-Fard, A. M. (2021). A hyper-hybrid fuzzy decision-making framework for the sustainable-resilient supplier selection problem: a case study of Malaysian Palm oil industry. *Environmental science and pollution research*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12491-y>
- Fallahpour, A., Wong, K. Y., Rajoo, S., Fathollahi-Fard, A. M., Antucheviciene, J., & Nayeri, S. (2021). An integrated approach for a sustainable supplier selection based on Industry 4.0 concept. *Environmental science and pollution research*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17445-y>
- Fathollahi-Fard, A. M., Ahmadi, A., & Al-e-Hashem, S. M. (2020). Sustainable closed-loop supply chain network for an integrated water supply and wastewater collection system under uncertainty. *Journal of environmental management*, 275, 111277. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111277>
- Fathollahi-Fard, A. M., Dulebenets, M. A., Hajiaghayi-Keshteli, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaeian, M., & Mirzahasseinian, H. (2021). Two hybrid meta-heuristic algorithms for a dual-channel closed-loop supply chain network design problem in the tire industry under uncertainty. *Advanced engineering informatics*, 50, 101418. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101418>
- Ghahremani Nahr, J. (2020). Improvement the efficiency and efficiency of the closed loop supply chain: whale optimization algorithm and novel priority-based encoding approach. *Journal of decisions and operations research*, 4(4), 299-315. (In Persian). DOI: 10.22105/dmor.2020.206930.1132
- Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Najafi, S. E. (2020). Design a green closed loop supply chain network by considering discount under uncertainty. *Journal of applied research on industrial engineering*, 7(3), 238-266. DOI: 10.22105/jarie.2020.251240.1198
- Gholizadeh, H., & Fazlollahabbar, H. (2020). Robust optimization and modified genetic algorithm for a closed loop green supply chain under uncertainty: case study in melting industry. *Computers & industrial engineering*, 147, 106653. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106653>
- Gholizadeh, H., Tajdin, A., & Javadian, N. (2020). A closed-loop supply chain robust optimization for disposable appliances. *Neural computing and applications*, 32(8), 3967-3985. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3847-9>
- Gholizadeh, H., Tajdin, A., Javadian, N. J. N. C., & Applications. (2018). A closed-loop supply chain robust optimization for disposable appliances. *Neural Comput & Applic*, 32, 3967-3985. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3847-9>
- Hajipour, V., Tavana, M., Di Caprio, D., Akhgar, M., & Jabbari, Y. (2019). An optimization model for traceable closed-loop supply chain networks. *Applied mathematical modelling*, 71, 673-699. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.03.007>
- Ho, C. J. (1989). Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. *The international journal of production research*, 27(7), 1115-1135. <https://doi.org/10.1080/00207548908942611>
- Huang, S. M., & Su, J. C. (2013). Impact of product proliferation on the reverse supply chain. *Omega*, 41(3), 626-639. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.08.003>
- Jolai, F., Asefi, H., Rabiee, M., & Ramezani, P. (2013). Bi-objective simulated annealing approaches for no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem. *Scientia iranica*, 20(3), 861-872. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.10.044>
- Kaoud, E., Abdel-Aal, M. A., Sakaguchi, T., & Uchiyama, N. (2020). Design and optimization of the dual-channel closed loop supply chain with e-commerce. *Sustainability*, 12(23), 10117. <https://doi.org/10.3390/su122310117>
- Kim, T., & Glock, C. H. (2014). On the use of RFID in the management of reusable containers in closed-loop supply chains under stochastic container return quantities. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 64, 12-27. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.01.011>
- Mahtab, Z., Azeem, A., Ali, S. M., Paul, S. K., & Fathollahi-Fard, A. M. (2021). Multi-objective robust-stochastic optimisation of relief goods distribution under uncertainty: a real-life case study. *International journal of systems science: operations & logistics*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/23302674.2021.1879305>
- Marzband, A. (2020). Precise services and supply chain prioritization in manufacturing companies using cost analysis provided in a fuzzy environment. *Journal of fuzzy extension and applications*, 1(1), 42-59. 41-56. DOI: 10.22105/jfea.2020.248187.1006
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management-A review. *European journal of operational research*, 196(2), 401-412. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007>
- Mohammadi, M., & Soleimani, H. (2020). Investigating open loop and closed-loop supply chain under uncertainty (case study: Iran transfo company). *Journal of industrial management perspective*, 10 (38), 33-53. DOI: 10.52547/JIMP.10.2.33
- Mojtahedi, M., Fathollahi-Fard, A. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Newton, S. (2021). Sustainable vehicle routing problem for coordinated solid waste management. *Journal of industrial information integration*, 23, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100220>
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281. <https://doi.org/10.1287/opre.43.2.264>
- Nikas, A., Fountoulakis, A., Forouli, A., & Doukas, H. (2020). A robust augmented ϵ -constraint method (AUGMECON-R) for finding exact solutions of multi-objective linear programming problems. *Operational research*, 1-42. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00574-6>
- Nozari, H., Fallah, M., & Szmelter-Jarosz, A. (2021). A conceptual framework of green smart IoT-based supply chain management. *International journal of research in industrial engineering*, 10(1), 22-34. DOI: 10.22105/rirej.2021.274859.1189
- Pasha, J., Dulebenets, M. A., Fathollahi-Fard, A. M., Tian, G., Lau, Y. Y., Singh, P., & Liang, B. (2021). An integrated optimization method for tactical-level planning in liner shipping with heterogeneous ship fleet and environmental considerations. *Advanced engineering informatics*, 48, 101299. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101299>
- Paydar, M. M., Babaveisi, V., & Safaei, A. S. (2017). An engine oil closed-loop supply chain design considering collection risk. *Computers & chemical engineering*, 104, 38-55. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.04.005>
- Paydar, M. M., Yousefi Babadi, A., & Davoodi, A. (2015). Designing an integrated direct and reverse logistic robust optimization model under uncertainty. *Iranian journal of supply chain management*, 17(47), 4-15. (In Persian). https://scmj.ihu.ac.ir/article_203553.html?lang=fa



- Rahmani, D., Abadi, M. Q. H., & Hosseinezhad, S. J. (2020). Joint decision on product greenness strategies and pricing in a dual-channel supply chain: a robust possibilistic approach. *Journal of cleaner production*, 256, 120437.
- Ramezani, M., Kimiagari, A. M., Karimi, B., & Hejazi, T. H. (2014). Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment. *Knowledge-based systems*, 59, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.01.016>
- Ranjbar, Y., & Sahebi, H. (2020). The pricing and collection decisions in the closed-loop supply chain with dual competitive recycling channels under different channel leadership. *Journal of industrial engineering research in production systems*, 7(15), 377-393. DOI: [10.22084/ier.2020.19410.1865](https://doi.org/10.22084/ier.2020.19410.1865)
- Ross, D. F., Weston, F. S., & Stephen, W. (2010). *Introduction to supply chain management technologies*. Crc Press.
- Ruimin, M. A., Lifei, Y. A. O., Maozhu, J. I. N., Peiyu, R. E. N., & Zhihan, L. V. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, solitons & fractals*, 89, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.10.028>
- Safaei, A. S., Roozbeh, A., & Paydar, M. M. (2017). A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. *Journal of cleaner production*, 166, 1154-1168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.085>
- Saffari, H., Makui, A., Mahmoodian, V., & Pishvae, M. S. (2015). Multi-objective robust optimization model for social responsible closed-loop supply chain solved by non-dominated sorting genetic algorithm. *Journal of industrial and systems engineering*, 8(3), 42-58.
- Samuel, C. N., Venkatadri, U., Diallo, C., & Khatib, A. (2020). Robust closed-loop supply chain design with presorting, return quality and carbon emission considerations. *Journal of cleaner production*, 247, 119086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119086>
- Theophilus, O., Dulebenets, M. A., Pasha, J., Lau, Y. Y., Fathollahi-Fard, A. M., & Mazaheri, A. (2021). Truck scheduling optimization at a cold-chain cross-docking terminal with product perishability considerations. *Computers & industrial engineering*, 156, 107240. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107240>
- Zahedi, A., Salehi-Amiri, A., Smith, N. R., & Hajiaghahi-Keshтели, M. (2021). Utilizing IoT to design a relief supply chain network for the SARS-COV-2 pandemic. *Applied soft computing*, 104, 107210. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107210>

ضمایم

بخش ۱. تعریف مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله در حالت قطعی

اندیس‌ها.

- b : اندیس مکان‌های ثابت تأمین‌کننده‌ها $b = 1, 2, \dots, B$
- i : اندیس مکان‌های بالقوه مراکز تولید-بازیابی $i = 1, 2, \dots, I$
- j : اندیس مکان‌های بالقوه برای مراکز توزیع و جمع‌آوری و مراکز ترکیبی $j = 1, 2, \dots, J$
- c : اندیس مکان‌های ثابت مشتریان اولیه $c = 1, 2, \dots, C$
- k : اندیس مراکز بالقوه دفع محصولات $k = 1, 2, \dots, K$
- m : اندیس مکان‌های بالقوه مراکز تعمیر $m = 1, 2, \dots, M$
- f : اندیس مکان‌های ثابت مشتریان ثانویه $f = 1, 2, \dots, F$
- p : اندیس محصولات $p = 1, 2, \dots, P$
- r : اندیس مواد خام $r = 1, 2, \dots, R$
- l : اندیس دستگاه‌های حمل‌ونقل $l = 1, 2, \dots, L$
- t : اندیس دوره‌های زمانی $t = 1, 2, \dots, T$
- h : اندیس تکنولوژی‌های تولیدی $h = 1, 2, \dots, H$
- o : اندیس نوع سیستم RFID مورد استفاده در سیستم‌های حمل‌ونقل $o = 1, 2, \dots, O$

پارامترها.

- D_{cp}^t : تقاضای مشتری اولیه c برای محصول p در دوره t .
- D_{fp}^t : تقاضای مشتری ثانویه f برای محصول p در دوره t .
- PR_{cp}^t : قیمت فروش هر واحد محصول p به مشتری اولیه c در دوره t .
- PR_{fp}^t : قیمت فروش هر واحد محصول p به مشتری ثانویه f در دوره t .
- BC_{br}^t : هزینه واحد خرید ماده خام r از تأمین‌کننده b در دوره t .
- MC_{iph}^t : هزینه واحد تولید محصول p در مرکز تولید-بازیابی i با تکنولوژی نوع h در دوره t .



OC_{jp}^t : هزینه واحد عملیات بر روی محصول p در مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z در دوره t .

OC_{mp}^t : هزینه واحد عملیات تعمیر بر روی محصول p در مرکز تعمیر m در دوره t .

IC_{jp}^t : هزینه واحد بازرسی و جمع‌آوری محصول p برگشتی در مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z در دوره t .

RC_{iph}^t : هزینه واحد بازیابی محصول P در مرکز تولید-بازیابی i با تکنولوژی نوع h در دوره t .

DC_{kp}^t : هزینه واحد دفع محصول p در مرکز دفع k در دوره t .

HC_{jp}^t : هزینه واحد نگهداری موجودی محصول p در مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z در دوره t .

FB_b^t : هزینه ثابت انتخاب یک تأمین‌کننده b در دوره t .

FX_{ih}^t : هزینه ثابت باز بودن مرکز تولید-بازیابی i با تکنولوژی نوع h در دوره t .

FY_j^t : هزینه ثابت باز بودن مرکز توزیع z در دوره t .

FZ_j^t : هزینه ثابت باز بودن مرکز جمع‌آوری z در دوره t .

FU_j^t : هزینه ثابت باز بودن مرکز ترکیبی z در دوره t .

FV_k^t : هزینه ثابت باز بودن مرکز دفع k در دوره t .

FM_m^t : هزینه ثابت باز بودن مرکز تعمیر m در دوره t .

CB_{br}^t : ظرفیت تأمین‌کننده b برای مواد خام r در دوره t .

CX_{ih}^t : ظرفیت تولید در مرکز تولید-بازیابی i با تکنولوژی نوع h در دوره t .

CY_j^t : ظرفیت مرکز توزیع z در دوره t .

CZ_j^t : ظرفیت مرکز جمع‌آوری z در دوره t .

CU_j^t : ظرفیت مرکز ترکیبی z در دوره t .

CR_{ih}^t : ظرفیت مرکز تولید-بازیابی i برای بازیابی محصولات برگشتی با تکنولوژی نوع h در دوره t .

CV_k^t : ظرفیت مرکز دفع k در دوره t .

CM_m^t : ظرفیت مرکز تعمیر m در دوره t .

CBI_{bir}^t : هزینه واحد انتقال ماده خام r حمل شده از تأمین‌کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

CIJ_{ijpl}^t : هزینه واحد انتقال محصول p حمل شده از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

CIC_{icpl}^t : هزینه واحد انتقال محصول p حمل شده از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

CJC_{jcpl}^t : هزینه واحد انتقال محصول p حمل شده از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

CCJ_{cjpl}^t : هزینه واحد انتقال محصول برگشتی p حمل شده از مشتری c به مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

t .

CJI_{jipl}^t : هزینه واحد انتقال محصول p بازرسی شده حمل شده از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تولید-بازیابی i برای بازیابی با

سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

CJK_{jkpl}^t : هزینه واحد انتقال محصول p حمل شده از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز دفع k در دوره t .

CJM_{jmpl}^t : هزینه واحد انتقال محصول p حمل شده از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تعمیر m در دوره t .

CMF_{mfpl}^t : هزینه واحد انتقال محصول p حمل شده از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

EBI_{bir}^t : آلودگی زیست‌محیطی حاصل از انتقال مواد اولیه r از تأمین‌کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .



- EIJ_{ijpl}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از انتقال محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j با سیستم حمل و نقل l در دوره t .
- EIC_{icpl}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از انتقال محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل و نقل l در دوره t .
- EJC_{jcpl}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از انتقال محصول p از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j به مشتری c با سیستم حمل و نقل l در دوره t .
- ECJ_{cjpl}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از انتقال محصول p از مشتری c به مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j با سیستم حمل و نقل l در دوره t .
- EJI_{jipl}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از انتقال محصول p از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز تولید-بازیابی i برای بازیابی با سیستم حمل و نقل l در دوره t .
- EJK_{jkpl}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از انتقال محصول p از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز دفع k برای دفع با سیستم حمل و نقل l در دوره t .
- EJM_{jmpl}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از انتقال محصول p از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز تعمیر m با سیستم حمل و نقل l در دوره t .
- EMF_{mfpl}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از انتقال محصول p از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل و نقل l در دوره t .
- EP_{iph}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از تولید محصول p در مرکز تولید-بازیابی i با تکنولوژی نوع h .
- ER_{mp}^t : آلودگی زیست محیطی حاصل از تعمیر محصول p در مرکز تعمیر m .
- TBI_{birlo}^t : زمان تحویل مواد اولیه r از تأمین کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TJI_{ijplo}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TIC_{icplo}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TJC_{jcplo}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j به مشتری c با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TCJ_{cjplo}^t : زمان تحویل محصول p از مشتری c به مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TJI_{jiplo}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز تولید-بازیابی i برای بازیابی با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o در دوره t .
- TJK_{jkpl}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز دفع k با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TJM_{jmplo}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز تعمیر m با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TMF_{mfplo}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TBI_{irlo}^t : زمان تحویل مورد انتظار مواد اولیه r از تأمین کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TJI_{jpllo}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .



- TIC_{cplo}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TJC_{cplo}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TCJ_{jpl}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مشتری c به مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TJI_{iplo}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تولید-بازیابی i برای بازیابی با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o در دوره t .
- TJK_{kpl}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز دفع k با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TJM_{mplo}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تعمیر m با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- TMF_{fpl}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o در دوره t .
- FBI_{birlo}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم RFID نوع o برای ارسال از تأمین‌کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- FIJ_{ijplo}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم RFID نوع o برای ارسال از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- FIC_{icplo}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم RFID نوع o برای ارسال از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- FJC_{jcplo}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم RFID نوع o برای ارسال از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- FCJ_{cjpl}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم RFID نوع o برای ارسال از مشتری c به مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- FJI_{jiplo}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم RFID نوع o برای ارسال از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تولید-بازیابی i برای بازیابی با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- FJK_{jkpl}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم حمل‌ونقل l برای ارسال از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز دفع در دوره t .
- FJM_{jmplo}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم RFID نوع o برای ارسال محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تعمیر m با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- FMF_{mfpl}^t : هزینه ثابت به‌کارگیری سیستم RFID نوع o برای ارسال محصول p از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم RFID نوع o ، در دوره t .
- WX_{ih}^t : تعداد فرصت‌های شغلی درازای فعالیت مرکز تولید-بازیابی i با تکنولوژی نوع h در دوره t .
- WY_j^t : تعداد فرصت‌های شغلی درازای فعالیت یک مرکز توزیع در نقطه z در دوره t .
- WZ_j^t : تعداد فرصت‌های شغلی درازای فعالیت یک مرکز جمع‌آوری در نقطه z در دوره t .
- WU_j^t : تعداد فرصت‌های شغلی درازای فعالیت یک مرکز ترکیبی در نقطه z در دوره t .



WV_k^t : تعداد فرصت‌های شغلی درازای فعالیت یک مرکز دفع در نقطه k در دوره t .

WM_m^t : تعداد فرصت‌های شغلی درازای فعالیت یک مرکز تعمیر در نقطه m در دوره t .

DX_{ih}^t : میزان توسعه اقتصادی درازای فعالیت مرکز تولید-بازیابی i با تکنولوژی h در دوره t .

DY_j^t : میزان توسعه اقتصادی درازای فعالیت یک مرکز توزیع در نقطه j در دوره t .

DZ_j^t : میزان توسعه اقتصادی درازای فعالیت یک مرکز جمع‌آوری در نقطه j در دوره t .

DU_j^t : میزان توسعه اقتصادی درازای فعالیت یک مرکز ترکیبی در نقطه j در دوره t .

DV_k^t : میزان توسعه اقتصادی درازای فعالیت یک مرکز دفع در نقطه k در دوره t .

DM_m^t : میزان توسعه اقتصادی درازای فعالیت یک مرکز تعمیر در نقطه m در دوره t .

n_{rp} : ضریب (نرخ یا میزان) استفاده از ماده خام r در تولید محصول p .

m_p : نرخ استفاده از ظرفیت در هر واحد تولید محصول p .

$mcont_t$: میزان احتمال فرا داد سفارش با مراکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تولید-بازیابی i ، در دوره t .

RR_p : نرخ بازگشت محصول استفاده شده p .

RXi_p : نرخ بازتولید محصول استفاده شده p .

RXm_p : نرخ تعمیر محصول استفاده شده p .

RXd_p : نرخ دفع محصول استفاده شده p .

β : ضریب وزنی اهمیت (پاسخگویی) زنجیره رفت.

$1-\beta$: ضریب وزنی اهمیت (پاسخگویی) زنجیره برگشت.

ζ_1 : ضریب بی مقیاس سازی تعداد مشاغل ایجاد شده در شاخص مسئولیت اجتماعی.

ζ_2 : ضریب بی مقیاس سازی میزان توسعه اقتصادی در شاخص مسئولیت اجتماعی.

BM : یک عدد خیلی بزرگ.

$$M1_{irlo}^t = \left\{ b \mid TBI_{birlo}^t \geq TBI_{irlo}^t \right\}$$

$$M2_{jpl}^t = \left\{ i \mid TIJ_{ijpl}^t \geq TIJ_{jpl}^t \right\}$$

$$M3_{cpl}^t = \left\{ i \mid TIC_{icpl}^t \geq TIC_{cpl}^t \right\}$$

$$M4_{cpl}^t = \left\{ j \mid TJC_{jcpl}^t \geq TJC_{cpl}^t \right\}$$

$$M6_{jpl}^t = \left\{ c \mid TCJ_{cjpl}^t \geq TCJ_{jpl}^t \right\}$$

$$M6_{iplo}^t = \left\{ j \mid TJI_{jiplo}^t \geq TJI_{iplo}^t \right\}$$

$$M7_{kplo}^t = \left\{ j \mid TJK_{jkplo}^t \geq TJK_{kplo}^t \right\}$$

$$M8_{mplo}^t = \left\{ j \mid TJM_{jmplo}^t \geq TJM_{mplo}^t \right\}$$

$$M9_{fplo}^t = \left\{ m \mid TMF_{mflo}^t \geq TMF_{fplo}^t \right\}$$

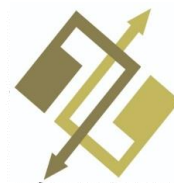
متغیرهای تصمیم.

$$QBI_{bir}^t$$
: مقدار ماده خام r حمل شده از تأمین‌کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

$$QIJ_{ijpl}^t$$
: مقدار محصول p حمل شده از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

$$QIC_{icpl}^t$$
: مقدار محصول p حمل شده از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .

$$QJC_{jcpl}^t$$
: مقدار محصول p حمل شده از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l در دوره t .



QCJ_{cjp}^t : مقدار محصولات p برگشتی حمل شده از مشتری c به مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی j با سیستم حمل و نقل l در دوره t .

QJI_{jip}^t : مقدار محصولات نوع p حمل شده از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل و نقل l در دوره t .

QJK_{jkp}^t : مقدار محصولات قابل بازیابی نوع p حمل شده از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز دفع k با سیستم حمل و نقل l در دوره t .

QJM_{jmp}^t : مقدار محصولات قابل تعمیر نوع p حمل شده از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز تعمیر m با سیستم حمل و نقل l در دوره t .

QMF_{mfp}^t : مقدار محصولات قابل تعمیر شده نوع p حمل شده از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل و نقل l در دوره t .

INV_{jp}^t : موجودی محصول p در مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j در پایان دوره t .

B_b^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر تأمین‌کننده b در دوره t انتخاب شود، در غیر این صورت ۰.

X_{ih}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر مرکز تولید-بازیابی i با فناوری h در دوره t باز باشد، در غیر این صورت ۰.

Y_j^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر در نقطه z در دوره t ، مرکز توزیع باز باشد، در غیر این صورت ۰.

Z_j^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر در نقطه z در دوره t ، مرکز جمع‌آوری باز باشد، در غیر این صورت ۰.

U_j^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر در نقطه z در دوره t ، یک مرکز ترکیبی باز باشد، در غیر این صورت ۰.

V_k^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر در نقطه k در دوره t ، مرکز دفع باز باشد، در غیر این صورت ۰.

VM_m^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر در نقطه M در دوره t ، مرکز تعمیر باز باشد، در غیر این صورت ۰.

OBI_{bilo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، تأمین‌کننده b را به مرکز تولید-بازیابی i در دوره t به هم متصل کند، در غیر این صورت ۰.

OIJ_{ijlo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، مرکز تولید-بازیابی i و مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j را در دوره t به هم متصل کند، در غیر این صورت ۰.

OIC_{iclo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، مرکز تولید-بازیابی i را به مشتری c در دوره t متصل کند، در غیر این صورت ۰.

OMF_{mflo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f در دوره t متصل کند، در غیر این صورت ۰.

OJC_{jclo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j را به مشتری c در دوره t متصل کند، در غیر این صورت ۰.

OCJ_{cjlo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، مشتری c را به مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی j در دوره t متصل کند، در غیر این صورت ۰.

OJI_{jilo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی j را به مرکز تولید-بازیابی i در دوره t متصل کند، در غیر این صورت ۰.

OJK_{jklo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی j را به مرکز دفع k در دوره t متصل کند، در غیر این صورت ۰.

OJM_{jmlo}^t : متغیر باینری برابر ۱ اگر سیستم حمل و نقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی j را به مرکز تعمیر m در دوره t متصل کند، در غیر این صورت ۰.

بخش ۲. تعریف مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله در حالت استوار

s : سناریو فرآورده شدن تقاضا $S, 1, \dots, s$.

پارامترها.

D_{cp}^t : تقاضای مشتری اولیه c برای محصول p در دوره t تحت سناریو s .

D_{fp}^t : تقاضای مشتری ثانویه f برای محصول p در دوره t تحت سناریو s .

TBI_{birlos}^t : زمان تحویل مواد اولیه r از تأمین‌کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TIJ_{jiplos}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، در دوره t تحت سناریو s .

TIC_{icplos}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TJC_{jiplos}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TCJ_{icplos}^t : زمان تحویل محصول p از مشتری c به مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، در دوره t تحت سناریو s .

TJI_{jiplos}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تولید-بازیابی i برای بازیابی با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TJK_{jkpls}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز دفع k با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، در دوره t تحت سناریو s .

$TJM_{jimplos}^t$: زمان تحویل محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تعمیر m با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، در دوره t تحت سناریو s .

TME_{mfplos}^t : زمان تحویل محصول p از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TBI_{irlos}^t : زمان تحویل مورد انتظار مواد اولیه r از تأمین‌کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، در دوره t تحت سناریو s .

TIJ_{jiplos}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، در دوره t تحت سناریو s .

TIC_{cplos}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TJC_{cplos}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی z به مشتری c با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TCJ_{jiplos}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مشتری c به مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، در دوره t تحت سناریو s .

TJI_{jiplos}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تولید-بازیابی i برای بازیابی با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TJK_{kpls}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز دفع k با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o در دوره t تحت سناریو s .

TJM_{mplos}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز جمع‌آوری/مرکز ترکیبی z به مرکز تعمیر m با سیستم حمل‌ونقل l با سیستم $RFID$ نوع o ، در دوره t تحت سناریو s .



TMF_{fplos}^t : زمان تحویل مورد انتظار محصول p از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل و نقل l با سیستم RFID نوع o در دوره t تحت سناریو s .

p_s : احتمال رخداد سناریو s .

ω : وزن محدودیت نقض شده (هزینه جریمه هر واحد تقاضای پاسخ داده نشده).

λ : مقدار ثابت.

متغیرهای کنترل.

θ_{1s} : ضریب خطی سازی تحت سناریو s برای تابع هدف اول.

θ_{2s} : ضریب خطی سازی تحت سناریو s برای تابع هدف سوم.

θ_{3s} : ضریب خطی سازی تحت سناریو s برای تابع هدف دوم.

η_{eps}^t : میزان تقاضای برآورده نشده محصول p برای مشتری اولیه c در دور t و در سناریو s .

η_{fps}^t : میزان تقاضای برآورده نشده برای مشتری ثانویه f در دوره t در سناریو s .

متغیرهای تصمیم وابسته به سناریو.

QBI_{birds}^t : مقدار ماده خام r حمل شده از تأمین کننده b به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

QIT_{ijpls}^t : مقدار محصول p حمل شده از مرکز تولید-بازیابی i به مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

QIC_{iepls}^t : مقدار محصول p حمل شده از مرکز تولید-بازیابی i به مشتری c با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

QJC_{jepls}^t : مقدار محصول p حمل شده از مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j به مشتری c با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

QCQ_{ejpls}^t : مقدار محصولات p برگشتی حمل شده از مشتری c به مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

QJI_{ijpls}^t : مقدار محصولات نوع p حمل شده از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز تولید-بازیابی i با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

QJK_{jkpls}^t : مقدار محصولات قابل بازیابی نوع p حمل شده از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز دفع k با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

QJM_{jmpls}^t : مقدار محصولات قابل تعمیر نوع p حمل شده از مرکز جمع آوری/مرکز ترکیبی j به مرکز تعمیر m با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

QMF_{mfpls}^t : مقدار محصولات قابل تعمیر شده نوع p حمل شده از مرکز تعمیر m به مشتری ثانویه f با سیستم حمل و نقل l در دوره t تحت سناریو s .

INV_{jps}^t : موجودی محصول p در مرکز توزیع/مرکز ترکیبی j در پایان دوره t تحت سناریو s .

