



Paper Type: Original Article



Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Design: Heuristic Hybrid Approach with Considering Inflation and Carbon Emission Policies

Saeid Kalantari¹, Hamed Kazemipoor^{1,*} , Farzad Movahedi Sobhani², Seyed Mohammad Hajimolana²

¹ Department of Industrial Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; s.kalantari1989@gmail.com; hkazemipoor@yahoo.com.

² Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; f-movahedi@srbiau.ac.ir; molana@srbiau.ac.ir.

Citation:



Kalantari, S., Kazemipoor, H., Movahedi Sobhani, F., & Hajimolana, S. M. (2023). Sustainable closed-loop supply chain network design: heuristic hybrid approach with considering inflation and carbon emission policies. *Journal of decisions and operations research*, 8(4), 931-953.

Received: 22/10/2021

Reviewed: 22/11/2021

Revised: 09/12/2021

Accepted: 11/01/2022

Abstract

Purpose: Establishing the structure and expansion of sustainable closed-loop supply chains is critical to meeting environmental, economic, and social standards to strengthen their position in competitive markets. This study aims to decide on operational and tactical levels to configure the Stable Closed Chain Supply Chain Network (SCLSC) to maximize Net Present Value (NPV) and seek to minimize carbon emissions while maintaining environmentally friendly policies and considering inflation.

Methodology: This paper considers a solid Fuzzy Robust Optimization (FRO) approach to deal with stable, closed-loop supply chain uncertainties. Also, due to the complexity of the model and its multi-objective, a new combined method of Heuristic algorithm (HA) and Multi-Choice Goal Programming with Utility Function (MCGP-UF) is used. The proposed Mixed Integer Linear Programming (MILP) model is applied in the electronics industry.

Findings: The proposed model is evaluated in several experiments and discussed in different scenarios to confirm the efficiency and validity of the proposed model and method. The results were compared with the two factors of optimal gap and solution time, which showed the proper performance of the proposed method. Then, the tactical results and model strategy were presented for a case study in which the optimal flow between facilities, selection of suitable suppliers, selection of transportation type, and opening of facilities were presented. The findings showed that in different scenarios, the effective improvement of the obtained solutions by reducing the solution time by twenty percent could address large-scale problems.

Originality/Value: By considering a new combined method of heuristic algorithm and multi-choice ideal programming with a utility function, this paper is done to solve the problem of designing a stable closed-loop supply chain network under uncertainty.

Keywords: Fuzzy robust optimization, Net present value, Multi-choice goal programming with utility function, Sustainable closed-loop supply chain, Heuristic algorithm.



Corresponding Author: hkazemipoor@yahoo.com



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 شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار: رویکرد ترکیبی اکتشافی با در نظر گرفتن تورم و سیاست‌های انتشار کربن

سعید کلانتری^۱، حامد کاظمی‌پور^{۱*}، فرزاد موحدی سبحانی^۲، سید محمد حاجی مولانا^۳

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

^۲گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: ایجاد ساختار و گسترش زنجیره‌های تأمین حلقه بسته پایدار برای برآوردن استانداردهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در جهت تقویت موقعیت در بازارهای رقابتی بسیار حیاتی است. این مطالعه به منظور تصمیم‌گیری در سطوح عملیاتی و تاکتیکی برای پیکربندی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار^۱ با هدف حداکثرسازی ارزش خالص فعلی^۲ و به دنبال حداقل‌سازی میزان انتشار کربن با حفظ سیاست‌های سازگار با محیط‌زیست و در نظر گرفتن تورم انجام شده است.

روش‌شناسی پژوهش: این مقاله رویکرد بهینه‌سازی فازی استوار^۳ برای مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار را در نظر می‌گیرد. هم‌چنین به دلیل پیچیدگی مدل و چندهدفه بودن آن از یک روش جدید ترکیبی الگوریتم اکتشافی^۴ و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت^۵ استفاده می‌شود. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۶ پیشنهادی در صنعت الکترونیک اعمال می‌شود.

یافته‌ها: مدل پیشنهادی در چندین آزمایش ارزیابی شده و در سناریوهای مختلف مورد بحث قرار می‌گیرد تا کارایی و اعتبار مدل و روش پیشنهادی تایید شود. نتایج با دو عامل شکاف بهینه و زمان حل مقایسه شد که عملکرد مناسب روش پیشنهادی را نشان داد. سپس، نتایج تاکتیکی و استراتژی مدل برای مطالعه موردی ارائه شد که در آن جریان بهینه بین تسهیلات، انتخاب تأمین‌کنندگان مناسب، انتخاب نوع حمل‌ونقل و افتتاح تسهیلات ارائه شد. یافته‌ها نشان داد که در سناریوهای مختلف بهبود موثر راه‌حل‌های به‌دست‌آمده با کاهش زمان حل تا ۲۰٪ می‌تواند برای مشکلات در مقیاس بزرگ پاسخگو باشد.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: این مقاله با در نظر گرفتن یک روش ترکیبی جدید الگوریتم اکتشافی و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت برای حل مشکل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار تحت عدم قطعیت طراحی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ارزش خالص فعلی، الگوریتم اکتشافی، بهینه‌سازی فازی استوار، برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت، زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار.

۱- مقدمه

یک زنجیره‌تأمین پایدار^۷ بر اساس پارادایم سه‌گانه^۸ پیش‌بینی شده است که شامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌شود. مدیریت پایدار زنجیره‌تأمین در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از دانشگاهیان و صنعتگران قرار گرفته است [1]. مدیریت پایدار زنجیره‌تأمین به شرکت‌ها کمک می‌کند تا خطرات و آلودگی‌های زیست‌محیطی خود را کاهش داده، عملکرد محیطی را بهبود بخشیده، مزایای قوی‌تری در

¹ Sustainable Closed-Loop Supply

Chain (SCLSC)

² Net Present Value (NPV)

³ Fuzzy Robust Optimization (FRO)

⁴ Heuristic Algorithm (HA)

⁵ Multi-Choice Goal Programming with Utility Function

(MCGP-UF)

⁶ Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

⁷ Sustainable Supply Chain (SSC)

⁸ Triple Bottom Line (TBL)





بازار ایجاد کرده، ارزش ویژه برند و شهرت شرکت را افزایش داده، هزینه‌های کلی پایین‌تر را در نظر گرفته و روابط بهتر با مصرف‌کنندگان را به ارمغان می‌آورد [2]. در حالی که رویکرد *TBL* در تحقیقات مربوط به عملکرد پایداری در حوزه مدیریت زنجیره‌تأمین پایدار اتخاذ شده است [3]، تحقیقات در مورد بعد محیطی برجسته‌تر بوده است [4]. تحقیقات در مورد ابعاد متعدد پایداری بسیار مهم است، زیرا این ابعاد به‌طور هم‌زمان بر یکدیگر و عملکرد پایداری تأثیرگذار هستند. با این حال، ادغام همه ابعاد برای دستیابی به توسعه پایدار یک چالش کلیدی برای صنعت است [5]، [6].

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین در زمینه‌هایی مختلف مانند ضایعات [7]، مصرف انرژی [8]، خون [9]، صنعت سیمان [10]، توسعه محصول جدید [11] و تدارکات بشردوستانه [12] در نظر گرفته شده و از طرف دیگر با آگاهی بیش‌تر مصرف‌کنندگان از محصولات سازگار با محیط‌زیست، نیاز به اتخاذ شیوه‌هایی برای کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی در فعالیت‌های تولید ضروری شده است [13] که این مشکل هم‌چنین در بخش‌های دیگر مانند صنعت الکترونیک [14]، حمل‌ونقل مواد خطرناک [15]، صنعت ذوب [16]، توزیع دارو [17]، کالاهای یک‌بار مصرف [18] و روغن موتور [19] مورد بحث قرار گرفته است. از طرف دیگر، با توجه به چرخه عمر کوتاه محصول و حاشیه سود کم‌تر، زنجیره‌تأمین حلقه بسته اکنون یک ضرورت عملیاتی برای شرکت‌ها است. در یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته، سیستم‌های لجستیک روبه‌جلو و معکوس به‌طور هم‌زمان ادغام می‌شوند. لجستیک معکوس در زنجیره‌تأمین حلقه بسته، مسئول مدیریت بازده محصول برای اهدافی مانند بازیافت، استفاده مجدد یا دفع است [20]. لجستیک معکوس به کاهش اثرات زیست‌محیطی عملیات‌های موجود در آن و میزان زباله تولید شده در سطح جهانی کمک می‌کند. لجستیک معکوس هم‌چنین به ایجاد مزیت رقابتی کمک می‌کند و از طریق هدف‌گذاری مجدد محصولات مورد استفاده، حاشیه سود شرکت را افزایش می‌دهد [21].

در سال ۲۰۱۶، زباله سالانه جهانی ۲/۰۱ میلیارد تن بوده و تا سال ۲۰۴۶، ۳/۴ میلیارد تن خواهد بود [22]. به همین ترتیب، محققان استدلال می‌کنند که لجستیک معکوس برای مسایل اقتصادی و زیست‌محیطی که زنجیره‌تأمین در بازار ناپایدار امروز با آن مواجه می‌شود، ضروری است [23]. بازیابی محصولات مورد استفاده، ارزش افزوده اقتصادی دارد. با تأکید بیش‌تر بر تولید پایدار، تعامل بیش‌تری بین توسعه محصول و بازیابی محصول مورد نیاز است. بازیابی محصول به کاهش هزینه‌های تولید و ارتقای سازگاری محیطی سازمان کمک می‌کند. تحقیق در مورد طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته برای مدیریت زنجیره‌تأمین پایدار مهم است [24]. علاوه‌براین، یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته یکپارچه یک مسیر بازیابی محصول کارآمد را برای تحقق اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و حتی اجتماعی فراهم می‌کند. یک فرآیند بازیابی کارآمد محصول و پیکربندی زنجیره‌تأمین حلقه بسته مربوطه، مشتریان را تشویق می‌کند تا محصولات خود را در پایان عمر مفید خود بازگردانند و با برنامه‌ریزی منسجم، اثرات زیست‌محیطی محل‌های دفن زباله و بازیابی محصولات را کاهش دهند. زنجیره‌تأمین حلقه بسته برای برآوردن تقاضا از طریق عملیات‌های موجود در زنجیره و فرآیندهای ارزش افزوده، با جمع‌آوری محصولات برگشتی برای استفاده مجدد، بازیافت یا دفع در نظر گرفته شده است [25]. در طراحی زنجیره‌تأمین حلقه بسته، مدیریت عملیات لجستیک معکوس زمانی دشوارتر می‌شود که بسیاری از متغیرهای تصمیم‌گیری و عدم قطعیت آن‌ها بر محیط تأثیر بگذارد؛ بنابراین، برای طراحی زنجیره‌تأمین حلقه بسته، تصمیم‌گیرندگان باید مناطق مشکل‌دار را شناسایی کرده، آن‌ها را مدل کنند و شاخص‌های عملکرد مناسب را برای جریان‌های روبه‌جلو و معکوس محصولات تعریف کنند [26]، [27].

در این راستا، طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته در زمینه‌هایی مانند صنایع لبنی [28]، صنعت انرژی [29]، صنعت بازیافت پلاستیک [30]، [31]، صنعت بنزین [32]، محصولات فاسدشدنی [33]، صنعت گردو [34] و صنعت روغن موتور [19] مورد استفاده قرار گرفت. از سوی دیگر، طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار یک تصمیم استراتژیک است و برآورد دقیق برخی از پارامترها مانند تقاضا به دلیل تغییرات در محیط کسب‌وکار دشوار است [35]؛ بنابراین، برخی از پارامترهای مهم مانند خواسته‌های مشتری کاملاً نامشخص هستند و برنامه‌ریزی مناسب برای مقابله با این عدم قطعیت ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، مطالعات در زمینه طراحی زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار تحت عدم قطعیت توجه محققان را به خود جلب کرد که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد [36]، [37]. در زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار، عوامل مالی به دلیل تأثیر بیش‌تر بر عرضه، تولید، توزیع و بازیافت از اهمیت بالایی برخوردارند، زیرا همه تصمیمات زنجیره‌تأمین بر نحوه تخصیص و تأمین منابع مالی تأثیر می‌گذارند [38]. در میان انتظارات تورمی، نحوه تأمین کسری بودجه و تغییر در پایه پولی و نقدینگی برای صنعت مهم است، زیرا تورم ناشی از نوسانات نرخ ارز برای تأمین مواد اولیه و فناوری تولید یا بازیافت به‌شدت بر سیاست‌های زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار تأثیر می‌گذارد [39].



بر اساس آنچه بیان شد، سهم این مقاله در حوزه مدل‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر بهینه‌سازی، از یک سو، در نظر گرفتن عوامل پایداری (اقتصادی و محیطی) است که هر دو عامل پایداری با این فرض که تسهیلات می‌توانند تحت تاثیر این اهداف قرار گیرند، در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، توسعه یک مدل بهینه‌سازی فازی استوار با در نظر گرفتن اندازه‌گیری ریسک مناسب برای تدوین تغییرات در عدم قطعیت در مقابل نوسانات بازار، برای تنظیم پارامترهای نامشخص که توابع توزیع آن‌ها ناشناخته است، استفاده می‌شود. از سوی دیگر، این مدل با توجه به فعالیت‌های موجود و بالقوه مانند مشکلات انتخاب تامین‌کننده و انتخاب حالت‌های حمل و نقل و مشکلات مربوط به سیاست‌های انتشار کربن، مناسب‌ترین گزینه‌ها را انتخاب می‌کند.

کل روابط، تغییرات و خریدها باید با ساختار فرآیندها و هزینه مرتبط باشد. به منظور محاسبه معیارهای اقتصادی برای گزینه‌های شرکت‌ها، هزینه‌های ثابت شامل هزینه‌های باز شدن یا استفاده از تاسیسات یا فناوری و هم‌چنین هزینه‌های متغیر شامل انتشار، حمل و نقل، تولید، توزیع، دفع زباله و بازیافت در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر، ارزش فعلی خالص به‌عنوان یک معیار بهینه‌سازی در تابع مطلوبیت گنجانده شده است. از آنجا که NPV گزینه‌های سرمایه‌گذاری را مقایسه می‌کند، دوره، هزینه سرمایه و تورم، معیار بسیار خوبی برای ارزیابی محصولات بازیافتی است. از آنجا که محصولات بازیافتی جدید دارای دسترسی دشوار به بازار یا در ابتدا کم هستند، در این مطالعه ارزیابی دوره‌های مختلف مهم است. از این رو، در نظر گرفتن تقاضا بر اساس شرایط چند دوره‌ای، امکان استفاده از نرخ رشد مرکب سالانه ضمیمه محصولات خاصی را فراهم می‌کند که می‌تواند بر باز شدن فناوری تاثیر بگذارد.

این مطالعه یک چارچوب عملیاتی و تاکتیکی برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار تحت عدم قطعیت ارائه می‌دهد که اثرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند، در حالی که NPV شبکه پیشنهادی را به حداکثر می‌رساند. برای دستیابی به این اهداف، این مقاله یک مدل برنامه‌نویسی صحیح مختلط چندهدفه را با عدم قطعیت در یک مطالعه موردی روی زنجیره قطعات الکترونیکی در نظر می‌گیرد. از سوی دیگر، به دلیل پیچیدگی مساله و ماهیت چندهدفه بودن مدل پیشنهادی، یک روش ترکیبی جدید بر اساس الگوریتم اکتشافی و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت برای حل این مشکلات پیشنهاد شده است.

در ادامه این مقاله، در بخش ۲، ادبیات موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد و شکاف تحقیق مشخص می‌گردد. در بخش ۳، ساختار مساله مورد بررسی قرار می‌گیرد و مدل پیشنهادی با توجه به فرضیه‌ها نشان داده می‌شود. در بخش ۴، به مدل بهینه‌سازی فازی استوار را مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش ۵، به تعریف روش ترکیبی برای راه‌حل مورد استفاده در این مقاله پرداخته می‌شود. در بخش ۶، نیز به تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی و روش حل معرفی شده بحث می‌شود. در نهایت در بخش ۷، نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی بیان می‌شود.

۲- ادبیات پژوهش

طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته برای تصمیم‌گیری‌هایی هم‌چون محل تسهیلات، جریان رفت و برگشت مواد و محصول، تولید، توزیع و بازیافت محصولات در دهه گذشته توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. این در حالی است که برخی مطالعات به حداکثر رساندن سود در زنجیره‌تامین حلقه بسته می‌پردازند. برخی دیگر به حداقل‌سازی هزینه کل مربوط به شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته تمرکز کرده‌اند [40]. علاوه بر این تعدادی از محققان به حداقل‌سازی اثرات زیست‌محیطی [41]، [42]، حداقل‌سازی از دست دادن روزهای کاری [43]، حداکثرسازی پاسخگویی اجتماعی [44]، حداکثرسازی پوشش تقاضا [45]، حداکثرسازی ارزش افزوده اقتصادی [23]، حداکثرسازی ارزش خالص فعلی [23]، [46] و حداکثرسازی میزان تولیدات بازیافت و کیفیت تولید [47] پرداختند.

اکثر مطالعات بر جنبه‌های هزینه در شبکه یعنی مکان‌یابی/هزینه جابجایی/تخصیص تسهیلات، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های بهره‌برداری و سایر هزینه‌ها مانند هزینه آلودگی هوا را مورد مطالعه قرار دادند [48]. اکثر مطالعات هم‌چنین جریان محصولات و مواد اولیه و هم‌چنین جریان بازده محصول (جمع‌آوری شده یا جمع‌آوری نشده) را در نظر می‌گیرند [49]. برخی از مطالعات متغیرهایی مانند میزان مواد اولیه مورد نیاز [50] و تقاضای برآورده نشده [51] را در نظر گرفته‌اند.

یان و همکاران [35] اخیراً در مقاله‌ای یک شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار را برای تلفن‌های همراه طراحی می‌کردند. آن‌ها یک مدل چندهدفه پیشنهادی را برای به حداکثر رساندن سود شبکه، به حداقل رساندن کل انتشار کربن و حداکثرسازی تاثیر اجتماعی برای افزایش ثبات شبکه پیشنهادی در نظر گرفتند. آن‌ها سه نوع کانال توزیع را در نظر گرفتند و یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای حل مدل پیشنهاد



کردند. نتایج مطالعه آن‌ها اعتبار مدل و شبکه پیشنهادی را اثبات کرده و تاثیر کانال‌های توزیع را در اهداف بیان شده نشان دادند. گویندان و همکاران [52] یک روش ترکیبی مبتنی بر تصمیم‌گیری فازی و برنامه‌ریزی ریاضی برای ادغام انتخاب تامین‌کننده و مشکلات طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار را توسعه دادند. نویسندگان از روش فازی برای حل مدل پیشنهادی استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها تاثیر تامین‌کنندگان بر طراحی شبکه پایدار را نشان داده و هم‌چنین نشان دادند که با انتخاب یک تامین‌کننده می‌توان رشد پایداری را در جهت بهبود سود شبکه در نظر گرفت.

زاهدی و همکاران [53] در مطالعه اخیر خود یک شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته مربوط به صنعت گردو را طراحی کردند و تمرکز آن‌ها روی زنجیره کشاورزی بود. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای کاهش هزینه کل صنعت گردو پیشنهاد دادند و برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم‌های متاکتشافی و ترکیبی استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که شبکه پیشنهادی جریان معکوس در صنعت گردو، علاوه بر برآوردن تقاضاهای بازار، محصول برگشتی را با قابلیت استفاده و کارایی برای استفاده مجدد آماده می‌کند.

قلی زاده و همکاران [22] در مطالعه‌ای به طراحی یک شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار برای صنعت لبنیات متمرکز شدند و با هدف حداکثرسازی سود و به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی در سناریوهای مختلف، به دنبال تاثیر احتمالی سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه با تمرکز بر بازیافت محصولات لبنی در یک مطالعه موردی در ایران را مورد بحث قرار دادند. آن‌ها مدل پیچیده خود را با ارایه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه با یک روش ترکیبی اکتشافی و ϵ -محدودیت بهبودیافته حل کردند. سپس آن‌ها نتایج خود را با کارایی روش حل پیشنهادی و اثرات احتمالات سناریو نشان دادند.

برای نشان دادن اهمیت توسعه پایدار، نیری و همکاران [40] با طراحی یک شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار برای مخزن آب را پیشنهاد دادند و هم‌زمان بهینه‌سازی تاثیرات مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی بر شبکه پایدار مخزن آب را بررسی کردند. علاوه بر این، شبکه پیشنهادی آن‌ها مشروط به عدم قطعیت در پارامترهای هزینه و تقاضای حمل‌ونقل بود و برای حل این مشکل، آن‌ها از بهینه‌سازی قوی فازی استفاده کردند و برای سه هدف مختلف از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت را برای تک هدفه سازی در نظر گرفتند. نتایج این تحقیق تاثیر توسعه پایداری بر طراحی شبکه زنجیره‌تامین را نشان داد و از آنجایی که دستیابی به مزیت‌های رقابتی نسبت به رقبای موجود در بازار مستلزم ایجاد تعادل در جنبه‌های اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی زنجیره‌تامین است، پورمهدی و همکاران [54] طراحی زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار در صنعت فولاد را تحت شرایط عدم قطعیت مورد توجه دادند. عدم قطعیت‌ها در مدل چندهدفه پیشنهادی از طریق روش مبتنی بر سناریو در محیط تصادفی مدل‌سازی شده و از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی که برای مدل‌سازی تک هدفه استفاده می‌شود، بهره بردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که کاهش سود زنجیره‌ای پیشنهادی تا ۱% باعث کاهش انتشار کربن تا ۵% می‌شود.

۲-۱- شکاف پژوهش

پس از بررسی ادبیات اخیر در مورد طراحی زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار سهم اصلی این مقاله به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱. از نظر دانش ما، هیچ مطالعه‌ای به‌طور هم‌زمان به مفاهیم انتخاب تامین‌کنندگان، انتخاب حالت‌های حمل‌ونقل و سیاست‌های انتشار کربن تحت شرایط عدم قطعیت در نظر گرفته نشده است.
۲. یکی از مهم‌ترین ویژگی این مطالعه در نظر گرفتن ارزش خالص فعلی و تورم در طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار تحت عدم قطعیت می‌باشد که این مطالعه را نسبت به ادبیات اخیر خاص می‌کند.
۳. در نظر گرفتن یک روش ترکیبی جدید الگوریتم اکتشافی و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت برای حل مشکل طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار تحت عدم قطعیت.

۳- بیان مساله

در اینجا یک زنجیره‌تامین حلقه بسته برای قطعات الکترونیکی مربوط به موس رایانه است. شبکه پیشنهادی در سطوح عملیاتی روبه‌جلو شامل چهار سطح (تامین‌کنندگان مواد اولیه، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان) است که در آن فرآیند عملیاتی با تامین مواد، تولید و توزیع و تقاضای مشتری می‌باشد. سطوح عملیاتی معکوس شبکه شامل چهار سطح (مراکز جمع‌آوری، مراکز جداسازی، مراکز بازیافت



و مراکز دفع) است که در آن‌ها، در جریان معکوس، عمدتاً قطعات الکترونیکی مربوط به موس رایانه، در مراکز جداسازی به اجزا و تجهیزات قابل استفاده مجدد و بازیافت و غیرقابل استفاده تعیین می‌شود که در مراکز دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، قیمت این قطعات یا مواد متأثر از تورم و عرضه و تقاضا است؛ بنابراین، عدم قطعیت پارامترها اجتناب‌ناپذیر است. از آنجاکه تصمیم‌گیری در مورد جداسازی، استفاده مجدد یا بازیافت با یک فناوری خاص مفید است (هر فناوری هزینه افتتاح، هزینه عملیاتی و انتشار کربن مخصوص به خود را دارد)، برای کنترل هزینه و حاشیه هزینه قیمت‌گذاری تجزیه و تحلیل ارزش فعلی برای تصمیم‌گیری در مورد جداسازی، استفاده مجدد یا بازیافت تصمیمات مفید است. علاوه بر این، انتقال اجزای این محصول از طریق جریان معکوس مستلزم یک مدل جامع از حمل و نقل مواد است، درصدی از این اجزا به مراکز بازیافت، درصدی به مراکز تولید برای استفاده مجدد و درصدی به مراکز دفع منتقل می‌شود. سپس مواد بازیافتی به مراکز عرضه و مابقی به مراکز دفع ارسال می‌شود.

از سوی دیگر، از سیاست‌های ظرفیت و تجارت برای محدود کردن سازمان به انتشار کربن استفاده شده است. این سیاست را محدود به فعالیت‌های تولید، بازیافت، حمل و نقل و حتی دفن می‌کند که منجر به انتشار کربن می‌شود. این به سازمان اجازه می‌دهد تا میزان انتشار کربن بلااستفاده را متناسب با ظرفیت کربن تعیین شده خود به فروش برساند. هم‌چنین، هنگامی که کربن منتشر شده توسط سازمان از ظرفیت کربن تعیین شده فراتر رود، اعتبار انتشار کربن برای فعالیت‌های زنجیره تامین خریداری می‌شود.

ثبات اقتصادی و کاهش نرخ تورم می‌تواند زمینه‌ها را برای بهبود عملکردهای تولیدی فراهم نماید و تأثیری به سزا در کاهش جرایم زیست‌محیطی نیز داشته باشد. در شرایط کنونی تولید ناخالص داخلی سبز^۱ در برخی از کشورهای پیشرفته محاسبه می‌شود، البته بعضی از کشورها این رقم را اعلام نمی‌کنند اما در حقیقت با محاسبه، سیاست‌گذار را در جریان قرار می‌دهند. در این راستا علاوه بر سیاست‌های مالیاتی مستقیم، از سیاست‌های مالیاتی غیرمستقیم نیز استفاده شده است مانند مالیات بر کربن و مالیات بر نرخ انرژی. این مالیات بر نهاده‌های تولید یا کالاهای مصرفی که استفاده از آن‌ها منجر به آسیب دیدن محیط‌زیست می‌شود وضع می‌گردد و می‌تواند سیگنالی برای تحقق سطح انتشار کارآمد اجتماعی تلقی شود. تغییرات زیست‌محیطی برای اکثر این کارخانه‌ها نیز مهم است و خواستار کم‌ترین تضاد منافع با سیاست‌گذاران محیط‌زیستی می‌باشند. از این رو ما برای آمادگی در برابر تنش‌های اقتصادی از قبیل بی‌ثباتی نرخ ارز، تغییر ناگهانی نرخ انرژی و... در این پژوهش از محدودیت محاسبه تورم نقطه به نقطه استفاده کردیم که می‌تواند علاوه بر در نظر گرفتن منافع کارخانه، بهینه‌سازی دفعات خرید، کاهش حمل و نقل و به طبع آن کاهش نرخ انتشار کربن را در پی داشته باشد.

برای مدل‌سازی این شبکه پیشنهادی، مفروضات به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

۱. همه تسهیلات با محدودیت ظرفیت روبرو هستند.
۲. عدم قطعیت در پارامترهای تاکتیکی تقاضا، هزینه‌ها و ظرفیت انتشار کربن است.
۳. هزینه خرید فناوری و مواد اولیه و قیمت محصولات تحت تأثیر تورم قرار می‌گیرد.
۴. محل تسهیلات در شبکه پیشنهادی از پیش تعیین شده است.
۵. مسایل مربوط به انتشار کربن تحت سیاست‌های ظرفیت کربن و سیاست تجارت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۳- مدل ریاضی پژوهش

در این بخش شاخص‌ها، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها تعریف می‌شوند. سپس با توجه به مشکل پیش رو و با مفروضات تعریف شده، مدل و محدودیت لازم نوشته می‌شوند.

شاخص‌ها

S	مجموعه‌ای از تامین‌کنندگان با شاخص s .
M	مجموعه‌ای از تولیدکنندگان با شاخص m .
D	مجموعه‌ای از مراکز توزیع با شاخص d .
K	مجموعه‌ای از مشتریان با شاخص k .

¹ Green GDP



مجموعه مراکز جمع‌آوری با شاخص c .	C
مجموعه‌ای از مراکز جداسازی با شاخص b .	B
مجموعه‌ای از مراکز بازیافت با شاخص r .	R
مجموعه مواد اولیه با شاخص i .	I
مجموعه‌ای از مراکز دفع با شاخص j .	J
مجموعه‌ای از فناوری‌های بازیافت با شاخص t .	T
مجموعه‌ای از حالت‌های حمل و نقل با شاخص q .	Q
مجموعه‌ای از محصولات با شاخص p .	P
مجموعه دوره زمانی با شاخص l .	L
مجموعه‌ای از اجزای محصولات با شاخص g .	G
مجموعه‌ای از همه سطوح زنجیره $e, e' \in \{s, m, d, k, c, r, b, j, f\}$.	e, e'
مجموعه تسهیلات در سطوح زنجیره $f, f' \in \{1, \dots, F_e\}$.	f, f'

پارامترها

هزینه ثابت مربوط به تامین‌کننده s .	fcs_s
هزینه خرید فناوری t در دوره زمانی l .	pct_{tl}
هزینه ثابت افتتاح مراکز بازیافت r با فناوری t .	fcr_{rt}
هزینه ثابت افتتاح تسهیلات $(f_e e \in \{d, c, b\})$.	fco_{f_e}
ظرفیت تسهیلات $\{f_e e \in \{s, m, d, c, b, r, j\}\}$ در دوره زمانی l .	$Cap_{f_e l}$
تقاضای مشتری k برای محصول p در دوره زمانی l .	De_{kpl}
قیمت فروش محصول p در دوره زمانی l .	sp_{pl}
قیمت مواد اولیه i خریداری شده از تامین‌کنندگان s در دوره زمانی l .	pr_{isl}
قیمت فروش مواد بازیافتی به تامین‌کنندگان s در دوره زمانی l .	spr_{sl}
هزینه‌های عملیات در تسهیلات $\{f_e e \in \{m, d, c, b, j\}\}$ در دوره زمانی l .	$Co_{f_e l}$
هزینه بازیافت مرکز بازیافت r با فناوری t در دوره زمانی l .	Cr_{rtl}
هزینه حمل و نقل از تسهیلات f_e به تسهیلات $f_{e'}$ با حالت حمل و نقل q , $e, e' \in \{s, m, k, b, c, r, j, d\}$ در دوره زمانی l .	$TC_{ee'ql}$
فاصله بین تسهیلات f_e و تسهیلات $f_{e'} (e, e' \in \{s, m, k, b, c, r, j, d\})$.	$dis_{ee'}$
میزان مصرف مواد اولیه i در هر واحد محصول p در دوره زمانی l .	σ_{ipl}
نرخ بازگشت محصول p از مشتری K در دوره زمانی l .	α_{pkl}
تعداد اجزای قابل استفاده مجدد g در مرکز جداسازی b در دوره زمانی l .	β_{gbl}
تعداد اجزای قابل بازیافت g مرکز جداسازی b در دوره زمانی l .	τ_{gbl}
تعداد اجزای یک‌بار مصرف g در مرکز جداسازی b در دوره زمانی l .	μ_{gbl}
نرخ بازیافت اجزای g در مرکز بازیافت r با فناوری t در دوره زمانی l .	δ_{grtl}
نرخ ضایعات اجزای g در مرکز بازیافت r با فناوری t در دوره زمانی l .	θ_{grtl}
ظرفیت حالت حمل و نقل q بین تسهیلات f_e و تسهیلات $f_{e'} (e, e' \in \{s, m, k, b, c, r, j, d\})$.	$TCap_{ee'q}$
میزان انتشار کربن از تولیدکننده m .	λ_m
میزان انتشار کربن از مرکز بازیافت r با فناوری t .	λ_{rt}
میزان انتشار کربن از حمل و نقل از تسهیلات f_e به تسهیلات $f_{e'}$ با حالت حمل و نقل q , $e, e' \in \{s, m, k, b, c, r, j, d\}$.	$\lambda_{ee'q}^q$
قیمت خرید هر واحد اعتبار کربن.	δ^+
قیمت فروش هر واحد اعتبار کربن.	δ^-



ظرفیت کربن بر انتشار کربن در افق برنامه‌ریزی.	CapCE
نرخ بهره.	π
یک عدد بزرگ حد بالای تقاضا.	Mbig
نرخ تورم.	SI

متغیرها

مقدار محصولات p از تسهیلات f_e به تسهیلات $f_{e'}$ حالت حمل و نقل q منتقل می‌شود $e, e' \in \{m, d, k, c, b\}$ در بازه زمانی l .	$Q_{ee'p}^{ql}$
مقدار اجزای g از تسهیلات f_e به تسهیلات $f_{e'}$ با حالت حمل و نقل q منتقل می‌شود $e, e' \in \{b, r, m, j\}$ در بازه زمانی l .	$Q_{ee'g}^{ql}$
مقدار مواد اولیه‌ای i که از تامین کننده s به تولیدکننده m با حالت حمل و نقل q در دوره زمانی l منتقل می‌شود.	Q_{ism}^{ql}
مقدار مواد اولیه‌ای i که از مرکز بازیافت r با فناوری t با حالت حمل و نقل q به مرکز دفع j در دوره زمانی l منتقل می‌شود.	Q_{irtj}^{ql}
مقدار مواد اولیه‌ای i که از مرکز بازیافت r با فناوری t با حالت حمل و نقل q به تامین کننده s در دوره زمانی l منتقل می‌شود.	Q_{irts}^{ql}
میزان اعتبار کربن خریداری شده.	e^+
میزان اعتبار فروش کربن.	e^-
یک متغیر باینری، اگر تامین کننده s انتخاب شود ۱، در غیر این صورت صفر.	Su_s
یک متغیر باینری، اگر تسهیلات $f_e \in \{d, c, b\}$ افتتاح شود ۱، در غیر این صورت صفر.	FY_{fe}
یک متغیر باینری، اگر مرکز بازیافت r با فناوری t افتتاح شود ۱، در غیر این صورت صفر.	FY_{rt}
یک متغیر باینری، اگر حالت حمل و نقل q استفاده شود بین تسهیلات f_e به تسهیلات $f_{e'}$ ، ۱ در غیر این صورت صفر.	$TX_{ee'}$

۱-۱-۳- هدف اقتصادی

در این بخش به بررسی و تعریف اولین تابع هدف مساله پیش رو می‌پردازیم، یعنی حداکثرسازی NPV شبکه پیشنهادی که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$MaxZ_1 = \frac{Total\ revenue_t - Total\ cost_t}{1 + \pi)^t} \quad (1)$$

مجموع درآمد مطابق رابطه (۲) متناسب با جریان نقدینگی مثبت ناشی از فروش محصولات تولیدی و کربن به مشتریان و مواد بازیافتی به تامین کنندگان است که مقدار محصول یا کربن منتقل شده به مشتریان ضرب در قیمت و تورم آن محاسبه می‌شود.

$$Total\ revenue = \sum_d \sum_k \sum_p \sum_q \sum_l (sp_{pl} + SI \cdot sp_{pl}) \cdot Q_{dkp}^{ql} + \sum_i \sum_r \sum_s \sum_q \sum_l \sum_t spr_{sl} + SI \cdot spr_{sl}) \cdot Q_{irts}^{ql} + \delta^- \cdot e^- \cdot SI. \quad (2)$$

هزینه کل مطابق با معادله (۳) دارای چهار بخش است. بخش اول شامل هزینه‌های ثابت مربوط به بازگشایی تسهیلات (مراکز جداسازی، مراکز جمع‌آوری، مراکز توزیع و مراکز بازیافت با فناوری‌های مختلف) و هزینه‌های ثابت همکاری با تامین کنندگان است. بخش دوم هزینه‌های عملیاتی انجام شده در هر تسهیل را نشان می‌دهد. در بخش سوم، هزینه‌های مربوط به حمل و نقل بین تسهیلات مورد بحث قرار می‌گیرد. بخش چهارم هزینه خرید فناوری، مواد اولیه و اعتبار کربن را در نظر می‌گیرد.



$$\begin{aligned}
 Total\ cost = & \sum_{f_e \in \{d,c,b\}} f c o_{f_e} \cdot F Y_{f_e} + \sum_t \sum_r f c r_{rt} \cdot F Y_{rt} + \sum_s f c s_s \cdot S u_s \\
 & + \sum_q \sum_p \sum_{f_e \in \{m,d,c\}} \sum_l C o_{f_e l} \cdot Q_{e'p}^{ql} + \sum_g \sum_q \sum_{f_e \in \{b,j\}} \sum_l C o_{f_e l} \cdot Q_{e'g}^{ql} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l C r_{rtl} \cdot Q_{irtj}^{ql} \\
 & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l C r_{rts} \cdot Q_{irts}^{ql} \\
 & + \sum_q \sum_p \sum_{f_e \in \{m,d,k,c,b\}} \sum_l T C_{e'ql} \cdot Q_{e'p}^{ql} \cdot dis_{e'e'} \\
 & + \sum_q \sum_g \sum_{f_e \in \{b,r,m,j\}} \sum_l T C_{e'gl} \cdot Q_{e'g}^{ql} \cdot dis_{e'e'} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l T C_{rjql} \cdot Q_{irtj}^{ql} \cdot dis_{rj} \\
 & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l T C_{rsql} \cdot Q_{irts}^{ql} \cdot dis_{rs} \\
 & + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l T C_{smql} \cdot Q_{ism}^{ql} \cdot dis_{sm} \\
 & + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l p r_{isl} \cdot S I + p r_{isl} \cdot Q_{ism}^{ql} \\
 & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l p c t_{il} \cdot S I + p c t_{il} \cdot Q_{irts}^{ql} + \delta^+ \cdot e^+ \cdot S I.
 \end{aligned} \tag{۳}$$

۲-۱-۳- هدف زیست‌محیطی

در این بخش، تابع هدف دوم مسأله مطابق با رابطه (۴)، یعنی به حداقل رساندن میزان انتشار کربن در شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پیشنهادی که شامل میزان انتشار کربن از طریق حمل‌ونقل بین تسهیلات، عملیات تولید و بازیافت می‌باشد.

$$\begin{aligned}
 min\ Z_2 = & \sum_m \sum_d \sum_p \sum_q \sum_l \lambda_m \cdot Q_{mdp}^{ql} + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{rt} \cdot Q_{irts}^{ql} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{rt} \cdot Q_{irtj}^{ql} \\
 & + \sum_p \sum_q \sum_l \sum_{f_e \in \{m,d,k,c,b\}} \lambda_{e'e'}^q \cdot Q_{e'p}^{ql} \cdot dis_{e'e'} \\
 & + \sum_q \sum_g \sum_l \sum_{f_e \in \{b,r,m,j\}} \lambda_{e'e'}^q \cdot Q_{e'g}^{ql} \cdot dis_{e'e'} \\
 & + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l \lambda_{sm}^q \cdot Q_{ism}^{ql} \cdot dis_{sm} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{rj}^q \cdot Q_{irtj}^{ql} \cdot dis_{rj} \\
 & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{rs}^q \cdot Q_{irts}^{ql} \cdot dis_{rs}.
 \end{aligned} \tag{۴}$$

۳-۱-۳- محدودیت‌های مدل

در این بخش، درباره محدودیت‌های مدل که شامل محدودیت‌های ظرفیت تسهیلات، محدودیت‌های تعادل جریان، محدودیت‌های مکان‌یابی تسهیلات، محدودیت‌های ظرفیت حالت حمل‌ونقل، محدودیت‌های سیاست کربن و محدودیت‌های مربوط به تورم می‌باشد را بحث می‌شود.

$$\sum_m \sum_q Q_{ism}^{ql} \leq Cap_{sil} \cdot S u_s, \quad for\ all\ i, s, l. \tag{۵}$$

$$\sum_d \sum_q Q_{mdp}^{ql} \leq Cap_{mpl}, \quad for\ all\ m, p, l. \tag{۶}$$



$$\sum_k \sum_q Q_{dkp}^{ql} \leq Cap_{dpl} \cdot FY_{d'} \quad \text{for all } d, p, l. \quad (7)$$

$$\sum_k \sum_q Q_{kcp}^{ql} + \sum_b \sum_q Q_{cbp}^{ql} \leq Cap_{cpt} \cdot FY_{c'} \quad \text{for all } c, p, l. \quad (8)$$

$$\sum_m \sum_q Q_{bmg}^{ql} + \sum_r \sum_q Q_{brg}^{ql} + \sum_j \sum_q Q_{bjg}^{ql} \leq Cap_{bgl} \cdot FY_{b'} \quad \text{for all } b, g, l. \quad (9)$$

$$\sum_s \sum_q Q_{rsit}^{ql} + \sum_j \sum_q Q_{rjit}^{ql} \leq FY_{rt} \cdot Cap_{irtl'} \quad \text{for all } r, i, t, l. \quad (10)$$

$$\sum_t FY_{rt} \leq 1, \quad \text{for all } r. \quad (11)$$

همان طور که مشاهده می کنید، محدودیت (۵) و محدودیت (۶) به ظرفیت تامین کننده و تولیدکننده اشاره دارد. محدودیت (۷) بیان می کند که مقدار محصول ارسال شده به توزیع کننده نمی تواند از ظرفیت مرکز توزیع تجاوز کند. محدودیت (۸) به ظرفیت مراکز جمع آوری اشاره دارد. محدودیت (۹) نشان دهنده ظرفیت مراکز جداسازی قطعات است. محدودیت (۱۰) با توجه به نوع فناوری به ظرفیت مراکز بازیافت می پردازد. محدودیت (۱۱) تضمین می کند که یک مرکز بازیافت تنها با یک فناوری باز می شود.

$$\sum_s \sum_m \sum_q Q_{smi}^{ql} = \sum_d \sum_m \sum_q \sigma_{ipl} \cdot Q_{mdp'}^{ql} \quad \text{for all } i, p, l. \quad (12)$$

$$\sum_d \sum_q Q_{dkp}^{ql} \cdot \alpha_{pkl} = \sum_c \sum_q Q_{kcp}^{ql}, \quad \text{for all } p, k, l. \quad (13)$$

$$\sum_m \sum_d \sum_q Q_{mdp}^{ql} = \sum_c \sum_k \sum_q Q_{dkp}^{ql}, \quad \text{for all } p, l. \quad (14)$$

$$\sum_c \sum_b \sum_q Q_{cbp}^{ql} = \sum_b \sum_m \sum_q Q_{bmg}^{ql} + \sum_b \sum_r \sum_q Q_{brg}^{ql} + \sum_b \sum_j \sum_q Q_{bjg}^{ql}, \quad \text{for all } p, g, l. \quad (15)$$

$$\sum_b \sum_m \sum_q Q_{bmg}^{ql} = \sum_c \sum_b \sum_q Q_{cbp}^{ql} \cdot \beta_{gbl}, \quad \text{for all } p, g, l. \quad (16)$$

$$\sum_b \sum_r \sum_q Q_{brg}^{ql} = \sum_c \sum_b \sum_q Q_{cbp}^{ql} \cdot \tau_{gbl}, \quad \text{for all } p, g, l. \quad (17)$$

$$\sum_b \sum_j \sum_q Q_{bjg}^{ql} = \sum_c \sum_b \sum_q Q_{cbp}^{ql} \cdot \mu_{gbl}, \quad \text{for all } p, g, l. \quad (18)$$

$$\sum_r \sum_s \sum_q Q_{rsit}^{ql} = \sum_b \sum_r \sum_q Q_{brg}^{ql} \cdot \delta_{grtl}, \quad \text{for all } i, g, l, t. \quad (19)$$

$$\sum_r \sum_j \sum_q Q_{rjit}^{ql} = \sum_b \sum_r \sum_q Q_{brg}^{ql} \cdot \theta_{grtl}, \quad \text{for all } i, g, l, t. \quad (20)$$

$$\sum_d \sum_q Q_{dkp}^{ql} \leq De_{kpl}, \quad \text{for all } k, p, l. \quad (21)$$

به منظور تحقق اهداف محدودیت های جریان برای مدل پیشنهادی در معادله (۱۲) تا معادله (۲۱) شرح داده شده است. در واقع محدودیت (۱۲) میزان ارسال مواد اولیه به تولیدکننده را نشان می دهد که متناسب با میزان مصرف مواد اولیه در هر محصول است. محدودیت (۱۳) به مقدار محصول برگشتی از مشتریان اشاره دارد. معادله (۱۴) تا معادله (۲۰) تعادل جریان بین هر تسهیلات را با در نظر گرفتن نرخ تعیین شده نشان می دهد. محدودیت (۲۱) به تقاضای مشتری اشاره دارد، یعنی رابطه بین میزان ارسال محصول از توزیع کننده به مشتری نسبت به تقاضای مشتریان می باشد.

$$\sum_p \sum_l Q_{ee'p}^{ql} \leq Tcap_{ee'q} \cdot TX_{ee'q}, \quad \text{for all } e, e' \in \{m, d, k, c, b\}. \quad (22)$$

$$\sum_g \sum_l Q_{ee'g}^{ql} \leq Tcap_{ee'q} \cdot TX_{ee'q}, \quad \text{for all } e, e' \in \{b, r, m, j\}. \quad (23)$$

$$\sum_i \sum_l Q_{smi}^{ql} \leq Tcap_{smq} \cdot TX_{smq}, \quad \text{for all } q, s, m. \quad (24)$$

$$\sum_i \sum_t \sum_l Q_{rjit}^{ql} \leq Tcap_{rjq} \cdot TX_{rjq}, \quad \text{for all } r, j, q. \quad (25)$$

$$\sum_i \sum_t \sum_l Q_{rsit}^{ql} \leq Tcap_{rsq} \cdot TX_{rsq}, \quad \text{for all } q, r, s. \quad (26)$$

همان طور که می بینید، محدودیت (۲۲) تا محدودیت (۲۶) ظرفیت حالت های حمل و نقل مواد و محصول بین تسهیلات را نشان می دهد. محدودیت (۲۲) به جریان حمل و نقل روبه جلو شبکه اشاره دارد و محدودیت (۲۳) تا محدودیت (۲۶) به جریان حمل و نقل رو به عقب (جریان معکوس) شبکه پیشنهادی اشاره دارد.

$$\begin{aligned} & \sum_m \sum_d \sum_p \sum_q \sum_l \lambda_m \cdot Q_{mdp}^{ql} + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{rt} \cdot Q_{irts}^{ql} \\ & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{rt} \cdot Q_{irtj}^{ql} \\ & + \sum_p \sum_q \sum_l \sum_{fe \in \{m, d, k, c, b\}} \lambda_{ee'}^q \cdot Q_{ee'p}^{ql} \cdot dis_{ee'} \\ & + \sum_q \sum_g \sum_l \sum_{fe \in \{b, r, m, j\}} \lambda_{ee'}^q \cdot Q_{ee'g}^{ql} \cdot dis_{ee'} \\ & + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l \lambda_{sm}^q \cdot Q_{ism}^{ql} \cdot dis_{sm} \\ & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{rj}^q \cdot Q_{irtj}^{ql} \cdot dis_{rj} \\ & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{rs}^q \cdot Q_{irts}^{ql} \cdot dis_{rs} + e^- \leq CapCE + e^+. \end{aligned} \quad (27)$$

محدودیت (۲۷) نشان دهنده سیاست های کربن اتخاذ شده در این مطالعه می باشد که بر اساس سیاست ظرفیت و تجارت کربن است.

$$\sum_d \sum_q (sp_{pl} + SI \cdot sp_{pl}) \cdot Q_{dkp}^{ql} \leq De_{kpl}, \quad \text{for all } k, p, l. \quad (28)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_q \sum_l pr_{isl} \cdot SI + pr_{isl} \cdot Q_{ism}^{ql} \leq Mbig \cdot Su_s, \quad \text{for all } s. \quad (29)$$

به دنبال تاثیر تورم بر قیمت فروش محصول و خرید مواد اولیه، در محدودیت (۲۸) و محدودیت (۲۹) تاثیر تورم بررسی می شود.

$$TX_{ee'q} \leq FY_{e'}, \quad \text{for all } e, e' \in \{m, d, k, c, b\}, e'' \in \{d, c, b\}. \quad (30)$$

$$TX_{rsq} \leq \sum_t FY_{rt}, \quad \text{for all } r, s, q. \quad (31)$$

$$TX_{rjq} \leq \sum_t FY_{rt}, \quad \text{for all } j, r, q. \quad (32)$$

$$Q_{ee'p}^{ql}, Q_{ee'g}^{ql}, Q_{ism}^{ql}, Q_{irst}, Q_{irtj}^{ql}, e^+, e^- \geq 0. \quad (33)$$

$$Su_s, FY_{fe}, TX_{ee'q}, FY_{rt} \in \{0, 1\}. \quad (34)$$

محدودیت (۳۰) تا محدودیت (۳۲) رابطه بین حمل و نقل بین تسهیلات و بازگشایی تسهیلات را نشان می دهد، یعنی جریان حمل و نقل زمانی ایجاد می شود که تسهیلات افتتاح شوند. در نهایت، محدوده متغیرهای تصمیم گیری مدل پیشنهادی در محدودیت (۳۳) و محدودیت (۳۴) نشان داده شده است.

۴- عدم قطعیت مدل

با توجه به نوسانات موجود در محیط کسب و کار مانند تقاضا و هزینه های عملیاتی و تاکتیکی، ماهیت عدم قطعیت در طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پایدار غیرقابل انکار می باشد. از طرف دیگر انواع مختلف عدم قطعیت ها بر اساس میزان دسترسی به داده ها به عدم قطعیت های معرفتی^۱، تصادفی^۲ و عمیق^۳ تقسیم بندی می شوند که در این مطالعه از عدم قطعیت های معرفتی و تصادفی استفاده می شود. برای مقابله با این نوع عدم قطعیت ها از بهینه سازی استوار استفاده می شود. این مطالعه با بهره گیری از مطالعات نیری و همکاران [40] و طلائی و همکاران [41]، روش کارآمد بر مبنای رویکرد برنامه ریزی فازی استوار ارایه می دهد که به تصمیم گیرندگان اجازه می دهد تا کنترل

¹ Epistemic
² Stochastic

³ Deep



سطح محافظه‌کاری در جهت ارضای محدودیت‌ها را پشتیبانی کند. رویکرد استفاده شده در این مطالعه یک شکل گسترده‌ی مدل برنامه‌ریزی فازی محدود به شانس که پیاده‌سازی آن بر روی مدل پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد که برگرفته از مطالعه طلایی و همکاران [41] است:

$$\begin{aligned}
 & \text{Total cost} \\
 & = \sum_{f_e \in \{d, c, b\}} f c_{o_{f_e}} \cdot F Y_{f_e} + \sum_t \sum_r f c_{r_{t_l}} \cdot F Y_{r_{t_l}} + \sum_s f c_{s_s} \cdot S U_s \\
 & + \sum_q \sum_p \sum_{f_e \in \{m, d, c\}} \sum_l \left[\frac{C o_{f_{e l 1}} + C o_{f_{e l 2}} + C o_{f_{e l 3}} + C o_{f_{e l 4}}}{4} \right] \cdot Q_{e' p}^{q l} \\
 & + \sum_g \sum_q \sum_{f_e \in \{b, j\}} \sum_l \left[\frac{C o_{f_{e l 1}} + C o_{f_{e l 2}} + C o_{f_{e l 3}} + C o_{f_{e l 4}}}{4} \right] \cdot Q_{e' g}^{q l} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \left[\frac{C r_{r t l 1} + C r_{r t l 2} + C r_{r t l 3} + C r_{r t l 4}}{4} \right] \cdot Q_{i r t j}^{q l} \\
 & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \left[\frac{C r_{r t l 1} + C r_{r t l 2} + C r_{r t l 3} + C r_{r t l 4}}{4} \right] \cdot Q_{i r t s}^{q l} \\
 & + \sum_q \sum_p \sum_{f_e \in \{m, d, k, c, b\}} \sum_l \left[\frac{T C_{e' q l 1} + T C_{e' q l 2} + T C_{e' q l 3} + T C_{e' q l 4}}{4} \right] \cdot Q_{e' p}^{q l} \cdot d i s_{e'} \\
 & + \sum_q \sum_g \sum_{f_e \in \{b, r, m, j\}} \sum_l \left[\frac{T C_{e' q l 1} + T C_{e' q l 2} + T C_{e' q l 3} + T C_{e' q l 4}}{4} \right] \cdot Q_{e' g}^{q l} \cdot d i s_{e'} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \left[\frac{T C_{r j q l 1} + T C_{r j q l 2} + T C_{r j q l 3} + T C_{r j q l 4}}{4} \right] \cdot Q_{i r t j}^{q l} \cdot d i s_{r j} \\
 & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \left[\frac{T C_{r s q l 1} + T C_{r s q l 2} + T C_{r s q l 3} + T C_{r s q l 4}}{4} \right] \cdot Q_{i r t s}^{q l} \cdot d i s_{r s} \\
 & + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l \left[\frac{T C_{s m q l 1} + T C_{s m q l 2} + T C_{s m q l 3} + T C_{s m q l 4}}{4} \right] \cdot Q_{i s m}^{q l} \cdot d i s_{s m} \\
 & + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l p r_{i s t} \cdot S I + p r_{i s t} \cdot Q_{i s m}^{q l} \\
 & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l p c t_{i t} \cdot S I + p c t_{i t} \cdot Q_{i r t s}^{q l} + \delta^+ \cdot e^+ \cdot S I.
 \end{aligned} \tag{35}$$

s. t.

$$\sum_d \sum_q Q_{d k p}^{q l} \leq (1 - \alpha_1) \cdot D e_{k p l 2} + \alpha_1 \cdot D e_{k p l 1}, \quad \text{for all } k, p, l. \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_m \sum_d \sum_p \sum_q \sum_l \lambda_m \cdot Q_{m d p}^{q l} + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{r t} \cdot Q_{i r t s}^{q l} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{r t} \cdot Q_{i r t j}^{q l} \\
 & + \sum_p \sum_q \sum_l \sum_{f_e \in \{m, d, k, c, b\}} \lambda_{e' p}^q \cdot Q_{e' p}^{q l} \cdot d i s_{e'} \\
 & + \sum_q \sum_g \sum_l \sum_{f_e \in \{b, r, m, j\}} \lambda_{e' g}^q \cdot Q_{e' g}^{q l} \cdot d i s_{e'} \\
 & + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l \lambda_{s m}^q \cdot Q_{i s m}^{q l} \cdot d i s_{s m} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{r j}^q \cdot Q_{i r t j}^{q l} \cdot d i s_{r j} \\
 & + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l \lambda_{r s}^q \cdot Q_{i r t s}^{q l} \cdot d i s_{r s} + e^- (1 - \alpha_2) \cdot C a p C E_2 \\
 & + \alpha_2 \cdot C a p C E_1 + e^+.
 \end{aligned} \tag{37}$$

$$\sum_d \sum_q (s p_{p l} + S I \cdot s p_{p l}) \cdot Q_{d k p}^{q l} \leq (1 - \alpha_3) \cdot D e_{k p l 2} + \alpha_3 \cdot D e_{k p l 1}, \quad \text{for all } k, p, l. \tag{38}$$

$$0.5 \leq \alpha \leq 1. \tag{39}$$

مجموعه محدودیت (۵) تا محدودیت (۲۱)، محدودیت (۲۲) تا محدودیت (۲۶)، محدودیت (۲۹)، محدودیت (۴۰)

(۳۰) تا محدودیت (۳۴).



با توجه به مطالعه طلائی و همکاران [41]، مدل عدم قطعیت به صورت زیر فرموله شده است:

$$\begin{aligned} \max E[Z_1] + \eta Z_{max} - E[Z_1] + \xi_1 \cdot \left(\sum_k \sum_p \sum_l (1 - \alpha_1) \cdot De_{kpl(2)} + \alpha_1 \cdot De_{kpl(1)} - De_{kpl(1)} \right) \\ + \xi_2 \cdot \left((1 - \alpha_2) \cdot CapCE_2 + \alpha_2 \cdot CapCE_1 - CapCE_1 \right) \end{aligned} \quad (41)$$

$$+ \xi_3 \cdot \left(\sum_k \sum_p \sum_l (1 - \alpha_3) \cdot De_{kpl(2)} + \alpha_3 \cdot De_{kpl(1)} - De_{kpl(1)} \right) \cdot$$

مجموعه محدودیت (۳۶) تا محدودیت (۴۰). (42)

جایی که η و ξ ضرایبی را نشان می دهند که به ترتیب استحکام بهینه و قدرت امکان سنجی بردار راه حل را تنظیم می کنند. هم چنین، Z_{max} به شرح زیر تعریف می کند:

$$\begin{aligned} Z_{max} = \sum_{fe \in \{d,c,b\}} fco_{fe} \cdot FY_{fe} + \sum_t \sum_r fcr_{rt} \cdot FY_{rt} + \sum_s fcs_s \cdot Su_s \\ + \sum_q \sum_p \sum_{fe \in \{m,d,c\}} \sum_l Cof_{el} \cdot Q_{ee'p}^{ql} + \sum_g \sum_q \sum_{fe \in \{b,j\}} \sum_l Cof_{el} \cdot Q_{ee'g}^{ql} \\ + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l Cr_{rtl} \cdot Q_{irtj}^{ql} \\ + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l Cr_{rts} \cdot Q_{irts}^{ql} \\ + \sum_q \sum_p \sum_{fe \in \{m,d,k,c,b\}} \sum_l TC_{ee'ql} \cdot Q_{ee'p}^{ql} \cdot dis_{ee'} \\ + \sum_q \sum_g \sum_{fe \in \{b,r,m,j\}} \sum_l TC_{ee'ql} \cdot Q_{ee'g}^{ql} \cdot dis_{ee'} \\ + \sum_r \sum_j \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l TC_{rjql} \cdot Q_{irtj}^{ql} \cdot dis_{rj} \\ + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l TC_{rsql} \cdot Q_{irts}^{ql} \cdot dis_{rs} \\ + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l TC_{smql} \cdot Q_{ism}^{ql} \cdot dis_{sm} \\ + \sum_i \sum_s \sum_m \sum_q \sum_l pr_{isl} \cdot SI + pr_{isl} \cdot Q_{ism}^{ql} \\ + \sum_r \sum_s \sum_t \sum_q \sum_i \sum_l pct_{il} \cdot SI + pct_{il} \cdot Q_{irts}^{ql} + \delta^+ \cdot e^+ \cdot SI. \end{aligned} \quad (43)$$

۵- رویکرد حل مدل

برای رسیدگی به پیچیدگی مساله، این مطالعه مدل پیشنهادی را با نسخه بهبود یافته برنامه ریزی آرمانی چندگزینه ای با تابع مطلوبیت و الگوریتم اکتشافی که یک روش ترکیبی برای تولید راه حل های سریع تر و با کیفیت تر در مقایسه با نرم افزارهای تجاری استاندارد ارایه می دهد. یکی از انواع برنامه ریزی آرمانی مورد استفاده در این مطالعه ارایه شده توسط چانگ [55] است. مزایای این روش نسبت به سایر نسخه های برنامه ریزی آرمانی، در نظر گرفتن نظرات متخصصان در مورد مسایل مختلف و هم چنین در نظر گرفتن ارزش ترجیحی تصمیم گیرندگان است. مدل مربوطه به شرح زیر است:

$$\min \sum_k [w_k^+ \cdot d_k^+ + d_k^- + w_k^- \cdot \xi_k^-] \quad (44)$$

s. t.

$$\lambda_k \leq \frac{U_{k,max} - y_k}{U_{k,max} - U_{k,min}} \quad \text{for all } k.$$

$$f_k(X) + d_k^- - d_k^+ = y_k, \quad \text{for all } k.$$



$$\lambda_k + \xi_k^- = 1, \quad \text{for all } k,$$

$$U_{k,min} \leq y_k \leq U_{k,max} \quad \text{for all } k,$$

$$d_k^+, d_k^-, y_k, \lambda_k, \xi_k^- \geq 0, \quad \text{for all } k.$$

در مدل فوق $U_{k,min}$ و $U_{k,max}$ به ترتیب نشان‌دهنده حد بالا و پایین سطح آسپیراسیون^۱ هدف k هستند. y_k یک متغیر تصمیم مستمر است، d_k^+ و d_k^- به ترتیب انحراف مثبت و منفی ($f_k X$) از y_k هستند. λ_k مقدار سودمندی و ξ_k^- انحراف نرمال از $U_{k,min}$ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مدل را می‌توان به صورت زیر نرمال کرد (در صورت نیاز):

$$\min \sum_k \left[w_k^d \cdot \left(\frac{d_k^+ + d_k^-}{f_k^- - f_k^+} \right) + w_k^\xi \cdot \xi_k^- \right]. \quad (45)$$

در معادله فوق، برای تابع هدف که حداقل سازی می‌باشد خواهیم داشت $f_k^+ = \{\min f_k X\}$ و $f_k^- = \{\max f_k X\}$ و همچنین به دلیل اینکه $k \leq \xi_k^- \leq 1$; for all k ، در نتیجه ξ_k^- نیازی به نرمال سازی ندارد.

از طرف دیگر، ما یک راه‌حل ابتکاری برای حل مدل پیشنهادی که با روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت برای در نظر گرفتن آرامش سازی متغیرهای باینری در جهت حل کارآمد مدل توسعه داده‌ایم. از آنجاکه زمان محاسبه برای هر مدل برنامه‌ریزی غیرخطی صحیح مختلط و برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط با افزایش متغیرها و حضور داده‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه در طول زمان، حتی در برخی موارد، هیچ راه‌حل قابل قبولی به دست نمی‌آید؛ بنابراین، یک روش اکتشافی بر اساس آرامش سازی یک متغیر باینری پیشنهاد شده است. ابتدا، ما متغیر باینری را بزرگ‌تر از صفر در نظر می‌گیریم و مدل بهینه‌سازی را از راه‌حل‌های بهینه که همه متغیرهای باینری غیر صفر را در نظر گرفتیم، حل می‌کنیم و به‌عنوان یک محدودیت جدید، یک عدد صحیح مختلط را به مدل غیرخطی اضافه می‌کنیم و دوباره مدل بهینه‌سازی را حل می‌کنیم. مزایای اصلی این روش این است که منجر به کاهش شدید زمان حل مساله می‌شود و همچنین می‌تواند راه‌حل‌های با کیفیت بالاتر را به دست آورد. از طرف دیگر، یکی از مشکلات این روش در بعضی از زمان‌ها در حلقه الگوریتم باقی می‌ماند و نمی‌تواند راه‌حل را به دست آورد. برای رفع این مشکل، این مطالعه با ترکیب این الگوریتم با روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت مانع از حلقه ایجاد شده در الگوریتم می‌شود.

مراحل رویکرد ترکیبی به شرح زیر می‌باشد:

مرحله ۱- محدودیت‌های صفر و یک را با تبدیل متغیرهای باینری پیشنهادی به یک متغیر مثبت پیوسته آزاد کنید. مدل آزاد شده را برای محاسبه $U_{k,max}$ ، $U_{k,min}$ ، f_k^- و f_k^+ حل کنید.

مرحله ۲- سپس متغیر باینری را به‌عنوان یک متغیر پیوسته نگه دارید و از آن در مدل جدید استفاده کرده و مدل را حل کنید.

مرحله ۳- گزارش یا ثبت تمام مقادیر غیر صفر برای متغیر آزاد شده.

مرحله ۴- هر مقدار غیر صفر متغیرهای آزاد شده را روی ۱ تنظیم کنید و آن‌ها را در مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط اصلی محدودیت قرار دهید و دوباره مدل را حل کنید.

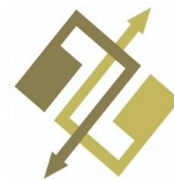
مرحله ۵- در نهایت گزارش $U_{k,max}$ ، $U_{k,min}$ ، f_k^- ، f_k^+ و متغیرهای تصمیم‌گیری را ارائه دهید.

۶- محاسبات عددی

یکی از وسایل الکترونیکی که مدام با آن سروکار داریم، رایانه و لپ‌تاپ است که از آن برای بهبود کار خود استفاده می‌کنیم. مجموعه‌ای از اجزای رایانه و لپ‌تاپ مانند صفحه‌کلید، ماوس و کابل‌ها پس از مدتی خراب می‌شوند که به آن‌ها ضایعات رایانه می‌گویند. به‌طورکلی،

¹ Aspiration level





یک ماده پلاستیکی در لوازم جانبی رایانه و حتی خود مانیتور رایانه وجود دارد که می‌توان با از بین بردن تمام قطعات رایانه و بازیافت ضایعات رایانه، علاوه بر پلاستیک، سیلیکون، آهن و سرب، از آن استفاده مجدد کرد و حتی جالب است بدانید که فلزات گران‌بهایی مانند طلا، نقره و پالادیوم در قطعات رایانه وجود دارد که با بازیافت آن‌ها می‌توان طلا، نقره و سایر فلزات مانند مس را استخراج کرد. این مقاله یکی از شرکت‌های بین‌المللی در ایران را به‌عنوان مورد مطالعاتی خود در نظر گرفته که واقع در استان تهران، مرکز ایران است. شرکت مورد مطالعه، خصوصی و ایرانی است که در زمینه طراحی، تولید و بازاریابی رایانه، لوازم الکترونیکی و تجهیزات فناوری اطلاعات فعالیت می‌کند. محصولات این شرکت قاب، مینی‌کیف، تبلت، بلندگو، ماوس و صفحه‌کلید، هدفون و هدست، پاور بانک و حتی محصولات مانند گیرنده‌های دیجیتال است. این مطالعه به‌طور خاص بر روی یکی از محصولات این شرکت یعنی ماوس رایانه تمرکز کرده است و زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار را برای این محصول طراحی و موردبررسی قرار داده است.

برخی از داده‌های موردنیاز برای حل مدل پیشنهادی مانند اندازه مساله، تعداد حالت‌های حمل‌ونقل با ظرفیت و انتشار کربن در زیر شرح داده شده است. لازم به ذکر است به دلیل سیاست‌های شرکت، امکان اشتراک‌گذاری اطلاعات از آن وجود نداشت؛ بنابراین، با توجه به رفتار داده‌های شرکت، ما از توزیع تصادفی برای پیاده‌سازی مدل پیشنهادی استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است این توزیع بر اساس داده‌های واقعی شرکت است.

جدول ۱ تولید داده‌های واقعی را بر اساس رفتار داده‌های شرکت نشان می‌دهد. هم‌چنین، زنجیره پیشنهادی برای شرکت دارای تامین‌کنندگان بالقوه ($S = 5$)، تولیدکننده ($M = 1$)، مراکز احتمالی توزیع ($D = 5$)، مشتریان ($K = 15$)، مراکز احتمالی جمع‌آوری ($C = 5$)، مراکز احتمالی جداسازی ($B = 4$)، مراکز بازیافت ($R = 2$) و مرکز دفع ($J = 1$) می‌باشد. این شرکت از چهار روش حمل‌ونقل برای زنجیره خود استفاده می‌کند، از جمله نیشان با ظرفیت (کیلوگرم) = ۲۰۰۰ و با ضریب انتشار کربن (کیلوگرم/کیلومتر) = ۰/۰۳۱، کامیون سبک با ظرفیت (کیلوگرم) = ۳۰/۰۰۰ و با ضریب انتشار کربن (کیلوگرم/کیلومتر) = ۰/۰۴۸، کامیون متوسط با ظرفیت (کیلوگرم) = ۶۰۰۰۰ و با ضریب انتشار کربن (کیلوگرم/کیلومتر) = ۰/۰۲۵۲ و کامیون‌های سنگین با ظرفیت (کیلوگرم) = ۱۰۰۰۰۰ و با ضریب انتشار کربن (کیلوگرم / کیلومتر) = ۰/۲۹۷.

جدول ۱- تولید داده‌های مساله بر اساس رفتار واقعی داده‌های شرکت.

Table 1- Problem data generation based on the actual behavior of company data.

پارامترها	پارامتر فازی ($\theta = \theta_{(1)}, \theta_{(2)}, \theta_{(3)}, \theta_{(4)}$)			
	$\theta_{(1)}$	$\theta_{(2)}$	$\theta_{(3)}$	$\theta_{(4)}$
De_{kpl}	DU[100 250]	DU[250 400]	DU[450 600]	DU[650 800]
$Co_{rel}(\$*10^3)$	DU[0.250 0.255]	DU[0.255 0.260]	DU[0.260 0.265]	DU[0.265 0.270]
$Cr_{rl}(\$*10^3)$	DU[0.225 0.230]	DU[0.230 0.235]	DU[0.235 0.240]	DU[0.240 0.245]
نیسان	DU [0.75 0.80]	DU [0.80 0.85]	DU [0.85 0.90]	DU [0.95 0.100]
کامیون سبک	DU [0.115 0.120]	DU [0.120 0.125]	DU [0.125 0.130]	DU [0.135 0.140]
کامیون متوسط	DU [0.125 0.135]	DU [0.135 0.145]	DU [0.150 0.155]	DU [0.160 0.165]
کامیون سنگین	DU [0.140 0.145]	DU [0.145 0.150]	DU [0.155 0.160]	DU [0.165 0.170]
CapCE (ton)	DU [30 40]	DU [40 50]	DU [50 60]	DU [60 65]
پارامترها	بازه			
$fcs_s(\$*10^3)$	DU[0.00714 0.0142]			
$pct_{rl}(\$*10^3)$	DU[9.55 11.32]			
$fcr_{rl}(\$*10^3)$	DU[19.2 22.1]			
$fco_{fe}(\$*10^3)$	DU[15.5 18.6]			
$sp_{pl}(\$*10^3)$	DU[3 15]			
$pr_{isl}(\$*10^3)$	DU[3 15]			
$spr_{sl}(\$*10^3)$	DU[3 15]			
$dis_{ee'}(km)$	DU[3 15]			
σ_{ipl}	0.65			
α_{pkl}	0.19			
β_{gbl}	0.4			

Table 1- Continued.

پارامترها	بازه
τ_{gbl}	0.4
h_{gbl}	0.2
δ_{grtl}	0.6
θ_{grtl}	0.4
λ_m (kg / km)	DU [0.185 0.225]
λ_{rt} (kg / km)	DU [0.234 0.258]
δ^+ ($\$*10^3$)	DU [0.0120 0.0125]
δ^- ($\$*10^3$)	DU [0.0125 0.0130]

این مطالعه بر اساس فرضیه‌ای برای دو نوع فناوری مورد استفاده در مراکز بازیافت مورد بررسی قرار گرفته است، به این معنی که نوع اول فناوری دارای هزینه کم اما انتشار کربن بالا است و هم‌چنین نوع دوم فناوری دارای هزینه بالا اما انتشار کربن کم است. این فرض بر اساس نظرات کارشناسان شرکت است.

۱-۶- اعتبار سنجی مدل

در این بخش، ابتدا اعتبار مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، پانزده مشکل آزمایشی برای مدل پیشنهادی با روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت و روش ترکیبی پیشنهادی حل شده و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، دو عامل مهم زمان حل مدل و شکاف بهینه که بر اساس رابطه (۴۶) در نظر گرفته شده به دست می‌آید.

$$\frac{Hybrid_{sol} - MCGP - UF_{sol}}{MCGP - UF_{sol}} \times 100. \quad (46)$$

با توجه به جدول ۲ می‌توان به‌طور واضح مشاهده کرد که نتایج حاصل از پانزده نمونه آزمون در نظر گرفته اعتبار مدل پیشنهادی را نشان می‌دهند. برای درک بهتر، شکل ۲ مقایسه زمان حل مدل بین روش ترکیبی پیشنهادی و روش سنتی برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای با تابع مطلوبیت را نشان می‌دهد که روش ترکیبی ۲۵٪ زمان حل را کاهش داده است. از طرف دیگر، برای نشان دادن شکاف بهینه بین راه‌حل‌های به‌دست‌آمده از دو روش با توجه به نتایج جدول ۳ در شکل ۱ نشان داده‌ایم که میانگین درصد شکاف بهینه در محدوده قابل قبول کم‌تر از ۵٪ بوده و این امر راه‌حلی برای اثبات اعتبار روش پیشنهادی و مدل مورد استفاده می‌باشد.

جدول ۲- سایز مساله آزمون در مطالعه موردی.

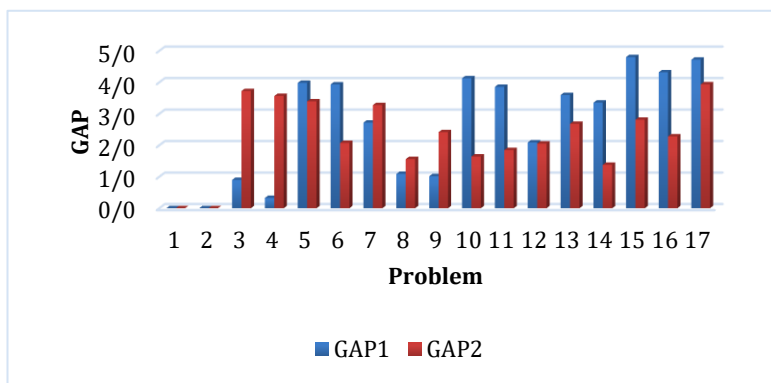
Table 2- The size of the test problem in the case study.

شماره آزمون	L	P	Q	J	I	R	B	C	K	D	M	S	G
1	2	1	1	3	2	2	1	3	1	4	1	2	12
2	2	1	1	3	2	2	1	3	1	4	1	2	12
3	3	1	1	5	2	2	2	3	1	4	1	3	12
4	3	2	2	5	3	2	2	5	2	4	1	3	12
5	3	2	2	8	3	3	2	5	2	4	1	4	12
6	4	2	2	8	4	3	3	5	2	4	2	4	12
7	4	3	3	12	4	3	3	7	3	4	2	5	12
8	4	3	3	12	4	4	3	7	3	4	2	5	12
9	4	3	3	15	5	4	2	7	3	4	2	6	12
10	5	3	4	15	5	4	2	7	4	4	2	6	12
11	5	4	4	17	4	10	4	7	4	4	2	7	12
12	5	4	5	17	4	10	4	7	4	4	3	7	12
13	5	4	5	17	5	10	6	8	5	4	3	8	12
14	5	5	5	20	5	14	6	8	5	4	3	8	12
15	6	5	6	20	7	14	8	9	5	4	3	9	12
16	6	5	6	20	7	16	8	9	6	4	3	9	12
17	6	5	8	20	9	16	8	10	6	4	4	10	12
18	7	6	8	23	9	20	10	10	6	4	4	10	12
19	7	6	10	23	10	20	10	12	7	4	4	12	12
20	7	6	10	23	10	20	10	12	7	4	4	12	12

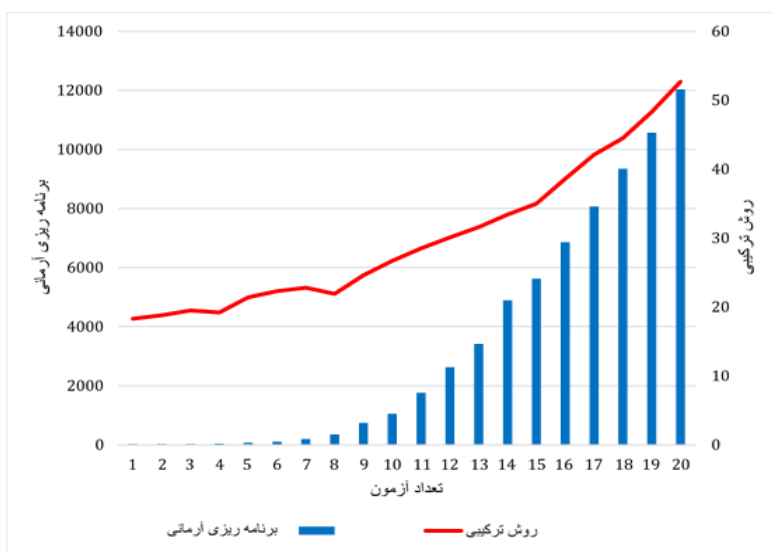


Table 3- The results of solving the proposed model in different dimensions.

شماره آزمون	برنامه ریزی آرمانی			روش ترکیبی			ارزیابی کیفیت راه حل	
	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان حل	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان حل	GAP1%	GAP2%
1	1058204.24	182.14	20.3	1058204.24	182.14	18.3	0.0	0.0
2	1072158.18	194.23	21.1	1072158.18	194.23	18.8	0.0	0.0
3	1113640.21	205.47	22.6	1123645.05	213.12	19.5	0.9	3.7
4	1154819.36	227.07	36.14	1158590.17	235.17	19.2	0.3	3.6
5	1277482.08	260.21	76.5	1328381.21	269.05	21.4	4.0	3.4
6	1555510.19	289.39	103.2	1616710.23	295.33	22.3	3.9	2.1
7	1766083.45	305.12	195.7	1814110.11	315.25	22.8	2.9	3.3
8	1837205.37	320.05	348.5	1857256.50	325.15	21.9	1.1	1.6
9	1859876.68	331.19	736.1	1878800.51	339.36	24.6	1.0	2.4
10	20147688.55	365.20	1053.8	20979820.7	371.14	26.7	4.1	1.6
11	22047205.15	378.68	1766.5	22897805.1	385.61	28.5	3.9	1.8
12	25357456.28	389.51	2623.4	25887616.3	397.47	30.1	2.1	2.1
13	28147084.15	410.25	3415.9	29158990.3	421.13	31.6	3.6	2.7
14	34308460.41	435.10	4896.1	35459806.5	441.18	33.4	3.4	1.4
15	39547371.36	462.19	5623.5	41446691.2	475.29	35	4.8	2.8
16	45149578.12	482.15	6854.2	47098990.6	493.34	38.6	4.3	2.3
17	50648476.45	508.07	8069.6	53038970.6	528.17	42.1	4.7	3.9
18	-	-	9345.3	59113215.1	682.14	44.5	-	-
19	-	-	10560.5	63154890.4	754.23	48.3	-	-
20	-	-	12038	69278482.2	805.47	52.7	-	-



شکل ۱- مقایسه شکاف بهینه بین دو روش استفاده شده برای حل مساله پیشنهادی.
Figure 1- Comparison of the optimal gap between the two methods used to solve the proposed problem.



شکل ۲- مقایسه زمان حل بین دو روش مختلف استفاده شده.
Figure 2- Comparison of the solution time between the two different methods used.



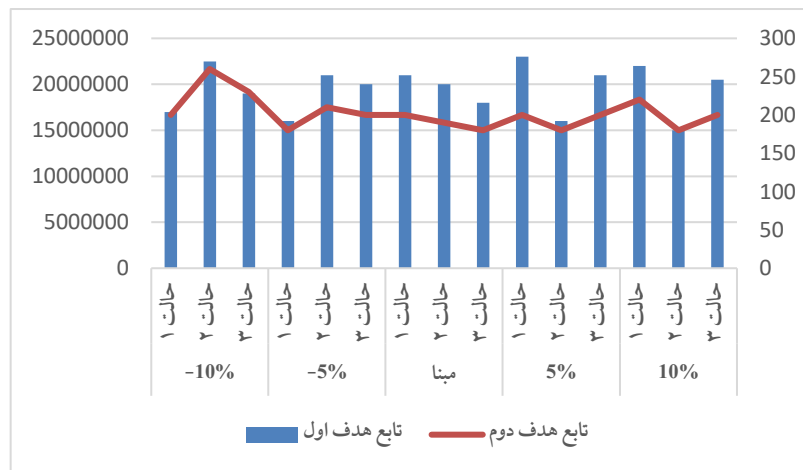
جدول ۳ نتایج استراتژیکی و تاکتیکی مطالعه موردی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، تامین‌کنندگان ۱ و ۴ برای تامین مواد اولیه شرکت انتخاب شده‌اند. از سوی دیگر، مراکز توزیع ۲ و ۴ و مراکز جمع‌آوری ۲ و ۳ افتتاح شده است و مرکز بازیافت در محل بالقوه ۱ با فناوری ۲ افتتاح می‌شود. علاوه بر این، مرکز جداسازی ۳ نیز افتتاح شده است. جدول ۳ هم‌چنین نشان می‌دهد که کدام حالت‌های حمل‌ونقل بین تسهیلات مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصمیمات تاکتیکی مطالعات موردی مربوط به میزان جریان محصول، اجزای محصول و مواد اولیه در شبکه پیشنهادی نیز گزارش شده است.

۶-۲- تحلیل حساسیت

در این بخش به تاثیر برخی پارامترهای مهم مدل پیشنهادی بر روی مساله طراحی شده می‌پردازیم. سه پارامتر مهم موردبررسی در این مطالعه شامل تقاضا، تورم و ظرفیت می‌باشد. ابتدا به تاثیر تغییرات پارامتر تورم می‌پردازیم. سپس به تغییرات تقاضا و سپس به تغییرات پارامتر ظرفیت مورد توجه قرار می‌گیرد. از طرف دیگر به تحلیل استحکام مدل عدم قطعیت و تاثیر آن بر روی طراحی شبکه را مورد تحلیل قرار می‌دهیم. در نهایت نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت را مورد بحث قرار داده و تصمیمات مدیریتی مناسب را پیشنهاد می‌دهیم.

۶-۲-۱- پارامتر تورم

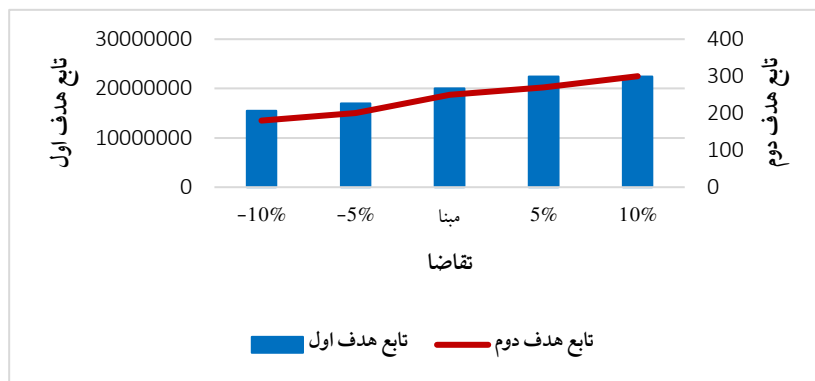
این بخش به بررسی تاثیر تورم بر استراتژی‌های مختلف قیمت اختصاص دارد (حالت ۱ = قیمت مقعر، حالت ۲ = قیمت مرجع، حالت ۳ = قیمت محدب). به این ترتیب، ما مشکل را برای مقادیر متنوع تورم حل می‌کنیم (از ۵٪- تا ۱۰٪+). نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۳، استراتژی قیمت‌گذاری برای تامین‌کننده و تولیدکننده در حالت‌های ۱ و ۳، زمانی که مقادیر تورم به ترتیب کوچک‌تر از مقادیر ۱۹۵/۰، ۲۱۰/۰، ۸۷/۰، ۹۰/۰، ۱۰۵/۰، ۲۲۵/۰ است، اهداف مساله را بهبود می‌بخشد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، اگر سایر پارامترهای مدل ثابت باشند و تورم تغییر کند، برای بازارهایی که نسبت به قیمت‌های بالاتر حساس‌تر هستند، روند رو به افزایش اثرات زیست‌محیطی و روند کاهش NPV در حالت ۳ تحت عدم قطعیت را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، با کاهش ارزش تورم، حالت ۳ توابع هدف را بهبود می‌بخشد. در نتیجه، با انتخاب سیاست قیمت‌گذاری حالت ۳ برای بازارهای با تغییرات تورم ۵٪-، ۳۳٪ بهبود عملکرد NPV و ۶٪ بهبود عملکرد محیطی را نسبت به حالت ۱ دارد. این در حالی است که انتخاب سیاست قیمت‌گذاری حالت ۱ برای بازارهای دارای تورم ۵٪+ تقریباً ۲۶٪/۱ بهبود عملکرد NPV و ۸۴٪/۰ بهبود عملکرد محیطی را در مقایسه با حالت ۳ دارد.



شکل ۳- اثر تورم بر روی اهداف.

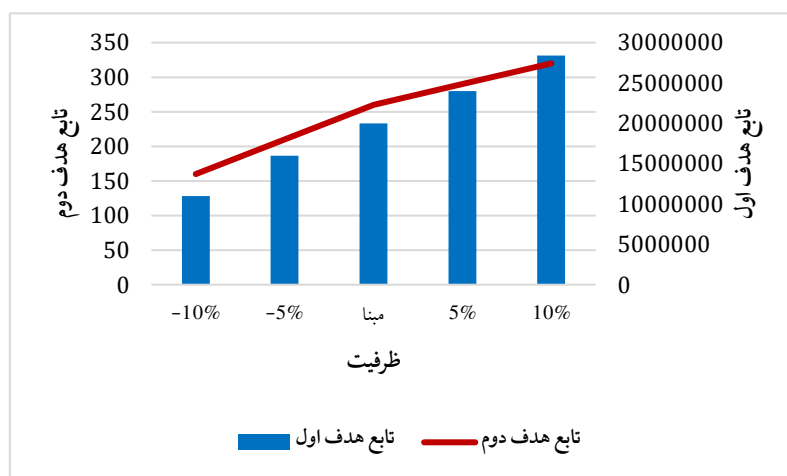
Figure 3- The effect of inflation on targets.

شکل ۴ نتایج تجزیه و تحلیل پارامتر تقاضا را نسبت به اهداف بررسی می‌کند. با توجه به این شکل، افزایش ۵٪ تقاضا باعث افزایش میزان NPV شده است، اما از ۵٪ به بعد مقادیر هدف ثابت بوده است که نشان‌دهنده افزایش هزینه‌های شبکه و تاثیر آن بر NPV هدف است. از سوی دیگر، افزایش تقاضا با افزایش تاثیرات زیست‌محیطی ارتباط مستقیم دارد. دلیل این امر افزایش میزان حمل و نقل با شیوه‌های حمل و نقل است که تاثیرات زیست‌محیطی بیشتری را در پی داشته است.



شکل ۴- تحلیل حساسیت پارامتر تقاضا.
Figure 4- Sensitivity analysis of the demand parameter.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، توابع هدف مستقیماً با تغییرات ظرفیت مرتبط هستند. با افزایش ۲۰٪ ظرفیت، تابع هدف اول ۶۱٫۵۹٪، تابع هدف دوم ۵۰٪ افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان افزایش تولید و حمل و نقل دانست، اما میزان سودآوری بسیار بیش‌تر از هدف زیست‌محیطی تحت تاثیر قرار می‌گیرد.



شکل ۵- تحلیل حساسیت ظرفیت تسهیلات بر میزان سودآوری و اثرات زیست‌محیطی.
Figure 5- Sensitivity analysis of facility capacity on profitability and environmental effects.

این بخش به تحلیل حساسیت پارامترهای مدل بهینه‌سازی فازی استوار تخصیص یافته است. ضرایب مجازات مورد استفاده در مدل بهینه‌سازی فازی استوار برای تابع هدف اول مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، با افزایش مقدار NPV کاهش می‌یابد. هم‌چنین، هیچ تغییری در NPV با تغییر ϵ ایجاد نمی‌شود.



جدول ۴- آنالیز حساسیت پارامترهای مدل بهینه‌سازی فازی استوار.
Table 4- Sensitivity analysis of the parameters of the robust fuzzy optimization model.

	$\eta = 0.3$	$\eta = 0.6$	$\xi_i = 1000$ $\eta = 0.9$
$ Z $	25275812.88	20220650.3	15110325.15
	$\xi_i = 100$	$\xi_i = 1000$	$\xi_i = 2000$
$ Z $	20220650.3	20220650.3	20220650.3



با توجه به تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته، آینده‌نگری تکنولوژیکی، تصمیمات استراتژیک مدیران را از چالش‌ها و فرصت‌های مورد انتظار آگاه می‌سازد. یکی از مهم‌ترین فرصت‌های ایجاد شده برای بازیافت زباله‌های الکترونیکی در بعد تکنولوژیکی، ایجاد فرصت‌های بسیار مناسب مانند نرخ بازگشت سرمایه، پتانسیل صادرات روش‌های بازیافت محلی و ارزش افزوده سرمایه‌گذاری است. سرمایه‌گذاری برای بهبود فرآیندهای بازیافت و تولید در بلندمدت سودآوری و ارزش *NPV* را افزایش می‌دهد، اما ممکن است هزینه‌ها را در کوتاه‌مدت نیز افزایش دهد. البته، ریسک تامین مالی فناوری برای کشورهای در حال توسعه را نباید فراموش کرد چراکه یکی از مشکلات دولت‌هاست. از سوی دیگر، سیاست‌های تشویقی دولت برای کمک به صنایع برای مدیریت ریسک تامین مالی با نرخ رشد سالانه، موثرتر خواهد بود؛ بنابراین، کارایی محصولات بازیافتی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار، به‌ویژه در صنایع الکترونیک رایج است و می‌توان آن‌ها را برای ارزش *NPV* بهتر مدیریت کرد. علاوه بر این، یک استراتژی قیمت‌گذاری مناسب با توجه به نرخ تورم در اقتصاد ناپایدار ایران برای بازارهایی که نسبت به قیمت‌های بالاتر حساس‌تر هستند، تورم می‌تواند عاملی در تعیین استراتژی‌های قیمت‌گذاری باشد. به این معنا که تعیین نرخ تورم و قیمت‌گذاری منجر به انتخاب محدوده سودآوری می‌شود که این امر اثرات زیست‌محیطی و حتی اجتماعی را در نظر می‌گیرد. در مورد سیاست‌هایی که برای تشویق تولیدکنندگان به طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار برای قطعات الکترونیکی استفاده می‌شود، عناصر مهمی برای ایجاد یک سیستم بازیابی کارآمد با تدوین اجرای طرح‌های سیاست مبتنی بر بازار پیشنهاد می‌شود. این سیاست در سطح کلان به منظور بازپس‌گیری تجهیزات خراب و دست‌دوم توسط تولیدکنندگان یا خورده‌فروشان می‌باشد به گونه‌ای که در زمان فروش مبلغی به‌عنوان بازدهی از مشتریان دریافت می‌شود. این امر باعث تقویت و توسعه طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار برای بازیافت قطعات الکترونیکی می‌شود، اما از طرف دیگر، این بار مالی بیشتری را بر روی مشتریان می‌گذارد؛ بنابراین، نقش دولت در تعیین مشوق‌های مالی برای مشتریان به منظور ایجاد فرهنگ سبز در لوازم الکترونیکی و تشویق آن‌ها به دادن تجهیزات قدیمی و دست‌دوم به تولیدکنندگان یا خورده‌فروشان اهمیت بسزایی دارد. در سطح کلان، چنین سیاستی فرصت‌های اقتصادی بسیار خوبی را از نظر درآمد، پس‌انداز ارزی و رشد اقتصادی کشور ایجاد می‌کند. از طرف دیگر سیاست اعتبار مالیاتی نیز می‌تواند یک انگیزه اقتصادی مستقیم برای اعتبار مالیاتی را ایجاد کند تا تولیدکنندگان را برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار تشویق کند. البته با توجه به شرایط اقتصادی کنونی جامعه، ممکن است تولیدکنندگان در برابر اجرای چنین مالیاتی مقاومت کنند؛ بنابراین، برای چنین مشکلی، دولت از یک سیستم تشویقی در سیاست‌های کلان مالیاتی استفاده کرده است که مالیات بر ارزش افزوده تولیدکنندگان را می‌بخشد. ایجاد سیستم سپرده‌گذاری یک سیاست موثر در کشورهای توسعه‌یافته برای بازیافت محصولات الکترونیکی است، اما به دلیل تورم در کشور، تولیدکنندگان تمایلی به اجرای چنین سیستمی ندارند؛ زیرا اغلب از کاهش فروش به دلیل میزان سپرده می‌ترسند و این موضوع، هزینه جمع‌آوری و حمل‌ونقل را افزایش می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه یکپارچه را با توجه به ویژگی‌های چند دوره‌ای و چند محصولی تحت عدم قطعیت برای پیکربندی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته پایدار ماوس رایانه ارائه داد. این زنجیره به دنبال زینفغان اصلی در مسیرهای روبه‌جلو و عقب برای بازیافت اجزای محصولات ماوس رایانه‌ای در پاسخ به تقاضا بود. مدل بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت تاسیسات، محدودیت‌های تعادل جریان، محدودیت‌های مکان‌یابی تسهیلات، محدودیت‌های ظرفیت حمل‌ونقل، محدودیت‌های سیاست کربن و محدودیت‌های تورمی در پی حداکثرسازی *NPV* به‌عنوان اولین تابع هدف و به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی به‌عنوان تابع هدف دوم پیشنهاد شد. علاوه بر این، مدل پیشنهادی تاثیر حالت‌های حمل‌ونقل، تورم، سیاست‌های انتشار کربن و انتخاب تامین‌کننده را بر روی شبکه مورد مطالعه نشان داد. برای مقابله با عدم قطعیت پارامترهای مدل از بهینه‌سازی فازی استوار استفاده شد و یک روش ترکیبی جدید برای حل پیچیدگی و ماهیت چندهدفه مدل پیشنهادی استفاده شد. مدل برنامه‌ریزی خطی

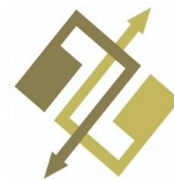
عدد صحیح مختلط حاصله به طور سیستماتیک برای شرکت در ایران حل شد. برای اعتبار سنجی مدل و روش پیشنهادی، چندین نمونه آزمون در ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج با دو عامل شکاف بهینه و زمان حل مقایسه شد که عملکرد مناسب روش پیشنهادی را نشان داد. سپس، نتایج تاکتیکی و استراتژی مدل برای مطالعه موردی ارائه شد که در آن جریان بهینه بین تسهیلات، انتخاب تامین کنندگان مناسب، انتخاب نوع حمل و نقل و افتتاح تسهیلات ارائه شد.

در نهایت، تجزیه و تحلیل حساسیت بر پارامترهای مهم مساله مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای بازارهایی که نسبت به قیمت‌های بالاتر حساس تر هستند، روند افزایشی اثرات زیست محیطی و روند کاهش NPV با توجه به قیمت محذب نسبت به قیمت مرجع وجود دارد. این بدان معناست که کاهش تورم برای قیمت محذب، عملکرد هدف را بهبود می بخشد. علاوه بر این، وقتی قیمت فروش مقعر برابر قیمت مرجع است، با افزایش تورم عملکرد توابع هدف را بهبود می بخشد. در نتیجه، تاثیر سطوح سبز بر استراتژی قیمت گذاری با توجه به تورم، قابلیت انعطاف پذیری قیمت فعلی را در دوره‌های قبل فراهم می کند. توجه به اثرات اجتماعی در طراحی زنجیره تامین حلقه بسته پایدار قطعات الکترونیکی می تواند به عنوان یک چالش جدید برای تحقیقات آینده باشد. از طرف دیگر در نظر گرفتن مباحث کنترل موجودی، اختلالات موجود در چنین زنجیره‌ای نیز می تواند علاقه مندی پژوهشگران در مطالعات آینده باشد.

منابع

- [1] Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International journal of production research*, 57(7), 2117–2135.
- [2] Ansari, Z. N., & Kant, R. (2017). A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. *Journal of cleaner production*, 142, 2524–2543. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.11.023
- [3] Gimenez, C., Sierra, V., & Rodon, J. (2012). Sustainable operations: Their impact on the triple bottom line. *International journal of production economics*, 140(1), 149–159. DOI:10.1016/j.ijpe.2012.01.035
- [4] Acquaye, A., Ibn-Mohammed, T., Genovese, A., Afrifa, G. A., Yamoah, F. A., & Oppon, E. (2018). A quantitative model for environmentally sustainable supply chain performance measurement. *European journal of operational research*, 269(1), 188–205. DOI:10.1016/j.ejor.2017.10.057
- [5] Govindan, K., & Gholizadeh, H. (2021). Robust network design for sustainable-resilient reverse logistics network using big data: A case study of end-of-life vehicles. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 149, 102279. DOI:10.1016/j.tre.2021.102279
- [6] Homayouni, Z., Pishvae, M. S., Jahani, H., & Ivanov, D. (2023). A robust-heuristic optimization approach to a green supply chain design with consideration of assorted vehicle types and carbon policies under uncertainty. *Annals of operations research*, 324(1–2), 395–435. DOI:10.1007/s10479-021-03985-6
- [7] Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydin, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. *Resources, conservation and recycling*, 104, 391–404. DOI:10.1016/j.resconrec.2015.07.006
- [8] Dayhim, M., Jafari, M. A., & Mazurek, M. (2014). Planning sustainable hydrogen supply chain infrastructure with uncertain demand. *International journal of hydrogen energy*, 39(13), 6789–6801. DOI:10.1016/j.ijhydene.2014.02.132
- [9] Ramezani, R., & Behboodi, Z. (2017). Blood supply chain network design under uncertainties in supply and demand considering social aspects. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 104, 69–82. DOI:10.1016/j.tre.2017.06.004
- [10] Motevalli, M. H. D., & Motamedi, M. (2020). Dynamic modeling to evaluate the efficiency of a sequential multilevel supply network. *Journal of decisions & operations research*, 5(3), 272–289. (In Persian). https://www.journal-dmor.ir/article_120313.html?lang=en
- [11] Jahani, H., Abbasi, B., & Alavifard, F. (2017). Supply chain network reconfiguration in new products launching phase. *IEEE international conference on industrial engineering and engineering management* (pp. 95–99). IEEE. DOI: 10.1109/IEEM.2017.8289858
- [12] Tofghi, S., Torabi, S. A., & Mansouri, S. A. (2016). Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. *European journal of operational research*, 250(1), 239–250.
- [13] Liu, M., Liu, R., Zhu, Z., Chu, C., & Man, X. (2018). A bi-objective green closed loop supply chain design problem with uncertain demand. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 967. DOI:10.3390/su10040967
- [14] Golpîra, H., Sadeghi, H., & Bahramara, S. (2021). Electricity supply chain coordination: Newsvendor model for optimal contract design. *Journal of cleaner production*, 278, 123368. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.123368
- [15] Bolhasani, P., Fallah, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Alam Tabriz, A. (2021). Presenting a multi-objective mathematical model of a location-routing-inventory problem for hazardous materials considering the concept elastic demand and queuing system. *Journal of decisions and operations research*, 6(2), 210–241. (In Persian). http://www.journal-dmor.ir/article_136500_495740a95cc285e0d82b225078bbe378.pdf?lang=en
- [16] 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. DOI:10.1007/s00521-018-3847-9





- [17] Kiani, S., & Samouei, P. (2020). Multi-objective dynamic recycling-routing-inventory for different pharmaceutical items with considering discount in a closed-loop supply chain. *Journal of decisions and operations research*, 5(3), 290-311. (In Persian). https://www.journal-dmor.ir/article_120337.html?lang=en
- [18] Gholizadeh, H., & Fazlollahtabar, H. (2020). Robust optimization and modified genetic algorithm for a closed loop green supply chain under uncertainty: Case study in melting industry. *Computers and industrial engineering*, 147, 106653. DOI:10.1016/j.cie.2020.106653
- [19] Paydar, M. M., Babaveisi, V., & Safaei, A. S. (2017). An engine oil closed-loop supply chain design considering collection risk. *Computers and chemical engineering*, 104, 38–55. DOI:10.1016/j.compchemeng.2017.04.005
- [20] Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European journal of operational research*, 263(1), 108–141. DOI:10.1016/j.ejor.2017.04.009
- [21] Goudenege, G., Chu, C., & Jemai, Z. (2013). Reusable containers management: From a generic model to an industrial case study. *Supply chain forum: an international journal*, 14(2), 26-38. DOI: 10.1080/16258312.2013.11517313
- [22] Gholizadeh, H., Jahani, H., Abareshi, A., & Goh, M. (2021). Sustainable closed-loop supply chain for dairy industry with robust and heuristic optimization. *Computers and industrial engineering*, 157, 107324. DOI:10.1016/j.cie.2021.107324
- [23] Polo, A., Peña, N., Muñoz, D., Cañón, A., & Escobar, J. W. (2019). Robust design of a closed-loop supply chain under uncertainty conditions integrating financial criteria. *Omega (United Kingdom)*, 88, 110–132. DOI:10.1016/j.omega.2018.09.003
- [24] Govindan, K., & Soleimani, H. (2017). A review of reverse logistics and closed-loop supply chains. *Journal of cleaner production*, 142, 371–384. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.03.126
- [25] Zhen, L., Huang, L., & Wang, W. (2019). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of cleaner production*, 227, 1195–1209. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.04.098
- [26] Morganti, E., & Gonzalez-Feliu, J. (2015). City logistics for perishable products. The case of the Parma's Food Hub. *Case studies on transport policy*, 3(2), 120–128. DOI:10.1016/j.cstp.2014.08.003
- [27] Sel, Ç., & Bilgen, B. (2015). Quantitative models for supply chain management within dairy industry: A review and discussion. *European journal of industrial engineering*, 9(5), 561–594. DOI:10.1504/EJIE.2015.071772
- [28] Yavari, M., & Geraeli, M. (2019). Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. *Journal of cleaner production*, 226, 282–305. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.03.279
- [29] Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (2020). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of cleaner production*, 242, 118452. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118452
- [30] Pavlo, S., Fabio, C., Hakim, B., & Mauricio, C. (2018, June). 3D-Printing based distributed plastic recycling: A conceptual model for closed-loop supply chain design. *2018 IEEE international conference on engineering, technology and innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-8). IEEE. DOI: 10.1109/ICE.2018.8436296
- [31] Liao, H., & Li, L. (2021). Environmental sustainability EOQ model for closed-loop supply chain under market uncertainty: A case study of printer remanufacturing. *Computers and industrial engineering*, 151, 106525. DOI:10.1016/j.cie.2020.106525
- [32] Saedinia, R., Vahdani, B., Etebari, F., & Afshar Nadjafi, B. (2019). Robust gasoline closed loop supply chain design with redistributing, service sharing and intra-district service transfer. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 123, 121–141. DOI:10.1016/j.tr.2019.01.015
- [33] Yavari, M., & Zaker, H. (2020). Designing a resilient-green closed loop supply chain network for perishable products by considering disruption in both supply chain and power networks. *Computers and chemical engineering*, 134, 106680. DOI:10.1016/j.compchemeng.2019.106680
- [34] Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Akbapour, N., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and sustainable energy reviews*, 141, 110821. DOI:10.1016/j.rser.2021.110821
- [35] Yun, Y., Chuluunsukh, A., & Gen, M. (2020). Sustainable closed-loop supply chain design problem: A hybrid genetic algorithm approach. *Mathematics*, 8(1), 84. DOI:10.3390/math8010084
- [36] Ahmed, M. M., Salaudin Iqbal, S. M., Priyanka, T. J., Arani, M., Momenitabar, M., & Billal, M. M. (2021). An environmentally sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty: application of optimization. *Progress in intelligent decision science: proceeding of IDS 2020* (pp. 343-358). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-66501-2_28
- [37] Mohammed, F., Selim, S. Z., Hassan, A., & Syed, M. N. (2017). Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty. *Transportation research part D: transport and environment*, 51, 146–172. DOI:10.1016/j.trd.2016.10.033
- [38] Fu, R., Qiang, Q. P., Ke, K., & Huang, Z. (2021). Closed-loop supply chain network with interaction of forward and reverse logistics. *Sustainable production and consumption*, 27, 737–752.
- [39] Wan, N., & Hong, D. (2019). The impacts of subsidy policies and transfer pricing policies on the closed-loop supply chain with dual collection channels. *Journal of cleaner production*, 224, 881–891. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.03.274
- [40] Nayeri, S., Paydar, M. M., Asadi-Gangraj, E., & Emami, S. (2020). Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design. *Computers and industrial engineering*, 148, 106716. DOI:10.1016/j.cie.2020.106716



- [41] Talaei, M., Farhang Moghaddam, B., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (2016). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: A numerical illustration in electronics industry. *Journal of cleaner production*, 113, 662–673. DOI:10.1016/j.jclepro.2015.10.074
- [42] Sazvar, Z., Zokaee, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Salari, S. A. sadat, & Nayeri, S. (2022). Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty, manufacturer's brand and waste management. *Annals of operations research*, 315(2), 2057–2088. DOI:10.1007/s10479-021-03961-0
- [43] Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., & Jafari, H. (2017). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers and industrial engineering*, 109, 191–203. DOI:10.1016/j.cie.2017.04.038
- [44] Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of cleaner production*, 196, 273–296. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.05.245
- [45] Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoğlu, A. (2015). Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming. *Applied mathematical modelling*, 39(9), 2661–2702. DOI:10.1016/j.apm.2014.11.004
- [46] Amin, S. H., Zhang, G., & Akhtar, P. (2017). Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert systems with applications*, 73, 82–91. DOI:10.1016/j.eswa.2016.12.024
- [47] Liu, Z., Li, K. W., Li, B. Y., Huang, J., & Tang, J. (2019). Impact of product-design strategies on the operations of a closed-loop supply chain. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 124, 75–91. DOI:10.1016/j.tre.2019.02.007
- [48] Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Mirjalili, S. (2018). Hybrid optimizers to solve a tri-level programming model for a tire closed-loop supply chain network design problem. *Applied soft computing journal*, 70, 701–722. DOI:10.1016/j.asoc.2018.06.021
- [49] Cheraghalipour, A., Paydar, M. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). A bi-objective optimization for citrus closed-loop supply chain using Pareto-based algorithms. *Applied soft computing journal*, 69, 33–59. DOI:10.1016/j.asoc.2018.04.022
- [50] Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G., & Ahmadi, E. (2018). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 341, 69–91.
- [51] Pedram, A., Pedram, P., Yusoff, N. Bin, & Sorooshian, S. (2017). Development of closed-loop supply chain network in terms of corporate social responsibility. *PloS one*, 12(4), e0174951. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174951>
- [52] Govindan, K., Mina, H., Esmaeili, A., & Gholami-Zanjani, S. M. (2020). An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of cleaner production*, 242, 118317. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118317
- [53] Zahedi, A., Salehi-Amiri, A., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Diabat, A. (2021). Designing a closed-loop supply chain network considering multi-task sales agencies and multi-mode transportation. *Soft computing*, 25, 6203–6235.
- [54] Pourmehdi, M., Paydar, M. M., & Asadi-Gangraj, E. (2020). Scenario-based design of a steel sustainable closed-loop supply chain network considering production technology. *Journal of cleaner production*, 277, 123298. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.123298
- [55] Chang, C. Ter. (2011). Multi-choice goal programming with utility functions. *European journal of operational research*, 215(2), 439–445. DOI:10.1016/j.ejor.2011.06.041