



The Design of a Multi-directional Network Chain Model Offering a Closed Loop in the Automotive Industry by Providing Energy and Time Efficiency Programs

Saeed Aminpour

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran. E-mail: aminpour_saeed@ut.ac.ir

Alireza Irajpour

*Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran. E-mail: airajpour@yahoo.com

Mehdi Yazdani

Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran. E-mail: m_yazdani@qiau.ac.ir

Ali Mohtashami

Associate Prof., Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran. E-mail: mohtashami07@gmail.com

Abstract

Objective: Today, green supply chain managers in leading companies strive to offer green logistics and improve their environmental performance throughout the supply chain as a strategic weapon to gain a sustainable competitive advantage by creating profitability and satisfaction across the supply chain. Therefore, considering the purpose of the research, which is to design a multi-objective model of closed-loop supply chain networks in the automotive industry according to energy efficiency and time efficiency plans, we try to model the closed-loop supply chain in the automotive industry.

Methods: In this study, we use the MOPSO method to facilitate its implementation and its ability to provide good convergence, as well as to maintain a proper balance between exploitation and exploration, as well as the NSGA II genetic algorithm.

Results: In the study of the findings of the proposed algorithms, it found that the average error resulting from these algorithms is less than 0.04. The results also

show that the proposed algorithms have the necessary efficiency in solving these problems.

Conclusion: We note the significant findings of our model as follows: (1) An efficient closed-loop network that shows the economic benefits of considering the value of time due to the recycling of worn-out products. (2) Has the ability to demonstrate the capacity to achieve maximum benefits in terms of cost value as well as environmental prospects.

Keywords: Closed-loop supply chain network, automotive industry, multi-objective model, energy efficiency and time.

Citation: Aminpour, Saeed, Irajpour, Alireza, Yazdani, Mehdi & Mohtashami, Ali (2020). The Design of a Multi-directional Network Chain Model Offering a Closed Loop in the Automotive Industry by Providing Energy and Time Efficiency Programs. *Industrial Management Journal*, 12(1), 319-343. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2020, Vol. 12, No.1, pp. 319- 343

DOI: 10.22059/imj.2020.304115.1007743

Received: December 08, 2019; Accepted: March 05, 2020

© Faculty of Management, University of Tehran



طراحی مدل چندهدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت خودرو با توجه به طرح‌های بازده انرژی و زمان

سعید امین پور

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه: aminpour_saeed@ut.ac.ir

علیرضا ایرج پور

* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه: airajpour@yahoo.com

مهدی یزدانی

استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه: m_yazdani@qiau.ac.ir

علی محتشمی

دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه: mohtashami07@gmail.com

چکیده

هدف: تعداد وسایل نقلیه در جهان، به علت پیشرفت‌های تکنولوژی و کاهش قیمت، در حال افزایش است. این وسایل نقلیه، در دوره تولید و اتمام طول عمرشان، تبعات منفی زیادی دارند. این مسائل، نیاز به بازیافت و دفع وسایل نقلیه در سطح جهانی را افزایش داده است. از این رو، مدیریت بازیافت خودروها، هم به علت عوامل اقتصادی و هم آثار زیست‌محیطی، اهمیت دارد. استراتژی‌های صنعت خودرو را دولت تنظیم می‌کند. یکی از روش‌های مناسب برای حل این مشکل، استفاده از زنجیره تأمین حلقه بسته است. در این پژوهش، مدل چندهدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت خودرو با توجه به طرح‌های بازده انرژی و زمان طراحی شده است.

روش: در این پژوهش، از سه روش حل قطعی، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک NSGA II استفاده شده است.

یافته‌ها: در بررسی یافته‌های الگوریتم‌های پیشنهادی، مشخص شد که میانگین خطای حاصل از این الگوریتم‌ها کمتر از ۰/۰۴ است. بر اساس نتایج، الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل این مسائل از کارایی لازم برخوردارند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که شبکه حلقه بسته، در طول زمان و با توجه به بازیافت محصول فرسوده، از لحاظ اقتصادی کارآمد است. افزون بر این، برای دستیابی به حداکثر مزایا، از نظر ارزش هزینه و چشم‌انداز محیطی، به اندازه کافی ظرفیت دارد.

کلیدواژه‌ها: شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، صنعت خودرو، مدل چندهدفه، بازده انرژی و زمان.

استناد: امین پور، سعید؛ ایرج پور، علیرضا؛ یزدانی، مهدی؛ محتشمی، علی (۱۳۹۹). طراحی مدل چندهدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت خودرو با توجه به طرح‌های بازده انرژی و زمان. مدیریت صنعتی، ۱۲(۲)، ۳۱۹-۳۴۳.

مدیریت صنعتی، ۱۳۹۹، دوره ۱۲، شماره ۲، صص. ۳۱۹-۳۴۳

DOI: 10.22059/imj.2020.304115.1007743

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

امروزه، یکی از صنایع بسیار مهمی که با چالش‌های گوناگونی در زنجیره تأمین خود روبه‌رو است، صنایع خودروسازی است. تولید خودرو، روند پُرانرژی و پیچیده‌ای دارد و مواد اولیه و آب شایان توجهی را مصرف می‌کند. برای حفظ رقابت، تولیدکنندگان تجهیزات اصلی خودرو با بهبود مستمر روند تولیدی خود و حرکت به سمت انتشار کمتر کربن و افزایش پایداری، در تلاش‌اند تا محصولات را با کیفیت بهتری به مشتریان ارائه دهند (گیامپیری، چین، ما، اسمالبون، روسکیلی^۱، ۲۰۲۰: ۱). تعداد وسایل نقلیه در جهان، به‌علت پیشرفت‌های تکنولوژی و کاهش قیمت آن، رو به افزایش است. با این حال، وسایل نقلیه، چه در زمان تولید و چه در پایان طول عمرشان، هم از لحاظ انرژی و هم از لحاظ مصرف منابع، تبعات منفی زیادی برای محیط زیست بر جا می‌گذارند. این مسائل، افزایش نیاز به بازیافت و دفع وسایل نقلیه در سطح جهانی را ضروری ساخته است. وسیله نقلیه عمدتاً از قطعات فلزی تشکیل شده است؛ اما باقی وسایل بازیافتی خودرو، به‌طور نامحدودی به محیط زیست منتقل می‌شود. بنابراین، مدیریت بازیافت خودروها، هم به‌علت عوامل اقتصادی و هم از نظر آثار زیست‌محیطی، برای جوامع بشری بسیار حیاتی است. دولت تدوین‌کننده استراتژی‌های صنعت خودرو است (اوزسیلان، دمیرل، ستینکایا و دمیرل^۲، ۲۰۱۷). در همین راستا، دولت‌ها با اتخاذ بخش‌نامه‌هایی از قبیل ایجاد محدودیت در استفاده و تولید مواد خطرناک و میزان تولید زباله تجهیزات کارخانه‌ای و الکترونیکی، بیش از پیش، سازمان‌ها را برای بازیافت محصولات استفاده شده، تحت فشار قرار می‌دهند. این مقررات، به‌منظور کاهش تأثیر فعالیت‌های تولید بر تغییرات آب‌وهوا تصویب شده است (ساموئل، ونکاتاداری، دیالو و خاطب^۳، ۲۰۲۰). در واقع، نگرانی‌های زیست‌محیطی موجب شده است که تولیدکنندگان و به‌خصوص تولیدکنندگان وسایل نقلیه، به‌طور فزاینده‌ای به توسعه شبکه حلقه بسته^۴ برای استفاده مجدد، بازیافت و بازسازی مواد خام و کاهش انرژی، به برنامه‌ریزی‌های گسترده اقدام کنند (کادامبالا، سوبرامانیان، تیواری، عبدالرحمن و لیو^۵، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، رقابت شدید در بازارهای جهانی امروز، انتظار بیشتر مشتریان و پیشرفت‌های سریع در فناوری اطلاعات، به کوتاه‌شدن چرخه عمر محصول، افزایش ظرفیت حمل‌ونقل و رفتارهای پویای مشتریان در نحوه انتخاب و تقاضای آنها منجر شده است (جبارزاده، هاگتون و خسروجردی^۶، ۲۰۱۸). بنابراین، می‌توان گفت که امروزه، زنجیره تأمین حلقه بسته، از جنبه صنعتی و محیط زیستی نقشی اساسی دارد. در مدل‌های زنجیره تأمین رو به جلو، تنها تأمین‌کننده، تولیدکننده و خرده‌فروش در نظر گرفته می‌شود؛ اما در زنجیره لجستیک معکوس، فرایند بازیافت محصول نیز لحاظ می‌شود. در واقع، این فرایند شامل جمع‌آوری، بازیافت و دفع زباله‌های تولیدی است. اگر زنجیره‌های تأمین رو به جلو و معکوس در کنار هم قرار گیرند، زنجیره تأمین بسته ایجاد می‌شود. بنابراین، زنجیره تأمین حلقه بسته، ترکیبی از طراحی، بررسی و کنترل زنجیره تأمین در جهت به حداکثر رساندن ارزش محصولات برگشتی، از طریق بازیابی و بازیافت این محصولات است (احمدی و حسن‌زاده امین^۷، ۲۰۱۹). در شبکه حلقه بسته، تمام فرایندهای بازسازی و بازیافتی به کار می‌رود تا محصولی که قبلاً استفاده شده، قابلیت استفاده مجدد پیدا کند، همچنین، به تولیدکنندگان اجازه می‌دهد که ضمن بهبود بخشیدن به عملیات خود، هزینه‌های استفاده از مواد اولیه خام را کاهش دهند (جیووانی^۸، ۲۰۱۸).

1. Giampieri, Chin, Ma, Smallbone, Roskilli

3. Samuel, Venkatadri, Diallo, Khatab

5. Kadambala, Subramanian, Tiwari, Abdulrahman, Liu

7. Ahmadi, Hassanzadeh Amin

2. Özceylan, Demirel, Çetinkaya, Demirel

4. Closed loop supply chain

6. Jabbarzadeh, Haughton, Khosrojerdi

8. Giovanni

در زنجیره تأمین سنتی، حرکات جریان مواد از طرف تأمین‌کنندگان به مشتریان هدایت می‌شود؛ اما در زنجیره تأمین معکوس، گردش مواد از مشتریان به سمت تأمین‌کننده است و کالاهای مصرفی، از مصرف‌کننده نهایی به مراکز تولید منتقل می‌شود. بنابراین، یکپارچگی زنجیره‌های حمل‌ونقل و معکوس در این روش، به زنجیره تأمین حلقه بسته منجر می‌شود (گیامپیری و همکاران، ۲۰۲۰).

در ایران، هم اکنون روند از رده خارج کردن وسایل نقلیه فرسوده برای موتورسیکلت بیش از ۱۰ سال، سواری بیش از ۲۰ سال، خودروهای سواری عمومی و وانت‌بار بیش از ۱۵ سال، اتوبوس و مینی‌بوس شهری بیش از ۱۰ سال، اتوبوس بین شهری بیش از ۱۵ سال و کامیون و تریلی بیش از ۲۵ سال است که به کندی و با محدودیت‌هایی در حال اجراست. این در حالی است که میانگین عمر خودروهای کشورهای پیشرفته بین ۱۰ تا ۱۲ سال است و پس از آن، خوردو به سرعت به چرخه بازیافت منتقل می‌شود. در سال ۱۳۸۴، پس از تشکیل ستادهای مدیریت حمل‌ونقل سوخت و نوسازی ناوگان حمل‌ونقل، روند از رده خارج کردن خودروهای فرسوده آغاز شد؛ به طوری که هم‌اکنون، ۱۲۰ مرکز اسقاط خودرو در کشور وجود دارد که تا پایان سال ۹۱، توانسته‌اند بیش از یک میلیون خودروی فرسوده سبک و سنگین را از گردونه حمل‌ونقل خارج کنند؛ اما طبق آمار پلیس راهور ناجا (۱۳۹۱) تعداد ۹۶۳ هزار خودروی دیگر در کشور وجود دارد که به سن فرسودگی رسیده‌اند و مالکان آنها برای خروج خودرو خود اقدام نکرده‌اند (حسینی، رستمی و عبدی، ۱۳۹۲). از سوی دیگر، با توجه به افزایش قیمت و کمبود مواد اولیه در تولید بسیاری از وسایل خودروها (به‌طور مثال آلومینیم و گرن شدن آن در سطح جهان) لزوم و اهمیت زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت خودروسازی کشور، بیش از پیش نمایان شده است. بنابراین، در این پژوهش تلاش شده است تا با تشریح و بررسی زنجیره تأمین حلقه بسته و طراحی مدل چندهدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت خودرو، به بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین اقدام شود.

یکی از تصمیم‌های استراتژیک جامع در مدیریت زنجیره تأمین، مشکل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته است که برای بهره‌برداری طولانی‌مدت و کارآمد، به بهینه‌سازی کل زنجیره تأمین نیاز دارد. طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، شامل ایستگاه‌ها و ظرفیت‌های تأسیسات تولیدی و کانال‌های توزیع از سمت مشتریان، به سمت تأمین‌کنندگان و برعکس است. علاوه بر این، کنترل پارامترهای نامشخص، یکی دیگر از کارهای مدیریتی در زنجیره تأمین حلقه بسته است. عدم قطعیت در عرضه (تأخیر در ارسال مواد اولیه یا محصولات)، فرایندهای توزیع و تولید، برآورد تقاضا و مقدار کالاهای برگشتی، تنها تعدادی از مشکلات موجود در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته است. از این رو، پیچیدگی و ماهیت پویای هر زنجیره تأمین، عدم اطمینان زیادی ایجاد می‌کند و به‌طور شایان توجهی بر تصمیم‌گیری شبکه و زنجیره، تأثیر می‌گذارد (قهرمانی نهر، کیان و ثابت^۱، ۲۰۱۹: ۴۵۴).

در زنجیره تأمین حلقه بسته، مدیریت برگشتی، در قالب لجستیک معکوس اعمال می‌شود. به دلایل مختلف، جریان مواد و کالاها، در خلاف جهت عادی زنجیره، اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین پرداختن به موضوع شبکه لجستیک معکوس و اجزای آن، مانند مکان‌یابی، مسیریابی و طراحی سیستم حمل‌ونقل بهبود یافته و مواردی از این قبیل، مؤثر و ضروری است. مدل ارائه شده در این پژوهش، چندمحصولی و چندرده‌ای است که هم‌زمان، هزینه‌های حمل‌ونقل و احداث تسهیلات را

در برمی‌گیرد. این مدل، با در نظر گرفتن کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه‌های استقرار تسهیلات و هزینه‌های حمل‌ونقل) در بازه‌های زمانی مختلف، حداقل‌سازی انرژی در طول مسیر و میزان تقاضای محصولات برگشتی، از نوع مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی سخت^۱ است که در آن، زمان حل مسئله به‌صورت نمایی و با توجه به ابعاد مسئله افزایش می‌یابد.

ادامه مقاله، به این ترتیب ساختاربندی شده است: در بخش بعد، به بررسی ادبیات مربوط به زنجیره تأمین حلقه بسته می‌پردازیم. در بخش روش‌شناسی، مفروضات مدل و فرمول ریاضی مدل پیشنهادی معرفی می‌شود. در بخش یافته‌ها، نتایج کمی چند مسئله طراحی شده در اندازه‌های مختلف گزارش می‌شود و سرانجام در بخش آخر، نتایج و پیامدهای مدیریتی بررسی شده و پیشنهادهایی در زمینه پژوهش‌های آینده بیان خواهد شد.

پیشینه پژوهش

محمدی، عالم تبریز و پیشوایی (۱۳۹۷) در پژوهشی، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی، توسعه و تصمیم‌های مالی، طراحی کرده‌اند. در این مطالعه، محققان مدلی چندمحصولی، چندهدفی، غیرقطعی و حلقه بسته ارائه داده‌اند. آنها برای مواجهه با عدم قطعیت مربوط به تقاضا و بازگشت سرمایه، از روش مسیر سناریو استفاده کرده‌اند و برای هر دوره، سه سناریو خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه را در نظر گرفته‌اند. این سناریوها با روش فرموله‌بندی مسیر، مدل‌سازی شده است. بررسی نتایج این مدل، نشان‌دهنده تأثیر مثبت تصمیم‌های مالی بر سطح خدمت ارائه شده به توزیع‌کنندگان است. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ملاحظه یکپارچه تصمیم‌های مالی همراه با تصمیم‌های فیزیکی، عملکرد زنجیره تأمین را هم از لحاظ سودآوری و هم از لحاظ پاسخ به نیاز مشتریان، بهبود می‌بخشد.

در مقاله‌ای دیگر، حاجیان، افشار کاظمی، سیدحسینی و اشلقی (۱۳۹۸) به‌صورت جدیدی با استفاده از مسئله مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی را در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای محصولات فاسد شنی با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی ارائه دادند، به نحوی که هم‌زمان، مجموع هزینه‌های سیستم، مجموع زمان حمل‌ونقل و انتشار آلاینده‌ها، در کل شبکه کمینه شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تصمیم‌های مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی، به هم وابسته بوده و تعیین مقدار بهینه این متغیرها در تعامل با هم، می‌تواند به یافتن یک سیستم بهینه با حداقل هزینه ممکن منجر شود. آنها پژوهش خود را برای محصولات فاسد شنی انجام داده‌اند و فقط زنجیره امحای محصولات را در نظر گرفته‌اند؛ اما در پژوهش حاضر، با توجه به نوع صنعت بررسی شده (خودروسازی) در زنجیره حلقه بسته، علاوه بر امحای، بازیافت محصولات برای تولیدکننده و تأمین‌کننده نیز در نظر گرفته شده است.

اختیاری، زندیه، عالم تبریز و ربیعه (۱۳۹۸)، برای حل مسئله انتخاب هم‌زمان تأمین‌کننده و تخصیص سفارش در زنجیره تأمین چندمرحله‌ای، یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی طراحی کرده‌اند. آنها از تکنیک بهینه‌سازی استوار، برای برخورد با شرایط عدم قطعیت مسئله و از الگوریتم ژنتیک دوسطحی، برای دستیابی به جواب‌های بهینه مسئله بهره برده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از حل یک مسئله واقعی در صنعت فولاد تحت سناریوهای مختلف، مؤید آن است که اهداف قابلیت اطمینان و

هزینه، رابطه متعاضی با یکدیگر دارند و افزایش تعداد اعضای زنجیره، به افزایش قابلیت اطمینان و هزینه سیستم منجر می‌شود. در نهایت، محققان بیان کردند که برای بهبود قابلیت اطمینان زنجیره تأمین، باید متوسط قابلیت اطمینان مرحله‌ای از زنجیره تأمین که در مقایسه با سایر مراحل در کمترین (بیشترین) سطح قرار دارد، افزایش (کاهش) یابد تا از بروز هزینه‌های اضافه جلوگیری شود. همچنین رویکرد تعاملی در روش‌شناسی پیشنهاد شده، راهکار مناسبی را برای بیشینه‌سازی منافع سطوح رهبر و پیرو ارائه داده است؛ اما محققان در مدلی که طراحی کرده‌اند، زنجیره تأمین حلقه بسته و همچنین، ملاحظات زیست‌محیطی را در نظر نگرفته‌اند.

فتحی، نصراللهی و زمانیان (۱۳۹۸)، برای شرکت شیشه‌سازی همدان، با در نظر گرفتن ابعاد پایداری، یک مدل ریاضی شبکه زنجیره تأمین ارائه داده‌اند. در این مقاله، محققان برای به حداقل رساندن آثار زیست‌محیطی و حداکثرسازی آثار اجتماعی و سود اقتصادی، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه فازی را در طراحی زنجیره تأمین پایدار حلقه بسته در وضعیت عدم قطعیت به کار برده‌اند. در نتایج پژوهش، محققان گفته‌اند که ملاحظات هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی و همچنین، عدم قطعیت در بعضی از پارامترها، همچون تقاضا و میزان برگشتی، از نظر سودآوری و پاسخ‌گویی به نیازهای مشتریان، عملکرد زنجیره تأمین را بهبود می‌دهد. در این پژوهش نیز، محققان در مدل ارائه شده، زنجیره تأمین حلقه بسته و چرخه بازیافتی محصولات را بررسی نکرده‌اند.

جیوانی، سلیمانی و کانن^۱ (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای، ۳۸۲ مقاله منتشر شده از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ را طبقه‌بندی کرده‌اند. همچنین، بر اساس ۱۰ عامل، از جمله سال انتشار، رویکردها، اهداف، کارکردها و... طبقه‌بندی دقیق‌تری ارائه داده‌اند. بر اساس نتایج آنها، تقریباً ۵۰ درصد از کل پژوهش‌ها، در خصوص طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته و حدود ۴۰ درصد در خصوص طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس انجام شده است. همچنین، طبق نتایج این طبقه‌بندی، بیشتر مقالات منتشر شده مربوط به مدل‌های تک هدفی بوده است و مدل‌های چندهدفی زیادی در این مقالات دیده نمی‌شود.

سلیمانی، گویندان، سقفی و جعفری^۲ (۲۰۱۷) در مقاله‌ای به ارائه مدل چندهدفه‌ای برای چندین محصول با رویکرد سبز پرداخته‌اند و آن را با روش ژنتیک حل کرده‌اند.

اوزسیلان و همکاران (۲۰۱۷)، بر اساس روند بازیافت خودرو در ترکیه، یک زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد داده‌اند. آنها در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفه را برای بررسی کرده‌اند و زنجیره تأمین حلقه بسته‌ای را با توجه به ادغام مجدد آنها در زنجیره‌های عرضه حمل‌ونقل، ارائه داده‌اند. در این پژوهش، برای نشان دادن عملکرد مدل پیشنهادی و کاربرد آن در صنعت خودرو، چندین سناریو زنجیره تأمین حلقه بسته بررسی شده است.

قهرمانی نهر، کیان و ثابت^۳ (۲۰۱۹)، یک الگوی برنامه‌ریزی غیرخطی با قابلیت کاهش هزینه‌های کل شبکه ارائه کرده‌اند. مدل ارائه شده، برای بررسی تأثیر پارامترهای عدم قطعیت از جمله تقاضای مشتری، بخشی از کالاهای برگشتی، هزینه حمل‌ونقل، قیمت مواد اولیه و هزینه‌های کمبود، با استفاده از الگوی فازی توسعه یافته است؛ اما این مدل هم تک‌هدفه است. مدل پیشنهاد شده در این پژوهش، کل هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین، از جمله هزینه‌های ثابت سالانه،

هزینه‌های افتتاح و بستن امکانات، هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه و محصولات تولیدی، هزینه‌های نگهداری مواد اولیه و محصولات نهایی را به حداقل می‌رساند.

در پژوهشی دیگر، طالی‌زاده، حقیقی، طاقی و نیاکی^۱ (۲۰۱۹) برای اندازه‌گیری تأثیرات اجتماعی و زیست‌محیطی تصمیمات زنجیره تأمین، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار ارائه کرده‌اند. در این مدل، به‌منظور تشویق مشتریان برای بازگشت محصولات استفاده شده خود، تخفیفی برای محصولات بازگشتی بسته به کیفیت آنها در نظر گرفته شده است. در این مدل فرض شده است که کلیه محصولات برگشتی، به مرکز مجموعه هدایت می‌شوند تا با توجه به کیفیت آنها طبقه‌بندی شوند. در جدول ۱، به خلاصه سایر مطالعات کمی صورت گرفته در این خصوص، اشاره شده است.

جدول ۱. خلاصه مطالعات

مورد مطالعه	شبهه حل	ملاحظات زیست محیطی	حداقل سازی هزینه	حمل و نقل چندگانه	چند محصوله	چند دوره ای	رویکرد چند هدفه	محقق
صنعت دستگاه‌های کپی	روش‌های دقیق	•	•	-	•	-	محدودیت اپسیلونی	طلایی، مقدم، پیشوایی، بزرگی و غلام نژاد ^۲ (۲۰۱۶)
صنایع شیمیایی	سناریو	-	•	-	•	•	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح	محمدی و همکاران (۱۳۹۷)
باتری	-	•	-	-	-	•	ANP فازی	توسرکانی و امین ^۳ (۲۰۱۸)
عمومی	روش‌های دقیق	-	•	•	•	•	-	الشمسی و دیابار ^۴ (۲۰۱۸)
لبنیات	اکتشافی	-	•	-	•	•	Robust	یاوری و گرایلی ^۵ (۲۰۱۹)
پلاستیک	روش‌های دقیق	•	•	•	-	-	برنامه‌ریزی خطی مخلوط عدد صحیح	سانتاندر، سانچز، بادود و کامارگو ^۶ (۲۰۲۰)
عمومی	روش ترکیبی (دیماتل و ANP)	•	•	•	-	-	-	گاویندان، مینا، اسماعیلی، غلامی زنجانی ^۷ (۲۰۲۰)
خودرو	روش‌های دقیق و اکتشافی	•	•	-	•	•	•	پژوهش حاضر

از جمله ویژگی‌هایی که مدل این پژوهش را از سایر پژوهش‌ها متمایز می‌سازد، در نظر گرفتن همه جنبه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته (امحاء، بازیافت و حتی فروش مجدد محصول بازیافتی به مشتریان) با یک مدل سه‌گانه اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است.

1. Taleizadeh, Haghghi, Taghi, Niaki

3. Tosarkan, Amin

5. Yavari, Geraeli

7. Govindan, Mina, Esmaeili, Gholami-Zanjani

2. Talaei, Moghaddam, Pishvae, Bozorgi-Amiri, Gholamnejad

4. Alshamsi & Diabat

6. Santander, Sanchez, Boudaoud, Camargo

زنجیره تأمین حلقه بسته و لجستیک معکوس

زنجیره تأمین، سلسله‌فرایندهایی است که برای پاسخ‌گویی به درخواست‌های مشتریان، ترکیب شده است و همه نهادهای شبکه‌ای نظیر تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، حمل‌ونقل، انبارها، خرده‌فروشان و مشتریان را دربرمی‌گیرد و هدف اصلی آن، رضایت مشتری با حداقل هزینه است (باربوسا پووا، سیلوا و کاروالهوا^۱، ۲۰۱۸). در یک زنجیره تأمین رو به جلو (سنتی)، محصولات از طریق تهیه‌کننده به مشتریان منتقل می‌شود. از طرف دیگر، برخی از محصولات ممکن است از مشتریان بازگردانده شود. این زنجیره تأمین معکوس نامیده می‌شود. محصولات برگشتی، هم از نظر هزینه و هم از لحاظ محیط زیست با ارزش هستند. ادغام زنجیره‌های عرضه و ارسال معکوس با اضافه‌کردن عناصر، پیچیدگی شبکه‌ها را افزایش می‌دهد (حسن‌زاده امین و بیکی^۲، ۲۰۱۷). زنجیره تأمین حلقه بسته، مستلزم طراحی، کنترل و اجرای یک سیستم برای به حداکثر رساندن ایجاد ارزش در طول عمر محصول، با تولید ارزش پویا از محصولات مختلف برگشتی در طول زمان است (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۷). شیوه‌های طراحی معمول زنجیره تأمین، تنها بر جریان رو به جلو تمرکز دارد. با این حال، به‌منظور بهره‌مندی از محصولات بازگشتی، شرکت‌ها علاوه بر لجستیک مستقیم، لجستیک معکوس را نیز اتخاذ می‌کنند که باعث شکل‌گیری زنجیره تأمین حلقه بسته می‌شود (جبارزاده، هاگتون و خسروجردی^۳، ۲۰۱۸). طبق ادبیات طراحی شبکه زنجیره تأمین، سه طبقه‌بندی در خصوص زنجیره تأمین وجود دارد: زنجیره تأمین رو به جلو، زنجیره تأمین رو به عقب و زنجیره تأمین حلقه بسته. زنجیره تأمین رو به جلو، فقط بر کارهای زنجیره تأمین عرضه که از عرضه‌کننده آغاز شده و به مشتری ختم می‌شود، متمرکز است. با توجه به یک شبکه زنجیره تأمین عمومی، سازندگان تصمیم‌های اصلی پس از خرید مواد اولیه از تأمین‌کنندگان را اتخاذ کرده و محصولات را با تکنولوژی مدنظر تولید می‌کنند. در واقع، لجستیک مستقیم، شامل فعالیت‌هایی برای تبدیل مواد خام به محصولات نهایی است (جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۸).

زنجیره‌های تأمین سنتی که به نام زنجیره‌های عرضه به جلو نیز شناخته می‌شوند، صرف‌نظر از خسارتی که به محیط زیست وارد می‌کنند، عمر محصولات را نادیده می‌گیرند. با این حال، یک زنجیره تأمین پایدار با طراحی مناسب و صحیح، کمترین آسیب را به محیط زیست وارد می‌کند. لجستیک معکوس در زنجیره‌های عرضه حلقه بسته، با جمع‌آوری و استفاده مجدد از محصولات استفاده شده در جهت رو به جلو، برای محصولاتی با عمر محدود بهترین راه‌حل هستند (تالیزاده، حقیقی و اخوان نیایی^۴، ۲۰۱۹: ۱۶۳). لجستیک معکوس شامل فعالیت‌های جمع‌آوری و بازیابی محصولات بازگشتی است (جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۸).

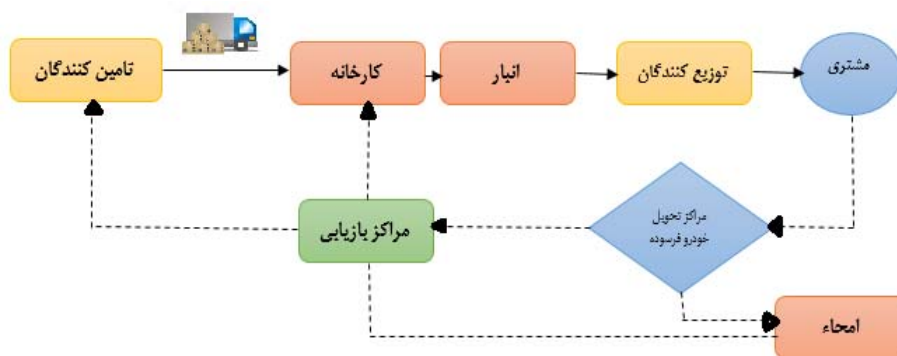
شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، سیستم یکپارچه‌ای است که هر دو نوع زنجیره تأمین مستقیم و معکوس را شامل می‌شود. طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، یکی از موضوع‌های زیرساختاری است که شامل تصمیم‌گیری در خصوص تعداد، مکان، ظرفیت و هماهنگی تسهیلات، جریان‌های درون شبکه، مقادیر خریدوفروش و نگهداری موجودی برای بهینه‌سازی کل

عملیات زنجیره تأمین است (فرخ، آذر، جندقی و احمدی^۱، ۲۰۱۷). طراحی کلی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، شامل چهار سطح می‌شود: ۱. کارخانه / محل بازیابی محصولات تولید شده / محصولات بازسازی شده؛ ۲. محل انبار برای توزیع محصولات تولیدی یا بازسازی شده؛ ۳. مراکز تثبیت و ۴. مناطق خرده‌فروشی / مشتری (کادامبالا و همکاران ۲۰۱۷).

مدل پژوهش

در این بخش، ابتدا مشکل بازیافت وسایل نقلیه‌ای که در ایران به پایان عمر خود رسیده‌اند، توضیح داده می‌شود، سپس مدل برنامه‌ریزی خطی تهیه شده برای این مشکل، معرفی می‌شود. یک زنجیره تأمین حلقه بسته را با دو بخش فرض کنید: زنجیره رو به جلو و زنجیره معکوس. زنجیره رو به جلو برای خرید زیرمجموعه‌های خودرو، مونتاژ آنها در تولیدکنندگان و تحویل به خوشه‌های کاربر استفاده می‌شود، در حالی که از زنجیره معکوس برای جمع‌آوری، برچیدن، خرد کردن، دفن زباله و بازیافت زیرمجموعه‌ها یا محصولات استفاده می‌شود. این شبکه، به‌عنوان یک زنجیره تأمین سه‌لایه معمولی رو به جلو ساخته شده است: ۱. تأمین‌کننده؛ ۲. تولیدکننده و ۳. توزیع‌کنندگان و مشتریان (کلی و خرد). به‌طور مشابه، یک ساختار سه‌لایه برای زنجیره معکوس در نظر گرفته شده است، از جمله: ۱. مراکز تحویل خودرو؛ ۲. مراکز بازیابی؛ ۳. مراکز امحا و بازیافت. شکل ۱، زنجیره تأمین حلقه بسته در صنایع خودروسازی را نشان می‌دهد (سریواستوا^۲، ۲۰۰۸).



شکل ۱. زنجیره تأمین حلقه بسته در صنایع خودروسازی

معمولاً فرایند زنجیره تأمین معکوس با مراجعه مشتری به مراکز تحویل خودرو فرسوده آغاز می‌شود. در اولین زنجیره حلقه معکوس، محصولات از مشتریان در مراکز تحویل، جمع‌آوری می‌شود. پس از معاینه اولیه، وسایل تعمیرشدنی به محل تعمیر مراکز بازیابی و موارد نقص به مراکز امحا منتقل می‌شود. در مراکز بازیابی، موارد بازیافتی طبقه‌بندی شده و بر اساس نوع و کیفیت محصول بازیافتی، تصمیم مناسب گرفته می‌شود. اگر تصمیم به تعمیر گرفته شود، محصولات بازیافتی به سه محل تأسیسات تولیدی، مراکز امحا و تأمین‌کنندگان منتقل می‌شود. در این مرحله، هر محصولی که بازیافت آن امکان‌پذیر نباشد، به بخش امحا انتقال می‌یابد. از سوی دیگر، از آنجا که برخی از محصولات بازیافتی قادر به قرارگرفتن در زنجیره تولید مجدد توسط تولیدکننده نیستند، اجزای کاملاً سالم آن به تأمین‌کنندگان ارسال می‌شود. بخش نهایی عملیات ترمیم و

تجدید در چرخه لجستیک حلقه معکوس، مونتاژ قطعات با کالای جدید تولیدی (برابر با استانداردهای محصولات جدید) است. این محصولات بازیابی شده، پس از بررسی‌های کنترل کیفیت و فرایندهای بسته‌بندی، تقاضای مراکز توزیع را تأمین می‌کنند و با تخفیف قیمت به مشتریان فروخته می‌شوند.

معرفی مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$s \in S$	مجموعه نقاط ثابت برای مراکز تأمین‌کنندگان	S
$p \in P$	مجموعه نقاط ثابت برای مراکز تولیدکنندگان	P
$p' \in P'$	مجموعه نقاط ثابت برای ایجاد مراکز انبارها	P'
$w \in W$	تعداد احتمالی مشتریان (خرده‌فروشان)	W
$d \in D$	مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز توزیع	D
$j \in J$	مجموعه نقاط بالقوه برای ایجاد مراکز جمع‌آوری	J
$r \in R$	مجموعه نقاط بالقوه برای ایجاد مراکز بازیابی کلی	R
$n \in N$	مجموعه نقاط بالقوه برای ایجاد مراکز امحا	N
	دوره (t)	T
	تعداد محصول (u)	U

پارامترهای مدل

هزینه حمل‌ونقل محصول u از تأمین‌کننده s به مراکز تولیدکنندگان p	C_{sp}^u
هزینه حمل‌ونقل محصول u از مراکز تولیدکنندگان p به انبار p'	$C_{pp'}^u$
هزینه حمل‌ونقل محصول u از انبار p' به توزیع‌کنندگان d	$C_{p'd}^u$
هزینه حمل‌ونقل محصول u از توزیع‌کنندگان d به مشتری w	C_{dw}^u
هزینه حمل‌ونقل محصول بازیافتی u از مشتری w به مرکز جمع‌آوری خودرو فرسوده j	C_{wj}^u
هزینه حمل‌ونقل محصول بازیافتی u از مرکز جمع‌آوری خودرو فرسوده j به مراکز بازیافتی r	C_{jr}^u
هزینه حمل‌ونقل محصول بازیافتی u از مراکز بازیافتی r به مرکز امحای n	C_{rn}^u
هزینه حمل‌ونقل محصول بازیافتی u از مراکز بازیافتی r به مرکز تولید p	C_{rp}^u
فاصله بین تأمین‌کننده s تا مراکز تولیدکنندگان p	di_{sp}
فاصله بین تولیدکننده p تا انبار p'	$di_{pp'}$
فاصله بین انبار p' تا توزیع‌کنندگان d	$di_{p'd}$
فاصله بین توزیع‌کنندگان d تا مشتری w	di_{dw}
فاصله بین مشتری w تا مرکز جمع‌آوری خودرو فرسوده j	di_{wj}
فاصله بین مرکز جمع‌آوری خودرو فرسوده j تا مراکز بازیافتی r	di_{jr}

di_{rn}	فاصله بین مراکز بازیافتی r تا مرکز امحای n
di_{rp}	فاصله بین مراکز بازیافتی r تا مرکز تولید p
cr_{rpt}^u	هزینه مونتاژ محصول بازگشتی از مرکز بازیافت r به مرکز تولید p در دوره t
re_{rnt}^u	مقدار بازگشت محصول u از مرکز بازیافت r به مرکز انهدام در محل n در دوره t
re_{rst}^u	مقدار بازگشت محصول u از مرکز بازیافت r به تأمین کنندگان s در دوره t
re_{rat}^u	مقدار بازگشت محصول u از مرکز بازیافت r به توزیع کننده d
re_{rpt}^u	مقدار بازگشت محصول u از مرکز بازیافت r به تولیدکنندگان p
An_n	ظرفیت مرکز امحا در انهدام محصول
pc_s^u	ظرفیت ارسال توزیع کنندگان s
pc_p^u	ظرفیت تولید محصول u در مرکز تولید p
f_d^u	هزینه ثابت احداث مرکز توزیع در محل d
f_j^u	هزینه احداث مرکز جمع‌آوری و احیا در محل j
f_r^u	هزینه احداث مرکز بازیافت در محل r
f_n^u	هزینه احداث مرکز دفن و انهدام در محل n
H_{prt}^u	هزینه نگهداری محصول u در هر واحد در انبار p' در دوره t
DH_{dt}^u	هزینه نگهداری محصول u برای هر واحد در توزیع کننده d در دوره t
Cd_{dwt}^u	هزینه دیرکرد تحویل خودرو از توزیع کننده d به مشتری w در زمان t
ϑ_w^u	میزان تقاضای فازی محصول u توسط مشتری w
re_w^u	مقدار بازگشت محصول u از مشتری w

متغیرهای پژوهش

x_{sp}^u	مقدار جریان محصول u از تأمین کننده s به مراکز تولیدکنندگان p
$x_{pp'}^u$	مقدار جریان محصول u از مراکز تولیدکنندگان p به انبار p'
$x_{p'd}^u$	مقدار جریان محصول u از انبار p' به توزیع کننده d
x_{dw}^u	مقدار جریان محصول u از توزیع کنندگان d به مشتری w
x_{wj}^u	مقدار جریان محصول u از مشتری w به مرکز جمع‌آوری خودرو فرسوده j
x_{jr}^u	مقدار جریان محصول u از مرکز جمع‌آوری خودرو فرسوده j به مراکز بازیافتی r
x_{rn}^u	مقدار جریان محصول u از مرکز بازیابی r به مرکز امحای n
x_{rp}^u	مقدار جریان محصول u از مرکز بازیابی r به تولید کننده p

x_{rs}^u	مقدار جریان محصول u از مرکز بازاریابی r به تأمین کننده s
V_d^u	اگر مرکز توزیع در مکان d باشد برابر با ۱ و در غیر این صورت معادل ۰
V_j^u	اگر مرکز توزیع در مکان j باشد برابر با ۱ و در غیر این صورت معادل ۰
V_r^u	اگر مرکز توزیع در مکان r باشد برابر با ۱ و در غیر این صورت معادل ۰
V_n^u	اگر مرکز توزیع در مکان n باشد برابر با ۱ و در غیر این صورت معادل ۰
W_{prt}^u	مقدار موجودی محصول u در انبار p' در زمان t
W_{dt}^u	مقدار موجودی محصول u در توزیع کننده d در زمان t
D_{dw}^u	مقدار محصولی u از توزیع کننده d که به مشتری w تحویل داده نشده
Q_{rp}^u	مقدار محصول بازاریافتی u از مرکز بازاریافت r به تولید کننده p

سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷) و اوزسیلان و همکاران (۲۰۱۷) هر یک در تحقیقات جداگانه، به بررسی بخشی از زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند. در مدل نخست این پژوهش، به مسئله حداقل کردن هزینه‌ها، یعنی مجموع هزینه‌های احداث (گاتو، وانگ، فان و ژن^۱، ۲۰۱۷)، حمل و نقل (کادامبالا و همکاران، ۲۰۱۷)، مونتاژ و امحا (سلیمانی و کانان^۲، ۲۰۱۵) و جریمه دیرکرد تحویل محصول به مشتری پرداخته شده است. در این پژوهش ترکیبی از مدل‌ها با توجه به زنجیره تأمین حلقه بسته در کشور، استخراج و توسعه داده شده است.

در سطح اول این زنجیره، مواد اولیه لازم برای تولید در کارخانه‌ها، از مراکز جمع‌آوری و با استفاده از اجزای بازاریافتی تأمین می‌شود. در صورت عدم تأمین قطعات از مراکز لجستیک معکوس، کارخانه‌ها می‌توانند کالاهای مورد نیاز خود را از تأمین‌کنندگان خارجی تهیه کنند. شبکه رو به جلو، شامل تعدادی تأمین‌کننده است که اجزای جدید مختلفی مانند آهن، لاستیک، قطعات اولیه و باتری را در اختیار تولیدکنندگان / توزیع‌کنندگان قرار می‌دهد و آنها به محصولات نهایی (وسایل نقلیه جدید) تبدیل شده و پس از آن، وسایل نقلیه جدید در خوشه‌های کاربر توزیع می‌شوند. شبکه تدارکاتی معکوس، از وسایل نقلیه برگشتی با دریافت وسایل نقلیه از خوشه‌های کاربر در مراکز جمع‌آوری آغاز می‌شود. مالکان باید وسیله نقلیه خود را به یکی از مراکز جمع‌آوری یا بازاریابی برگردانند. قدم بعدی حمل و نقل وسایل نقلیه برگشتی به محل‌های امحا یا بازاریابی است. وسایل نقلیه استفاده شده نیز می‌توانند به‌طور مستقیم به مراکز تخلیه‌کننده منتقل شوند و از مراکز جمع‌آوری عبور کنند. در مراکز بازاریابی، مایعات تخلیه شده و عملیات جداسازی قطعات انجام می‌شود. سوخت، روغن موتور، روغن گیربکس، روغن هیدرولیک، خنک‌کننده، مایع تهویه هوا، مایع ترمز و مایع فرمان از وسایل نقلیه پایان عمر تخلیه می‌شود. در این میان، برخی از اجزا برای بازاریافت و اجزای باقی‌مانده به خردکن‌ها ارسال می‌شود. علاوه بر این، قطعاتی که قابلیت استفاده مجدد دارند، از قبیل موتور، دیفرانسیل، گیربکس، پنل‌های بدنه (برای مثال، هود، درها و ضربه‌گیرها) و چرخ‌ها، پس

از انجام عملیات بازسازی دوباره به صورت دست دوم به خوشه‌های کاربر فروخته می‌شوند. پس از خرد شدن، فلزات آهنی و غیر آهنی (آلومینیوم، مس، روی، سرب) به دست می‌آید. این مواد همچنین برای بازیافت‌ها ارسال می‌شوند. هزینه احداث به صورت تابع (Construction) تعریف شد (رابطه ۱).

$$\text{Construction} = \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} f_d^u V_d^u + \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} f_j^u V_j^u + \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} f_r^u V_r^u + \sum_{u \in U} \sum_{n \in N} f_n^u V_n^u \quad (\text{رابطه ۱})$$

هزینه حمل‌ونقل محصولات در طول زنجیره حلقه معکوس به صورت تابع (Transportation) تعریف شد که در قالب رابطه ۲ مشاهده می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Transportation} &= \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{sp}^u di_{sp} C_{spt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P'} x_{pp'}^u di_{pp'} C_{pp't}^u \\ &+ \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{p' \in P'} \sum_{d \in D} x_{p'd}^u di_{p'd} C_{p'dt}^u \\ &+ \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} \sum_{w \in W} x_{dw}^u di_{dw} C_{dwt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{w \in W} \sum_{j \in J} x_{wj}^u di_{wj} C_{wjt}^u \\ &+ \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} x_{jr}^u di_{jr} C_{jrt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} x_{rn}^u di_{rn} C_{rnt}^u \\ &+ \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} x_{rp}^u di_{rp} C_{rpt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} x_{rs}^u di_{rs} C_{rst}^u \\ &+ \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{d \in D} x_{rd}^u di_{rd} C_{rdt}^u \end{aligned}$$

سپس تابع هزینه‌های مونتاژ قطعات (Assembly) برگشت داده شده به سیستم بررسی می‌شود.

$$\text{Assembly} = \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} Q_{rp}^u C_{rpt}^u \quad (\text{رابطه ۳})$$

تابع هزینه امحا قطعات بازیافتی (Annihilation) تعریف می‌شود که این قطعات می‌تواند از دو بخش مراکز بازیابی و مراکز تحویل خودرو فرسوده به مرکز امحا وارد شود.

$$\text{Annihilation} = \sum_{w \in W} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} W_{pt}^u H_{pt}^u + \sum_{d \in D} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} W_{dt}^u D H_{dt}^u \quad (\text{رابطه ۴})$$

تابع آخر، تابع جریمه هزینه دیرکرد محصول به مشتری (Penalty) در زنجیره لجستیکی است. این تابع به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{Penalty} = \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} \sum_{w \in W} C_{dwt}^u D_{dw}^u \quad (\text{رابطه ۵})$$

هدف اولیه پژوهش حاضر (حداقل‌سازی هزینه)، در مجموع به صورت رابطه ۶ است.

$$\begin{aligned}
\min Z = & \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} f_d^u V_d^u + \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} f_j^u V_j^u + \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} f_r^u V_r^u + \sum_{u \in U} \sum_{n \in N} f_n^u V_n^u & \text{رابطه (۶)} \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{sp}^u di_{sp} C_{spt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P'} x_{pp'}^u di_{pp'} C_{pp't}^u \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{p' \in P'} \sum_{d \in D} x_{p'd}^u di_{p'd} C_{p'dt}^u \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} \sum_{w \in W} x_{dw}^u di_{dw} C_{dwt}^u \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{w \in W} \sum_{j \in J} x_{wj}^u di_{wj} C_{wjt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} x_{jr}^u di_{jr} C_{jrt}^u \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} x_{rn}^u di_{rn} C_{rnt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} x_{rp}^u di_{rp} C_{rpt}^u \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} x_{rs}^u di_{rs} C_{rst}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{d \in D} x_{rd}^u di_{rd} C_{rdt}^u \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} Q_{rp}^u C_{rpt}^u + \sum_{w \in W} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} W_{p't}^u H_{p't}^u \\
& + \sum_{d \in D} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} W_{dt}^u D H_{dt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} \sum_{w \in W} C_{dwt}^u D_{dw}^u
\end{aligned}$$

در بررسی هدف ثانویه پژوهش، می‌توان گفت که این تابع از ترکیب و توسعه دو مدل کادامبالا و همکاران (۲۰۱۷) و سیف و الهلیدی (۲۰۱۵) به‌دست آمده است. در این مدل، تلاش می‌شود تا مصرف کل انرژی، طی هر چرخه تولید به حداقل برسد. دو فعالیت اصلی که بیشترین انرژی را در تولید محصول جدید مصرف می‌کنند، تولید اصلی و تولید مواد اولیه از سوی تأمین‌کننده است. به‌طور مشابه، در حلقه بازگشتی، انرژی تولیدی در حین تولید مجدد محصول، در خط تولید و تولید اجزای جدید، بیشترین مصرف انرژی را می‌طلبد. از آنجا که تمامی محصولات بازگشتی، قادر به بازیافت و استفاده از آنها در تولید مجدد نیستند، اجزای سالم قطعات بایستی شناسایی و دوباره به چرخه ارسال شوند. برای مثال، قطعات موتور ماشین‌های بازیافتی، به‌طور معمول بین ۵۰ تا ۹۰ درصد قابلیت بازیافت دارند. در این مدل، \aleph نشان‌دهنده قابلیت بازیافت محصول توسط شرکت است (بین ۵۰ تا ۷۰ درصد). با توجه به مطالب بیان شده، کل انرژی استفاده شده برای ساخت و تولید مجدد، به‌صورت رابطه ۷ است.

$$Total\ Energy = T_{manf} + T_{remanf} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$Total\ Energy = (E_{sup} + E_{manf}) x_{p'd}^u + (E_{remanf}) x_{rp}^u + (1 - \aleph)(E_{resup}) x_{rs}^u$$

بنابراین تابع دوم به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
\min Z = & \sum_{u \in U} \sum_{p' \in P'} \sum_{d \in D} (E_{sup} + E_{manf}) x_{p'd}^u + \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} (E_{remanf}) x_{rp}^u & \text{رابطه (۸)} \\
& + \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (1 - \aleph)(E_{resup}) x_{rs}^u
\end{aligned}$$

گفتنی است که در رابطه ۸، E_{resup} ، E_{sup} ، E_{manf} ، E_{remanf} معرف گازهای گلخانه‌ای ساعت شده برای جابه‌جایی یک جزء بین یک کارخانه و یک انبار یا توزیع‌کننده (E_{sup} ، E_{manf}) یا () میان تأمین‌کننده و کارخانه و در حلقه معکوس، میان مراکز بازاریابی و کارخانه (E_{remanf}) و همچنین، میان مراکز بازاریابی و تأمین‌کنندگان (E_{resup}) است. در واقع، از آنجا که بیشتر انتشارهای ناشی از گازهای گلخانه‌ای، در بخش‌های حمل‌ونقل و انبارداری رخ می‌دهد، اهمیت زیادی دارد که آثار گلخانه‌ای را در مدل‌های زنجیره تأمین/ تدارکات ارائه شده برای کاهش یا کنترل زیان‌های محیطی حاصل از این شرکت‌ها در نظر بگیریم. تأثیر گرمای جهانی این سیستم، نتیجه انتشار GHG از طریق انبارکردن محصولات و جابه‌جایی قطعات بین کارخانه‌ها و انبارها یا بین انبارها و خرده‌فروشان است. فرض کنید $eCO_{2p'pu}$ میانگین انتشار گاز دی‌اکسیدکربن بر اثر جابه‌جایی یک جزء از محصول u بین کارخانه p و انبار p' باشد $eHFC_{p'pu}$ میانگین نشت گاز HFC به ازای هر واحد از محصول u بین کارخانه p و انبار p' است. تأثیر گرمای جهانی ترکیبی از هر دو گاز منتشر شده با استفاده از اصل تعادل بین انتشار یک جزء از HFC و واحد GWP_{HFC} از دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری می‌شود که GWP_{HFC} پتانسیل گرمایش جهانی HFC است که پیش‌تر شرح داده شد. بنابراین، $e_{p'pu}$ میزان دی‌اکسیدکربن معادل گازهای گلخانه‌ای ساعت شده برای جابه‌جایی یک جزء بین یک کارخانه و یک انبار به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$eCO_{2p'pu} = GWP_{HFC} \times eHFC_{p'pu} + eCO_{2p'pu} \quad \text{رابطه ۹}$$

گفتنی است که بر اساس آزمایش‌های انجام شده، در این شرکت، نمودار تغییرات میانگین گاز دی‌اکسیدکربن خروجی از آگروز خودروها در سال‌های ۹۵ و ۹۶ روند کاهشی داشته و از ۱۸۹/۲۵ گرم بر کیلومتر در سال ۹۵ به ۱۸۵/۹ گرم بر کیلومتر رسیده است. در تابع نیز eCO_{2jkl} تابعی از مسافت در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که بر اساس آمار، ثابت سالیانه میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن $۱۰^۶$ و گاز HFC حدود $۱۰^۷$ در نظر گرفته می‌شود. در ادامه به بررسی محدودیت‌های مدل می‌پردازیم. این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

$$\sum_{u \in U} \sum_{d \in D} x_{dw}^u = \vartheta_w^u \quad \forall w \in W \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{d \in D} x_{wj}^u = re_w^u \quad \forall w \in W \quad \text{رابطه ۱۱}$$

دو رابطه ۱۰ و ۱۱ تضمین می‌کند که در جریان مستقیم، به تمامی تقاضاهای مشتریان پاسخ داده می‌شود و در جریان برگشت، تمامی کالاهای برگشتی از مراکز مشتریان جمع‌آوری می‌شود.

$$\sum_{u \in U} \sum_{w \in W} x_{wj}^u = \sum_{r \in R} x_{jr}^u \quad \forall j \in J \quad \text{رابطه ۱۲}$$

رابطه ۱۲ تضمین می‌کند که تمامی محصولات برگشتی، پس از مرکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت فرستاده می‌شوند.

$$\sum_{u \in U} \sum_{d \in D} x_{rd}^u = re_{rd}^u \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{jr}^u \quad \forall r \in R \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{p \in P} x_{rp}^u = re_{rp}^u \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{jr}^u \quad \forall r \in R \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{s \in S} x_{rs}^u = re_{rs}^u \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{jr}^u \quad \forall r \in R \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{n \in N} x_{rn}^u = re_{rn}^u \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{jr}^u \quad \forall r \in R, \forall u \in U \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{p' \in P'} (x_{p'd}^u + Q_{p'd}^u) = \sum_{u \in U} \sum_{w \in W} x_{dw}^u - \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{rd}^u \quad \forall d \in D \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{s \in S} x_{sp}^u + \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{rp}^u = \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} x_{pd}^u + \sum_{u \in U} \sum_{p' \in P'} x_{pp'}^u \quad \forall p \in P \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\sum_{u \in U} W_{pt}^u = \sum_{u \in U} \sum_{p' \in P'} x_{pp'}^u - \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} x_{p'd}^u \quad \forall p \in P \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\sum_{u \in U} W_{dt}^u = \sum_{u \in U} \sum_{d \in PD} x_{p'd}^u - \sum_{u \in U} \sum_{w \in W} x_{dw}^u \quad \forall p' \in P' \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

رابطه‌های ۱۳ تا ۲۰ مربوط به محدودیت‌های تعادل جریان در گره‌ها هستند.

$$\sum_{u \in U} \sum_{d \in D} x_{p'd}^u \leq \sum_{u \in U} \sum_{p \in P} x_{pp'}^u \quad \forall p' \in P' \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

رابطه ۲۱ تضمین می‌کند که میزان جریان خروجی از انبار تولیدکنندگان، کمتر از مجموع جریان ورودی به انبار تولیدکنندگان و کمتر یا مساوی با مجموع جریان ورودی به انبار تولیدکنندگان باشد.

$$\sum_{u \in U} \sum_{p \in P} x_{sp}^u + \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{rs}^u \leq \sum_{u \in U} (\text{cap}_s^u + \text{pc}_s^u) \quad \forall s \in S \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{p \in P} x_{pp'}^u + \sum_{u \in U} \sum_{p \in P} x_{p'd}^u \leq \text{cap}_{p'} \quad \forall p' \in P' \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{w \in W} x_{dw}^u + \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{rd}^u \leq \text{cap}_d V_d \quad \forall d \in D \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{w \in W} x_{wj}^u \leq \text{cap}_j V_j \quad \forall j \in J \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{p \in P} x_{rp}^u re_{rpt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{s \in S} x_{rs}^u re_{rst}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{n \in N} x_{rn}^u re_{rnt}^u + \sum_{t \in T} \sum_{u \in U} \sum_{d \in D} x_{rd}^u re_{rdt}^u \leq cap_r V_r \quad (26) \text{ رابطه}$$

$$\forall r \in R$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{rp}^u \leq \sum_{u \in U} (cap_r + pc_p^u V_r) \quad \forall p \in P \quad (27) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{r \in R} x_{rn}^u \leq cap_n + An_n V_n \quad \forall n \in N \quad (28) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{u \in U} W_{p't}^u \leq cap_{p'} \quad \forall p' \in P' \quad (29) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{u \in U} W_{dt}^u \leq cap_d \quad \forall d \in D \quad (30) \text{ رابطه}$$

رابطه‌های ۲۲ تا ۳۰، تضمین می‌کنند که جریان تنها بین نقاطی است که در آنجا تسهیلی احداث شده و همچنین، مجموع جریان در هر تسهیل از ظرفیت آن تجاوز نمی‌کند.

$$\sum_{u \in U} V_d^u \leq 1 \quad \forall d \in D \quad (31) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{u \in U} V_j^u \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (32) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{u \in U} V_r^u \leq 1 \quad \forall r \in R \quad (33) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{u \in U} V_n^u \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (34) \text{ رابطه}$$

رابطه‌های ۳۱ تا ۳۴ تضمین می‌کنند حداقل یکی از مراکز بالقوه فعال است.

$$re_{rdt}^u + re_{rpt}^u + re_{rst}^u + re_{rnt}^u = 1 \quad \forall u \in U \quad (35) \text{ رابطه}$$

رابطه ۳۵ تضمین می‌کند که مجموع ضرایب محصولات برگشتی برابر با ۱ است.

$$V_d \cdot V_j \cdot V_r \cdot V_n \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, \forall j \in J, \forall r \in R, \forall n \in N \quad (36) \text{ رابطه}$$

$$x_{sp}^u \cdot x_{ppr}^u \cdot x_{p'd}^u \cdot x_{dw}^u \cdot x_{wj}^u \cdot x_{jr}^u \cdot x_{rn}^u \cdot x_{rp}^u \cdot x_{rs}^u \cdot W_{prt}^u \cdot W_{dt}^u \geq 0 \quad (\text{رابطه } ۳۷)$$

رابطه‌های ۳۶ و ۳۷، رابطه‌های منطقی و بدیهی مربوط به متغیرهای تصمیم مسئله هستند.

روش‌شناسی پژوهش

همان‌طور که گفته شد، هدف اصلی این پژوهش، طراحی مدل چند هدفه فازی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، در صنعت خودرو با توجه به طرح‌های بازده انرژی و زمان است، از این رو، پژوهش حاضر، بر اساس هدف کاربردی است. از سویی دیگر، از نظر ماهیت و روش پژوهش، توصیفی است؛ زیرا پژوهشگر ماهیت مسئله پژوهش را توصیف می‌کند. از نظر مکانی، دارای خصوصیات کتابخانه‌ای و میدانی است. اجرای این پژوهش، مستلزم جمع‌آوری داده‌ها از جامعه آماری متشکل از واحدهای آماری بوده و از این جهت روش پیمایشی (زمینه‌یابی) برای آن انتخاب شده است. حال با توجه به اینکه پژوهش حاضر از نوع آمیخته (کیفی - کمی) است، در ادامه به بررسی روش حل مدل پژوهش می‌پردازیم.

روش حل

معمولاً برای حل مسائل، رویکردهای مختلفی از جمله حل به روش دقیق (قطعی) و اکتشافی استفاده می‌شود. بعضی از مسائل، بسته به پیچیدگی و تعداد متغیرهای مسئله، با استفاده از رویکردهای دقیق حل نمی‌شوند که به آنها مسائل غیرقطعی^۱ گفته می‌شود. برای این نوع مسائل، می‌توان راه‌حل را حدس زد و اعتبار آن را تأیید کرد. این مسائل شامل مسائل NP-Complete و NP-Hard است. در حل این مسائل، از الگوریتم‌هایی استفاده می‌شود که می‌توانند با اعتبار مناسب و بهینه‌سازی خروجی‌ها، نتایج معقولی ارائه دهند. به این نوع الگوریتم‌ها، الگوریتم‌های متاهیروستیکی اطلاق می‌شود (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۷). از آنجا که مسائل زنجیره تأمین حلقه بسته، از دسته مسائل سخت است، از روش‌های متاهیروستیکی برای حل آن استفاده می‌شود. حداقل کردن هزینه‌ها و الزامات بهینه‌سازی مصرف انرژی، اهداف متناقضی محسوب می‌شوند. در این پژوهش، از الگوریتم ژنتیک چند هدفه^۲ و همچنین، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳، به دلیل سهولت اجرا و توانایی در ایجاد هم‌گرایی خوب و همچنین، حفظ تعادل مناسب بین بهره‌برداری و اکتشاف، استفاده شده است. در میان الگوریتم‌های تصادفی، الگوریتم ژنتیک از کارایی بالایی برخوردار است و کاربردهای فراوانی دارد. الگوریتم ژنتیک، علاوه بر استفاده در مسائل طراحی، در موضوعات مختلفی از قبیل بهینه‌سازی توابع، بهینه‌سازی ترکیبی، یادگیری ماشین، پردازش تصمیم، تقسیم‌بندی سیستم‌ها، تعلیم شبکه‌های عصبی و سیستم‌های کنترل، کارایی خود را نشان داده است (هاپت و هاپت^۴، ۲۰۰۴). تکنیک بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیز، نوعی روش بهینه‌سازی تصادفی قوی است که بر اساس حرکت و هوش گروه‌ها عمل می‌کند. این الگوریتم، روش جست‌وجوی ابتکاری، دقیق و کم‌هزینه است و سازوکار آن، از رفتارهای گروهی جمعیت‌های زیستی الهام می‌گیرد. در شبیه‌سازی بهینه‌سازی ازدحام ذرات، از یک جدول (مخزن) ثانویه خارجی، به منظور ذخیره اطلاعات نماینده‌ها (ذرات) استفاده می‌شود تا هر ذره بتواند بعداً از این اطلاعات نهایت بهره را ببرد. همچنین، این الگوریتم مجهز به پارامتر جهش مخصوصی است که امکانات جست‌وجوی بیشتر و بهتری را برای الگوریتم

1. NP
3. MOPSO

2. NSGA II
4. Haupt and Haupt

فراهم می‌سازد (سلیمانی، ۲۰۱۷). از آنجا که در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی کلی چند هدفه تصادفی پایدار ارائه شده و علاوه بر این، مسئله پژوهش، مسئله دو هدفه عدد صحیح مختلط است و توابع هدف آن در تضاد با یکدیگرند، از روش برنامه‌ریزی توافقی استفاده شده است. روش برنامه‌ریزی توافقی، یکی از روش‌های شناخته شده در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره است که برای حل مسائل با توابع هدف متضاد، استفاده می‌شود. در مدل اول، توابع هدف اول و دوم را به ترتیب Z_1 و Z_2 می‌نامیم و طبق توضیحات فوق، مدل پیشنهادی باید به ازای هر دو توابع حل شود. فرض کنید جواب بهینه به دست آمده برای این دو تابع به ترتیب Z_1^* ، Z_2^* باشند، در این صورت، تابع هدف مسئله Lp-metrics که Z_3 نام‌گذاری شده، به صورت زیر فرمول بندی می‌شود:

$$\text{Min } Z_3 = \left[\omega \cdot \frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^*} + (1 - \omega) \cdot \frac{Z_2 - Z_2^*}{Z_2^*} \right]^P \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

که در آن $0 \leq \omega \leq 1$ وزن نسبی دو تابع هدف Z_1 و Z_2 است و ارجحیت تصمیم‌گیر را نسبت به دو تابع هدف مسئله نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن تابع هدف Z_3 و محدودیت‌های مدل تصادفی گسترده شده اول، یک مسئله تک‌هدفه خطی به دست می‌آید که به راحتی با استفاده از نرم‌افزارهای حل مسائل برنامه‌ریزی ریاضی حل می‌شود (میرزاپور، ملکی، آریان نژاد، ۲۰۱۱: ۱۳۵) و مقدار p مشخص کننده درجه تاکید بر انحرافات موجود است.

تنظیم پارامترها

اولین گام در به کارگیری و پیاده‌سازی یک الگوریتم فرا ابتکاری، انتخاب روشی برای نمایش جواب‌هاست. تبدیل یک جواب از فضای حل، به یک کروموزوم را رمزگذاری^۲ و برگرداندن یک کروموزوم را به یک جواب از فضای حل مسئله، رمزگشایی^۳ می‌گویند. در واقع، مهم‌ترین بخش از الگوریتم ژنتیک که نقطه آغاز آن محسوب می‌شود، همین قسمت است. در ارائه جواب‌ها که به وسیله کروموزوم صورت می‌پذیرد، باید نهایت دقت را به عمل آورد تا کروموزوم‌ها به خوبی فضای شدنی مسئله را تحت پوشش قرار دهند. سپس با استفاده از روش تاگوچی، به تنظیم پارامترهای پژوهش می‌پردازیم. برای تسهیل این بررسی، از مفهوم نسبت هشدار به اغتشاش (S/N) استفاده می‌شود. ساده‌ترین شکل تعریف نسبت S/N، نسبت میانگین (هشدار) به انحراف معیار (اغتشاش) یا معکوس ضریب تغییرات پاسخ سیستم است. بر این اساس، سطوح پارامترهای الگوریتم ژنتیک در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۲. دامنه جست‌وجو و سطح پارامترهای الگوریتم

الگوریتم	پارامترهای الگوریتم	فواصل پارامترها	پایین (۱)	متوسط (۲)	بالا (۳)
NSGA	nPop (A)	۲۰۰-۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
	Pc (B)	۰/۷-۰/۹	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	Pm (C)	۰/۱-۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۳
	nIt (D)	۱۰۰-۲۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰

سپس به منظور انتخاب بهترین حالت ممکن، ترکیبات مختلف اعداد در بازه [۰/۱, ۱] در نظر گرفته شد و برای هر زوج، یک بار الگوریتم به اجرا درآمد و نتایج بررسی شد. پس هر پارامتر در هر سطحی که بیشتر باشد، آن سطح انتخاب می‌شود. مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA II در جدول ۳ درج شده است.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA II و الگوریتم PSO

Mutation rate	Mutation Percentage	Cross over rate	جمعیت اولیه
۰/۲	۰/۲	۰/۸۰	۲۰۰

یافته‌های پژوهش

از آنجا که مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش، برای نخستین بار ارائه شده است، ابتدا برای بررسی امکان پذیر بودن مدل، مسئله در اندازه کوچک و در نرم‌افزار گمز، با حل کننده بارون حل شد. همچنین الگوریتم‌های فراابتکاری به کار گرفته شده، در نرم‌افزار متلب^۱ ویرایش ۲۰۱۶ برنامه‌نویسی شد. سپس به منظور آزمون کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی، نتایجی که از حل مسئله به روش قطعی با نرم‌افزار گمز به دست آمد با نتایج به دست آمده از روش‌های فراابتکاری در مثال‌های اندازه کوچک مقایسه شدند. نتایج این مقایسه در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

نتایج محاسباتی

به منظور بررسی مدل پیشنهادی، چند مسئله با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ تعریف شده است که نتایج آن در جدول ۴ درج شده است.

جدول ۴. مسائل نمونه ایجاد شده

شماره مسئله	تأمین کنندگان	تولید/ انبار	توزیع کنندگان	مشتری	مراکز تحویل خودرو فرسوده	مراکز باز یابی	مراکز امحا	تعداد دوره	محصول
۱	۱۰	۱	۵	۲۰	۱	۱	۱	۴	۱
۲	۱۲	۱	۱۵	۵۰	۵	۲	۲	۴	۲
۳	۱۵	۲	۲۰	۷۰	۱۰	۴	۲	۴	۲
۴	۱۸	۲	۳۰	۹۰	۱۵	۸	۳	۳	۵
۵	۲۴	۵	۵۰	۱۰۰	۲۰	۱۰	۴	۳	۵
۶	۲۷	۵	۵۲	۱۲۰	۲۲	۱۱	۴	۴	۸
۷	۳۰	۵	۵۵	۱۵۰	۲۵	۱۲	۵	۴	۸
۸	۴۰	۷	۶۰	۲۰۰	۳۰	۱۶	۶	۴	۱۲
۹	۴۰	۱۰	۸۰	۲۰۰	۳۰	۱۶	۷	۴	۱۳
۱۰	۴۰	۱۵	۱۰۰	۲۰۰	۳۰	۱۶	۸	۴	۱۴
۱۱	۴۰	۲۰	۱۲۰	۲۰۰	۳۰	۱۶	۱۰	۴	۱۵

جدول ۵. مقادیر اسمی پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
f_d	$U[400, 700] * 1000000$	re_{rpt}^u	$U[20, 400]$
f_j	$U[100, 200] * 1000000$	An_n	$U[2000, 6000]$
f_r	$U[2000, 5000] * 1000000$	pc_s^u	$U[1000, 90000]$
f_n	$U[2000, 2700] * 1000000$	pc_p^u	$U[1000, 100000]$
$H_{p't}^u$	$U[50, 500] * 1000$	di_{sp}	$U[10, 250]$
DH_{dt}^u	$U[100, 700] * 1000$	$di_{pp'}$	$U[2, 15]$
Cd_{dwt}^u	$U[60, 100] * 1000$	$di_{p'd}$	$U[10, 500]$
ϑ_w^u	$U[20, 400]$	di_{dw}	$U[0, 1, 10]$
cr_{rpt}^u	$U[5000, 100000]$	di_{wj}	$U[50, 300]$
re_w^u	$U[0.2, 0.7]$	di_{jr}	$U[10, 100]$
re_{rnt}^u	$U[0.1, 0.8]$	di_{rn}	$U[10, 250]$
re_{rst}^u	$U[0.1, 0.2]$	di_{rp}	$U[10, 200]$
re_{rdt}^u	$U[0.1, 0.5]$		

در این تحقیق، برای مقایسه نتایج دو الگوریتم با یکدیگر، از سه شاخص زمان حل، مقدار تابع هدف و شکاف بین مقادیر تابع هدف در دو الگوریتم استفاده شده است. مقدار تابع هدف، مقدار هزینه‌ای است که برای جواب‌های نزدیک بهینه توسط هر یک از الگوریتم‌ها حاصل شده است. منظور از زمان حل الگوریتم، زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها برای حل مسائل آزمایشی برای یافتن جواب نزدیک بهینه است. شاخص سوم برای مقایسه دو الگوریتم، شکاف بین مقادیر تابع هدف حاصل شده توسط دو الگوریتم است که با استفاده از رابطه ۳۹ محاسبه می‌شود.

$$dev = \frac{Ans(PSO) - Ans(GA)}{Ans(PSO)} \quad \text{رابطه ۳۹}$$

این معیار، شکاف بین مقدار تابع هدف الگوریتم PSO و مقدار تابع هدف به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک است. در این پژوهش برای بررسی صحت مدل، به حل با روش قطعی می‌پردازیم. نتایج حاصل از حل مسائل آزمایشی در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. حل مسائل با ابعاد کوچک و متوسط به روش قطعی

شماره مسئله	گمز		
	Z_1	Z_2	Z_{LP}
۱	۷۹۹۱۳۳۳۲	$0.97993e^{+3}$	-/۱۶۲
۲	۸۰۲۳۸۹۸۲	$1.0211023e^{+3}$	-/۱۸۲
۳	۸۰۶۰۲۹۴۸	$1.0718149e^{+3}$	-/۱۷۹
۴	۸۰۶۵۹۶۲۳	$1.0923924e^{+3}$	-/۱۸۸
۵	۸۰۷۳۷۳۴۸	$1.1038173e^{+3}$	-/۱۹۳
۶	۸۱۰۸۲۷۶۳	$1.10492424e^{+3}$	-/۱۵۶
۷	۸۲۱۱۳۹۳۴	$1.10814814e^{+3}$	-/۱۸۳

جدول ۷. نتایج محاسباتی حل مدل با ابعاد کوچک و متوسط

شماره مسئله	الگوریتم ژنتیک				الگوریتم PSO				
	%Dev	زمان	Z_{LP}	Z_T	Z_1	زمان	Z_{LP}	Z_T	Z_1
۱	۰/۸۴۱۶	۲۹/۵	۰/۰۱۲۵۹۶	$۰/۹۹۱۰۲e^{+3}$	۷۸۱۱۲۰۷۵/۱	۲۶/۳۲	۰/۰۰۷۹۵۲۱	$۰/۹۸۰۰۸۲e^{+3}$	۸۰۶۱۳۵۶۱/۶
۲	-۰/۱۴	۶۱/۵۹	۰/۰۰۵۰۳۰۴	$۱/۰۴۱۵۹e^{+3}$	۸۰۴۲۸۶۷۹/۸	۵۸/۴۸	۰/۰۰۲۰۹۵۸	$۱/۰۲۰۱۰۴۱۸e^{+3}$	۸۰۶۸۴۷۵۱/۱
۳	۰/۸۸۶۲	۷۳/۶۵	۰/۰۱۶۱۴۱	$۱/۰۸۴۵۳۸e^{+3}$	۸۰۶۷۰۱۶۷/۴	۶۳/۶۱	۰/۱۴۱۸۴۰۲	$۱/۰۳۰۲۱۵e^{+3}$	۸۰۶۹۵۷۱۳/۲
۴	۰/۹۳۶۵	۱۲۴/۳۰	۰/۰۱۳۸۴	$۱/۱۰۴۸۵۴e^{+3}$	۸۰۶۸۸۴۰۴/۲	۱۱۷/۳۳	۰/۲۱۷۹۱۴	$۱/۰۴۰۲۳۲۹۸e^{+3}$	۸۰۷۴۵۶۴۷/۹
۵	۰/۷۸۷۵	۱۴/۲۱۶	۰/۰۷۰۲۳۷	$۱/۱۲۹۸۵۲e^{+3}$	۸۰۹۷۶۸۴۴/۹	۱۹۲/۴۸	۰/۳۳۰۵۰۸۰	$۱/۰۴۰۲۷۰۱۲e^{+3}$	۸۰۷۴۷۵۷۳/۳
۶	۰/۵۲۹۱	۴۰۲/۱۹	۰/۰۸۴۵۲۴	$۱/۰۵۲۳۷e^{+3}$	۸۳۱۹۸۳۹۰/۷	۳۶۱/۲۷	۰/۰۱۷۹۴۹۴	$۱/۰۵۰۳۵۹۳e^{+3}$	۸۱۰۸۲۷۶۳/۵
۷	۰/۰۶۰۵	۶۱۷/۲۵	۰/۰۷۳۴۹۸	$۱/۰۹۲۳۷e^{+3}$	۸۳۵۱۳۳۴۴/۴	۵۰۰/۶۴	۰/۰۰۷۸۲۳۵	$۱/۰۷۱۱۳۴۳e^{+3}$	۸۲۱۷۳۲۵۴/۸

نتایج دو جدول ۶ و ۷، کارایی بالای دو الگوریتم فراابتکاری را از لحاظ زمان و کیفیت جواب‌ها نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی نتایج الگوریتم پیشنهادی با حل در ابعاد بزرگ مسئله می‌پردازیم.

جدول ۸. مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل با ابعاد بزرگ

شماره مسئله	الگوریتم ژنتیک				الگوریتم PSO				
	%Dev	زمان	Z_{LP}	Z_T	Z_1	زمان	Z_{LP}	Z_T	Z_1
۸	-۰/۰۲۶	۲۹/۵	۰/۰۶۰۸	$۱/۴۱۹۲۴۸e^{+3}$	۱۰۲۱۶۲۹۵	۶۰۲/۹	۰/۰۵۹۲۴۲۷	$۱/۳۹۳۳۳۱e^{+3}$	۱۰۲۳۷۱۹۱
۹	-۰/۰۶۹	۶۱/۵۹	۰/۰۶۵۷۲	$۱/۵۴۵۰۰۵e^{+3}$	۱۱۲۰۹۶۸۴	۶۵۹/۹	۰/۰۶۱۴۷۷۹	$۱/۴۱۲۸۰۲e^{+3}$	۱۰۹۳۹۲۵۹
۱۰	-۰/۱۵۳	۷۳/۶۵	۰/۱۶۶۸۵	$۱/۸۳۴۳۰۹e^{+3}$	۱۱۲۳۶۸۳۲	۷۳۰/۱۲	۰/۱۴۴۶۶۳۶	$۱/۷۴۰۲۵۰e^{+3}$	۱۱۰۵۶۷۷۰
۱۱	-۰/۰۸۷	۱۲۴/۳۰	۰/۱۶۳	$۲/۱۷۵۳۷e^{+3}$	۱۱۶۱۱۳۴۱	۷۴۲/۲۴	۰/۱۴۹۹۷۱۱	$۲/۰۰۷۶۳۹e^{+3}$	۱۱۵۷۰۷۹۳

ستون آخر جدول (ستون %Dev) در هر جدول، به مقایسه نتایج به دست آمده از هر الگوریتم می‌پردازد. نتایج پژوهش، از کارایی خوب دو الگوریتم در حل مدل ارائه شده حکایت می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته، برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه شده است. در واقع، در این پژوهش، برای بررسی بازده شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، مدل بهینه‌سازی چندبخشی ارائه شده است. همان گونه که پیش از این مطرح شد، در تحقیقات قبلی، محققان به بررسی بخشی از زنجیره تأمین حلقه بسته در صنایع مختلف پرداخته‌اند. حاجیان و همکارانش (۱۳۹۸) مسئله مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی را به صورت جدیدی،

در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای محصولات فاسد شدنی و در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی ارائه داده‌اند، به نحوی که هم‌زمان مجموع هزینه‌های سیستم، مجموع زمان حمل‌ونقل و انتشار آلاینده‌ها در کل شبکه کمینه شود. نتایج آنها نشان داد که تصمیم‌های مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی، به هم وابسته‌اند و تعیین مقدار بهینه این متغیرها در تعامل با هم، می‌تواند به یافتن سیستم بهینه با حداقل هزینه ممکن منجر شود. با این حال، باید گفت که پژوهش‌ها حایجان و همکارانش، در خصوص محصولات فاسد شدنی بوده و محققان تنها زنجیره امحای محصولات را در نظر گرفته‌اند. همچنین سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷) و اوزسیلان و همکاران (۲۰۱۷) هر یک در تحقیقات خود، به بررسی بخش از زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند. اما از جمله ویژگی‌هایی که مدل این پژوهش را از سایر پژوهش‌ها متمایز می‌سازد، در نظر گرفتن همه جنبه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته (امحا، بازیافت و حتی فروش مجدد محصول بازیافتی به مشتریان) با یک مدل سه‌گانه اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است. جنبه اجتماعی، به‌عنوان هزینه و منافع دریافت شده توسط مشتری برای خرید یک محصول جدید و همچنین نتایج آنها از عواقب ناشی از مسئله دفع زباله محصولات زباله بررسی شد. بحث زیست‌محیطی نیز، برای کشف زنجیره تأمین سبز ضروری است که دفع کنترل شده، مدل‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی و گزینه‌های بازیابی بهتر برای کسب سود بیشتر از بازده را شامل می‌شود. از این رو مدلی با اهداف حداقل‌سازی هزینه و حداقل‌سازی انرژی مصرفی ارائه شده است. در واقع، مدل این پژوهش، چند محصولی و چندرده‌ای در نظر گرفته شده است که هم‌زمان، هزینه‌های حمل‌ونقل و احداث تسهیلات را دربرمی‌گیرد.

این مدل با در نظر گرفتن کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه‌های استقرار تسهیلات)، حداقل‌سازی زمان و انرژی در طول مسیر و همچنین، در نظر گرفتن تقاضای مختلف محصولات برگشتی، از نوع مسائل NP-Hard است که در آن، زمان حل مسئله به‌صورت نمایی و با توجه به ابعاد مسئله افزایش می‌یابد. در مجموع باید گفت که سنجش رفتارهای زیست‌محیطی و اقتصادی یک سیستم، به‌دلیل گستردگی و ماهیت پیچیده مسائل اجتماعی و زیست‌محیطی بسیار دشوار است. با این حال، مسلم است که مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی، بر اقدامات عملکرد یک سیستم شبکه زنجیره تأثیر می‌گذارد. تجزیه و تحلیل‌های این پژوهش نشان می‌دهد که محدودیت در انتشار دی‌اکسیدکربن با منافع کل سیستم ارتباط مثبت دارد. بنابراین، تصمیم‌گیرندگان ممکن است با وجود انتشار دی‌اکسیدکربن، راهی برای افزایش سود یا کاهش هزینه پیدا کنند.

موضوع مهم دیگری که در این پژوهش مشخص شد، ایجاد هم‌افزایی بین جریان‌های مختلف در زنجیره تأمین حلقه بسته است. شبکه‌های سنتی لجستیک، مانند یک خیابان یکطرفه بودند، در حالی که در زنجیره‌های حلقه بسته، جریان‌های چندگانه داخلی و خارجی یکدیگر را قطع می‌کنند. در این وضعیت، استفاده از پتانسیل یکپارچه‌سازی جریان‌ها، منبعی مهم برای صرفه‌جویی در مقیاس است. در واقع، یکپارچه‌سازی جریان مستقیم و معکوس، موجب کاهش هزینه‌های بالاسری و سرجمع هزینه‌ها می‌شود. طراحی مناسب یک زنجیره تأمین حلقه بسته مناسب، به‌خصوص در صنایع خودروسازی ایران، می‌تواند با توجه به وضعیت بحران اقتصادی کنونی کشور، به کاهش هزینه‌های تولید و حتی کاهش واردات محصولاتی منجر شود که در داخل کشور توان تولید آنها وجود ندارد و از سوی دیگر، فرصتی برای ایجاد محصولات بیشتر با قیمت مناسب‌تر فراهم کند.

برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود که محققان این مدل را با در نظر گرفتن معیارهای دیگری همچون، ارزش زمانی پول، میزان تورم و درصد مالیات توسعه دهند. همچنین می‌توان تابع هدف دیگری برای حداقل‌سازی ریسک مالی شرکت خودروسازی / مشتری در نظر گرفت یا از روش‌های پیش‌بینی، مانند شبکه عصبی در مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته بهره برد.

منابع

- اختیاری، مصطفی؛ زندیه، مصطفی؛ عالم تبریز، اکبر؛ ربیع، مسعود (۱۳۹۸). ارائه یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای زنجیره تأمین چند مرحله‌ای با تأکید بر قابلیت اطمینان در شرایط عدم قطعیت. *مدیریت صنعتی*، ۲ (۱۱)، ۱۷۷ - ۲۰۶.
- حاجیان، سیما؛ افشار کاظمی، محمد علی؛ سیدحسینی، سید محمد؛ طلوعی اشلقی، عباس (۱۳۹۸). ارائه مدل چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز چند دوره‌ای و چند محصولی برای کالاهای فاسدشدنی. *مدیریت صنعتی*، ۱۱ (۱)، ۸۳ - ۱۱۰.
- سادات حسینی، سیدمحمد؛ رستمی، احمد؛ عبدی، حمید رضا (۱۳۹۲). *مطالعه تطبیقی تأثیر بازیافت خودروهای فرسوده در کاهش تصادفات جاده‌ای*. *مطالعات مدیریت ترافیک*، ۳۱ (۳)، ۱۷ - ۳۴.
- فتحی، محمدرضا؛ نصراللهی، مهدی؛ زمانیان، علی (۱۳۹۸). مدل‌سازی ریاضی شبکه زنجیره تأمین پایدار در وضعیت عدم قطعیت و حل آن با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری. *مدیریت صنعتی*، ۱۱ (۴)، ۶۲۱ - ۶۵۲.
- محمدی، امیرسالار؛ عالم تبریز، اکبر؛ پیشوایی، میرسامان (۱۳۹۷). طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته همراه با تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت. *مدیریت صنعتی*، ۱۰ (۱)، ۶۱ - ۸۴.

References

- Ahmadi, Sh., Hassanzadeh Amin, S. (2019). An integrated chance-constrained stochastic model for a mobile phone closed-loop supply chain network with supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, 226, 988-1003.
- Barbosa-Póvoa, A.P., Silva, C., Carvalho, A. (2018). Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. *European Journal of Operational Research*, 268, 399-431. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.036>
- Ekhtiari, M., Zandieh, M., Alem Tabriz, A., & Rabieh, M. (2019). Proposing a Bi-level Programming Model for Multi-echelon Supply Chain with an Emphasis on Reliability in Uncertainty. *Industrial Management*, 11(2), 177-206. (in Persian)
- Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, Gh., Ahmadi, E. (2017). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 3, 1-23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fss.2017.03.019>
- Fathi, M.R., Nasrollahi, M., & Zamanian, A. (2019). Mathematical Modeling of Sustainable Supply Chain Networks under Uncertainty and Solving It Using Metaheuristic Algorithms. *Industrial Management*, 11(4), 621-652. (in Persian)

- Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert Systems with Applications*, 116, 454 – 471.
- Giampieri, A., Ling-Chin, J., Ma, Z., Smallbone, A., Roskilly, A. (2020). A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy* 261, 114074.
- De Giovanni, P. (2018). A joint maximization incentive in closed-loop supply chains with competing retailers: The case of spent-battery recycling. *European Journal of Operational Research*, 268(1), 128-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.003>
- 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.
- Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240, 603- 626. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Guo, J., Wang, X., Fan, S., Gen, M. (2017). Forward and reverse logistics network and route planning under the environment of low-carbon emissions: A case study of Shanghai fresh food E-commerce enterprises. *Computers & Industrial Engineering*, 106, 351–360.
- Hajian, S., Afshar Kazemi, M.A., Seyed Hosseini, S.M., & Toloie Eshlaghy, A. (2019). Developing a Multi-Objective Model for Locating-Routing-Inventory Problem in a Multi-Period and Multi-Product Green Closed-Loop Supply Chain Network for Perishable Products. *Industrial Management Journal*, 11(1), 83-110. (in Persian)
- Hassanzadeh Amin, S., Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 316-330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030>
- Jabbarzadeh, A., Haughton, M., Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178- 191. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.025>
- Kadambala, D., Subramanian, N., Tiwari, M., Abdulrahman, M., Liu, Ch. (2017). Closed loop supply chain networks: Designs for energy and time value efficiency. *International Journal of Production Economics*, 183, 382 – 402.
- Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Malekly, H., Aryanezhad, M.B. (2011). A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 134, 28–42.
- Mohammadi, A.S., Alem Tabriz, A., & Pishvae, M. (2018). Designing Green Closedloop Supply Chain Network with Financial Decisions under Uncertainty. *Industrial Management*, 10(1), 61- 84. (in Persian)
- Özceylan, E., Demirel, N., Çetinkaya, C., Demirel, E. (2017). A closed-loop supply chain network design for the automotive industry in Turkey. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 727-747. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.022>

- Sadat Hosseini, S. M., Rostami, A., Abdi, H. R. (2014). A comparative study of the effect of recycling used cars in reducing road accidents. *Traffic management studies Journal*, 11(2), 17-34. (in Persian)
- Saif, A., Elhedhli, S. (2015). Cold Supply Chain Design with Environmental Considerations: A Simulation-Optimization Approach. *European Journal of Operational Research*, 251(1). doi: 10.1016/j.ejor.2015.10.056
- Samuel, C., Venkatadri, U., Diallo, C., Khatab, A. (2020). Robust closed-loop supply chain design with presorting, return quality and carbon emission considerations. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119086.
- Soleimani, H., Govindan, K. (2015). A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks. *Applied Mathematical Modelling*, 39, 3990-4010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2014.12.016>
- Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., Jafari, H. (2017). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & industrial engineering*, 109, 191- 210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.038>
- Srivastava, S. (2008). Network design for reverse logistics. *Omega*, 36, 535- 548. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2006.11.012>
- Talaei, M., Moghaddam, B., Pishvaei, M., 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.
- Taleizadeh, A., Haghghi, F., Akhavan Niaki, S.T. (2019). Modeling and solving a sustainable closed-loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products. *Journal of Cleaner Production*, 207, 163-181,
- Tosarkani, B. M., Hassanzadeh Amin, S. (2018). A possibilistic solution to configure a battery closed-loop supply chain: multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 92, 12-26.
- 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.