

## توسعه مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته چندهدفه و چنددوره‌ای تحت شرایط عدم قطعیت

صادق فیض‌اللهی\*، هیرش سلطان‌پناه\*\*،

هیوا فاروقی\*\*\*، ایوب رحیم‌زاده\*\*\*\*

### چکیده

امروزه بحث استفاده مجدد از محصولات مصرفی اهمیت خاصی یافته است. از آنجاکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته نه تنها جریان روبه‌جلو بلکه شامل جریان معکوس نیز می‌شود، لذا شرکت‌هایی موفق هستند که بین زنجیره تأمین مستقیم و معکوس، یکپارچگی ایجاد کنند. مدل ارائه‌شده در این مقاله، چندهدفه، چندسطحی، چنددوره‌ای و تک‌محصولی در شرایط عدم قطعیت است. توابع هدف مدل شامل حداقل کردن هزینه‌ها، افزایش سود حاصل از محصول بازیافتی، کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از تولید، حمل و بازیافت محصول است. به‌منظور حل مسئله، از رویکرد (TH) که یکی از روش‌های تبدیل توابع چندهدفه به تک‌هدفه است، استفاده شده است. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مثال‌های عددی متعدد طرح شده و حل گردیده‌اند. همچنین جهت بررسی کاربرد مدل ارائه‌شده، یک مطالعه موردی روی محصول برانکاردر در یکی از شرکت‌های صنایع بیمارستانی در تهران انجام شده است. به‌علاوه برای بررسی اثر تغییرات پارامترهای مؤثر بر بهبود اهداف، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای بودجه، ظرفیت تولید و ضریب عدم قطعیت صورت گرفته است که نتایج، نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه ظرفیت تولید و بودجه بر افزایش سود حاصل از قطعات بازیافتی و همچنین تأثیر ضریب تقاضای فازی بر توابع هدف هزینه و اثرات زیست‌محیطی به‌صورت افزایشی است.

**کلیدواژه‌ها:** زنجیره تأمین حلقه‌بسته؛ عدم قطعیت؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ چند دوره‌ای؛ تقاضا؛ ظرفیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۷.

\* دانشجوی دکتری، گروه مدیریت، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

\*\* استادیار، گروه مدیریت، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران (نویسنده مسئول).

E-mail: heresh@iausdj.ac.ir

\*\*\* استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان.

\*\*\*\* استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر ظهور فناوری‌های نوین و ایجاد تحولات عظیم در بازارهای جهانی، مدیریت زنجیره تأمین را بیش از پیش ضروری ساخته است، به‌نحوی که سازمان‌های مختلف برای ایجاد و حفظ موقعیت و جایگاه رقابتی خود، ناگزیر به استفاده از مدیریت زنجیره تأمین هستند [۳۱]. شبکه زنجیره تأمین تمام فعالیت‌های مرتبط با جریان و تبدیل محصول‌ها از مرحله تأمین مواد اولیه تا تحویل به مشتری و نیز جریان‌های مرتبط با آن‌ها را شامل می‌شود. اگر بحث زنجیره تأمین معکوس در مسئله تعریف شود، محصولات مصرفی از مشتریان به تولیدکنندگان نیز ارسال می‌شود. اگر در مدلی، جریان معکوس در کنار جریان مستقیم فرض شود، مدل را «شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته» می‌نامند. زنجیره تأمین حلقه‌بسته از دو بخش تشکیل شده است: زنجیره معکوس و زنجیره مستقیم. در زنجیره مستقیم، جریان محصولات از تأمین‌کنندگان و کارخانه شروع می‌شود و سپس توزیع‌کنندگان، محصولات نهایی را به مشتریان به‌منظور فراهم‌کردن تقاضای آن‌ها تحویل می‌دهند. این فرایند مستقیم است. در زنجیره معکوس، محصولات مصرفی از مشتریان به سمت مراکز جمع‌آوری یا توزیع‌کنندگان برای دسته‌بندی یا مونتاژکردن برای احیا، استفاده مجدد و یا انهدام و دور ریختن فرستاده می‌شوند [۲۴، ۲۶].

از آنجاکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با جریانی از مواد در طول کل زنجیره مواجه است، طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته باید تصمیم‌های استراتژیکی و تاکتیکی را یکپارچه و مشخص سازد تا بتواند هزینه کل را کاهش دهد و یا سود کل را افزایش دهد [۱۵، ۱۸، ۲۸]. در شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته جریان رفت‌وبرگشت بر هم اثر می‌گذارند، تأثیر متقابل این دو می‌تواند متفاوت باشد که به نوع محصول بستگی دارد. از آنجاکه به‌شدت کارایی زنجیره‌های روبه‌جلو و معکوس با هم در ارتباط هستند، استفاده از یکپارچه‌سازی مناسب که قادر به حفاظت از هر دو جریان روبه‌جلو و معکوس باشد، امری ضروری است. در همین راستا زنجیره تأمین حلقه‌بسته مطرح شد [۴۴].

مسئله موردنظر در این پژوهش، توسعه مدل شبکه زنجیره تأمین یکپارچه است. در این مسئله، شبکه زنجیره تأمین شامل هفت مرحله است و تسهیلات موجود در شبکه شامل سطوح تأمین‌کننده، مراکز تولید، مراکز توزیع‌کننده، مشتری، مراکز جمع‌آوری، مراکز بازرسی و انهدام هستند. در این مسئله مراکز تولید پس از خرید مواد اولیه و تبدیل آن به محصولات نهایی، آن‌ها را به سیستم توزیع می‌فرستند و سپس از راه مراکز توزیع محصولات برای مشتریان ارسال می‌شوند. درصدی از محصولات به دلایل مختلف، مانند خرابی، از مشتریان به مراکز جمع‌آوری که نخستین حلقه در شبکه معکوس هستند، ارسال می‌شوند. این محصولات پس از ارسال به مراکز بازرسی و انهدام در صورت قابل‌تعمیربودن به مراکز تولید فرستاده شده و بعد از تعمیر دوباره به شبکه زنجیره تأمین وارد می‌شوند و سپس برای پاسخگویی به نیاز مشتریان از آن‌ها استفاده می‌شود.

در صورتی که محصولات موجود در مراکز بازرسی و انهدام قابل تعمیر نباشند در همان جا منهدم شده و از شبکه خارج می‌شوند تا به شیوه مناسبی از محیط زیست خارج شوند. چون کالاها در چرخه زنجیره تأمین معکوس و در چرخه زنجیره تأمین مستقیم وارد می‌شوند، بنابراین شبکه یک شبکه حلقه بسته خواهد بود و مدل به صورت چندهدفه، چندسطحی و تک محصولی با بازگشت محصول در شرایط عدم قطعیت است. توابع هدف مدل شامل حداقل کردن هزینه‌ها، افزایش سود حاصل از محصول بازیافتی، افزایش صرفه جویی هزینه‌های حاصل از بازیافت و اثرات زیست محیطی است. در مدل پیشنهادی، تقاضای مشتریان و ظرفیت تأمین کننده قطعی نیست و نیمی از محصول بازگشتی، بعد از بازرسی به مراکز تولید برگشته و بعد از انجام تعمیر در مراکز تولید به سیستم بازگردانده می‌شود و دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیمی دیگر از محصول برگشتی که قابل تعمیر نیست، بعد از انهدام از شبکه خارج می‌شود.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مسائل زنجیره تأمین حلقه بسته<sup>۱</sup> معرف دسته مسائلی هستند که جریان مواد برگشتی از مشتریان و بازیافت آن‌ها و برگشت این مواد به چرخه تولید را در نظر می‌گیرند. گاهی اوقات به مسائل زنجیره تأمین حلقه بسته مسائل زنجیره تأمین دوست‌دار محیط زیست<sup>۲</sup> نیز می‌گویند؛ که هدف آن حداقل کردن اتلاف مواد در طول چرخه عمر محصول است [۲۹]. کویل و همکاران (۲۰۰۹) زنجیره تأمین حلقه بسته را به صورت «بررسی هر دو فرایند جریان‌ات مستقیم و معکوس در زنجیره تأمین برای طراحی و مدیریت این جریان‌ات به صورت صریح» تعریف کرده‌اند [۸]. مدل‌های قطعی طراحی شبکه زنجیره تأمین، عدم قطعیت‌ها و عدم اطلاعات مربوط به آینده محتمل بازار را در نظر نمی‌گیرند، در نتیجه نمی‌توانند عملکرد آتی زنجیره را تضمین کنند؛ بنابراین مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها یک موضوع کلیدی در واقعی طراحی کردن شبکه‌های زنجیره تأمین است. از این رو، لازم است عدم قطعیت، خصوصاً عدم قطعیت‌های مرتبط با داده‌ها و روابط بین عناصر سیستم، در مدل‌سازی سیستم‌ها لحاظ شود [۵]. مرور مبانی نظری، دیدگاه‌های مختلفی را در مطالعه روابط زنجیره تأمین نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان چنین برداشت کرد که مطالعات پیشین بر موضوع‌های زیر متمرکز هستند:

فتح‌اللهی فرد و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل چند هدفه تصادفی برای زنجیره تأمین حلقه بسته با ملاحظات محیطی طراحی کردند و برای اعتبارسنجی مدل در اندازه‌های کوچک از اپسیلون محدودیت و برای اندازه‌های بزرگ ترکیبی از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کردند [۱۳]. فرخ و همکاران (۲۰۱۸) به طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم اطمینان با استفاده از

1. Closed-loop supply chain (CLSC)

2. Green supply chain (GSC)

برنامه‌ریزی تصادفی جامع فازی پرداختند [۱۲]. محمدی و همکاران (۲۰۱۸) به ارائه یک مدل برای برنامه‌ریزی اصلی زنجیره تأمین پایدار با ملاحظه یکپارچگی جریان مالی و فیزیکی پرداختند. اهداف این مدل عبارت‌اند از: بیشینه‌سازی سود؛ کمینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی و همچنین کمینه‌سازی انحراف نامطلوب شاخص‌های مالی از حد مطلوب خود. برای مواجهه با ماهیت چندهدفه مدل، از روش برنامه‌ریزی آرمانی استفاده شده است و مدل در یک مورد واقعی در صنعت بازیافت پلاستیک اجرا شده است [۲۱]. مرتضوی و سیف برقی (۲۰۱۸) به مدل‌سازی دو هدفه مسئله مکان‌یابی تخصیص در یک زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن سیستم حمل‌ونقل و انتشار گاز CO<sub>2</sub> پرداختند. اهداف مدل پیشنهادی، کمینه‌کردن هزینه کل شبکه و کمینه‌کردن میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> است. روش حل پیشنهادی برای حل مدل روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، یافته‌ها با نتایج به دست آمده از روش محدودیت اپسیلون مقایسه شده و تحلیل حساسیت پارامترهای ضروری انجام شده است [۲۲].

لویز و همکاران (۲۰۱۸) به یکپارچه‌سازی طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت جریان بازگشت نامشخص پرداختند. در این مطالعه یک مدل خطی عدد صحیح دوبعدی با عدم اطمینان بر کیفیت و کمیت جریان بازگشتی پیشنهاد شده است [۲۰]. پایدار و همکاران (۲۰۱۷) به طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته مهندسی نفت با در نظر گرفتن ریسک جمع‌آوری پرداختند [۲۷]. یان سوی و همکاران (۲۰۱۷) به مشکل شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با عدم قطعیت در محصولات مورد تقاضا و بازگشتی پرداختند و برای حل این مشکل از الگوریتم ژنتیک کلونی زنبور مصنوعی استفاده کردند [۹]. چن و همکاران (۲۰۱۷) به بهینه‌سازی تازگی محصولات در زنجیره تأمین حلقه‌بسته با استفاده از مدل چنددوره‌ای ترکیب‌شده با کنترل‌کننده فازی تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند [۷]. السالم و همکاران (۲۰۱۶) به مسئله زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداختند. بر این اساس، یک برنامه عدد صحیح غیرخطی ترکیبی است که از طریق آن مشکلات حمل‌ونقل و سفارش و مکان حل می‌شود [۳].

رومینا و همکاران (۲۰۱۶) به طراحی مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته محیطی قوی تحت عدم قطعیت پرداختند. مدل پیشنهادی طبق مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی تک‌هدفه حل می‌شود [۳۰]. کایا و یورک (۲۰۱۶) به مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی ترکیبی و راه‌حل‌های ابتدایی برای تصمیم‌گیری مکان، فهرست موجودی و قیمت در زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند [۱۹]. زوحال و سلیمانی (۲۰۱۶) به توسعه رویکرد کلونی مورچگان در شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز پرداختند. هدف این مطالعه کاهش هزینه‌ها و انتشار کربن است.

عملکرد الگوریتم پیشنهادی با راه‌حل بهینه نرم‌افزار لینگو<sup>۱</sup> از طریق مثال‌های عددی بر اساس داده‌های واقعی مقایسه شده است [۴۶]. ژی و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی به مطالعه پیچیدگی و کنترل زنجیره تأمین بازیافت بازار تلویزیون‌های رنگی چین بر اساس یارانه دولت به بررسی حل مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته بازیافت پرداختند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل، در بهبود محیط‌زیست و افزایش رفاه اجتماعی استفاده می‌شود [۴۵]. کادامبالا و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی به شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته، طراحی برای کارایی زمان و انرژی پرداختند. رویکرد بهینه‌سازی انبوه چندهدفه برای حل مدل و استفاده از الگوریتم ژنتیک است [۱۷].

تیواری و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی رویکرد الگوریتم تکاملی برای طراحی شبکه حلقه‌بسته زنجیره تأمین سبز و حل مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداختند [۴۲]. دای و همکاران (۲۰۱۵) به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی، یک مدل برنامه‌ریزی فازی و شانس محدود به بررسی حل مدل پرداختند [۱۰]. طلایی و همکاران (۲۰۱۵) در یک مطالعه به بررسی یک مدل تخصیص/محل تسهیلات برای یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه‌بسته چند محصول متشکل از تولید/بازتولید و مراکز جمع‌آوری/بازرسی و همچنین بازارها و مرکز در دسترس پرداختند. مدل با در نظر گرفتن اهداف زیست‌محیطی و کاهش میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در محیط در سراسر شبکه توسعه داده شده است [۳۹]. سابولان و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با گزینه‌های بازیابی متعدد با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی فازی به بررسی و حل مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداختند [۳۷]. کافا و همکاران (۲۰۱۵) به شبیه‌سازی، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل طراحی شبکه زنجیره‌ای حلقه‌بسته تغذیه: مطالعه موردی صنعت باتری به بررسی و حل مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداختند [۱۸].

تائو و همکاران (۲۰۱۵) به موازنه شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته چنددوره‌ای با فشرده‌سازی انتشار کربن پرداختند که هدف آن دوباره‌سازی برای کاهش ضایعات و ایمنی محیطی است [۴۰]. غایبلو و تارخ (۲۰۱۵) به طراحی شبکه زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس سازگار با محیط‌زیست پرداختند که با استفاده از روش قیود محدود، مقادیر بهینه پارتو محاسبه شدند [۱۴]. صفار و همکاران (۲۰۱۵) به طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی در شرایط عدم قطعیت پرداختند که باروش الگوریتم مسیر ممنوع حل شد [۳۲]. بشیری و شیری (۲۰۱۵) شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با در نظر گرفتن مرکز جمع‌آوری چندبخشی در شرایط عدم قطعیت را بررسی کردند که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک ترکیب شده و حل آن با الگوریتم ابتکاری تقریب میانگین نمونه و نرم‌افزار گمز است [۵].

سلطانی تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) مدل بهینه‌سازی دو هدفه هزینه و کربن‌دی‌اکسید در زنجیره تأمین حلقه‌بسته ارائه کردند [۳۶]. اخوان و همکاران (۲۰۱۵) با ارائه مدلی ریاضی برای شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته در فرآیند بازیافت محصول به مدل‌سازی برای توسعه چندمرحله‌ای، چنددوره‌ای، برای جلوگیری از اتلاف بیشتر منابع و کاهش آلودگی‌های محیط‌زیست پرداختند [۱]. دوزنده و هنرور (۲۰۱۴) در پژوهشی با عنوان «بهینه‌سازی متمرکز برای مدل کنترل موجودی کالای فسادپذیر در زنجیره تأمین حلقه‌بسته با سیکل تولید و بازتولید هم‌زمان» به بررسی سیستم موجودی برای اقلام فاسدشدنی در زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداختند [۱۱]. صیدی و سلطانی (۲۰۱۴) به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با استفاده از تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی فازی جهت مدیریت پسماند پرداختند [۳۴].

صانعی و توکلی‌مقدم (۲۰۱۴) مدل‌سازی ریاضی دوهدفه برای زنجیره تأمین حلقه‌بسته با ریسک اشتراکی و تقاضای غیرقطعی ارائه دادند. این مدل به صورت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی دوهدفه و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده است [۳۳]. نوتاش و همکاران (۲۰۱۴) به طراحی چندهدفه شبکه زنجیره تأمین با رویکرد الگوریتم ژنتیک پرداختند. اهداف شامل کمینه‌سازی هزینه کل و بیشینه‌سازی استفاده متوازن از ظرفیت تسهیلات شبکه است [۲۳]. اوزسیلان و همکاران (۲۰۱۴) به مدل‌سازی و بهینه‌سازی مشکلات یکپارچگی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته و پیاده‌کردن تعادل خط تولید پرداختند [۲۵]. جایانت و همکاران (۲۰۱۴) به «شبیه‌سازی، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل طراحی شبکه زنجیره‌ای حلقه‌بسته تغذیه: مطالعه موردی صنعت باتری» به بررسی و حل مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداختند [۱۶]. توکلی مقدم و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای طراحی یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس ارائه دادند که با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره تأمین است و برای حل مدل از نرم‌افزار لینگو بهره گرفتند [۴۱].

امین و ژانگ (۲۰۱۳) یک مدل شبکه زنجیره تأمین دوهدفه حلقه‌بسته تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند. شبکه لجستیک حلقه‌بسته در این مطالعه، یک شبکه شامل کارخانه‌های تولیدی، بازار تقاضا، مراکز جمع‌آوری و مرکز دفن است [۴]. عالم‌تبریز و همکاران (۲۰۱۱) به طراحی و بهینه‌سازی شبکه لجستیک معکوس در شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته احتمالی برای طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه شده است. مدل ارائه شده، چندمحصولی و چنددوره‌ای است که هم‌زمان، هزینه‌های حمل و نقل و احداث تسهیلات را در برمی‌گیرد. هدف مدل کمینه‌سازی هزینه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای محصولات برگشتی است [۲].

پژوهش حاضر در ادامه مطالعات پیشین و در راستای پاسخ به محورهای پژوهش‌های پیشنهادشده از حمزه امین طهماسبی و همکاران (۲۰۱۸) و سپیده ظهوری و همکاران (۲۰۱۶) به توسعه مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته جهت تعیین سیاست‌های بهینه ذی‌نفعان خواهد پرداخت. یکی از محورهای پیشنهادشده در این پژوهش‌ها استفاده از عدم‌قطعیت در مورد تقاضا است و محور دیگر در نظرگرفتن مرحله بازیافت محصول به‌عنوان بخشی از مراحل تولید است که در مدل حاضر این‌ها لحاظ شده و مدل با توجه به این محورها توسعه داده شده است.

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود اکثر پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، توابع هدف خود را به کمینه‌کردن هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی و یا حداکثرسازی سود و کمینه‌کردن اثرات زیست‌محیطی پرداختند و در هیچ‌کدام از پژوهش‌های انجام‌شده هر سه تابع هدف (کمینه‌کردن هزینه‌ها، کمینه‌کردن اثرات زیست‌محیطی و حداکثرسازی سود) به‌صورت هم‌زمان لحاظ نشده؛ که در این مدل پیشنهادی این‌ها خلاً پوشش داده شده است. از منظر عدم قطعیت هم همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، برخی از پژوهش‌ها تمام پارامترها را به شکل قطعی در نظر گرفتند و برخی هم که عدم‌قطعیت را لحاظ کردند، بر روی پارامترهای تقاضا و ظرفیت تأمین‌کنندگان به‌صورت هم‌زمان تمرکز نداشتند که این شکاف نیز در مدل پیشنهادی مرتفع شده است. به‌عبارتی‌دیگر، می‌توان گفت نوآوری این پژوهش ارائه یک مدل جامع‌تر نسبت به مدل‌های قبلی ارائه شده است که ضمن درنظرگرفتن همه حلقه‌های زنجیره تأمین، جریان معکوس را نیز لحاظ کرده و در عین حال که چنددوره‌ای است به جریان موجودی نیز توجه داشته و در کنار تابع هدف هزینه به مسائل زیست‌محیطی و صرفه‌جویی سود حاصل از بازیافت نیز پرداخته است تا یک مدل جامع‌تر برای مسائل مختلف طراحی و به دنیای واقعی نزدیک‌تر کند.

جدول ۱. شکاف تحقیقاتی موجود در مقالات اخیر

نویسندگان و سال انتشار	تک محصولی	چند محصولی	عدم قطعیت				توابع هدف	
			ظرفیت تأمین‌کننده	سایر موارد	حداقل هزینه‌ها	حداکثر سود	محیط زیست	محیط زیست
محمدی و همکاران (۲۰۱۸)	-	√	-	-	-	√	√	
مرتضوی و سیف‌نراقی (۲۰۱۸)	-	√	-	-	√	-	-	
طهماسبی و همکاران (۲۰۱۸)	√	-	-	-	-	√	√	

-	-	√	-	-	-	√	-	ظهوری و همکاران (۲۰۱۶)
√	-	√	√	-	-	√	-	صفار و همکاران (۲۰۱۵)
√	√	-	-	-	-	√	-	غالبو و تارخ (۲۰۱۵)
√	-	√	-	-	-	√	-	سلطانی تهرانی و همکاران (۲۰۱۵)
√	√	-	-	-	-	√	-	افرین و همکاران (۲۰۱۵)
-	-	√	√	-	√	-	√	فرخ و همکاران (۲۰۱۸)
√	-	√	√	-	-	-	√	فتح الهی فرد (۲۰۱۸)
-	-	√	√	-	√	√	-	یان سوی و همکاران (۲۰۱۷)
-	√	-	√	-	-	√	-	چن و همکاران (۲۰۱۷)
-	√	-	√	-	√	√	-	دای و همکاران (۲۰۱۶)
-	-	√	-	-	-	-	√	السالم و همکاران (۲۰۱۶)
√	-	√	-	-	-	-	√	زوحان و سلیمانی (۲۰۱۶)
√	√	√	-	√	√	-	√	مسئله پیشنهادی

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، از نوع توسعه‌ای و از نظر روش، از نوع مدل‌سازی کمی است و پژوهشگر درصدد است ابتدا یک مسئله ریاضی چندهدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت عدم قطعیت را مدل‌سازی کند که به منظور حل مسئله چندهدفه از رویکرد پیشنهادی (TH<sup>۱</sup>) استفاده می‌کند. سپس با استفاده از مثال‌های عددی متعدد، یک مطالعه موردی اعتبارسنجی شده با نرم‌افزار GAMS را حل و مورد بررسی قرار می‌دهد.

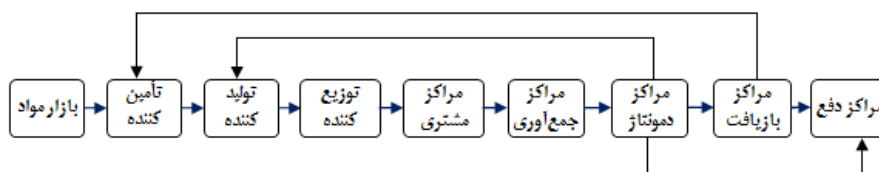


**مدل‌سازی ریاضی.** در این قسمت به تعریف مفروضات، اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم پرداخته می‌شود و در ادامه مدل ارائه شده ذکر شده است.

### مفروضات:

- هزینه انتقال (جابجایی) به نوع مواد، قطعه، محصول بستگی ندارد و تحت تأثیر مبدأ و مقصد (مسافت) است.
- هزینه توزیع با هزینه انتقال محصول از توزیع کننده به مشتری در نظر گرفته شده است.
- مراکز تأمین کنندگان، تولیدکنندگان/مونتازگران، توزیع کنندگان و مشتریان ثابت و از پیش تعریف شده است.
- هزینه جمع‌آوری داخل هزینه انتقال محصول استفاده شده از مراکز مشتری به مراکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده است.
- هزینه دفع و انهدام مواد و قطعات در هزینه حمل‌ونقل آن‌ها به مراکز دفع در نظر گرفته شده است.
- قطعات مورد استفاده در مراکز مونتاز از تأمین کننده خریداری شده است.
- محصولات سبز از مواد قابل بازیافت ساخته شده است.
- درصد ثابتی از محصولات ارسال شده به هر مشتری برابر با مقدار محصولات برگشتی از همان مشتری در نظر گرفته می‌شود.
- تقاضا برای محصولات باید ارضا شود.
- محصولات پس از جمع‌آوری از مناطق مشتری، دمونتاژ می‌شوند.
- قطعات حاصل از دمونتاژ در سه دسته قطعات مشابه نو، قطعات بازیافتی و قطعات ضایعاتی، به ترتیب، به مراکز مونتاز، مرکز بازیافت و مرکز دفع منتقل می‌شوند.
- یک محصول در نظر گرفته می‌شود.

شمای کلی زنجیره تأمین مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای گرافیکی زنجیره تأمین مورد بررسی

### مجموعه‌های مدل

$i \in \{1, 2, \dots, I\}$	مجموعه تأمین‌کننده‌ها	I
$j \in \{1, 2, \dots, J\}$	مجموعه تولیدکننده‌ها	J
$ma \in \{1, 2, \dots, MA\}$	مجموعه بازار مواد	Ma
$p \in \{1, 2, \dots, P\}$	مجموعه انواع قطعات	P
$m \in \{1, 2, \dots, M\}$	مجموعه مواد خام	M
$t \in \{1, 2, \dots, T\}$	مجموعه دوره‌های زمانی	T
$k \in \{1, 2, \dots, K\}$	مجموعه مراکز توزیع	K
$g \in \{1, 2, \dots, G\}$	مجموعه مراکز بالقوه جمع‌آوری	G
$r \in \{1, 2, \dots, R\}$	مجموعه مراکز بالقوه بازیافت	R
$re \in \{1, 2, \dots, Re\}$	مجموعه مراکز بالقوه دفع و انهدام	Re
$l \in \{1, 2, \dots, L\}$	مجموعه مراکز بالقوه دمونتاز	L
$c \in \{1, 2, \dots, C\}$	مجموعه مناطق مشتریان	C

### پارامترها

هزینه واحد انتقال مواد اولیه نوع m از بازار ma در دوره t	$ship_{mamt}^1$
هزینه واحد انتقال قطعه نوع p از تأمین‌کننده i به تولیدکننده j در دوره t	$ship_{ijpt}^2$
هزینه واحد جابجایی محصول از تولیدکننده j به توزیع‌کننده k در دوره t	$ship_{jkt}^3$
هزینه واحد جابجایی محصول از توزیع‌کننده k به مشتری c در دوره t	$ship_{kct}^4$
هزینه واحد انتقال محصول از مشتری c به مرکز جمع‌آوری g در دوره t	$ship_{cgt}^5$
هزینه واحد انتقال محصول از مرکز جمع‌آوری به مرکز دمونتاز l در دوره t	$ship_{glt}^6$
هزینه واحد انتقال قطعات مشابه نوع p از مرکز دمونتاز l به تولیدکننده j در دوره t	$ship_{ljpt}^7$
هزینه جابجایی قطعات بازیافتی نوع p از مرکز دمونتاز l به مرکز بازیافت r در دوره t	$ship_{lrpt}^8$
هزینه انتقال قطعات ضایعاتی نوع p از مرکز دمونتاز l به مرکز دفع و انهدام re در دوره t	$ship_{lrept}^9$
هزینه انتقال مواد بازیافت‌شده نوع m از مرکز بازیافت r به تأمین‌کننده i در دوره t	$ship_{rimt}^{10}$
هزینه انتقال مواد ضایعاتی نوع m از مرکز بازیافت r به مرکز دفع و انهدام re در دوره t	$ship_{remt}^{11}$

دوره t	
متوسط قیمت خرید قطعات نوع p از تأمین‌کنندگان در دوره t	$income_{pt}$
قیمت قطعه نوع p از تأمین‌کننده i در دوره t	$price_{ipt}$
هزینه ثابت تأمین محصول از تأمین‌کننده i در دوره t	$Fcost_{it}$
هزینه واحد راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری g در دوره t	$setg_{gt}$
هزینه واحد راه‌اندازی مرکز دمونتاز I در دوره t	$setdis_{lt}$
هزینه واحد راه‌اندازی مرکز بازیافت r در دوره t	$setrev_{rt}$
هزینه واحد راه‌اندازی مرکز دفع و انهدام re در دوره t	$setreb_{ret}$
هزینه واحد دمونتاز محصول در مرکز دمونتاز I در دوره t	$costdis_{lt}$
هزینه بازیافت قطعه نوع p در مرکز بازیافت r در دوره t	$costrev_{prt}$
هزینه واحد تولیدکننده j در دوره t	$cost_{jt}^2$
هزینه خرید مواد اولیه نوع m از بازار ma در دوره t	$bcost_{mamt}^1$
آلودگی ناشی از تولید زباله شیمیایی به ازای تولید هر قطعه نوع p به‌وسیله تأمین‌کننده i در دوره t	$CC_{ipt}$
آلودگی ناشی از تولید فاضلاب و پساب به ازای تولید هر قطعه نوع p به‌وسیله تأمین‌کننده i در دوره t	$WW_{ipt}$
آلودگی ناشی از تولید ضایعات جامد به ازای تولید هر قطعه نوع p به‌وسیله تأمین‌کننده i در دوره t	$SW_{ipt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال قطعه نوع p به‌وسیله تأمین‌کننده i به تولیدکننده j در دوره t	$AEX_{ijpt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال محصول از تولیدکننده j به توزیع‌کننده k در دوره t	$AEY_{jkt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال محصول از توزیع‌کننده k به محل مشتری c در دوره t	$AEY'_{kct}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال محصول از محل مشتری c به مرکز جمع‌آوری g در دوره t	$AEY''_{cgt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال محصول از مرکز جمع‌آوری g به مرکز دمونتاز I در دوره t	$AEYY'_{glt}$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال قطعات نوع p از مرکز دمونتاز I به	$AEXX'_{lrept}$

تولیدکننده $z$ در دوره $t$	
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال قطعات بازیافتی نوع $p$ از مرکز دمونتاز $l$	$AEYY_{lpt}$
به مرکز بازیافت $r$ در دوره $t$	
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال قطعات دورریز نوع $p$ از مرکز دمونتاز $l$	$AEY_{lpt}^m$
به مرکز دفع $re$ در دوره $t$	
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال مواد دورریز نوع $m$ از مرکز بازیافت $r$ به مرکز دفع $re$ در دوره $t$	$AEXX_{remt}^m$
واحد انتشار آلودگی هوا در حین انتقال مواد بازیافتی نوع $m$ از مرکز بازیافت $r$ به تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$	$AEZ'_{rimt}$
واحد مصرف انرژی در حین انتقال مواد نوع $m$ از بازار $ma$ به تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$	$ec_{maimt}$
میزان مصرف منابع تجدیدناپذیر در حین تولید قطعه نوع $p$ به‌وسیله تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$	$NC_{ipt}$
تقاضای فازی محصول در دوره $t$	$dem_{ct}$
تعداد واحد موردنیاز از قطعه نوع $p$	$req_p$
درصد (جمع‌آوری/برگشت از مشتری $c$ ) محصول در دوره $t$	$Q_{ct}$
درصد بازیافت قطعه نوع $p$ در مرکز بازیافت $r$ در دوره $t$	$Q'_{ptr}$
حداکثر ظرفیت فازی در دسترس قطعه نوع $p$ ارائه‌شده به‌وسیله تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$	$\sup\max_{ipt}$
حداقل مقدار خرید قطعه نوع $p$ از تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$	$\sup\min_{ipt}$
حداکثر درصد قطعه قابل‌استفاده مجدد نوع $p$ در دوره $t$	$reuse_{pt}$
ظرفیت محصول تولیدکننده $z$ در دوره $t$	$C_{jt}^1$
ظرفیت محصول توزیع‌کننده $k$ در دوره $t$	$C_{kt}^2$
ظرفیت محصول استفاده‌شده مرکز جمع‌آوری $g$ در دوره $t$	$C_{gt}^4$
ظرفیت قطعه مشابه نوع $p$ مرکز دمونتاز $l$ در دوره $t$	$C_{plt}^5$
ظرفیت مواد بازیافتی نوع $m$ مرکز بازیافت $r$ در دوره $t$	$C_{mrt}^6$
ظرفیت مرکز دفع و انهدام در دوره $t$	$C_{ret}^7$
بودجه تأمین در دوره $t$	$B_t$
هزینه نگهداری هر واحد قطعه نوع $p$ در انبار تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$	$isc_{ipt}$

هزینه نگهداری هر واحد قطعه نوع p در انبار تولیدکننده j در دوره t	$jsc_{jpt}$
هزینه نگهداری هر واحد محصول در انبار توزیع‌کننده k در دوره t	$kfc_{kt}$
هزینه نگهداری هر واحد محصول در مرکز جمع‌آوری g در دوره t	$gfc_{gt}$
هزینه نگهداری هر واحد قطعه نوع p در مرکز دمونتاز I در دوره t	$lsc_{lpt}$

### متغیرهای تصمیم

متغیر صفر و یک. اگر تأمین‌کننده i در دوره t انتخاب شود، یک و در غیر آن صفر است.	$S_{it}$
متغیر صفر و یک. اگر مرکز جمع‌آوری g در دوره t تأسیس شود، یک و در غیر آن صفر است.	$ga_{gt}$
متغیر صفر و یک. اگر مرکز دمونتاز I در دوره t تأسیس شود، یک و در غیر آن صفر است.	$dis_{lt}$
متغیر صفر و یک. اگر مرکز بازیافت r در دوره t تأسیس شود، یک و در غیر آن صفر است.	$rev_{rt}$
متغیر صفر و یک. اگر مرکز دفع و انهدام re در دوره t تأسیس شود، یک و در غیر آن صفر است.	$btl_{ret}$
متغیر عدد صحیح. میزان مواد خریداری‌شده نوع m از بازار ma به تأمین‌کننده i در دوره t	$z_{maint}$
متغیر عدد صحیح. تعداد قطعات خریداری‌شده نوع p از تأمین‌کننده i به تولیدکننده j در دوره t	$X_{ijpt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد محصولات انتقال‌یافته از تولیدکننده j به توزیع‌کننده k در دوره t	$y_{jkt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد محصولات انتقال‌یافته از توزیع‌کننده k به محل مشتری c در دوره t	$y'_{kct}$
متغیر عدد صحیح. تعداد محصولات استفاده‌شده انتقال‌یافته از محل مشتری c به مرکز جمع‌آوری g در دوره t	$y''_{cgt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد محصولات استفاده‌شده انتقال‌یافته از مرکز جمع‌آوری g به مرکز دمونتاز I در دوره t	$yy'_{glt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد قطعات نوع p انتقال‌یافته از مرکز دمونتاز I به تولیدکننده j در دوره t	$y'''_{ljpt}$
متغیر عدد صحیح. تعداد قطعات بازیافتی نوع p انتقال‌یافته از مرکز دمونتاز I به مرکز	$yy_{lpt}$

متغیر عدد صحیح. تعداد قطعات دورریز نوع p انتقال یافته از مرکز دمونتاز I به مرکز	$xx'_{lrept}$
دفع re در دوره t	
متغیر عدد صحیح. میزان مواد دورریز نوع m انتقال یافته از مرکز بازیافت r به مرکز	$xx''_{remt}$
دفع re در دوره t	
متغیر عدد صحیح. میزان مواد بازیافتی نوع m انتقال یافته از مرکز بازیافت r به	$z'_{rimt}$
تأمین کننده i در دوره t	
موجودی قطعه نوع p در انبار تأمین کننده i در دوره t	$isi_{ipt}$
موجودی قطعه نوع p در انبار تولیدکننده j در دوره t	$jsi_{jpt}$
موجودی محصول در انبار توزیع کننده k در دوره t	$kfi_{kt}$
موجودی محصول در مرکز جمع‌آوری g در دوره t	$gfi_{gt}$
موجودی قطعه نوع p در مرکز دمونتاز l در دوره t	$lsi_{lpt}$

### توابع هدف

هدف اول: هزینه کل با توجه به رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned}
 & \sum_k \sum_c \sum_t ship_{ket}^4 y'_{ket} + \sum_j \sum_k \sum_t (cost_{jt}^2 + ship_{jkt}^3) y_{jkt} + \sum_{ma} \sum_i \sum_m \sum_t (bcost_{mamt}^1 + ship_{mamt}^1) z_{mamt} \\
 & + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t (price_{ipt} + ship_{ijpt}^2) x_{ijpt} + \sum_i \sum_t F cost_{it} S_{it} + \sum_t \sum_g setg_{gt} ga_{gt} + \sum_c \sum_g \sum_t ship_{cgt}^5 y''_{cgt} \\
 & + \sum_t \sum_l setdis_{lt} dis_{lt} + \sum_t \sum_r setrev_{rt} rev_{rt} + \sum_t \sum_{re} setreb_{ret} btl_{ret} + \sum_g \sum_l \sum_t (costdis_{lt} + ship_{gl}^6) yy'_{gl} \\
 & + \sum_l \sum_j \sum_p \sum_t ship_{ljpt}^7 y''_{ljpt} + \sum_l \sum_r \sum_p \sum_t (costrev_{rpt} + ship_{lrpt}^8) yy_{lrpt} + \sum_l \sum_{re} \sum_p \sum_t ship_{lrept}^9 xx'_{lrept} \\
 & + \sum_r \sum_i \sum_m \sum_t ship_{rimt}^{10} z'_{rimt} + \sum_r \sum_{re} \sum_m \sum_t ship_{remt}^{11} xx''_{remt} + \sum_i \sum_p \sum_t isi_{ipt} * isc_{ipt} + \sum_j \sum_p \sum_t jsi_{jpt} * jsc_{jpt} \\
 & + \sum_k \sum_t kfi_{kt} * kfc_{kt} + \sum_g \sum_t gfi_{gt} * gfc_{gt} + \sum_l \sum_p \sum_t lsi_{lpt} * lsc_{lpt}
 \end{aligned}$$

رابطه (۱)

هدف دوم: سود حاصل از محصولات بازیافتی در رابطه (۲) ارائه شده است.

رابطه (۲)

$$\sum_l \sum_j \sum_p \sum_t income_{pt} yy''_{ljpt} + \sum_l \sum_r \sum_p \sum_t income_{pt} yy_{lrpt}$$

هدف سوم: حداقل سازی اثرات منفی زیست‌محیطی حاصل از تولید، بازیافت و حمل‌ونقل قطعات و محصولات در رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} & \sum_t \sum_p \sum_i \left( \sum_j x_{ijpt} \right) CC_{ipt} + \sum_t \sum_p \sum_i \left( \sum_j x_{ijpt} \right) WW_{ipt} + \sum_t \sum_p \sum_i \left( \sum_j x_{ijpt} \right) SW_{ipt} + \sum_t \sum_p \sum_i \sum_j x_{ijpt} AEX_{ijpt} \\ & + \sum_t \sum_j \sum_k y_{jkt} A E Y_{jkt} + \sum_t \sum_{ma} \sum_i \sum_m e c_{mamt} z_{mamt} + \sum_t \sum_i \sum_j \left( \sum_p x_{ijpt} \right) NC_{ipt} + \sum_k \sum_c \sum_t y'_{kct} A E Y'_{kct} \\ & + \sum_t \sum_c \sum_g y_{cgt} A E Y_{cgt} + \sum_t \sum_g \sum_l y y'_{gl} A E Y Y'_{gl} + \sum_t \sum_l \sum_{re} \sum_p x x'_{lrept} A E X X'_{lrept} + \\ & \sum_t \sum_l \sum_j \sum_p y''_{ljpt} A E Y''_{ljpt} + \sum_t \sum_r \sum_{re} \sum_m x x''_{remt} A E X X''_{remt} + \sum_t \sum_r \sum_i \sum_m z'_{rimt} A E Z'_{rimt} \end{aligned}$$

رابطه (۳)

محدودیت‌ها: در روابط (۴) تا (۲۳) ارائه شده است.

رابطه (۴)

رابطه (۵)

رابطه (۶)

$$kfi_{kt} = kfi_{k(t-1)} + \sum_j y_{jkt} - \sum_c y'_{kct} \quad \forall k \in K, t \in T \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$gfi_{gt} = gfi_{g(t-1)} + \sum_c y_{cgt} - \sum_l y y'_{gl} \quad \forall g \in G, t \in T \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sum_g y_{cgt} = \sum_k Q_{ct} y'_{kct} \quad \forall c \in C, t \in T \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$lsi_{lpt} = lsi_{lp(t-1)} + \sum_g req_p y y'_{gl} - \sum_j y_{ljpt} - \sum_r y y_{lrept} - \sum_{re} x x'_{lrept} \quad \forall l \in L, p \in P, t \in T \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sum_{p,l} Q_{ptr} y y_{lrept} = \sum_m \left( \sum_i z'_{rimt} + \sum_{re} x x''_{remt} \right) \quad \forall r \in R, t \in T \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_j x_{ijpt} \leq \sup \max_{ipt} S_{it} \quad \forall p \in P, i \in I, t \in T \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\sum_j x_{ijpt} \geq \sup \min_{ipt} S_{it} \quad \forall p \in P, i \in I, t \in T \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_j y y_{ljpt} \leq \sum_g reuse_{pt} y y'_{gl} \quad \forall p \in P, l \in L, t \in T \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_r y y_{lrept} + \sum_{re} x x'_{lrept} \leq \sum_g (1 - reuse_{pt}) y y'_{gl} \quad \forall p \in P, l \in L, t \in T \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_k y_{jkt} \leq C_{jt}^1 \quad \forall j \in J, t \in T \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_c y'_{kct} \leq C_{kt}^2 \quad \forall k \in K, t \in T \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_l yy'_{glt} \leq C_{gt}^4 * \sum_{i=1}^t ga_{gt} \quad \forall g \in G, t \in T \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\sum_j yy''_{ljpt} + \sum_r yy'_{lrpt} + \sum_{re} xx'_{lrept} \leq C_{plt}^5 * \sum_{i=1}^t dis_{li} \quad \forall p \in P, l \in L, t \in T \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\sum_i z_{rimt} + \sum_{re} xx''_{remt} \leq C_{mt}^6 * \sum_{i=1}^t rev_{li} \quad \forall r \in R, m \in M, l \in L, t \in T \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\sum_i \sum_j \sum_p \left( price_{ipt} + ship_{ijpt}^2 \right) x_{ijpt} + \sum_i Fcost_{it} S_{it} \leq B_t \quad \forall t \in T \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\sum_l \sum_p xx'_{lrept} + \sum_r \sum_m xx''_{remt} \leq C_{ret}^7 * \sum_{i=1}^t btl_{ret} \quad \forall re \in Re, t \in T \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$z_{mainit}, X_{ijpt}, y_{jkt}, y'_{kct}, y''_{cgt}, yy'_{glt}, y''_{ljpt}, yy'_{lrpt}, xx'_{lrept}, xx''_{remt}, z'_{nimt} \geq 0 \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

تابع هدف (۱) کل هزینه‌های زنجیره تأمین را حداقل می‌کند. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های خرید مواد اولیه و قطعات، هزینه تولید محصول، هزینه‌های حمل‌ونقل بین حلقه‌های مختلف زنجیره، هزینه‌های تأسیس مراکز و تجهیزات جدید و همچنین هزینه‌های نگهداری قطعات و محصولات است.

تابع هدف (۲) میزان صرفه‌جویی (سود) حاصل از استفاده تأمین‌کنندگان از قطعات مشابه نو و بازیافتی از مراکز دمونتاز و مراکز بازیافت را حداکثر می‌سازد.

تابع هدف (۳) جهت حداقل‌سازی اثرات منفی زیست‌محیطی حاصل از تولید و حمل قطعات و محصولات در تمام اجزای زنجیره تأمین است.

محدودیت (۴) برآوردن تقاضا: در هر دوره، تعداد محصولات انتقال‌یافته از همه توزیع‌کننده‌ها به هر مشتری باید از تقاضای آن مشتری در آن دوره بیشتر باشد.

محدودیت (۵) توازن موجودی قطعات در انبار تأمین‌کننده: مقدار موجودی تأمین‌کننده در هر دوره برابر است با اختلاف (مجموع موجودی تأمین‌کننده در دوره قبل و مواد اولیه ارسال شده از بازارهای مواد اولیه و مواد بازیافتی ارسال شده از مراکز بازیافت) از (مقدار جریان قطعات خروجی از تأمین‌کننده به تولیدکنندگان).

محدودیت (۶) توازن موجودی قطعات در مراکز تولید/دمونتاز: مقدار موجودی هر مرکز تولید در هر دوره برابر است با اختلاف (مجموع موجودی تولیدکننده در دوره قبل و تعداد قطعات خریداری شده توسط تولیدکننده از تأمین‌کنندگان و قطعات مشابه نو آرسالی از مراکز دمونتاز) از (تعداد قطعات به‌کاررفته در محصولات ارسال شده به توزیع‌کنندگان).



محدودیت (۷) توازن موجودی محصولات در مراکز توزیع: مقدار موجودی هر مرکز توزیع در هر دوره برابر است با اختلاف (مجموع موجودی توزیع‌کننده در دوره قبل و محصولات ارسال شده از تولیدکنندگان) از (تعداد محصولات انتقال یافته از توزیع‌کننده به مشتریان).

محدودیت (۸) توازن جریان موجودی در مراکز جمع‌آوری را نشان می‌دهد. موجودی هر مرکز جمع‌آوری در هر دوره برابر است با اختلاف (مجموع موجودی دوره قبل و محصولاتی که در آن دوره از مشتری‌ها جمع‌آوری شده و به آن مرکز جمع‌آوری ارسال شده است) از (مجموع محصولاتی که در آن دوره از آن مرکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت ارسال شده است).

محدودیت (۹) تعداد کالاهای برگشتی: تعداد محصولات ارسالی از هر مشتری به تمام مراکز جمع‌آوری برابر است با درصد (جمع‌آوری/برگشت از مشتری) محصول ضرب در تعداد محصولات انتقال یافته از تمام توزیع‌کنندگان به آن مشتری.

محدودیت (۱۰) توازن موجودی قطعات در مراکز دمونتاز: تعداد قطعات موجود در هر مرکز دمونتاز برابر است با اختلاف (مجموع موجودی دوره قبل و تعداد قطعات ارسال شده از مراکز بازیافت) از (تعداد قطعات انتقال یافته از آن مرکز دمونتاز به تمام تولیدکنندگان، مراکز بازیافت و مراکز دفع).

محدودیت (۱۱) توازن جریان محصولات در مراکز بازیافت: تعداد قطعات ارسالی از مراکز دمونتاز به هر مرکز بازیافت برابر است با تعداد قطعات بازیافتی ارسالی از آن مرکز بازیافت به تولیدکنندگان و تعداد قطعات دورریز ارسالی به مراکز دفع.

محدودیت (۱۲) ظرفیت تأمین‌کننده (قطعات خریداری شده): تعداد قطعات خریداری شده توسط تولیدکنندگان از هر تأمین‌کننده باید از حداکثر ظرفیت در دسترس آن قطعه توسط آن تأمین‌کننده کمتر باشد (در صورتی که آن تأمین‌کننده انتخاب شود).

محدودیت (۱۳) حداقل خرید از هر تأمین‌کننده: تعداد قطعه خریداری شده توسط تولیدکنندگان از هر تأمین‌کننده باید بیشتر از حداقل مقدار مجاز خرید آن قطعه از آن تأمین‌کننده باشد (در صورتی که آن تأمین‌کننده انتخاب شود).

محدودیت (۱۴) درصد قابل استفاده مجدد در دمونتاز: تعداد قطعه ارسالی از هر مرکز دمونتاز به تولیدکنندگان برابر است با حداکثر درصد قطعه قابل استفاده مجدد موجود در محصولات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به آن مرکز دمونتاز.

محدودیت (۱۵) درصد قطعات بازیافتی و دورریز در دمونتاز: مجموع قطعات بازیافتی ارسالی از هر مرکز دمونتاز به مراکز بازیافت و مراکز دفع حداکثر برابر تعداد محصول ارسالی (درصد قطعه غیرقابل استفاده مجدد) از مراکز جمع‌آوری به آن مرکز دمونتاز است.

محدودیت (۱۶) ظرفیت تولیدکننده: در هر دوره تعداد محصولات ارسالی از هر تولیدکننده به تمام توزیع‌کنندگان باید از ظرفیت آن تولیدکننده کمتر باشد.

محدودیت (۱۷) ظرفیت توزیع‌کننده: در هر دوره تعداد محصولات ارسالی از هر توزیع‌کننده به تمام مشتریان باید از ظرفیت آن توزیع‌کننده کمتر باشد.

محدودیت (۱۸) ظرفیت مرکز جمع‌آوری: تعداد محصولات ارسال‌شده از هر مرکز جمع‌آوری به مراکز دمونتاز باید از ظرفیت مرکز جمع‌آوری کمتر باشد و مراکز جمع‌آوری در آن دوره یا دوره‌های قبل تأسیس شده باشد.

محدودیت (۱۹) ظرفیت دمونتاز: مجموع تعداد هر قطعه ارسالی از هر مرکز دمونتاز به تولیدکنندگان و مراکز بازیافت و مراکز دفع باید از ظرفیت آن مرکز دمونتاز برای آن قطعه کمتر باشد و مراکز دمونتاز در آن دوره یا دوره‌های قبل تأسیس شده باشد.

محدودیت (۲۰) ظرفیت بازیافت: مجموع میزان مواد بازیافتی از هر مرکز بازیافت به تأمین‌کنندگان به‌علاوه میزان مواد دورریز ارسالی از آن مرکز بازیافت به مراکز دفع باید از ظرفیت مواد بازیافتی آن مرکز بازیافت کمتر باشد و مراکز بازیافت مربوطه در آن دوره یا دوره‌های قبل تأسیس شده باشد.

محدودیت (۲۱) بودجه تأمین: مجموع قیمت‌قطعات خریداری‌شده از تأمین‌کنندگان به‌علاوه هزینه انتقال قطعات از تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان به‌علاوه هزینه ثابت تأمین از تأمین‌کنندگان باید از بودجه تأمین در دوره کمتر باشد.

محدودیت (۲۲) محدودیت ظرفیت مراکز دفع: تعداد کل قطعات دورریز از مراکز موتناژ و کل مواد دورریز از مراکز بازیافت به هر مرکز دفع باید از ظرفیت آن مرکز دفع کمتر باشد و مراکز دفع مربوطه در آن دوره یا دوره‌های قبل تأسیس شده باشد.

رابطه (۲۳) نامنفی بودن متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

**عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و ظرفیت تأمین‌کننده.** شرایط واقعی، ماهیت پیچیده و فضای رقابتی زنجیره تأمین سبب افزایش عدم قطعیت بسیاری از پارامترهای زنجیره می‌شود که در اکثر مواقع، کمبود اطلاعات و یا در دسترس نبودن اطلاعات کمی در مورد پارامترها وجود دارد. در این پژوهش، عدم قطعیت از نوع فازی مثلی در نظر گرفته شده است. این روش برای برخورد با عدم قطعیت پارامتر تقاضا و پارامتر حداکثر ظرفیت قطعه ارائه شده توسط تأمین‌کننده استفاده می‌شود. برای این منظور از مفاهیم ریاضی مانند مقادیر انتظاری یک عدد فازی استفاده شده است و سطح اطمینان از ارضای محدودیت‌ها توسط تصمیم‌گیرنده تعیین شده است. مدل برنامه‌ریزی فازی مثلی به‌صورت رابطه (۲۴) نشان داده می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= Cx + Fy, \\ \text{s.t.} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$\begin{aligned} By &\leq Ay, \\ \text{Nec } \{Tx \leq \tilde{S}y, \} &\geq \beta, \\ \text{Nec } \{Kx \geq \tilde{d}\} &\geq \alpha, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0. \end{aligned}$$

مدل قطعی معادل مدل رابطه (۲۴) در رابطه (۲۵) نشان داده شده است [۲۵].

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= Cx + Fy, \\ \text{s.t.} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\begin{aligned} By &\leq Ay, \\ Tx &\leq ((1-\beta)S^{(2)} + \beta S^{(1)})y, \\ Kx &\geq (1-\alpha)d^{(2)} + \alpha d^{(3)} \\ Ex &\geq Uy, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0. \end{aligned}$$

با توجه به موارد گفته‌شده، معادل قطعی دو محدودیت فازی به شکل زیر خواهد بود:  
معادل قطعی محدودیت تقاضا:

$$\sum_k y'_{kct} \geq (1-\alpha)dem_{ct}^{(2)} + \alpha dem_{ct}^{(3)} \quad \forall t \in T, c \in C \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

معادل قطعی محدودیت ظرفیت تأمین‌کننده:

$$\sum_j x_{ijpt} \leq [(1-\beta)supmax_{ipt}^{(2)} + \beta*supmax_{ipt}^{(1)}] S_{it} \quad \forall p \in P, i \in I, t \in T \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

**رویکرد حل مسائل چندهدفه.** یکی از رویکردهای جدید در رویارویی با مسائل چندهدفه رویکرد پیشنهادی ترابی و هسینی (TH) است. این روش حل را می‌توان در گام‌های زیر خلاصه کرد:

گام اول: تعیین جواب ایده‌آل مثبت (PIS) و جواب ایده‌آل منفی (NIS) برای هر یک از توابع هدف. برای به‌دست‌آوردن جواب‌های ایده‌آل مثبت برای هر یک از توابع هدف، یعنی  $(Z_1^{PIS}, \dots, Z_k^{PIS})$  و  $(Z_1^{NIS}, \dots, Z_k^{NIS})$  لازم است تا مدل‌ها به‌طور جداگانه برای هر یک از توابع هدف حل شود. برای به‌دست‌آوردن این جواب‌ها برای هر یک از توابع هدف دو بار باید مدل اجرا شود و این روش در مسائل بزرگ وقت‌گیر است در نتیجه جواب ایده‌آل منفی برای هر یک از توابع هدف به‌صورت زیر تخمین زده خواهند شد.  $v_h^*$  نشان‌دهنده متغیر تصمیم مرتبط با PIS از  $h$  امین تابع هدف هستند:

$$Z_h^{NIS} = \max_{k=1,2,\dots,K} \{Z_h(v_k^*)\} \quad \forall h \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

گام دوم: تخمین یک تابع عضویت فازی خطی برای هر یک از توابع هدف، این تابع عضویت فازی به‌صورت رابطه (۲۹) خواهد بود:  
در رابطه فوق  $\mu_h(x)$ ، درجه ارضای  $h$  امین تابع هدف را نشان می‌دهد.

$$\mu_h(x) = \begin{cases} 1 & Z_h < Z_h^{PIS} \\ \frac{Z_i^{NIS} - Z_h}{Z_h^{NIS} - Z_h^{PIS}} & Z_h^{NIS} \leq Z_h \leq Z_h^{PIS} \\ 0 & Z_h > Z_h^{NIS} \end{cases} \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

گام سوم: تبدیل مدل خطی عدد صحیح قطعی چند هدفه به مدل تک هدفه به کمک تابع ادغام‌سازی پیشنهادی توسط ترابی و هسینی (۲۰۰۸):

$$\text{Max } \lambda(v) = \gamma \lambda_0 + (1 - \gamma) \sum_h \theta_h \mu_h(v)$$

s.t.

$$\lambda_0 \leq \mu_h(v), \quad h = 1, 2, \dots, H \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$v \in F(v)$$

$$\lambda_0 \text{ and } \gamma \in [0, 1]$$

متغیر  $\lambda \{0 = \min_i \mu(x)\}$  نشان‌دهنده حداقل درجه رضایت توابع هدف است که در آن نشان‌دهنده ناحیه شدنی تشکیل شده بر اساس محدودیت‌های قطعی (غیرفازی) مدل کمکی معادل است. همچنین  $\theta_h$  و  $\gamma$  به ترتیب نشان‌دهنده درجه اهمیت  $h$  امین هدف و ضریب تصحیح هستند. مقادیر  $\theta_h$  به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که  $\sum_h \theta_h = 1$  و  $\theta_h \geq 0$ .

گام چهارم: حل مدل تک هدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و توقف حل در صورت رضایت و در غیر این صورت، تغییر مقادیر پارامتر ۷ و برگشتن به گام دوم [۴۳].

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

نتایج حل و مطالعه موردی. در این بخش به اعتباریابی مدل توسعه داده‌شده پرداخته شده است. جهت اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده، مسئله در ابعاد کوچک و متوسط با استفاده از نرم‌افزار GAMS-24.1.2/CPLEX و در کامپیوتر ۲ هسته‌ای با پردازشگر ۲ گیگاهرتز و رم ۴ گیگابایت حل شده است. ۱۰ نمونه مسئله در ابعاد مختلف تعریف و نتایج حل دقیق مسئله برای این نمونه مسائل در ادامه آورده شده است.

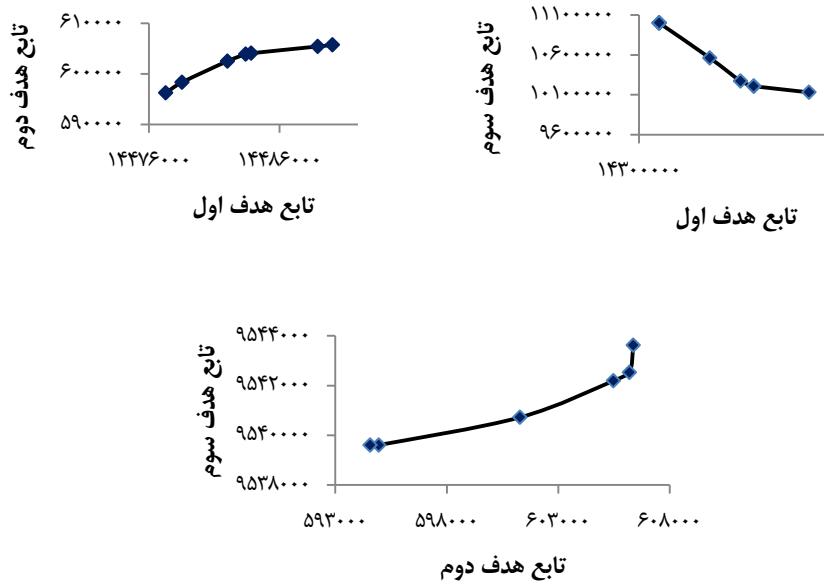
مقادیر پارامترها. پارامترهای ورودی مسئله در ابعاد کوچک و متوسط، طبق جدول ۲ در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر این پارامترها از مقاله سلیمانی و کنان [۳۵] استخراج شده است. حرف U به‌منزله تابع توزیع یکنواخت است. مقادیر هزینه نیز به دلار است.

جدول ۲. مقادیر پارامترها

پارامتر	مقادیر	پارامتر	مقادیر	پارامتر	مقادیر
$ship_{maint}^1$	U(۱۰,۵۰)	$costdis_{it}$	U(۲۰,۴۰)	$AEX_{ijpt}$	U(۳۰,۵۰)
$ship_{ijpt}^2$	U(۱۰,۵۰)	$costrev_{pt}$	U(۲۰,۴۰)	$AEY_{jkt}$	U(۳۰,۵۰)
$ship_{jkt}^3$	U(۱۰,۵۰)	$cost_{jt}^2$	U(۱۵۰,۲۰۰)	$AEY'_{kct}$	U(۳۰,۵۰)
$ship_{kct}^4$	U(۱۰,۵۰)	$bcost_{maint}^1$	U(۱۰,۵۰)	$AEY''_{cgt}$	U(۳۰,۵۰)
$ship_{cgt}^5$	U(۵۰,۱۰۰)	$CC_{ipt}$	U(۵,۱۰)	$AEEY'_{glt}$	U(۳۰,۵۰)
$ship_{glt}^6$	U(۱۰,۵۰)	$WW_{ipt}$	U(۲۰,۳۰)	$AEXX'_{lrept}$	U(۳۰,۵۰)
$ship_{ljpt}^7$	U(۱۰,۵۰)	$SW_{ipt}$	U(۱۰,۲۰)	$AEEY_{lpt}$	U(۳۰,۵۰)
$ship_{lpt}^8$	U(۱۰,۵۰)	$supmin_{ipt}$	U(۱۰,۲۰)	$AEY'''_{ljpt}$	U(۳۰,۵۰)
$ship_{lrept}^9$	U(۵۰,۱۰۰)	$reuse_{pt}$	U(۰,۰۳,۰,۰۵)	$AEXX''_{remt}$	U(۳۰,۵۰)

$U(۳۰,۵۰)$	$AEZ'_{rimt}$	$U(۶۰۰۰,۱۴۰۰۰)$	$C^1_{jt}$	$U(۱۰,۵۰)$	$ship^{10}_{rimt}$
$U(۵۰,۱۰۰)$	$ec_{mamt}$	$U(۶۰۰۰,۱۴۰۰۰)$	$C^2_{kt}$	$U(۵۰,۱۰۰)$	$ship^{11}_{remt}$
$U(۲۰,۵۰)$	$NC_{ipt}$	$U(۶۰۰۰,۱۴۰۰۰)$	$C^4_{gt}$	$U(۶۰۰,۷۰۰)$	$price_{ipt}$
$U(۱۰,۵۰)$	$dem^{(1)}_{ct}$	$U(۳۰۰۰,۷۰۰۰)$	$C^5_{plt}$	$U(۵,۱۰)$	$dem^{(2)}_{ct}$
$U(۱۰,۰۰۰, ۱۰۰,۰۰۰)$	$setreb_{ret}$	$U(۱۰۰,۲۰۰)$	$dem^{(3)}_{ct}$	$U(۳۰۰,۴۰۰)$	$Fcost_{it}$
$U(۱۵,۲۵)$	$req_p$	$U(۶۰۰۰,۲۱۰۰۰)$	$C^6_{mt}$	$U(۱۰,۰۰۰,۱۰۰,۰۰۰)$	$setg_{gt}$
$U(۰.۲۵,۰.۳۰)$	$Q_{ct}$	$U(۱۰۰۰,۰۰۰, ۱۰,۰۰۰,۰۰۰)$	$B_t$	$U(۱۰,۰۰۰,۱۰۰,۰۰۰)$	$setdis_{lt}$
$U(۱۵۰۰۰,۱۸۰۰۰)$	$supmax^{(2)}_{ipt}$	$U(۰.۱۵,۰.۲۵)$	$Q'_{ptr}$	$U(۱۰,۰۰۰,۱۰۰,۰۰۰)$	$setrev_{rt}$
$U(۱۰,۲۰)$	$isc_{ipt}$	$U(۱۰۰۰۰,۱۵۰۰۰)$	$supmax^{(1)}_{ipt}$	$U(۱۸۰۰۰,۴۲۰۰۰)$	$supmax^{(3)}_{ipt}$
$U(۱۰,۲۰)$	$jsc_{jpt}$	$U(۱۵,۲۵)$	$kfc_{kt}$	$U(۶۰۰۰,۱۴۰۰۰)$	$C^7_{ret}$
		$U(۱۰,۲۰)$	$lsc_{ipt}$	$U(۱۵,۲۵)$	$gfc_{gt}$

**تناقض توابع هدف.** یکی از نکاتی که در مسائل چندهدفه باید مورد توجه قرار گیرد، این است که هیچ‌کدام از توابع هدف نتواند کار دیگری را انجام دهد و با تابع هدف دیگر در یک راستا عمل کند. از این رو، در این بخش به این موضوع پرداخته شده است که توابع هدف با یکدیگر در تناقض هستند. بر این اساس، سه تابع هدف به صورت دو به دو مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تعیین مقادیر پارتو در حالت دوهدفه از روش وزنی جهت تعیین مقادیر تابع هدف استفاده شده و با تغییر در وزن‌های توابع هدف مقادیر مختلف برای این توابع به دست آمده است. تابع هدف اول و سوم از نوع مینیمم‌سازی و تابع هدف دوم از نوع ماکزیمم‌سازی است. همان‌طور که در نمودارها تناقض در توابع هدف مشخص است که در شکل (۲) نشان داده شده است. با بهبود در هر یک از توابع هدف تابع هدف دیگر بهبود پیدا نمی‌کند که این امر تناقض بین توابع هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمایش تناقض در توابع هدف

مشخصات نمونه مسائل مختلف. در جدول ۳ مشخصات نمونه مسائل مختلف جهت اعتباریابی مدل در نرم‌افزار گمز ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات نمونه مسائل مختلف

ردیف	تعداد بازار مواد	تأمین کننده	تولید کننده	مراکز مشتریان	مراکز توزیع	مراکز جمع آوری	مرکز بازرگانی	مراکز انهدام	مراکز دمونتاز	دوره زمانی
۱	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳
۲	۲	۴	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۳	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۳
۴	۴	۵	۴	۵	۴	۵	۵	۴	۵	۴
۵	۵	۵	۵	۶	۵	۵	۵	۵	۵	۵
۶	۶	۷	۶	۸	۷	۶	۶	۶	۵	۶
۷	۸	۸	۸	۹	۷	۶	۷	۷	۵	۷
۸	۱۰	۹	۹	۱۰	۸	۸	۸	۸	۸	۹
۹	۱۱	۹	۱۰	۱۱	۱۰	۹	۹	۹	۹	۱۰
۱۰	۱۲	۱۰	۱۰	۱۴	۱۲	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

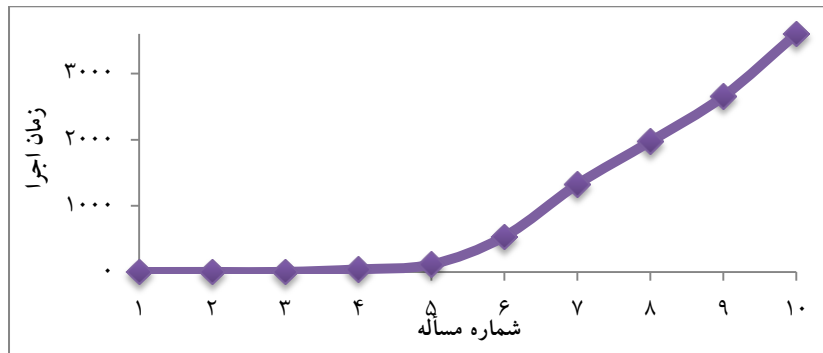
جدول ۴ نتایج حل دقیق مدل را برای نمونه مسائل مختلف نمایش می‌دهد. حداکثر زمان قابل قبول جهت اجرای مدل ۳۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. از این رو، بزرگ‌ترین ابعادی که

نرم‌افزار گمز قادر به حل آن است نمونه مسئله ۱۰ می‌باشد و برای ابعاد بزرگتر نرم‌افزار قادر به حل مدل در زمان قابل قبول نیست.

جدول ۴. نتایج حل دقیق مسئله برای نمونه مسائل مختلف

شماره مسئله	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	تابع هدف سوم	لاندا	زمان اجرا (ثانیه)
۱	۱۷۹۸۸۴۵۲۱	۱۵۴۰۵۶۲۱۰	۳۳۵۰۲۵۲۰	۰/۵۴۵	۲/۲۷
۲	۲۳۷۴۲۳۰۰۰	۴۰۹۶۳۷۴۱۱	۴۳۹۴۵۸۱۱۱	۰/۵۱۷	۳/۴۸
۳	۳۰۶۸۳۹۵۳۲	۴۲۱۲۷۲۵۴۳	۵۶۸۵۱۸۸۲	۰/۵۳۰	۴/۱۳
۴	۳۶۸۶۵۵۴۳۴	۶۶۶۹۹۴۹۴۴	۶۷۶۳۱۹۶۸	۰/۵۰۳	۴۲/۴۰
۵	۴۷۸۲۸۹۵۴۱	۱۱۱۳۳۵۱۲۱۱	۸۷۶۷۳۴۹۲	۰/۵۳۸	۱۱۵/۸۳
۶	۷۵۵۱۸۵۵۲۲	۲۴۰۳۱۵۴۲۳۱	۱۳۷۳۷۸۴۱۸	۰/۴۷۳	۵۳۶/۹۱
۷	۸۵۲۴۲۴۰۲۱	۴۹۸۹۰۲۰۳۱۴	۱۵۴۹۷۸۴۳۱	۰/۵۴۱	۱۶۲۴/۳۲
۸	۱۱۹۳۱۵۶۳۲۳	۷۷۸۴۶۸۰۲۳۱	۲۱۷۹۹۳۱۰۰	۰/۵۶۳	۱۹۷۲/۷۲
۹	۱۳۳۹۲۴۹۴۲۳	۸۷۹۱۴۵۹۳۵۴	۲۴۱۷۸۹۸۶۷	۰/۴۳۵	۲۶۵۴/۱۳
۱۰	۱۴۶۶۶۳۶۱۴۵	۱۳۵۱۷۳۸۷۰۰۰	۲۶۹۸۶۳۲۳۲	۰/۴۶۶	۳۵۹۷/۵۷

شکل (۳) زمان‌های اجرا برای ۱۰ مسئله نمونه را نشان می‌دهد. با افزایش ابعاد مسئله زمان حل به صورت نمایی افزایش می‌یابد.



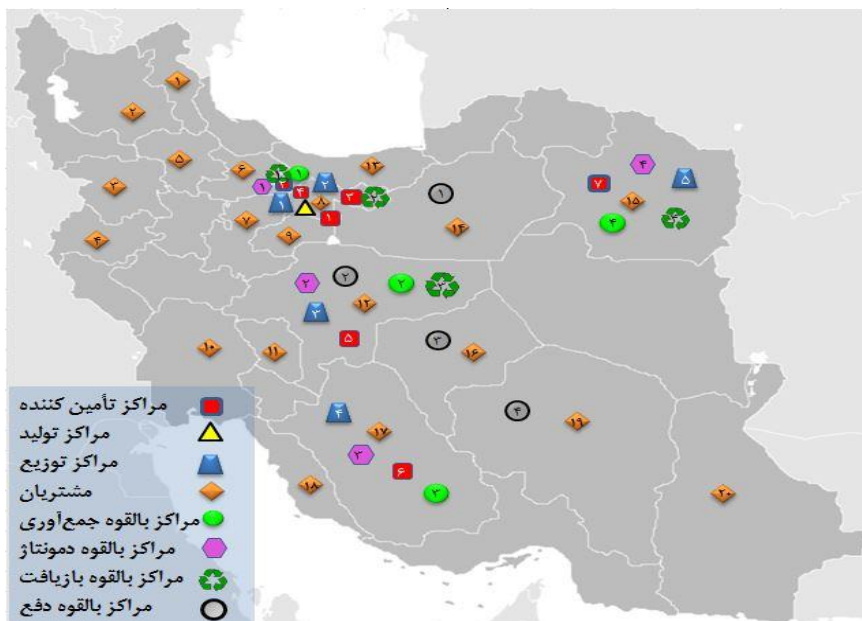
شکل ۳. زمان‌های اجرا در نرم‌افزار گمز برای نمونه مسائل مختلف

**مطالعه موردی.** «صنایع بیمارستان مهران»<sup>۱</sup> به عنوان اولین و بزرگ‌ترین تولیدکننده مبلمان بیمارستان در ایران فعالیت خود را از سال ۱۳۳۰ آغاز کرده است. این مجموعه به تولید انواع تخت، برانکارد، چرخ‌دستی ویژه نظافت، و کابینت‌های بیمارستان می‌پردازد. بیمارستان‌ها و مراکز

1. www.Mehranmed.com



درمانی، دانشگاه‌های علوم پزشکی، شرکت‌های پخش تجهیزات پزشکی و غیره از مشتریان محصولات این کارخانه هستند. در سال‌های اخیر این شرکت با جمع‌آوری محصولات کارکرده از بیمارستان‌ها اقدام به بستن حلقه زنجیره تأمین خود نموده است. از محصولات تولیدی این کارخانه، دو محصول تخت بیمارستانی و برانکاردار دارای چرخه زنجیره تأمین حلقه‌بسته هستند و عملیات جمع‌آوری و بازیافت روی آن‌ها انجام می‌شود. در این بخش یک مثال عددی واقعی بر اساس داده‌های مربوط به زنجیره تأمین برانکاردار در شرکت صنایع بیمارستانی مهران مورد بررسی قرار گرفته است. شرکت دارای ۳ سایت تولیدی بوده و ظرفیت تولید برابر ۱۰۰ واحد در ماه است. شرکت مهران مشتریان مختلفی از سراسر کشور دارد که در اینجا مشتریان هر استان به‌عنوان یک مشتری در نظر گرفته شده است که با توجه به فهرست ارائه‌شده از مشتریان در وب‌سایت شرکت، در نمونه مسئله مورد بررسی ۲۰ مشتری وجود دارند. براساس داده‌های موجود در مقاله سلیمانی و کنان [۳۵] و بر اساس نظرات خبرگان شرکت، متوسط تقاضای برانکاردار در هر دوره (یک ماهه) برابر ۸۴ است. همچنین نرخ بازگشت محصولات از مشتریان ۲۰٪ است. ۷ تأمین‌کننده اصلی برای تأمین قطعات ساخت برانکاردار وجود دارد. توزیع کالاها به‌صورت برون‌سپاری انجام می‌شود. مراکز توزیع، مراکز بالقوه جمع‌آوری، بازیافت، دمونتاز و دفع در شکل (۴) نشان داده شده است.



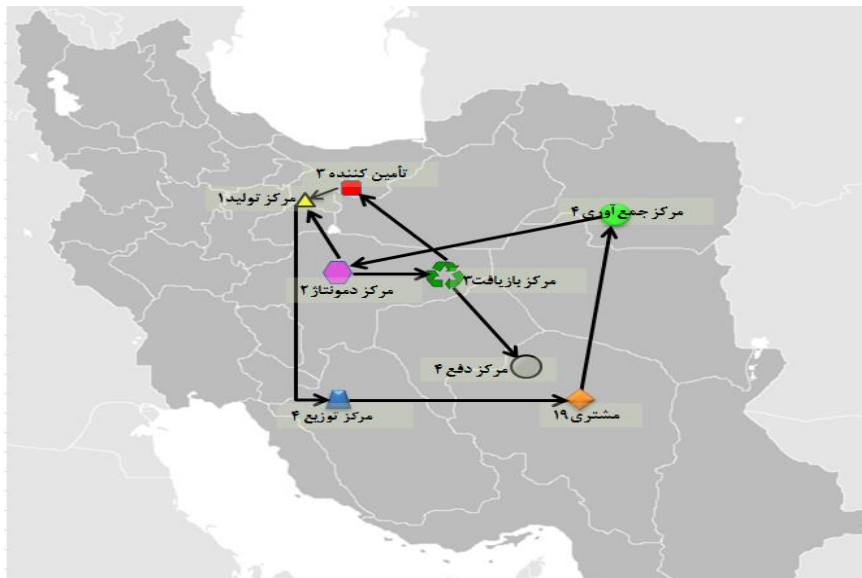
شکل ۴. زنجیره تأمین و نقاط بالقوه برای تأسیس تجهیزات جدید

پس از حل مسئله تعریف شده با نرم‌افزار گمز نتایج به‌صورت جدول ۵ به دست آمده است.

جدول ۵. نتایج حل مدل با داده‌های مطالعه موردی

۴۹۲۴۰۹۰۲۳	تابع هدف اول
۱۵۵۲۴۶۹۳۴۴	تابع هدف دوم
۹۴۵۱۶۰۵۵	تابع هدف سوم
۳۱۲.۱۶	زمان اجرا
۲(مرکز ۱ و ۴)	تعداد مراکز جمع‌آوری باز شده
۲(مرکز ۱ و ۲)	تعداد مراکز دموثناژ باز شده
۱(مرکز ۳)	تعداد مراکز بازیافت باز شده
۱(مرکز ۴)	تعداد مراکز دفع باز شده

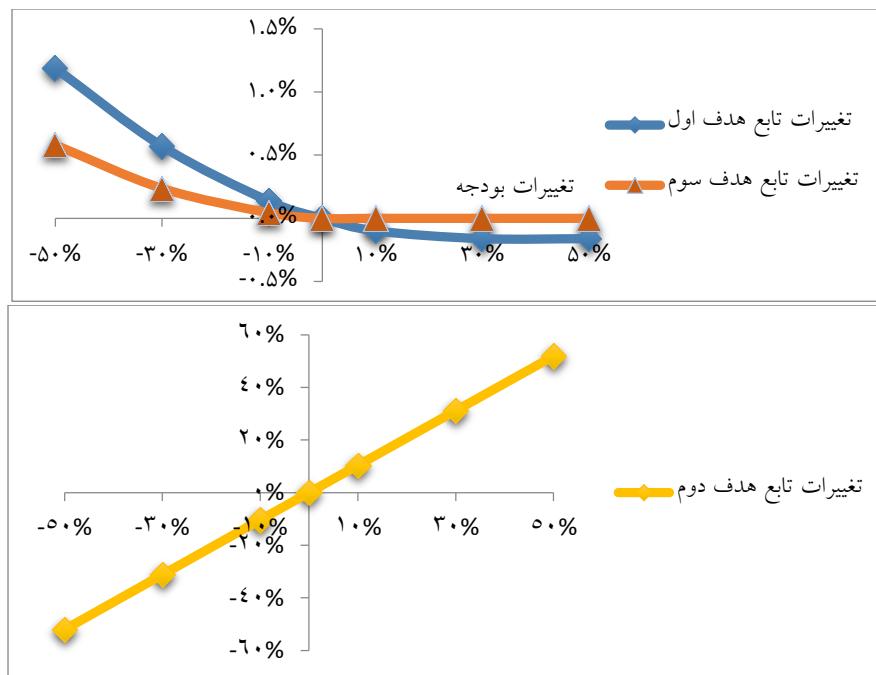
بخشی از زنجیره تأمین به‌دست‌آمده از حل مسئله مطالعه موردی برای یک مشتری در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵. بخشی از زنجیره تأمین مسئله مطالعه موردی

**تحلیل حساسیت.** در این بخش به تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به تغییرات پارامترهای مهم مسئله پرداخته شده است تا بررسی شود آیا تغییرات این پارامترها می‌تواند استراتژی مناسبی در کاهش هزینه‌ها و اثرات منفی زیست‌محیطی باشد و سود حاصل از بازیافت را افزایش دهد. سه پارامتر بودجه، ظرفیت مراکز تولید و ضریب آلفا (ضریب مربوط به پارامتر فازی تقاضا) برای انجام تحلیل حساسیت در نظر گرفته شده‌اند که نتایج تحلیل در ادامه ارائه شده است.

**تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به تغییرات تقاضا.** شکل (۶) میزان حساسیت توابع هدف نسبت به کاهش و افزایش مقدار بودجه را نشان می‌دهد. با کاهش بودجه، مسئله با محدودیت در تولید و تأسیس تجهیزات جدید در دوره‌های مختلف مواجه می‌شود. در نتیجه مجبور به انتخاب مسیرها و تجهیزات با هزینه بیشتر در دوره‌های دیگر می‌شود، از این رو افزایش تابع هزینه با کاهش بودجه منطقی است. با افزایش بودجه میزان این تابع بهبود می‌یابد ولی با افزایش بیش از ۳۰٪ به بودجه میزان تابع هدف هزینه بدون تغییر می‌ماند. در مورد تابع هدف سوم (اثرات زیست‌محیطی) می‌توان گفت افزایش بودجه تأثیر چندانی در بهبود این تابع هدف ندارد. از آنجاکه میزان آلودگی تولیدشده از تولید و حمل محصولات در دوره‌های مختلف تفاوت معنی‌داری ندارد و میزان این آلودگی وابسته به میزان محصول تولید و حمل شده است. در نتیجه با ثابت ماندن تقاضا روند این تابع هدف در برابر تغییرات بودجه قابل قبول است. نمای کلی نمودار نشان‌دهنده این است که تابع هدف دوم (سود حاصل از بازیافت) ارتباط مستقیم و خطی با تغییرات بودجه دارد. از آنجاکه تابع هدف دوم تنها دارای دو مؤلفه سود است و این سود حاصل از فروش قطعات بازیافتی است. با افزایش بازیافت مقدار این تابع افزایش می‌یابد.



شکل ۶ نمایش میزان حساسیت توابع هدف نسبت به تغییرات بودجه

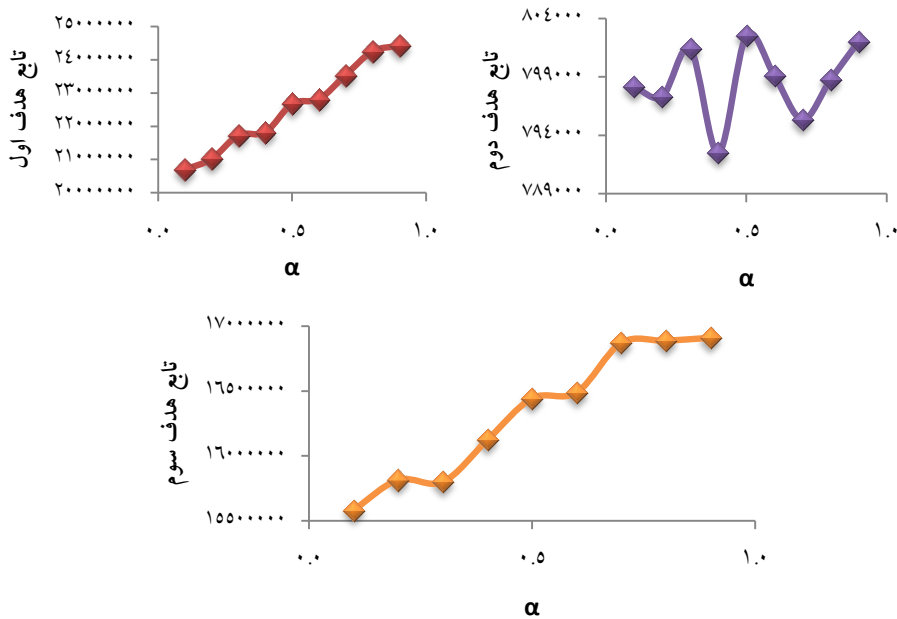
نمودارهای شکل (۷) حساسیت توابع هدف نسبت به تغییرات پارامتر ظرفیت تولید را نشان می‌دهد. با افزایش ظرفیت تولید مقدار هر سه تابع هدف بهبود می‌یابد که این بهبود در تابع هدف دوم (سود حاصل از فروش قطعات بازیافتی) بیشتر مشهود است و توابع هدف اول و سوم به‌خصوص تابع هدف هزینه حساسیت چندانی نسبت به تغییرات این پارامتر از خود نشان نداده‌اند. با افزایش ظرفیت تولید، مراکز تولید می‌توانند محصولات را در دوره‌هایی که هزینه کمتری دارند به مقدار بیشتری تولید کنند و بدین‌صورت در هزینه‌ها صرفه‌جویی شده و سود بیشتری حاصل می‌شود.



شکل ۷. نمایش میزان حساسیت توابع هدف نسبت به تغییرات ظرفیت تولید

نمودارهای نشان داده شده در شکل (۸) تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات  $\alpha$  را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب آلفا مقدار تابع هدف اول (هزینه) و سوم (اثرات زیست‌محیطی) افزایش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه با افزایش این ضریب وزن  $dem_{ct}^{(3)}$  افزایش پیدا می‌کند، به معنی افزایش مقدار تقاضا است. با افزایش تقاضا مقادیر در جریان در طول زنجیره تأمین افزایش یافته و در نتیجه مسئله هزینه بالاتری را متحمل می‌شود همچنین با افزایش مقدار جریان‌ات آلودگی‌های ناشی از حمل کالا بیشتر می‌شود که افزایش تابع هدف سوم را در پی خواهد داشت.

از این رو، افزایش تابع هدف هزینه با افزایش مقدار  $\alpha$  توجیه می‌یابد. به نظر می‌رسد تابع هدف سود نسبت به تغییرات مقادیر  $\alpha$  روند خاصی را از خود نشان نمی‌دهد. با افزایش مقادیر  $\alpha$  در بعضی موارد مقدار تابع افزایش و در موارد دیگر کاهش یافته است. دلیل این نوسانات و عدم وجود یک روند مشخص می‌تواند به دلیل عدم ارتباط مستقیم تابع هدف سود با جریان‌های کالای وارد شده به مشتری باشد که در نتیجه تغییرات تقاضا روی آن اثر مستقیم ندارد.



شکل ۸. نمایش میزان حساسیت توابع هدف نسبت به تغییر ضریب عدم قطعیت

**یافته‌های مدیریتی.** این پژوهش تلاش می‌کند که مدل جدید و جامعی در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با در نظر گرفتن رویکرد زیست‌محیطی ارائه دهد. از این رو، با بهینه‌سازی شبکه، قابلیت‌های مدیریت در ارتقاء حلقه‌های زنجیره تأمین سازمان و حل مسائل دنیای واقعی بهبود می‌یابد. مدل جامع ارائه‌شده با در نظر گرفتن اجزای مختلف زنجیره تأمین می‌تواند به مدیران در مکان‌یابی و تخصیص تجهیزات جدید کمک شایان توجهی کند. همچنین توجه به نتایج این پژوهش باعث می‌شود مدیران در طراحی شبکه زنجیره تأمین سازمان خود و تصمیم‌های مربوطه تجدیدنظر کرده و برنامه‌ریزی‌هایی از این دست را به صورت مؤثرتر و کارا انجام دهند. علاوه بر این مدیران را در افزایش سود حاصل از بازگشت محصولات یاری می‌دهد و همچنین توجه آن‌ها را علاوه بر افزایش سود و کاهش هزینه به کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی جلب می‌کند. در نهایت می‌توان گفت توجه به مدل جامع زنجیره تأمین ارائه‌شده

در این پژوهش و به‌کارگیری مؤثر آن، نتایجی چون توسعه پایدار، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، توجه به مصرف بهینه انرژی و منابع طبیعی و همچنین استفاده مجدد از محصولات از کارافتاده، کاهش هزینه‌های بازگشت محصولات مرجوعی و بهبود آوازه شرکت را به همراه می‌آورد.

### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه به توسعه یک مدل ریاضی سه هدفه شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته شامل بازار مواد اولیه، تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان، و همچنین مراکز جمع‌آوری، بازیافت و دفع تحت شرایط عدم قطعیت پرداخته شد. با استفاده از رویکرد فازی مثلی عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و پارامتر حداکثر ظرفیت قطعه ارائه‌شده توسط تأمین‌کننده در نظر گرفته شده و معادل قطعی برای مدل توسعه داده‌شده ارائه شد. سه تابع هدف هزینه، سود و اثرات زیست‌محیطی برای این مسئله در نظر گرفته شد. برای نمایش تناقض موجود بین اهداف از تغییر وزن‌ها در روش وزنی و به دست آوردن جواب‌های پارتوی مسئله در سه حالت دوهدفه بهره گرفته شد.

در ادامه با استفاده از روش (TH) مدل سه‌هدفه به یک مدل تک‌هدفه با یک تابع هدف ماکزیم‌سازی تبدیل شد و سپس نتایج عددی استخراجی از نرم‌افزار گمز در راستای تأییدشدنی بودن مدل توسعه داده‌شده، ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل جدیدشدنی و دارای جواب می‌باشد. جهت اعتبارسنجی این مدل یک مطالعه موردی انجام شده است که طی آن مکان تسهیلات جدید جهت تأسیس مشخص شده و طبق مصاحبه‌هایی که در زمینه نتایج حاصل از مقاله با خبرگان صنعت مربوطه انجام شد، افراد صاحب‌نظر و مدیران مربوطه نیز با موارد پیشنهادی موافق بوده و این نتایج را صحت‌گذاری کردند. درواقع، می‌توان گفت صحت‌گذاری و اعتبارسنجی این مقاله با نظر لایه مدیریتی سازمان انجام شده است. جهت بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای مؤثر به‌عنوان استراتژی‌های مؤثر در بهبود مقادیر تابع هدف، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای بودجه، ظرفیت تولید و ضریب عدم‌قطعیت انجام شده که نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه ظرفیت تولید و بودجه بر افزایش سود حاصل از قطعات بازیافتی و همچنین تأثیر ضریب تقاضای فازی بر توابع هدف هزینه و اثرات زیست‌محیطی به‌صورت افزایشی است. برای مطالعات آتی موارد ذیل پیشنهاد می‌شود:

- توسعه مدل‌های طراحی یکپارچه چندهدفه برای شبکه‌های چندمحصولی؛
- در نظر گرفتن توابع هدف مرتبط با محیط زیست از جمله بسته‌بندی سبز، تکنولوژی پاک، گواهی‌نامه‌های محیط‌زیست؛

- مدل‌های با پارامترهای غیر قطعی و بازگشت پویا به‌منظور نزدیک‌تر شدن مسئله به دنیای واقعی؛
- استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار.

**تقدیر و تشکر.** نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از شرکت ملی گاز ایران به خاطر حمایت‌های مالی و معنوی جهت انجام امورات این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

## منابع

1. Afarin, A., Rezaei, A. Khajeh Rezaei, A. (2015). Presentation of a mathematical model for closed loop supply chain in the process of product recycles, International Conference on Management, Economics and Industrial Engineering (In Persian).
2. Alam Tabriz, A., Roghanian, E, Hosseinzadeh, M. (2011). Design and Optimization of Reverse Logistics Network under Uncertainty Conditions Using Genetic Algorithm. *Industrial Management Perspective, 1*, 89-61 (In Persian).
3. Al-Salem, M., Diabat, A., Dalalah, D., & Alrefaei, M. (2016). A closed-loop supply chain management problem: Reformulation and piecewise linearization. *Journal of Manufacturing Systems, 40*, 1-8.
4. Amin, S. H., Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling, 37*(6), 4165.
5. Bashiri, M., Shiri, M. (2015). Designing the closed-loop network considering a multi-part collecting center under uncertainty conditions. *Journal of Industrial Engineering Research in Manufacturing Systems, 5*, 27-41 (In Persian).
6. Behmanesh, E. Pannek, J. (2016). Modeling and random path-based direct encoding for a closed loop supply chain model with flexible delivery paths, IFAC-Papers On Line, 49(2), 078-083.
7. Chen, Y. T., Chan, F. T., Chung, S. H., & Park, W. Y. (2018). Optimization of product refurbishment in closed-loop supply chain using multi-period model integrated with fuzzy controller under uncertainties. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 50*, 1-12.
8. Coyle, J. Langley, J.Jr. Gibson, B., Novack, R., & Bardi, E. (2009). Managing supply chains: a logistics perspective (8th ed.). Mason, OH: South Western.
9. Cui, Y. Y., Guan, Z., Saif, U., Zhang, L., Zhang, F., & Mirza, J. (2017). Close Loop Supply Chain Network Problem with Uncertainty in Demand and Returned Products: Genetic Artificial Bee Colony Algorithm Approach. *Journal of Cleaner Production, 162*, 717-742
10. Dai, Z., & Zheng, X. (2015). Design of close-loop supply chain network under uncertainty using hybrid genetic algorithm: a fuzzy and chance-constrained programming model. *Computers & Industrial Engineering, 88*, 444-457
11. Doozandeh, A., Honarvar, M. (2014). Focused optimization for the inventory control model of corrupt commodities in the closed loop supply chain with the simultaneous generation and reproduction cycle, Second National Conference on Industrial Engineering and Sustainable Management (In Persian).
12. 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
13. Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2018). A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations, *Applied Soft Computing, 69*, 232-249
14. Ghaleb Loo, S., Tarokh, M.J. (2015). Design of Integrated Direct and Inverse Ethernet Supply Chain Network. *Industrial Engineering Journal, 49*(1), 93-106 (In Persian).
15. Javid, A.A., Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design, 46(5), 582-597.



16. Jayant, A., Gupta, P., & Garg, S. K. (2014). Simulation Modeling and Analysis of Network Design for Closed Loop Supply Chain: A Case Study of Battery Industry. *Procedia Engineering*, 97(1672), 2213-2221.
17. Kadambala, D. K., Subramanian, N., Tiwari, M. K., Abdulrahman, M., & Liu, C. (2017). Closed loop supply chain networks: Designs for energy and time value efficiency. *Int. J. Production Economics*, 183, 382-393.
18. Kafa, N., Hani, Y., & El Mhamedi, A. (2015). An integrated sustainable partner selection approach with closed-loop supply chain network configuration IFAC-Papers on Line, 48(3), 1840-1845.
19. Kaya, O., & Urek, B. (2016). A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain. *Computers & Operations Research*, 65, 93-103.
20. Luis, J., Zeballos Carlos, A., Méndez Ana, P., & Barbosa, P. (2018). Integrating decisions of product and closed-loop supply chain design under uncertain return flows. *Computers & Chemical Engineering*, 112, 211-238.
21. Mohammadi, A. S., Alam Tabriz, A., Pishvaei, M. (2018). A Model for Mainstreaming the Sustainable Supply Chain Considering the Consistency of Financial and Physical Flow. *Industrial Management Perspective*, 29, 62-39 (In Persian).
22. Mortazavi, S.D., Seif-Barghi, M. (2018). Bi-objective modeling of allocation problem in a green supply chain considering the transport system and CO2 emissions. *Industrial Management Perspective*, 29, 185- 163 (In Persian).
23. Notash, M., Zandyeh, M., & Dorri, B. (2014). Multi-objective design of supply chain network with genetic algorithm approach. *Management researches in Iran*, 12, 183-207 (In Persian).
24. Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013). A mixed integer programming model for a closed-loop supply chain network. *International Journal of Production Research*, 51 (3), 718-734.
25. Özceylan, E., Paksoy, T., & Bektaş, T. (2014). Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing. *Transportation Research Part E: logistics and transportation review*, 61, 142-164
26. Paksoy, T. Bektas, T. Ozceylan, E. (2011). Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain. *Transportation Research Part E*, 47(4), 532-546.
27. Paydar, M. M., Babaveisi, V., and Safaei, A. S. (2017). An engine oil closed-loop supply chain design considering collection risk. *Computers and Chemical Engineering*, 104, 38-55.
28. Pishvaei, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*, 206, 1-20.
29. Pishvaz, M.S., & Torabi, S.A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
30. Ruimin, M. A., Lifei, Y. A. O., Maozhu, J. I. N., Peiyu, R. E. N., & Zhihan, L. V. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty, *Chaos, Solitons and Fractals*, 89, 195-202

31. Sabri, E.H., Beamon, B.M. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design; *Omega*, 28, 581-598.
32. Saffar, M.M., Shakouri Ganjavi, H, Razmi, j. (2015). Designs the supply chain of green closed loop with consideration of operating risks in uncertainty conditions. *Journal of Industrial Engineering*, 49(1), 55-68(In Persian).
33. Sanei, M., Tavakoli Moghadam, R. (2014). Bi-objective Modeling for closed loop supply chain with shared risk and uncertain demand. *Supply Chain Management*, 43(16), 4-15 (In Persian).
34. Sidi, M., Soltani, H. (2014). Designing a closed loop supply chain network using a fuzzy hierarchical analysis technique for waste management, the first national conference on industrial engineering research (In Persian).
35. Soleimani, H., & Kannan, G. (2015). A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks. *Applied Mathematical Modelling*, 39(14), 3990-4012.
36. Soltani Tehrani, M., Hassanpour, H. Ramezani, S. (2015). Bi-objective optimization model for cost and carbon dioxide in closed loop supply chain. *Management researches in Iran*, 19(1), 169-189(In Persian).
37. Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoglu, 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), 2661-2702.
38. Tahmasebi, H.A., Raheb, M, Jafari, S. (2018). Presented and solved a green optimization model in the closed-loop supply chain with the aim of increasing profit and reducing environmental problems, taking into account the warranty period of the product. *Journal of Investigating Operations in its Applications*, 15(3), 27-44(In Persian).
39. Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S.(2015). 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.
40. Tao, Z. G., Guang, Z. Y., Hao, S., & Song, H. J. (2015). Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with carbon emission constraints, *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 345-365.
41. Tavakoli Moghadam, R. Rekavandy Omid, M. Ghodrat Nema, A. (2013). Mathematical modeling to design integrated forward and reverse logistics network, *Management research in Iran*, 17.
42. Tiwari, A., Chang, P. C., Tiwari, M. K., & Kandhway, R. (2016). A Hybrid Territory Defined Evolutionary Algorithm approach for Closed Loop Green Supply chain Network Design. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 432-447.
43. Torabi, S. A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy sets and systems*, 159(2), 193-214.
44. Vahdani, B., Razmi, J., Tavakkoli-Moghadam, R., (2012). Fuzzy possibilistic modeling for Closed loop recycling collection networks. *Environmental Modeling & Assessment*, 17(6), 623-637.
45. Xie L, Ma J. (2016). Study the complexity and control of the recycling-supply chain of China's color TVs market based on the government subsidy. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, (38), 102-116.

46. Zohal, M., & Soleimani, H. (2016). Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design. *Journal of Cleaner Production*, 133, 314-337.

47. Zohori, S., Karimi, B, Mihami, R. (2016). Controlling the inventory of corrupt commodities in the closed loop supply chain, taking into account random demand. *Journal of Industrial Engineering*, 50(3), 429-439 (In Persian).



# Development of Multi Objective Multi Period Closed-Loop Supply Chain Network Model Considering Uncertain Demand and Capacity

Sadegh Feizollahi<sup>\*</sup>, Heirsh Soltanpanah<sup>\*\*</sup>, Hiwa Farughi<sup>\*\*\*</sup>,  
Ayub Rahimzadeh<sup>\*\*\*\*</sup>

## Abstract

Today, the discussion about the reuse of consumer products has particular importance. Since the closed loop supply chain is not only streaming but also includes reverse flow, companies are successful that integrate between direct and reverse supply chain. This paper model is multi-objective, multilevel, multi-disciplinary, and single-product in uncertain conditions. The objective functions of the model include minimizing costs, increasing the revenues from the recycled product, reducing the negative environmental effects of production, transportation and recycling of the product. To solve the problem, the approach TH, which is a method for converting multi-objective functions to single-objective, has been used. Numerical examples have been designed and solved for validating the proposed model. To study the application of the model, a case study was conducted on trolleys product in one of the hospitals industry companies in Tehran. To assess the effect of changes in the parameters affecting the improvement of objectives, sensitivity analysis on budget parameters, production capacity and uncertainty coefficient have been made. The results show the significant impact of production and budget on increasing the profit from recycled parts as well as the effect of fuzzy demand coefficient on the objective of cost and environmental effects which is increasing.

**Keywords: Closed-Loop Supply Chain; Uncertainty; Multi-Objective Optimization; Multi Period; Demand; Capacity.**

---

Received: April 17, 2018, Accepted: March 18, 2019.

<sup>\*</sup>Ph.D. student, Department of Management, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

<sup>\*\*</sup>Assistant Professor, Department of Management, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran (Corresponding Author).

Email:heresh@iausdj.ac.ir

<sup>\*\*\*</sup>Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan.

<sup>\*\*\*\*</sup> Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.