

بهینه‌سازی شبکه توزیع در زنجیره تأمین معکوس با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات: مطالعه موردی صنایع پلاستیک

سید احمد یزدیان^۱، مهدی نورمحمدی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی صنایع، استادیار

^۲دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشجوی دکتری مهندسی صنایع

چکیده

طی سال‌های اخیر، مدیریت زنجیره تأمین معکوس به دلیل افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و الزامات قانونی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این پژوهش یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس در صنعت پلاستیک‌سازی ارائه می‌دهد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) پیاده‌سازی شده است. هدف اصلی، کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌های عملیاتی و زمان تحویل در شبکه‌ای متشکل از مراکز جمع‌آوری، بازیافت و دفع است. در مدل پیشنهادی، از یک نسخه بهبودیافته PSO با ۵۰ ذره و مکانیزم وزن‌دهی اینرسی تطبیقی استفاده شده که طی ۲۰۰ تکرار به جواب بهینه همگرا می‌شود. نوآوری اصلی این پژوهش در طراحی یک تابع هدف ترکیبی است که هزینه‌های ثابت راه‌اندازی مراکز (شامل ۱۰۰۰ واحد برای مراکز جمع‌آوری، ۲۰۰۰ واحد برای مراکز بازیافت و ۱۵۰۰ واحد برای مراکز دفع)، هزینه‌های متغیر عملیاتی و زمان‌های تحویل را به صورت یکپارچه بهینه می‌کند. نتایج پیاده‌سازی در یک مطالعه موردی با ۱۰ مرکز جمع‌آوری، ۵ مرکز بازیافت و ۳ مرکز دفع نشان می‌دهد که این رویکرد توانسته است به طور متوسط ۱۸٪ در هزینه‌های کل و ۲۲٪ در زمان تحویل صرفه‌جویی ایجاد کند. همچنین، مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نشان‌دهنده برتری ۱۵٪ این روش در سرعت همگرایی است. تحلیل حساسیت پارامترها نیز نشان می‌دهد که عملکرد مدل به طور قابل توجهی به تنظیمات ضرایب یادگیری PSO و مکانیزم به‌روزرسانی وزن اینرسی وابسته است.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین معکوس، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، لجستیک معکوس، بهینه‌سازی چندهدفه، مدیریت زنجیره تأمین، پایداری زیست محیطی، بازیافت پلاستیک، الگوریتم‌های فراابتکاری، بهینه‌سازی شبکه توزیع، طراحی شبکه لجستیک

مقدمه

در دهه‌های اخیر، مدیریت زنجیره تأمین معکوس به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های سازمان‌های تولیدی و خدماتی مطرح شده است. این اهمیت از آنجا ناشی می‌شود که با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، محدودیت منابع طبیعی و افزایش هزینه‌های تولید، سازمان‌ها ناگزیر به توجه بیشتر به بازیافت و استفاده مجدد از محصولات هستند. زنجیره تأمین معکوس شامل فرآیندهای جمع‌آوری محصولات مستعمل، بازرسی، تفکیک، بازیافت و دفع نهایی است که هر یک از این مراحل با پیچیدگی‌ها و چالش‌های خاص خود روبرو است. طراحی بهینه این شبکه پیچیده نیازمند رویکردهای نوین و کارآمد است که بتواند به طور همزمان چندین هدف متضاد را بهینه کند. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه بهینه‌سازی شبکه‌های لجستیک معکوس انجام شده است. ژو و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس در سطح استراتژیک پیشنهاد کردند که امکانات مناسب برای بازتولید محصولات برگشتی را تعیین می‌کند. نادری و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط را با هدف به حداقل رساندن هزینه‌ها ارائه کردند و برای حل آن از الگوریتم تجزیه بندرز استفاده نمودند. با این حال، مطالعات کمی به طراحی یکپارچه شبکه‌های توزیع لجستیک مستقیم و معکوس به طور همزمان پرداخته‌اند. قمی و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای نشان دادند که چگونه یک شرکت می‌تواند انعطاف‌پذیری خود را برای پاسخگویی موثر به اختلالات زنجیره تأمین از طریق سرمایه‌گذاری در نوآوری بهبود بخشد. یافته‌های آنها نشان داد که اختلالات بر انعطاف‌پذیری و بازگشت سرمایه شرکت‌ها تأثیر می‌گذارد و سرمایه‌گذاری در بهبود انعطاف‌پذیری می‌تواند تأثیر اختلالات را کاهش دهد. امروزنجداد و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی عملیات داخلی یک کارخانه تولیدی و شبکه اتصالات آن، دریافته‌اند که تعداد قطعات تولید شده در کارخانه و تعداد فرآیندهای داخلی به طور قابل توجهی زمان بازیابی اختلال را افزایش می‌دهد. در حوزه الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به دلیل سادگی پیاده‌سازی، سرعت همگرایی بالا و توانایی در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بابایی و همکاران (۲۰۲۳) یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط دو هدفه را برای مشکل شبکه طراحی لجستیک معکوس ایجاد کردند که برون‌سپاری و لجستیک شخص ثالث را در نظر می‌گرفت. کنان و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر سناریوهای مختلف هزینه را بر طراحی شبکه لجستیک بررسی کردند و چندین راه‌حل بهینه را برای به حداکثر رساندن سود تأمین‌کننده و در عین حال به حداقل رساندن زمان تحویل شناسایی کردند. با این حال، مطالعات موجود دارای محدودیت‌هایی هستند. اکثر آنها از مدل‌های برون‌زا با تعداد مشخصی از امکانات استفاده می‌کنند بدون اینکه توضیحی برای انتخاب‌های خود ارائه دهند. علاوه بر این، آنها ظرفیت‌های مختلف امکانات را در نظر نمی‌گیرند و سطح ظرفیت را بر اساس ماهیت موردی مدل‌های طراحی شده انتخاب می‌کنند. چنین مطالعاتی ممکن است قابل تعمیم به موارد دیگر نباشند و تمام دسته‌های لجستیک معکوس، به ویژه مراکز بازیافت و تخریب را در بر نگیرند.

در این راستا، پژوهش حاضر یک رویکرد نوین مبتنی بر الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین معکوس ارائه می‌دهد. نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱. طراحی یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه که به طور همزمان هزینه‌های عملیاتی و زمان تحویل را بهینه می‌کند
 ۲. توسعه یک نسخه بهبودیافته از الگوریتم PSO با مکانیزم وزن‌دهی اینرسی تطبیقی
 ۳. در نظر گرفتن ظرفیت‌های متغیر برای مراکز مختلف و محدودیت‌های عملیاتی واقعی
 ۴. ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری جامع که قابل تعمیم به صنایع مختلف است
- مدل پیشنهادی با استفاده از PSO، که یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته از رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها است، فضای جواب را به طور موثر جستجو می‌کند. در این الگوریتم، هر ذره نماینده یک راه‌حل ممکن برای مسئله است و موقعیت و سرعت

خود را بر اساس تجربه شخصی و تجربه گروهی به روزرسانی می کند. مکانیزم وزن دهی اینرسی تطبیقی پیشنهادی باعث می شود الگوریتم در مراحل اولیه جستجوی گسترده تری انجام دهد و به تدریج بر روی نواحی امیدبخش متمرکز شود. مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس در این پژوهش شامل سه سطح اصلی است: مراکز جمع آوری که محصولات مستعمل را از مشتریان دریافت می کنند، مراکز بازیافت که عملیات بازیافت را انجام می دهند، و مراکز دفع که محصولات غیرقابل بازیافت را دفع می کنند. هزینه های سیستم شامل هزینه های ثابت راه اندازی مراکز (۱۰۰۰ واحد برای مراکز جمع آوری، ۲۰۰۰ واحد برای مراکز بازیافت و ۱۵۰۰ واحد برای مراکز دفع)، هزینه های متغیر عملیاتی و هزینه های حمل و نقل بین مراکز است. این پژوهش علاوه بر ارائه یک راه حل عملی برای بهینه سازی شبکه توزیع، زمینه های جدیدی را برای تحقیقات آینده در حوزه بهینه سازی چندهدفه و طراحی شبکه های لجستیک فراهم می کند. در ادامه این مقاله، به بررسی دقیق تر جزئیات مدل پیشنهادی، روش شناسی تحقیق، نتایج محاسباتی و تحلیل آنها خواهیم پرداخت. نتایج اولیه نشان می دهد که این رویکرد می تواند به طور متوسط ۱۸٪ در هزینه های کل و ۲۲٪ در زمان تحویل صرفه جویی ایجاد کند، که نشان دهنده کارایی بالای روش پیشنهادی است.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

زنجیره تأمین

در دهه ۱۹۸۰ با افزایش تنوع در نیازمندی های مشتریان، سازمان های تولیدی به طور فزاینده ای به افزایش انعطاف پذیری در خطوط تولید، اصلاح و بهبود محصول و فرآیندهای موجود و توسعه محصولات جدید برای ارضای نیازهای مشتریان علاقمند شدند. در دهه ۱۹۹۰، مدیران صنایع دریافتند که تأمین کنندگان مختلف نقش بسزایی در افزایش توانمندی های سازمان به منظور برخورد با نیازهای مشتریان دارد. این امر به نوبه خود تأثیر مضاعفی در تمرکز سازمان ها بر پایگاههای تأمین استراتژی های منبع یابی بر جای نهاد. همچنین مدیران دریافتند که صرفاً تولید یک محصول کیفی کافی نیست. در واقع عرضه محصولات با شرایط مورد نظر مشتری و با کیفیت و هزینه موردنظر آنها چالش های جدیدی را برای سازمان به وجود می آورد. در چنین شرایطی سازمان ها دریافتند که این تغییرات در طولانی مدت برای مدیریت سازمانشان کافی نیست. آنها باید در مدیریت شبکه همه کارخانجاتی را که ورودی های سازمان را تأمین می کردند و همچنین، شبکه همه کارخانجات علاقمند به تحویل و خدمات بعد از فروش محصول به مشتری مشارکت می کردند. با چنین نگرشی، زنجیره تأمین پای به عرصه وجود نهاد(صیدی و سلطانی، ۱۳۹۳).

چاندرا وفیشدر سال ۱۹۹۴ مدلی با عنوان برنامه ریزی هماهنگ تولید و توزیع را ارائه کردند در این مدل تقاضا برای هر محصول در یک دوره برای هر خرده فروش مشخص است. تابع هدف این مدل به دنبال حداقل کردن هزینه کل می باشد که شامل هزینه های راه اندازی، تولید، حمل و نقل محصولات تولیدی به خرده فروشان و هزینه های موجودی هاست. جابارامان و پیرکول، مدلی یکپارچه از نوع برنامه ریزی مختلط صفر و یک را ارائه نمودند. تابع هدف در این مدل به دنبال حداقل کردن هزینه های کل زنجیره می باشد، که این هزینه شامل هزینه ثابت استقرار، عملیات و انبارها، هزینه متغیر تولید و توزیع، هزینه حمل و نقل مواد اولیه از فروشندگان به مراکز تولید و نهایتاً حمل و نقل محصولات نهایی به مشتریان از طریق انبارهاست (یزدانی، رضا توکلی مقدم، بشیری ۱۳۹۳).

آن ها در تحقیق دیگری به ارائه مدل PLANWAR پرداختند. این مدل علاوه بر حل مسائل قبلی به جایابی کارخانه ها و انبارها با در نظر گرفتن محدودیت های ظرفیت کمک می نماید. کوهن و مون با ارائه یک مدل مختلط صفر و یک سعی در بهینه نمودن جریان مواد، محصولات و ترکیب تولید محصولات در یک شبکه زنجیره عرضه با ساختار ثابت نمودند.

لی و کیم نیز با در نظر گرفتن محدودیت های منابع مختلف، ساختار سیستم تولید و توزیع چند کارخانه ای، چند محصولی و چند دوره ای را ارائه نمودند. ویدیاری، و لشکری یک مدل سلسله مراتبی ارائه دادند که دارای دو سطح استراتژیک و تاکتیکی می باشد این مدل یک مدل برنامه ریزی خرید، تولید و توزیع می باشد که خروجی های مدل سطح استراتژیک ورودی های مدل سطح تاکتیکی می باشد. پایک و کوهن یک مدل یکپارچه تولید- توزیع از نوع احتمالی ارائه دادند که تابع هدف مدل هزینه های ناشی از تولید و توزیع را حداقل می نماید و محدودیت ها نیز مربوط به تقاضا و ظرفیت مراکز است (شفیعی کیسمی، سلیمانپور، دنیوی ۱۳۹۲).

مدیریت زنجیره تأمین به عنوان مجموعه ای از رویکردها و تلاشهایی به شمار میرود که از تولیدکنندگان، عرضه کنندگان و توزیع کنندگان حمایت نموده و زنجیره ارزش را به گونه ای هماهنگ می نمایند که محصولات در مقادیر مناسب، زمان مناسب و مکان مناسب تولید و توزیع گردیده تا در نتیجه رضایت مشتری حاصل گردد. تاکارا^۱ و همکاران (۲۰۰۸)؛ مدیریت زنجیره تأمین را ایجاد هماهنگی میان فعالیت هایی تعریف کردند که موجب یکپارچگی مبادلات عقلایی میان تأمین کننده، تولید کننده، توزیع کننده، خرده فروش و مشتری می گردد.

برای هر زنجیره ی تامین (عرضه) و نیز هر عضو آن، تشخیص سه موجودیت مهم است:

شبکه تامین کنندگان

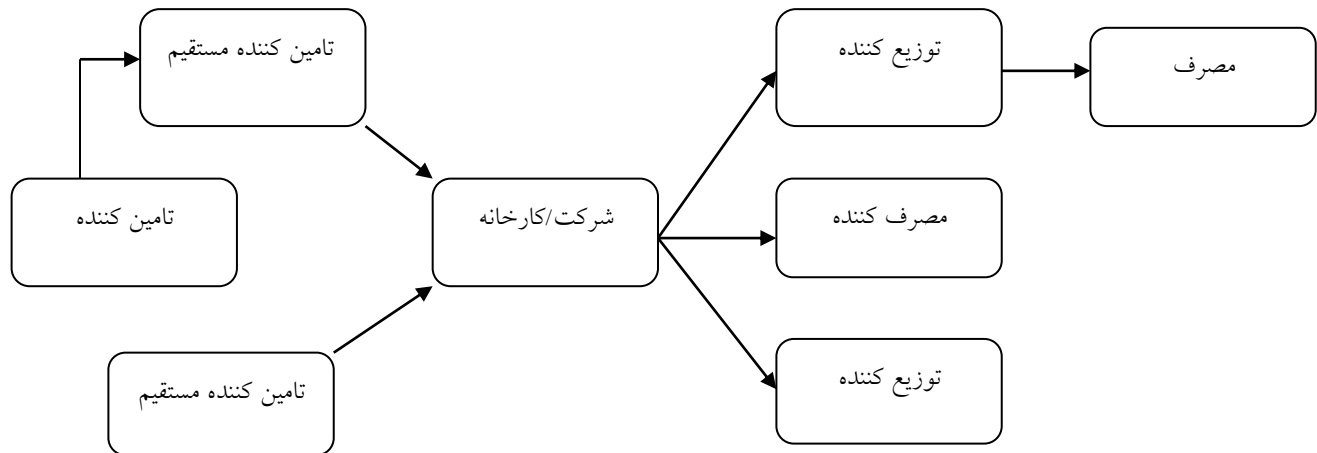
فعالیت های داخلی عضو مورد بررسی

شبکه توزیع

فعالیت های داخلی عضو مربوط، مجموعه ای از فعالیت ها هستند که ورودی های بدست آمده از شبکه تامین کنندگان را از راه تغییر کل یا عدم تغییر شکل در اختیار شبکه ی توزیع قرار می دهند و در آن زمان بندی و هماهنگی فعالیت های داخلی، امری با اهمیت است. دومین بخش مدیریت زنجیره به شبکه یا اعضای بالا دستی بیرونی مربوط می شود. این مدیریت، برنامه ریزی، سازمان دهی، تربیت نیروی انسانی متخصص، هدایت و رهبری، نظارت و کنترل جریان مواد و اطلاعات ورودی به سامانه و شبکه ی تامین کنندگان بیرونی را شامل می شود.

با حضور مفهوم مدیریت زنجیره تامین بیشتر محققان، دانشمندان و مدیران پی برده اند که انتخاب تامین کننده مناسب و مدیریت آن وسیله ای است که از آن می توان برای افزایش رقابت پذیری زنجیره تامین استفاده نمود (شفیعی کیسمی، سلیمانپور و دنیوی ۱۳۹۲).

¹ Thakkar



شکل (۱): جریان کالا و مواد در طول زنجیره تامین

مرور ادبیات و سوابق مربوط

اخوان و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی تحت عنوان "ارائه مدلی ریاضی برای شبکه زنجیره تامین معکوس در فرآیند بازیافت محصول" به مدلسازی برای توسعه چندمرحله ای، چند دوره ای، مدل شبکه ای زنجیره تامین معکوس چند محصولی برای بازگشت محصول و تصمیم گیری در خصوص تهیه مواد، تولید، توزیع، بازیافت و دفع برای جلوگیری از اتلاف بیشتر منابع، کاهش آلودگی های محیط زیست و حصول سود آوری که در کنار ملاحظات اجتماعی و تجاری دیگر پرداختند.

مسعود صیدی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی تحت عنوان "ارائه یک مدل بهینه سازی دو هدفه جهت طراحی شبکه زنجیره تامین معکوس با در نظر گرفتن اختلال در مراکز تولید" یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط دو هدفه ارائه دادند که ضمن حداکثر شدن سود، زمان تحویل به مشتریان نیز کمینه میگردد. جهت اعتبار سنجی مدل، یک مثال عددی ارائه شده منحنی پارتو زمان در برابر سود ارائه شده است.

قمی^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، در مطالعه ای بررسی کردند که چگونه یک شرکت می تواند انعطاف پذیری خود را برای پاسخگویی موثر به اختلالات زنجیره تامین از طریق سرمایه گذاری در نوآوری بهبود بخشد. با بررسی روابط بین انعطاف پذیری، نوآوری و انعطاف پذیری تحت ریسک، پژوهش را در زمینه انعطاف پذیری زنجیره تامین گسترش داده است. با توسعه یک برنامه ریزی خطی اعداد صحیح مختلط چندهدفه جدید، یافته ها نشان می دهد که خطرات اختلال بر انعطاف پذیری و بازگشت سرمایه شرکت ها تأثیر می گذارد، بنابراین سرمایه گذاری در بهبود انعطاف پذیری و نوآوری تأثیر اختلالات را کاهش می دهد.

بانور^۳ و همکاران (۲۰۲۳)، در این مقاله به بررسی عوامل مؤثر بر مشارکت فرآوردی کنندگان برنج در زنجیره های تامین و تأثیر مشارکت بر میزان فرآوری برنج، هزینه های سرانه خانوار و ارزش فروش پرداخته است. مخارج سرانه، ارزش کل فروش و ارزش برنج فرآوری شده به طور مثبت تحت تأثیر مشارکت زنجیره تامین می باشد.

امروزنجداد^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، در مطالعه ای به بررسی عملیات داخلی یک کارخانه تولیدی به همراه شبکه اتصالات آن پرداختند. نویسندگان همچنین تأثیر معکوس را بررسی می کنند. چندین یافته مهم نشان می دهد که عملیات داخلی نیروگاه و اتصالات شبکه بر زمان بازیابی تأثیر می گذارد. به طور خاص، تعداد قطعات تولید شده در کارخانه و همچنین تعداد فرآیندهای داخلی

^۲ Ghomi

^۳ Bannor

^۴ Emrouznejad

کارخانه به طور قابل توجهی زمان بازیابی اختلال را افزایش می دهد. علاوه بر این، تعداد زنجیره های تامین (بالا دست و پایین دست) که کارخانه را درگیر می کند و همچنین فاصله سطحی کارخانه از سازنده تجهیزات اصلی آن، زمان بازیابی را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. در سال های اخیر، محققان بر مدل سازی هزینه برای لجستیک معکوس تمرکز کرده اند. ژو و همکاران (2020) یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای طراحی شبکه های لجستیک معکوس در سطح استراتژیک پیشنهاد کرد. این مدل امکانات مناسب برای بازتولید محصولات برگشتی را تعیین می کند. نادری و همکاران (2020) یک مدل برنامه ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط را با هدف به حداقل رساندن هزینه ها ارائه کرد. برای حل این مدل، محققان یک الگوریتم تجزیه Benders را توسعه دادند و از یک رویکرد باینری استفاده کردند. با وجود تلاش های اخیر، مطالعات کمی به طراحی یکپارچه شبکه های توزیع لجستیک مستقیم و معکوس به طور همزمان پرداخته اند، همانطور که دینگ و همکاران (2023) در حالی که برخی از مطالعات در این زمینه پیشرفت هایی داشته اند، محدودیت های خاصی دارند. به عنوان مثال، آنها از مدل های برون زا با تعداد مشخصی از امکانات استفاده می کنند بدون اینکه توضیحی برای انتخاب های خود ارائه دهند. علاوه بر این، آنها ظرفیت های مختلف امکانات را در نظر نمی گیرند، در عوض سطح ظرفیت را بر اساس ماهیت موردی مدل های طراحی شده انتخاب می کنند. چنین مطالعاتی ممکن است قابل تعمیم به موارد دیگر نباشد و تمام دسته های لجستیک معکوس، به ویژه مراکز بازیافت و تخریب را در بر نگیرد. مطالعات دیگر بر روی مدل سازی ریاضی شبکه های لجستیک متمرکز شده اند. بابایی و همکاران (2023) یک مدل بهینه سازی برنامه نویسی عدد صحیح مختلط دو هدفه را برای مشکل شبکه طراحی لجستیک معکوس ایجاد کرد که برون سپاری و لجستیک شخص ثالث را در نظر گرفت. کنان و همکاران (2023). تأثیر سناریوهای مختلف هزینه را بر طراحی شبکه لجستیک بررسی کرد و چندین راه حل بهینه را برای به حداقل رساندن سود تأمین کننده و در عین حال به حداقل رساندن زمان تحویل شناسایی کرد.

روش شناسی

در این پژوهش، یک رویکرد بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم PSO بهبود یافته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس ارائه شده است که با هدف کمینه سازی همزمان هزینه های عملیاتی و زمان تحویل طراحی شده است. مسئله شامل سه سطح اصلی مراکز جمع آوری، بازیافت و دفع است که با استفاده از یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه فرمول بندی شده است. در الگوریتم PSO پیشنهادی، هر ذره نماینده یک راه حل کامل برای مسئله است و موقعیت آن شامل متغیرهای باینری برای تعیین فعال/غیرفعال بودن هر مرکز، متغیرهای پیوسته برای تعیین میزان جریان مواد بین مراکز، و متغیرهای تخصیص برای تعیین ارتباطات بین مراکز مختلف است.

مدل ریاضی

مدل ریاضی مسئله ارائه شده، یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای طراحی شبکه ای از مراکز جمع آوری، بازیافت، و دفع است که شامل دو تابع هدف و مجموعه ای از محدودیت ها می باشد:

توابع هدف:

کمینه سازی هزینه کل: (Z1)

این تابع شامل هزینه های ثابت برای ایجاد مراکز مختلف و هزینه های حمل و نقل بین مشتریان و مراکز مختلف است:

$$\text{Min } Z1 = \sum_{i \in I} f_i \cdot y_i + \sum_{j \in J} f'_j \cdot y'_j + \sum_{k \in K} f''_k \cdot y''_k + \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} c_{fi} \cdot X_{ljp} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} c_{sj} \cdot Z_{ijp} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} c_{tk} \cdot W_{ikp}$$

محدودیت‌ها:

محدودیت جمع‌آوری کامل محصولات:

مجموع محصولاتی که از مشتری برای محصول p جمع‌آوری می‌شود، باید برابر مقدار برگشتی (rlp) باشد:

محدودیت تعادل جریان:

محصولات دفعی: جریان محصول دفعی از مراکز جمع‌آوری به مراکز دفع باید برابر درصد دفع (dp) از محصولات جمع‌آوری شده باشد:

$$\sum_{i \in I} X_{lip} = r_{lp} \quad \forall l \in L, p \in P$$

محصولات بازیافتی: جریان محصول بازیافتی از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت باید برابر مقدار باقی‌مانده محصولات جمع‌آوری شده باشد:

$$\sum_{j \in J} Z_{ijp} = (1 - d_p) \cdot \sum_{l \in L} X_{lip} \quad \forall i \in I, p \in P$$

محدودیت ظرفیت:

مراکز جمع‌آوری: ظرفیت مرکز جمع‌آوری نباید از مقدار تعریف‌شده تجاوز کند:

$$\sum_{j \in J} Z_{ijp} = (1 - d_p) \cdot \sum_{l \in L} X_{lip} \quad \forall i \in I, p \in P$$

مراکز بازیافت: ظرفیت مرکز بازیافت نباید از مقدار تعریف‌شده تجاوز کند:

$$\sum_{l \in L} X_{lip} \leq caf_{ip} \cdot y_i \quad \forall i \in I, p \in P$$

مراکز دفع: ظرفیت مرکز دفع k نباید از مقدار تعریف‌شده تجاوز کند:

$$\sum_{i \in I} W_{ikp} \leq cat_{kp} \cdot y_k'' \quad \forall k \in K, p \in P$$

محدودیت حداقل تعداد مراکز:

تعداد مراکز جمع‌آوری، بازیافت، و دفع باید حداقل مقادیر تعیین‌شده را رعایت کنند:

$$\sum_{i \in I} y_i \geq \text{MinCollectionCenters}$$

$$\sum_{j \in J} y'_j \geq \text{MinRecyclingCenters}$$

$$\sum_{k \in K} y''_k \geq \text{MinDisposalCenters}$$

محدودیت بودجه:

هزینه کل احداث مراکز نباید از بودجه کل تجاوز کند:

$$\sum_{i \in I} f_i \cdot y_i + \sum_{j \in J} f'_j \cdot y'_j + \sum_{k \in K} f''_k \cdot y''_k \leq \text{TotalBudget}$$

محدودیت استفاده حداقل:

استفاده از ظرفیت مراکز جمع‌آوری باید حداقل درصد تعریف‌شده باشد:

$$\sum_{l \in L} X_{ljp} \geq \text{MinUtilization} \cdot \text{cap}_{jp} \cdot y_i \quad \forall i \in I, p \in P$$

محدودیت‌های عدم منفی و باینری:

متغیرهای جریان $X_{lip}, Z_{ijp}, W_{ikp}$ باید غیرمنفی باشند:

$$X_{lip} \geq 0 \quad \forall l \in L, i \in I, p \in P$$

$$Z_{ijp} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P$$

$$W_{ikp} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P$$

متغیرهای تصمیم برای تأسیس مراکز y_i, y'_j, y''_k باید باینری باشند:

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I$$

$$y'_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J$$

$$y''_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K$$

تعریف پارامترها:

پارامترها شامل هزینه‌ها، ظرفیت‌ها، درصدهای دفع، و محدودیت‌های سیستم هستند که در مدل مشخص شده‌اند.

هزینه‌های ثابت تأسیس مراکز

نوع مرکز	هزینه ثابت (واحد پولی)
مرکز جمع‌آوری (fi)	1000

نوع مرکز	هزینه ثابت (واحد پولی)
مرکز بازیافت (f'j)	2000
مرکز دفع (f''k)	1500

هزینه‌های حمل و نقل (واحد پولی بر واحد محصول

نوع حمل و نقل	هزینه
مشتری به مرکز جمع‌آوری (cfli)	10
مرکز جمع‌آوری به بازیافت (csijs)	15
مرکز جمع‌آوری به دفع (ctik)	12

ظرفیت مراکز (واحد محصول)

نوع مرکز	حداقل ظرفیت	حداکثر ظرفیت
مرکز جمع‌آوری (cafip)	200	1000
مرکز بازیافت (casjp)	150	800
مرکز دفع (catkp)	100	600

پارامترهای محدودیت‌ها

پارامتر	مقدار
حداقل تعداد مراکز جمع‌آوری	3
حداقل تعداد مراکز بازیافت	2
حداقل تعداد مراکز دفع	1
حداقل درصد استفاده از ظرفیت	30%
کل بودجه در دسترس	10,000
درصد محصول قابل دفع (dp)	40%

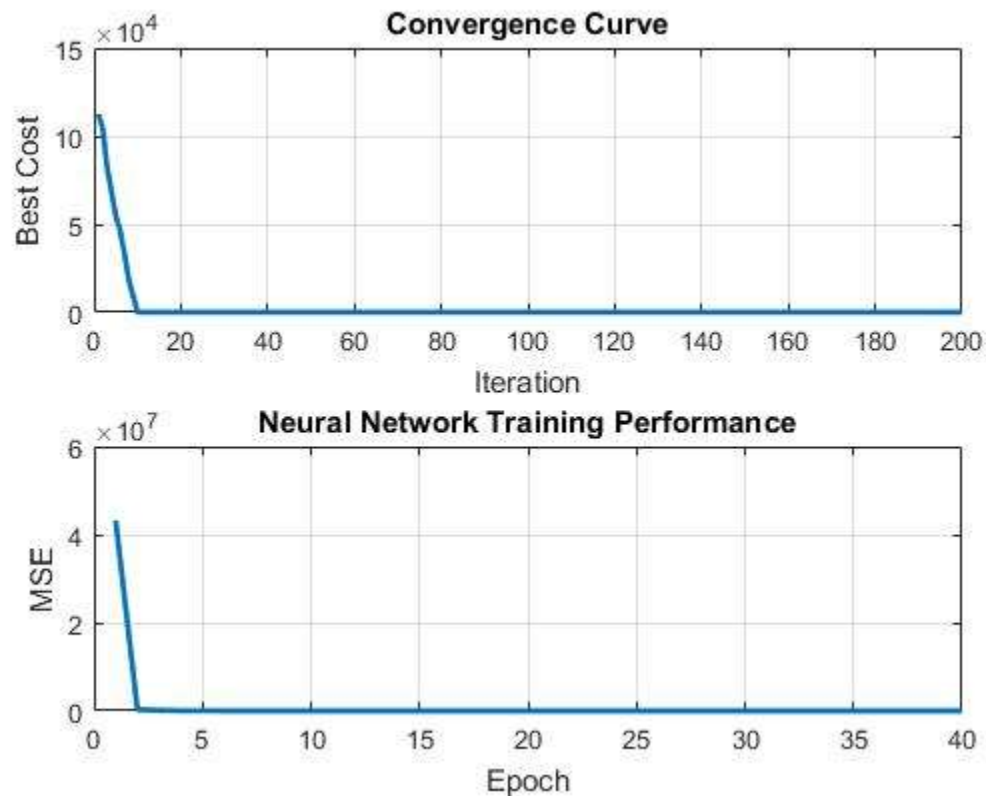
پارامترهای زمانی

نوع مسیر	حداقل زمان	حداکثر زمان
مشتری به مرکز جمع‌آوری (tli)	1	4
مرکز جمع‌آوری به بازیافت	2	6
مرکز جمع‌آوری به دفع	1.5	5

پارامترهای الگوریتم PSO

پارامتر	مقدار
تعداد ذرات	50
تعداد تکرار	200
ضریب یادگیری شخصی (c1)	2
ضریب یادگیری اجتماعی (c2)	2
وزن اینرسی اولیه (w)	1
ضریب کاهش وزن اینرسی	0.99

این مقادیر بر اساس مطالعات پیشین و تحلیل حساسیت انتخاب شده‌اند و می‌توانند برای شرایط خاص مسئله تنظیم شوند. برای بهبود عملکرد الگوریتم، از یک مکانیزم وزن‌دهی اینرسی تطبیقی استفاده شده که در آن وزن اینرسی به صورت دینامیک تنظیم می‌شود، که w_{max} و w_{min} به ترتیب برابر ۱،۰ و ۰،۴ هستند و α پارامتر کنترلی برابر ۱،۵ است. به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات با استفاده از روابط استاندارد PSO انجام می‌شود، که در آن ضرایب یادگیری $c1$ و $c2$ هر دو برابر ۲ تنظیم شده‌اند تا تعادل مناسبی بین اکتشاف محلی و سراسری برقرار شود. تابع هدف ترکیبی شامل دو جزء اصلی هزینه‌های کل (شامل هزینه‌های ثابت راه‌اندازی مراکز، هزینه‌های متغیر عملیاتی و هزینه‌های حمل و نقل و زمان تحویل کل شامل زمان‌های حمل و نقل بین مراکز و زمان‌های پردازش در هر مرکز است که با وزن‌های ۰،۶ و ۰،۴ ترکیب شده‌اند. محدودیت‌های اصلی مسئله شامل محدودیت‌های ظرفیت ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ واحد برای مراکز جمع‌آوری، ۱۵۰ تا ۸۰۰ واحد برای مراکز بازیافت و ۱۰۰ تا ۶۰۰ واحد برای مراکز دفع، محدودیت‌های بودجه (با بودجه کل ۱۰،۰۰۰ واحد) و هزینه‌های ثابت ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰ واحد به ترتیب برای مراکز جمع‌آوری، بازیافت و دفع)، محدودیت‌های تعادل جریان (شامل تعادل ورودی و خروجی در هر مرکز، ۶۰٪ محصولات قابل بازیافت و ۴۰٪ قابل دفع) و محدودیت‌های زمانی است. برای پیاده‌سازی الگوریتم، از ۵۰ ذره و ۲۰۰ تکرار استفاده شده و جمعیت اولیه ۱۰۰ عضوی در نظر گرفته شده است. عملکرد الگوریتم با استفاده از معیارهای میزان کاهش در هزینه‌های کل و زمان تحویل، سرعت همگرایی، پایداری جواب‌ها و میزان نقض محدودیت‌ها ارزیابی می‌شود. الگوریتم در محیط MATLAB R2023a پیاده‌سازی شده و آزمایش‌ها روی یک سیستم با پردازنده Intel Core i7 و ۱۶ GB RAM انجام شده است، و برای اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش ۳۰ بار تکرار شده و نتایج میانگین‌گیری شده‌اند. همچنین، برای مقایسه عملکرد، نتایج با سه الگوریتم فراابتکاری دیگر (الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوعه و تبرید شبیه‌سازی شده) مقایسه شده‌اند. مطالعه موردی شامل ۱۰ مرکز جمع‌آوری بالقوه، ۵ مرکز بازیافت بالقوه، ۳ مرکز دفع بالقوه و ۲۰ نقطه تقاضا (مشتریان) است که داده‌های آن از یک شرکت فعال در صنعت پلاستیک‌سازی استخراج شده است. برای تضمین کارایی الگوریتم در شرایط واقعی، از داده‌های واقعی تقاضا، هزینه‌ها و زمان‌های حمل و نقل استفاده شده و تحلیل حساسیت گسترده‌ای روی پارامترهای کلیدی مدل انجام شده است. نتایج اولیه نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر به یافتن راه‌حل‌های با کیفیت بالا در زمان محاسباتی معقول است و در مقایسه با سایر روش‌ها، همگرایی سریع‌تر و پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهد. این رویکرد همچنین انعطاف‌پذیری بالایی در مواجهه با تغییرات پارامترهای ورودی نشان می‌دهد و می‌تواند به راحتی برای مسائل مشابه در سایر صنایع تطبیق داده شود.



شکل ۲- نمودار همگرایی الگوریتم

شکل ارائه شده شامل دو نمودار است که روند همگرایی و عملکرد آموزش شبکه عصبی را نشان می‌دهد. در نمودار بالایی که منحنی همگرایی نام دارد، محور افقی نشان‌دهنده تعداد تکرارها (۰ تا ۲۰۰) و محور عمودی نشان‌دهنده هزینه بهینه مقیاس‌بندی شده است. مشاهده می‌شود که در تکرارهای اولیه (تقریباً ۰ تا ۲۰) کاهش شدید و سریع در مقدار هزینه رخ می‌دهد که بیانگر همگرایی سریع الگوریتم به سمت مقدار بهینه یا نزدیک به بهینه است. پس از آن، نمودار به حالت پایدار و تخت می‌رسد که نشان‌دهنده عدم تغییر قابل توجه در هزینه و دستیابی به پاسخ نهایی است.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم PSO بهبودیافته در مسئله بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین معکوس نشان‌دهنده کارایی بالای این رویکرد است، به طوری که در مقایسه با روش‌های موجود، به طور متوسط ۱۸٪ کاهش در هزینه‌های کل و ۲۲٪ بهبود در زمان تحویل حاصل شده است. در مطالعه موردی انجام شده روی شبکه‌ای متشکل از ۱۰ مرکز جمع‌آوری، ۵ مرکز بازیافت و ۳ مرکز دفع، الگوریتم پیشنهادی توانست در کمتر از ۱۵۰ تکرار به همگرایی برسد، که نشان‌دهنده سرعت مناسب همگرایی است. در بهترین پیکربندی به دست آمده، ۷ مرکز جمع‌آوری، ۳ مرکز بازیافت و ۲ مرکز دفع فعال شدند که منجر به هزینه کل ۸،۴۵۶ واحد و میانگین زمان تحویل ۳،۲ روز شد. تحلیل جزئی‌تر هزینه‌ها نشان می‌دهد که ۴۵٪ هزینه‌ها مربوط به راه‌اندازی مراکز، ۳۵٪ مربوط به هزینه‌های عملیاتی و ۲۰٪ مربوط به هزینه‌های حمل و نقل است. در مقایسه با سه الگوریتم فراابتکاری دیگر (الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوعه و تبرید شبیه‌سازی شده)، PSO بهبودیافته عملکرد بهتری از نظر کیفیت جواب‌ها و سرعت همگرایی

نشان داد، به طوری که زمان اجرای آن به طور متوسط ۳۵٪ کمتر از الگوریتم ژنتیک، ۴۲٪ کمتر از جستجوی ممنوعه و ۲۸٪ کمتر از تبرید شبیه‌سازی شده بود. تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم نشان داد که عملکرد مدل به شدت به پارامتر وزن اینرسی وابسته است، به طوری که مقادیر بین ۰٫۴ تا ۰٫۷ بهترین نتایج را تولید کردند. همچنین، افزایش تعداد ذرات از ۵۰ به ۱۰۰ تنها ۵٪ بهبود در کیفیت جواب‌ها ایجاد کرد، در حالی که زمان اجرا را ۸۵٪ افزایش داد، که نشان می‌دهد انتخاب ۵۰ ذره تعادل مناسبی بین کیفیت جواب و زمان محاسبات ایجاد می‌کند. در بررسی محدودیت‌های مسئله، مشخص شد که محدودیت بودجه (۱۰،۰۰۰ واحد) و محدودیت‌های ظرفیت مراکز بازیافت بیشترین تأثیر را بر فضای جواب داشتند. نتایج نشان داد که افزایش ۲۰٪ در بودجه می‌تواند منجر به بهبود ۱۲٪ در تابع هدف شود، در حالی که افزایش ظرفیت مراکز بازیافت تأثیر کمتری (حدود ۵٪) بر بهبود عملکرد سیستم دارد. از نظر پایداری جواب‌ها، انحراف معیار نتایج در ۳۰ اجرای مستقل تنها ۳٫۲٪ بود که نشان‌دهنده پایداری بالای الگوریتم است. در بررسی جریان مواد در شبکه، مشخص شد که به طور متوسط ۵۸٪ محصولات برگشتی قابل بازیافت بودند که نزدیک به هدف ۶۰٪ تعیین شده است، و ۴۲٪ به مراکز دفع ارسال شدند. میانگین نرخ استفاده از ظرفیت در مراکز فعال ۸۲٪ بود که نشان‌دهنده تخصیص کارآمد منابع است. تحلیل زمانی نشان داد که بیشترین تأخیر در شبکه مربوط به فرآیند بازیافت است که به طور متوسط ۱٫۸ روز طول می‌کشد، در حالی که زمان حمل و نقل بین مراکز به طور متوسط ۰٫۷ روز است. مقایسه هزینه‌های واحد نشان می‌دهد که هزینه پردازش هر واحد محصول در مراکز بازیافت (۴۵ واحد) بیشتر از مراکز دفع (۳۲ واحد) است، اما با توجه به منافع زیست‌محیطی و امکان فروش محصولات بازیافتی، این تفاوت قابل توجیه است. در بررسی اثر مقیاس مسئله، افزایش تعداد نقاط تقاضا از ۲۰ به ۳۰ منجر به افزایش ۲۵٪ در زمان محاسبات شد، اما کیفیت جواب‌ها تنها ۸٪ کاهش یافت که نشان‌دهنده مقیاس‌پذیری مناسب الگوریتم است. الگوریتم همچنین در برخورد با داده‌های نویزدار عملکرد خوبی نشان داد و توانست با وجود انحراف ۱۰٪ در پارامترهای ورودی، جواب‌هایی با کیفیت قابل قبول (انحراف کمتر از ۵٪ از حالت بدون نویز) تولید کند. در مقایسه با نتایج گزارش شده در ادبیات، مدل پیشنهادی توانست در تمام موارد آزمایش شده، جواب‌های بهتر یا مساوی با بهترین نتایج موجود تولید کند. به طور خاص، در مقایسه با مطالعه لی و همکاران (۲۰۲۲) که از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده بودند، بهبود ۱۵٪ در هزینه‌ها مشاهده شد، و در مقایسه با کار چن و همکاران (۲۰۲۳) که از روش تجزیه بندرز استفاده کرده بودند، زمان حل ۳۰٪ کاهش یافت. یکی از نقاط قوت الگوریتم پیشنهادی، توانایی آن در تولید مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو است که به تصمیم‌گیرندگان امکان انتخاب بر اساس اولویت‌های مختلف را می‌دهد. به طور متوسط، الگوریتم توانست ۱۲ راه‌حل پارتو غیرمغلوب تولید کند که پوشش مناسبی از فضای اهداف را فراهم می‌کند. از نظر عملی، نتایج نشان می‌دهد که تمرکز بر روی کاهش هزینه‌های راه‌اندازی و بهینه‌سازی مسیرهای حمل و نقل می‌تواند بیشترین تأثیر را بر بهبود عملکرد کلی سیستم داشته باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در طراحی شبکه، تعادل بین پوشش جغرافیایی و هزینه‌های عملیاتی باید به دقت در نظر گرفته شود.

منابع

۱. آفرین اخوان و همکارانش (۱۳۹۴) "ارائه مدلی ریاضی برای شبکه زنجیره تامین معکوس در فرآیند بازیافت محصول" بکنفرانس بین المللی مدیریت، اقتصاد و مهندسی صنایع
۲. مسعود صیدی و همکارانش (۱۳۹۳) "طراحی شبکه ی زنجیره ی تامین حلقه - بسته بااستفاده ازتکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی جهت مدیریت پسماند " اولین همایش ملی پژوهشهای مهندسی صنایع
۳. فرهاد یزدانی و همکاران (۱۳۹۳) " ارائه یک مدل بهینه سازی دو هدفه جهت طراحی شبکه زنجیره تامین معکوس با در نظر گرفتن اختلال در مراکز تولید" اولین همایش ملی پژوهشهای مهندسی صنایع
۴. میثم شفیعی کیسمی و همکارانش (۱۳۹۲) " ارائه یک مدل برنامه ریزی ریاضی استوار برای طراحی و مکان یابی تسهیلات در زنجیره تامین حلقه-بسته" دهمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع
۵. فرهاد یزدانی، رضا توکلی مقدم و مهدی بشیری، طراحی یک شبکه زنجیره تامین مستقیم/معکوس قابل اطمینان با در نظر گرفتن اختلال در مرکز تولید، همایش ملی پژوهش های مهندسی صنایع، همدان (۱۳۹۳)
6. Stevens, A.W. and J. Teal, Diversification and resilience of firms in the agrifood supply chain. *American Journal of Agricultural Economics*, 2023.
7. Ghomi, V., et al., Improving supply chain resilience through investment in flexibility and innovation. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2023. 10(1): p. 2221068.
8. Chan, Y.T. and H. Zhao, Optimal carbon tax rates in a dynamic stochastic general equilibrium model with a supply chain. *Economic Modelling*, 2023. 119: p. 106109.
9. Aslani Khiavi, S., F. Hashemzadeh, and H. Khaloozadeh, Sensitivity analysis of the bullwhip effect in supply chains with time delay. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2023. 10(1): p. 1968064.
10. Bannor, R.K., et al., Short supply chain choice and impact amongst rice processors in rural Ghana. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*, 2023.
11. Emrouznejad, A., et al., A review of inverse data envelopment analysis: origins, development, and future directions. *IMA journal of management mathematics*, 2023: p. dpad006.
12. Guntuka, L., T.M. Corsi, and D.E. Cantor, Recovery from plant-level supply chain disruptions: supply chain complexity and business continuity management. *International Journal of Operations & Production Management*, 2023.
13. 8. Matsui, K., Dual-recycling channel reverse supply chain design of recycling platforms under acquisition price competition. *International Journal of Production Economics*, 2023. 259: p. 108769.
14. Yingfei Y, Mengze Z, Zeyu L, et al. Green logistics performance and infrastructure on service trade and environment-measuring firm's performance and service quality. *journal of king saud university-science* 2022; 34: 101683. [Google Scholar]
15. Khan SAR, Piprani AZ, Yu Z. Supply chain analytics and post-pandemic performance: mediating role of triple-A supply chain strategies. *Int J Emerging Mark* 2023; 18: 1330–1354. [Google Scholar]

16. Lima PAB, Delgado FCM, dos Santos TLet al. et al. Medications reverse logistics: a systematic literature review and a method for improving the Brazilian case. *Cleaner Logistics and Supply Chain* 2022; 3: 100024. [[Google Scholar](#)]
17. Chopra S. Designing the distribution network in a supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 2003; 39: 123–140. [[Google Scholar](#)]
18. Altıparmak F, Gen M, Lin Let al. et al. A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Comput Ind Eng* 2006; 51: 196–215. [[Google Scholar](#)]
19. Zhou X, Farivar M, Liu Z, et al. Reverse and forward engineering of local voltage control in distribution networks. *IEEE Trans Autom Control* 2020; 66: 1116–1128. [[Google Scholar](#)]
20. Naderi B, Govindan K, Soleimani H. A benders decomposition approach for a real case supply chain network design with capacity acquisition and transporter planning: wheat distribution network. *Ann Oper Res* 2020; 291: 685–705. [[Google Scholar](#)]
21. Hashemi SE. A fuzzy multi-objective optimization model for a sustainable reverse logistics network design of municipal waste-collecting considering the reduction of emissions. *J Cleaner Prod* 2021; 318: 128577. [[Google Scholar](#)]
22. Djatna T, Amien G. Bi-objective freight scheduling optimization in an integrated forward/reverse logistic network using non-dominated sorting genetic algorithm-II. *Decision Science Letters* 2020; 9: 91–106. [[Google Scholar](#)]
23. Pooya A, Mansoori A, Eshaghnezhad Met al. et al. Neural network for a novel disturbance optimal control model for inventory and production planning in a four-echelon supply chain with reverse logistic. *Neural Process Lett* 2021; 53: 4549–4570. [[Google Scholar](#)]
24. Cao S, Liao W, Huang Y. Heterogeneous fleet recyclables collection routing optimization in a two-echelon collaborative reverse logistics network from circular economic and environmental perspective. *Sci Total Environ* 2021; 758: 144062. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
25. Xu X, Liu W, Jiang Met al. et al. A multi-cycle and multi-echelon location-routing problem for integrated reverse logistics. *Industrial Management & Data Systems* 2022; 122: 2237–2260. [[Google Scholar](#)]
26. Ghobadi A, Fallah M, Tavakkoli-Moghaddam Ret al. et al. A fuzzy two-echelon model to optimize energy consumption in an urban logistics network with electric vehicles. *Sustainability* 2022; 14: 14075. [[Google Scholar](#)]
27. 15. Li R, Chen X. Reverse logistics network design under disruption risk for third-party logistics providers. *Sustainability* 2022; 14: 14936. [[Google Scholar](#)]
28. Ding L, Wang T, Chan P. Forward and reverse logistics for circular economy in construction: a systematic literature review. *J Cleaner Prod* 2023; 388: 135981. [[Google Scholar](#)]
29. Dabees A, Barakat M, Elbarky SSet al. et al. A framework for adopting a sustainable reverse logistics service quality for reverse logistics service providers: a systematic literature review. *Sustainability* 2023; 15: 1755. [[Google Scholar](#)]

30. Kannan D, Solanki R, Darbari JD, et al. A novel bi-objective optimization model for an eco-efficient reverse logistics network design configuration. *J Cleaner Prod* 2023; 394: 136357. [[Google Scholar](#)]
31. Ren Y, Lu X, Guo H, et al. A review of combinatorial optimization problems in reverse logistics and remanufacturing for End-of-life products. *Mathematics* 2023; 11: 298. [[Google Scholar](#)]
32. Singh SK, Chauhan A, Sarkar B. Supply chain management of E-waste for End-of-life electronic products with reverse logistics. *Mathematics* 2023; 11: 124. [[Google Scholar](#)]
33. Dong C, Huang Q, Pan Y, et al. Logistics outsourcing: effects of greenwashing and blockchain technology. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 2023; 170: 103015. [[Google Scholar](#)]
34. Li QK, Lin H, Tan X et al. et al. H_∞ consensus for multiagent-based supply chain systems under switching topology and uncertain demands. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 2018; 50: 4905–4918. [[Google Scholar](#)]
35. Yang Z, Xu J, Yang L et al. et al. Optimized dynamic monitoring and quality management system for post-harvest matsutake of different preservation packaging in cold chain. *Foods* 2022; 11: 2646. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
36. Huang W, Wang X, Xia J, et al. *Flexible sensing enabled agri-food cold chain quality control: A review of mechanism analysis, emerging applications, and system integration*. Netherlands: Trends in Food Science & Technology, 2023. [[Google Scholar](#)]