پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۹، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، صص ۶۱-۲۹
نوع مقاله: پژوهشی

ملاحظات اجتماعی در طراحی زنجیره تامین پایدار حلقه بسته: رویکرد الگوریتم تکاملی چندین هدفه برای کربن‌زدایی عمیق

پوریا هاشم‌زهی [۱]، محمد محمدی *[۲]، محمدسعید اتابکی [۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۳. محقق پسادکتری، دانشکده کارآفرینی، نوآوری و توسعه پایدار، دانشگاه هالمستاد، هالمستاد، سوئد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

چکیده

معاهده پاریس به طور گسترده به دنبال جلوگیری از افزایش گرمایش و انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح اکوسیستم است. این مساله، به همراه قوانین زیست‌محیطی دولت‌ها و افزایش توجه مشتریان به توسعه پایدار، شرکت‌ها را وادار به بازنگری در ساختارهای خود کرده است. لذا این مطالعه با هدف طراحی یک زنجیره تامین پایدار حلقه بسته چند سطحی برای حرکت به سمت کربن‌زدایی عمیق انجام شده است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط غیرقطعی توسعه داده شده است تا هزینه، مصرف انرژی و انتشار کربن را به حداقل رسانیده و در عین حال فرصت‌های شغلی را حداکثر کند. آموزش کارکنان شبکه برای بهبود شرایط اجتماعی آن در توسعه مدل این مطالعه گنجانده شده، که پیش از این به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. رویکرد برنامه‌ریزی مقید به شانس برای مقابله با عدم قطعیت در نظر گرفته شده است و الگوریتم‌های ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب دوم (NSGA-II) و سوم (NSGA-III) برای حل مساله به کار برده شده‌اند. نتایج، تأثیر قابل توجه استفاده از انرژی پاک و کامیون‌های برقی بر کاهش انتشار کربن در تسهیلات عملیاتی و بخش حمل و نقل را نشان می‌دهد. یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که افزایش در مقدار سطح اطمینان برآورده شدن محدودیت‌های غیرقطعی منجر به افزایش در توابع هدف هزینه و محیط زیست می‌شود. تحلیل حساسیت بروی نتایج، تأثیر قابل توجه محصولات برگشتی در کاهش هزینه‌های شبکه، انتشار کربن و حفظ منابع و مواد اولیه را نشان می‌دهد. مجموعه راه‌حل‌های پارتو انعطاف‌پذیری بیشتری را برای تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ تصمیمات استراتژیک و عملیاتی فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تامین پایدار حلقه بسته، مسئولیت اجتماعی، کربن‌زدایی عمیق، NSGA-II و NSGA-III ، برنامه‌ریزی مقید به شانس.

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: Mohammadi@khu.ac.ir

۱- مقدمه و بیان مسئله

دولت‌ها و مصرف‌کنندگان به دلیل نگرانی‌های فزاینده در مورد آلودگی هوا و گرمایش جهانی[1] [۱]، به دنبال راهکارهایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای [۲]، به ویژه دی‌اکسید کربن، هستند [۳, ٤]. یکی از اهداف توافقنامه پاریس محدود کردن افزایش دمای جهانی به کمتر از ۲ درجه سانتیگراد، با استفاده از پیشنهادهایی برای جلوگیری از انتشار کربن تا نیمه قرن جاری است. کربن‌زدایی عمیق[2] به ویژه در بخش‌های صنعت و حمل و نقل که به شدت به سوخت‌های فسیلی وابسته‌اند [٥]، یک چالش بزرگ محسوب می‌شود [٦, ٧]. رویکردهایی مانند بهبود کارایی انرژی و استفاده از منابع انرژی پاک مانند هیدروژن[3] [٤]، انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر، به عنوان راهکارهای موثر برای رسیدن به این اهداف، مطرح شده‌اند [۸]. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه بالای تولید انرژی هیدروژن و مشکلات مربوط به دفع پسماند هسته‌ای و مسائل ایمنی، استفاده از این منابع را کند کرده است [۳]. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و باد به دلیل دوستدار محیط زیست بودن و کاهش قابل توجه هزینه‌های ذخیره‌سازی انرژی با باتری‌ها [۹]، امروزه به عنوان گزینه‌های اصلی تولید برق مطرح هستند [۱۰]. این انرژی‌ها به همراه استراتژی‌های ذخیره‌سازی، قابلیت اطمینان شبکه انرژی را افزایش داده [۱۱] و به کربن‌زدایی زنجیره تامین کمک می‌کنند [۱۲]. در حوزه حمل و نقل، جایگزینی خودروهای سوخت فسیلی با خودروهای برقی و هیبریدی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کرده و گامی مهم در کربن‌زدایی حمل و نقل است [۱۳]. پیاده‌سازی این تغییرات، به همراه اعمال سیاست‌های پایداری و تعادل بین ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، به پیشبرد اهداف پایداری کمک کرده و نیازهای کنونی را بدون به خطر انداختن منابع برای نسل‌های آینده برآورده می‌سازد [١٤] علاوه بر این، توجه به ملاحظات اجتماعی در زنجیره تامین، مانند اشتغال کارگران و شرایط کار، اساسی است تا اطمینان حاصل شود که پیشرفت‌های زیست‌محیطی و بهینه‌سازی اقتصادی به بهای بهره‌کشی از نیروی کار انجام نمی‌شود [۸]. توجه به این جنبه‌ها می‌تواند تضمین کند که راهکارهای کربن‌زدایی و استفاده از

---

[1] Global Warming
[2] Deep Decarbonization
[3] Hydrogen Energy

انرژی‌های پاک، در عین حال که به حفظ محیط زیست می‌پردازند، از جنبه‌های انسانی و اجتماعی نیز پشتیبانی کنند [٦].

همچنین مطالعات حاکی از اهمیت در نظر گرفتن مسائل اجتماعی در زنجیره تامین برای بهبود کیفیت زندگی و رفاه اجتماعی است [۱۵-۱۷]. این موضوع به افزایش رضایت مشتریان، ذینفعان و توان رقابتی شبکه کمک می‌کند [۱۸]. مرور ادبیات نشان می‌دهد امروزه توجه به مسائل زیست‌محیطی در طراحی زنجیره تامین و محصولات توسعه داشته است [۱۹]، اما نیاز به توجه بیشتر به مسئولیت‌های اجتماعی درون زنجیره تامین احساس می‌شود. با توجه به مرور ادبیات یکی از دلایل توجه کمتر به بعد اجتماعی پایداری، تعدد فاکتورهای کیفی و کمی دخیل در آن و پیچیدگی مدل‌سازی آن می‌باشد [۲۰]. اغلب توجه به بهبود موقعیت اجتماعی زنجیره‌های تامین به وسیله افزایش فرصت‌های شغلی صورت گرفته است که با اهداف اقتصادی شبکه متضاد است و نیاز به بررسی عمیق‌تر دارد [۲۱]. استخدام بهینه و آموزش کارکنان برای افزایش کارایی و رفاه، نقش مهمی در ترویج مسئولیت‌های اجتماعی در شبکه بدون افزایش بی مورد هزینه‌ها دارد [۲۲]. در راستای بازنگری سیستمی به مسائل کنونی ، توجه به هماهنگی و تبادل اطلاعات مؤثر در سراسر زنجیره تامین ضروری است [۱۵, ۲۳] و تحولات در زنجیره تامین به سمت حلقه‌های بسته با بازیافت محصولات و مواد اولیه به منظور ایجاد ارزش‌آفرینی مجدد متمایل است. زنجیره تامین حلقه بسته[1] به طراحی و مدیریت فرآیندهای تولید و توزیع می‌پردازد که به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده‌اند تا استفاده مؤثر و بهینه از منابع را تضمین کنند و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از تولید و مصرف محصولات را به حداقل برسانند [۲٤]. این مدل تاکید دارد بر اینکه مواد اولیه پس از اتمام عمر مفید محصولات، باید به شکلی مؤثر بازیافت یا بازسازی شوند تا دوباره در چرخه تولید استفاده شوند. این امر به کاهش ضایعات، افزایش کارایی منابع و کاهش نیاز به استخراج مواد جدید کمک می‌کند [١٤]. زنجیره تامین حلقه بسته نه تنها به کاهش تأثیرات منفی بر محیط زیست کمک می‌کند، بلکه به افزایش پایداری اقتصادی شرکت‌ها و جوامع نیز می‌انجامد [۲۱]. پیچیدگی‌های موجود باعث افزایش عدم قطعیت درون زنجیره تامین می‌شوند و نیازمند رسیدگی مؤثر به مدل‌سازی و طراحی شبکه برای

[1] Closed loop supply chain

کاهش ریسک‌های قابل توجه و پیچیده هستند. طراحی زنجیره تامین حلقه بسته به دلیل پیچیدگی‌های خود یک مسئله NP-hard است و با مشکلات تصمیم‌گیری چندوجهی مواجه است که استفاده از روش‌های دقیق در آن غیرکارآمد است [۲۵]. برای حل این مسائل، الگوریتم‌های فراابتکاری و بویژه الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه[1] (MOEA) برای مسائل دو یا سه هدفه توصیه می‌شود. با این حال، در مواجهه با مسائلی با بیش از سه هدف[2] (MaOPs)، افزایش ابعاد فضای جستجو به الگوریتم‌های تکاملی چندین هدفه پیشرفته‌تر (MaOEAs) نیاز دارد که می‌توانند به طور مؤثرتری با چالش‌های همگرایی و تنوع مقابله کنند و جبهه‌های پارتو و راه‌حل‌های بهینه‌تری تولید کنند [۲۶, ۲۷].

در این مطالعه، هدف کربن‌زدایی عمیق در سطوح عملیاتی زنجیره تامین با حفظ پایداری در شرایط غیرقطعی است. برای این منظور، یک زنجیره تامین حلقه بسته چند سطحی طراحی شده است که شامل مکان‌یابی، ایجاد تسهیلات، مدیریت حمل و نقل، انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش و مدیریت محصولات برگشتی است. مدل چندین هدفه توسعه یافته در این مطالعه برای کمینه‌سازی هزینه‌های شبکه، کاهش انتشار کربن و مصرف انرژی، و حداکثرسازی فرصت‌های شغلی ایجاد شده توسط شبکه، طراحی شده است. این مدل به دنبال ارتباط میان کاهش آلودگی هوا، کاهش تاثیرات منفی بر اکوسیستم، حفظ منابع، افزایش فرصت‌های شغلی و آموزش کارکنان است. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل چندین هدفه به کار گرفته شده‌اند و تحلیل حساسیت برای افزایش بینش مدیریتی انجام شده است. نوآوری‌های اصلی مطالعه حاضر به شرح زیر است:

- پیاده‌سازی کربن‌زدایی عمیق در بخش‌های عملیاتی زنجیره تامین حلقه بسته برای حرکت به سمت صفر شدن انتشار کربن که در پژوهش‌های پیشین غالبا در بخش‌های عملیاتی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر صورت نگرفته است.
- توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندین هدفه غیرقطعی برای طراحی یک زنجیره تامین حلقه بسته پایدار که از منظر چندین هدفه بودن و در نظر گرفتن ملاحظات

[1] decomposition-based multi-objective optimization algorithm

[2] Many-Objective optimization problems

اجتماعی در کنار کربن‌زدایی عمیق و مصرف بهینه انرژی از مباحث نواورانه این تحقیق در قیاس با تلاش‌های گذشته محسوب می‌شود.

- به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی چندین هدفه برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و عملیاتی و افزایش قابلیت‌های رقابتی شبکه که باعث انعطاف بیشتر مدیران در تصمیم‌گیری می‌شود.
- در نظر گرفتن آموزش کارکنان همراه با حداکثرسازی ایجاد فرصت‌های شغلی در شبکه برای برآورده کردن مسئولیت‌های اجتماعی از جهت نوع و ساختار این نوع ملاحظات حائز نوآوری است.
- پیشنهاد یک ناوگان حمل و نقل ناهمگن هیبریدی (برقی-فسیلی) برای بهینه‌سازی سیاست‌های لجستیکی و کاهش انتشار کربن در این بخش که می‌تواند برای استفاده‌های کاربردی در آینده لحاظ شود.

ساختار مقاله به شرح زیر است: بخش دوم، مروری بر ادبیات ارائه می‌دهد، بخش سوم، مساله را بیان و مدل ریاضی را معرفی می‌کند، بخش‌های چهارم و پنجم به ترتیب جزئیات راه‌حل مشکل، نتایج و بحث‌ها را ارائه می‌دهند، و بخش پایانی با بازتابی بر محدودیت‌های تحقیق و ارائه پیشنهادهایی برای مطالعات آینده به پایان می‌رسد.

۲- ادبیات و پیشینه پژوهش

تلاش‌های تحقیقاتی در حوزه حل چالش‌های طراحی زنجیره تامین حلقه بسته به معرفی مجموعه‌ای از راهکارها شده‌اند که هدف آنها بهینه‌سازی و یکپارچه‌سازی مدیریت در هر دو زنجیره تامین مستقیم و معکوس است. این پژوهش با بررسی و دسته‌بندی مقالات مرتبط، یک مرور ادبیات به روز شده در حوزه زنجیره تامین ارائه می‌دهد. اتابکی[1] و همکاران [۲۴] بر مدیریت مسیر بازگشت در سطوح مختلف زنجیره تامین با تأکید بر بازخوانی، بازسازی، بازیافت و مدیریت زباله‌ها در شرایط عدم قطعیت تأکید می‌کنند. سلیمانی[2] و همکاران [۱۰] مدلی برای ایجاد زنجیره تامین پایدار ارائه می‌دهند که شامل کمینه‌سازی هزینه‌های شبکه و

[1] Atabaki
[2] Soleimani

کاهش تاثیرات زیست‌محیطی است. باتیا[1] و همکاران [۲۸] بررسی می‌کنند که چگونه زنجیره تامین حلقه بسته بر عملکردهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در بخش تولید آمریکای شمالی تأثیر می‌گذارد. پراجاپاتی و همکاران [۲۹] به پر کردن شکاف دانشی پرداخته و بینش‌های منحصربه فردی در مورد روابط بین عوامل بحرانی موفقیت و نتایج عملکردی متنوع در زنجیره تامین حلقه بسته را ارائه می‌دهند. ادغام عوامل اجتماعی در زنجیره تامین حلقه بسته به دلیل اهمیت روزافزون رویه‌های پایدار در حال جلب توجه است. این تأثیرات اجتماعی مثبت، پذیرش لجستیک معکوس را برای پایداری و افزایش رقابت‌پذیری شرکت‌ها تقویت می‌کند. در بعد اجتماعی، نیاز به پارامترهای کمی و کیفی به عنوان ورودی‌های مدل، تصمیم‌گیری را پیچیده می‌کند. اشتغال (فرصت‌های شغلی) به عنوان مهم‌ترین شاخص اجتماعی مطرح شده و ادبیات بر اهمیت ایجاد شغل تأکید دارد. تحقیقات گویندان[2] و همکاران [۳۰] به وجود ابعاد اجتماعی هنگام گذار از زنجیره تامین سنتی به سیستم حلقه بسته پرداخته و مدل ریاضی چند هدفه‌ای را در این حوزه ارائه داده‌اند. همچنین، ایمران[3] و همکاران [۳۱] مدل مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی حلقه بسته پایدار تحت عدم قطعیت را ارائه داده و اثرات اجتماعی فرصت‌های شغلی و توسعه اقتصادی را در نظر گرفته‌اند. در پژوهش صالحی امیری و همکاران [۳۲]، به طراحی یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته برای صنعت، ارزیابی اثربخشی آن در یک مطالعه موردی و تجزیه و تحلیل تأثیر اجتماعی فرصت‌های شغلی پرداخته شده و مدل ریاضی چند هدفه عدد صحیح مختلط توسعه‌یافته برای دستیابی به اهداف معرفی شده مورد بررسی قرار گرفته است.

در مواجهه با پیچیدگی‌های طراحی شبکه‌های زنجیره تامین معکوس، تحقیقات مختلفی استراتژی‌های فراابتکاری را برای حل چالش‌های NP-hard ارائه داده‌اند. وانگ و همکاران (۲۰۱۶) یک الگوریتم آنتروپی متقابل پیشرفته (ACE) برای بهینه‌سازی چند دوره‌ای و چند محصولی در زنجیره تامین حلقه بسته معرفی کردند. ترکی و همکاران [۳۳] از الگوریتم ژنتیک (GA) برای بهبود تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت انبار و بازگشت محصول استفاده کردند.

[1] Bhatia
[2] Govindan
[3] Imran

چراغعلی پور و همکاران [۳۴] الگوریتم Keshtal چند هدفه‌ای را برای افزایش کارایی توزیع مرکبات در شبکه حلقه بسته ارائه دادند. گاور و همکاران [۱۴] یک مدل بهینه‌سازی با استفاده از GA اصلاح‌شده را بررسی کردند و عملکرد آن را مورد ارزیابی قرار دادند. باباییسمی و همکاران [۱] بر طراحی شبکه حلقه بسته با تمرکز بر کاهش هزینه‌ها، انتشار کربن و اثرات زیست‌محیطی با استفاده از الگوریتم خود تطبیقی NSGA-II تمرکز داشتند.

یاوری و گرائلی [۲۵] مدل YAG را برای بهینه‌سازی هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی در شبکه‌های حلقه بسته ارائه کردند، که به راه‌حل‌های دقیق ختم می‌شود. ولیدی و همکاران [۳۵] راه‌حلی موثر برای مدل توزیع زنجیره تامین پایدار دو سطحی، با استفاده از بهینه‌سازی MOGA-II هدایت‌شده توسط DoE، ارائه داده‌اند. باتای و همکاران [۳۶] تلاش کردند تا راهی برای کربن‌زدایی عمیق در آمریکای لاتین پیدا کنند و بر اهمیت مشارکت دولت و همکاری کشورها برای دستیابی به این مهم، تأکید کردند. کانالس بوستوس و همکاران [۳۷] و کارلسون و همکاران [۳۸] بر مدل‌های بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری و اثرات زیست‌محیطی در بخش‌های حمل و نقل و صنعت معدن تمرکز کردند. یانگ و همکاران [۵] نیز مدلی برای کربن‌زدایی عمیق در صنعت معدن در چین ارائه دادند. زارعی و همکاران [۳۹] شبکه‌ای را پیشنهاد داده‌اند که با استفاده از منطق فازی و الگوریتم ژنتیک به کاهش هزینه‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌ای، ریسک تولیدی-فنی و زمان ارسال محصول به مشتریان می‌پردازد، به‌طوری که شبکه دارای حداقل هزینه و اثرات زیست‌محیطی باشد. در راستای تقلیل انتشار کربن در تولید فولاد، رابه[1] و همکاران [۴۰] تولید فولاد از ضایعات را به عنوان یک جایگزین پایدار بررسی کرده‌اند که با چالش‌هایی مانند کمبود ضایعات و آلودگی بالای آن‌ها روبه‌رو است، ولی با گذشت زمان این فرآیند می‌تواند نقش مهمی در کاهش انتشار کربن ایفا کند. همچنین، لی[2] و همکاران [۴۱] با استفاده از مدل برنامه‌ریزی دینامیکی تصادفی، ترکیب سیاستی از مالیات کربن و سوبسید دکربنیزاسیون را بررسی کرده‌اند که در دوره‌های معینی از زمان، به طور مؤثری انتشار کربن را کاهش داده است. این تحقیقات نشان دهنده پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه بهینه‌سازی و پایدارسازی زنجیره‌های تامین و مدیریت محیط‌زیست است. در ادامه مدل‌های استفاده شده در تحقیقات مرور شده و برخی تحقیقات دیگر بصورت جدولی مرور شده و جزئیات هر تحقیق بصورت مفروضات در نظر گرفته شده بررسی شده است.

---

[1] Raabe [2] Li

جدول ۱. خلاصه پژوهش‌های پیشین.

	تعداد اهداف	زنجیره تامین		توابع هدف					مکانیسم کاهش کربن				فاکتور اجتماعی	انتخاب تکنولوژی	مدل		ناوگان وسایل نقلیه	رویکرد راه حل
		مستقیم	حلقه بسته	هزینه	انتشار CO۲	مصرف انرژی	اجتماعی	دیگر	Cap & trade	Cap	مالیات	به حداقل رساندن	کربن‌زدایی عمیق	ایجاد شغل	آموزش کارگران	قطعی	غیرقطعی	همگن	نامعلوم	
[۴۲]	4	*		*	*			*				*					*	*		LP-metric, Goal programming
[۴۳]	3		*	*	*		*					*		*		*		*		GA, SA, Epsilon Constraint
[۴۴]	2	*		*	*							*				*		*		NSGA-II, Ant Colony
[۳۷]	3	*		*	*			*				*	*			*		*		MOPSO
[۱۳]	3	*		*	*		*					*				*		*		NSGA-III
[۳۰]	2		*	*				*			*					*			*	Epsilon
[۴۵]	1		*	*					*						*	*		*		GAMS
[۱۰]	3		*	*		*	*							*		*		*		Langrangian Relaxation Huristics
[۲۷]	3		*	*				*				*			*	*		*		Commercial solver
[۴۶]	4	*		*				*			*					*	*			Fuzzy Goal programming
[۴۷]	4	*		*		*		*			*					*	*			Langrangian Relaxation ϵ-constraint
[۲۲]	4	*		*		*	*	*								*	*			LP-metric, Keshtel
[۲۴]	3		*	*	*	*						*			*	*			*	ϵ-constraint
[۴۸]	4	*		*				*	*					*		*			*	GAMS
[۲۶]	2		*	*				*						*		*	*			ϵ-constraint
[۲]	2	*		*				*				*				*			*	Langrangian Relaxation ϵ-constraint
[۴۹]	3		*	*				*						*		*	*			NSGA-II, Keshtel, Deer Algorithm
[۹]	4		*	*				*				*		*		*		*		NSGA-III, Gray wolf
[۵۰]	6	*		*				*				*			*	*			*	NSGA-III
مطالعه فعلی	4		*	*	*			*	*			*	*	*	*	*			*	NSGA-III/NSGA-II

در حالی که تلاش‌های قابل توجهی در حوزه طراحی زنجیره تامین حلقه بسته انجام شده و راهکارهای متنوعی برای بهینه‌سازی و یکپارچه‌سازی مدیریت زنجیره‌های تامین مستقیم و معکوس ارائه شده است، شکاف‌های دانشی خاصی همچنان پابرجا هستند. به ویژه، ادغام کامل عوامل اجتماعی به عنوان پارامترهای ورودی در مدل‌ها، که شامل تاثیرات اجتماعی ناشی از اشتغال و توسعه اقتصادی است، نیازمند توجه بیشتری است. علاوه بر این، استفاده از رویکردهای نوآورانه مانند مالیات بر کربن، سیستم‌های تجارت انتشار و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، برای کاهش انتشار کربن در مقیاس وسیع، مانند کربن‌زدایی عمیق در بخش‌هایی از شبکه، همچنان نیازمند توسعه بیشتر است. در نهایت، بررسی و تجزیه و تحلیل تأثیر تصمیم‌های مربوط به مکان‌یابی تسهیلات جدید و هزینه‌های عملیاتی مرتبط با آن‌ها به عنوان عناصر غیرقطعی در مدل‌سازی می‌تواند به فرموله کردن راهکارهای موثرتر و دقیق‌تر کمک کند. این موارد نمونه‌هایی از خلاءهای موجود هستند که برای دستیابی به یک سیستم زنجیره تامین پایدار و یکپارچه باید مورد توجه قرار گیرند.

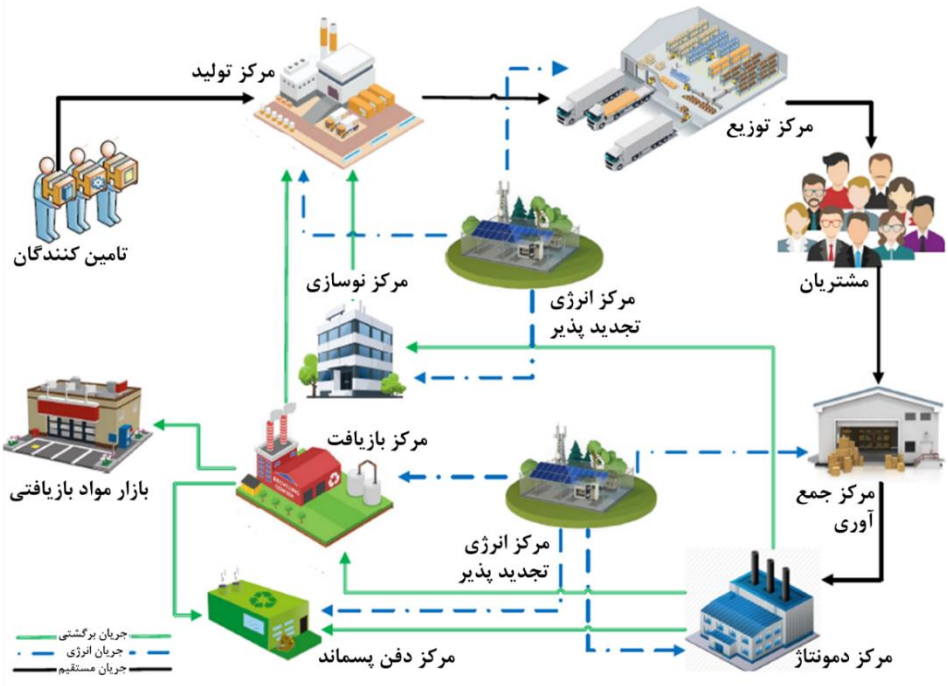
۳- روش‌شناسی پژوهش

در راستای پژوهش حاضر، رویکردی نسبت به جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها اتخاذ شده است که بدون نیاز به نمونه‌گیری معمول، امکان پردازش حجم وسیعی از داده‌ها را فراهم می‌آورد. این رویکرد، که بر پایه داده‌های کمی مستقیم و قابل دسترس استوار است، به تحلیل دقیق و ژرف‌نگرانه‌ای از زنجیره‌های تامین مستقیم و معکوس می‌پردازد. فلسفه پژوهش بر عملگرایی تکیه دارد و از حیث کاربرد جزو پژوهش‌های توسعه‌ای-کاربردی قرار می‌گیرد، که اهمیت ویژه‌ای به عملیاتی شدن نتایج تحقیق و تأثیرگذاری آن‌ها بر سیاست‌گذاری‌ها و تصمیم‌گیری‌های عملیاتی می‌دهد. این امر، با تأکید بر دقت بالا در پیش‌بینی‌ها و طراحی سناریوها، به ما اجازه می‌دهد تا استراتژی‌های مدیریتی پایدار و کارآمد را در مواجهه با عدم قطعیت‌ها شکل دهیم.

بطور دقیقتر این تحقیق به دنبال مدیریت یکپارچه و همزمان زنجیره تامین مستقیم و معکوس با تأکید بر پایداری و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها است. این رویکرد چند بعدی شامل انتخاب تامین‌کننده، تخصیص سفارش، مکان‌یابی تولید، انتخاب فناوری، تعیین سطوح تولید، و

بهینه‌سازی مسیرهای حمل و نقل است. در جریان معکوس، فعالیت‌هایی نظیر جمع‌آوری، بازسازی، جداسازی، بازیافت و دفع مواد ایمن مورد بررسی قرار می‌گیرند [۹]. هدف اصلی، ارتقای قابلیت‌های رقابتی و افزایش رضایت مشتری با تمرکز بر پایداری و کربن‌زدایی است. مدل ریاضی توسعه یافته (MILP) چهار هدف اصلی را دنبال می‌کند: کاهش هزینه‌های کلی، کاهش آلودگی و مصرف انرژی، و افزایش فرصت‌های شغلی به همراه آموزش کارکنان [٤٩]. این مدل (شکل ۱) با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، به مدیران کمک می‌کند تا سیاست‌های مناسب را انتخاب کنند. مفروضات مورد استفاده در مدل به شرح زیر می‌باشد:

- برنامه‌ریزی تولید برای یک محصول واحد در یک افق زمانی واحد انجام می‌شود.
- مقدار تقاضا و ظرفیت مرکز تولید انرژی پاک غیرقطعی است.
- در انتخاب وسایل نقلیه حمل و نقل و فناوری‌های تولید در زنجیره تامین انعطاف پذیری وجود دارد.
- جابجایی مواد و محصولات فقط بین سطوح مختلف امکان پذیر است.
- هر مرکز تولید مجاز به استفاده از یک فناوری است.
- تمام خواسته‌های مشتری باید برآورده شود و کلیه محصولات برگشتی از مشتریان باید جمع‌آوری شود.



شکل ۱. شماتیک زنجیره تامین حلقه بسته.

۳-۱- توابع هدف و محدودیت‌ها

چهار تابع هدف این مدل بر اساس کاهش هزینه، مصرف انرژی و انتشار کربن و افزایش اشتغال‌زایی، توسعه یافته است. تابع هدف اول، معادله ۱، که شامل پنج بخش فرعی است، جنبه اقتصادی پایداری را برای کاهش هزینه‌های شبکه، به حداقل می‌رساند. معادله ۲ هزینه تاسیس تسهیلات مورد نیاز را در دو جریان مستقیم و معکوس زنجیره تامین نشان می‌دهد. هزینه‌های مربوط به مواد اولیه و قطعات خریداری شده از تامین‌کنندگان و درآمد حاصل از فروش مواد بازیافتی در معادله ۳ نشان داده شده است. معادله ٤ هزینه عملیات و پردازش را در سطوح مختلف شبکه نشان می‌دهد. معادله ٥ و ٦ به ترتیب هزینه‌های مربوط به حمل و نقل مواد و آموزش کارکنان در سطوح مختلف شبکه را نشان می‌دهد. نمادهای به کار رفته در مدل برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط چندین هدفه (MaOMILP) را می‌توان در پیوست ۱ یافت.

$$(1) Min\ Obj1 = Obj1^{Establishment} + Obj1^{Procurement} + Obj1^{Production} + Obj1^{Transportation} + Obj1^{Training}$$

$$(2) Obj1^{Establishment} = \sum_{b\in B}\sum_{t\in T} fb_{tb} YB_{tb} + \sum_{d\in D} fd_d YD_d + \sum_{s\in S} fs_s YS_s + \sum_{f\in F} ff_f YF_f + \sum_{n\in N} fn_n YN_n + \sum_{p\in P} fp_p YP_p + \sum_{r\in R} fr_r YR_r + \sum_{c\in C} fc_c YC_c$$

$$(3) Obj\ 1^{Procurement} = \sum_{i\in I}\sum_{a\in A}\sum_{b\in B} ci_{ia} XIB_{iab} + \sum_{j\in J}\sum_{a\in A}\sum_{b\in B} cj_{ja} XJB_{jab} - \sum_{i\in I}\sum_{n\in N}\sum_{z\in Z} pz_i XNZ_{inz}$$

$$(4) Obj\ 1^{Production} = \sum_{b\in B}\sum_{d\in D} cb_{tb} XBD_{tbd} + \sum_{d\in D}\sum_{m\in M} cd_d XDM_{dm} + \sum_{s\in S}\sum_{f\in F} cs_s XSF_{sf} + \sum_{s\in S}\sum_{f\in F} cf_f XSF_{sf} + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{f\in F}\sum_{n\in N} cn_{in}\left(\lambda_{ij} XFN_{jfn}\right) + \sum_{j\in J}\sum_{f\in F}\sum_{r\in R} cr_{jr} XFR_{jfr} + \sum_{i\in I}\sum_{n\in N}\sum_{p\in P} cp_{ip} XNP_{inp} + \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{f\in F}\sum_{p\in P} cp_{ip}\lambda_{ij} XFP_{jfp}$$

$$(5) Obj1^{Transportation} = \sum_{i\in I}\sum_{v\in V}\sum_{a\in A}\sum_{b\in B} cv_v dab_{ab} VIB_{ivab} + \sum_{j\in J}\sum_{v\in V}\sum_{a\in A}\sum_{b\in B} cv_v dab_{ab} VJB_{jvab} + \sum_{v\in V}\sum_{b\in B}\sum_{d\in D} cv_v dbd_{bd} VBD_{vbd} + \sum_{v\in V}\sum_{d\in D}\sum_{m\in M} cv_v ddm_{dm} VDM_{vdm} + \sum_{v\in V}\sum_{m\in M}\sum_{s\in S} cv_v dms_{ms} VMS_{vms} + \sum_{v\in V}\sum_{s\in S}\sum_{f\in F} cv_v dsf_{sf} VSF_{vsf} + \sum_{j\in J}\sum_{v\in V}\sum_{f\in F}\sum_{n\in N} cv_v dfn_{fn} VJN_{jvfn} + \sum_{j\in J}\sum_{v\in V}\sum_{f\in F}\sum_{p\in P} cv_v dfp_{fp} VJP_{jvfp} + \sum_{j\in J}\sum_{v\in V}\sum_{f\in F}\sum_{r\in R} cv_v dfr_{fr} VJR_{jvfr} + \sum_{i\in I}\sum_{v\in V}\sum_{n\in N}\sum_{p\in P} cv_v dnp_{np} VNP_{ivnp} + \sum_{i\in I}\sum_{v\in V}\sum_{n\in N}\sum_{z\in Z} cv_v dnz_{nz} VIZ_{ivnz} + \sum_{i\in I}\sum_{v\in V}\sum_{n\in N}\sum_{b\in B} cv_v dnb_{nb} VNB_{ivnb} + \sum_{j\in J}\sum_{v\in V}\sum_{r\in R}\sum_{b\in B} cv_v drb_{rb} VRB_{jvrb}$$

$$(6) Obj1^{Training} = \left(\sum_{a\in A} wa_a * TCa_a + \sum_{b\in B}\sum_{t\in T} wb_b TCb_b\, YB_{tb} + \sum_{n\in N} wn_n TCn_n YN_n + \sum_{r\in R} wr_r TCr_r YR_r + \sum_{f\in F} wf_f TCf_f YF_f\right)$$

فرمول‌های ریاضی برای توابع هدف دیگر، که شامل به حداقل رساندن انتشار کربن، مصرف انرژی، و به حداکثر رساندن فرصت‌های شغلی است، در پیوست ۲ ارائه شده است.

۳-۲- محدودیت‌های مدل

محدودیت‌ها برای نزدیک شدن به شرایط دنیای واقعی در توسعه مدل گنجانده شده است تا محدودیت‌های مربوط به ظرفیت تسهیلات، وسایل نقلیه، ظرفیت تولید، استخدام نیروی کار و تعداد تأسیسات تسهیلات و سایر موارد رعایت شود. معادله ۷ تضمین کننده برآوردن کلیه تقاضای مشتریان توسط مراکز توزیع می‌باشد. معادله ۸ نشان می‌دهد که تقاضای مراکز توزیع باید به طور کامل توسط مراکز تولیدی تامین شود. معادله ۹ تضمین می‌کند که در هر مرکز تولید تنها از یک فناوری ساخت استفاده می‌شود.

Subject to:

(7) $\sum_{d\in D} XDM_{dm} \geq \widetilde{dm_m} \quad \forall m$

(8) $\sum_{b\in B}\sum_{t\in T} XBD_{tbd} \geq \sum_{m\in M} XDM_{dm} \quad \forall d$

(9) $\sum_{t\in T} YB_{tb} \leq 1 \quad \forall b$

معادله ۱۰ و ۱۱ بیانگر آن است که کلیه قطعات و مواد اولیه مورد نیاز مراکز تولیدی باید توسط تامین‌کنندگان، تامین شود به این معنی که در این مدل کمبود مجاز نمی‌باشد و همه نیاز خرید مواد اولیه و قطعات در دوره بایستی برآورده شود.

(10) $\sum_{n\in N} XNB_{inb} + \sum_{a\in A} XIB_{iab} \geq \alpha i_i \sum_{d\in D}\sum_{t\in T} XBD_{tbd} \quad \forall i,b$

(11) $\sum_{r\in R} XRB_{jrb} + \sum_{a\in A} XJB_{jab} \geq \beta_j \sum_{d\in D}\sum_{t\in T} XBD_{tbd} \quad \forall j,b$

معادله ۱۲ مقرر می‌دارد که مراکز جمع‌آوری موظف به جمع‌آوری کلیه محصولات برگشتی از مشتریان هستند و معادله ۱۳ اشاره می‌کند که تمامی این محصولات باید به مراکز دمونتاژ ارسال شوند. حداکثر تعداد قطعات قابل ارسال پس از جداسازی از مراکز دمونتاژ به مراکز نوسازی، بازیافت و دفع ایمن توسط معادلات ۱٤ تا ۱٦ مشخص شده است.

(12) $\sum_{s\in S} XMS_{ms} = rm_m \quad \forall g$

(13) $\sum_{f\in F} XSF_{sf} = \sum_{m\in M} XMS_{ms} \quad \forall s$

(14) $\sum_{r\in R} XFR_{jfr} \leq \beta_j \varphi_j \sum_{s\in S} XSF_{sf} \quad \forall f,j$

(15) $\sum_{n\in N} XFN_{jfn} \leq \psi_j \beta_j \sum_{s\in S} XSF_{sf} \quad \forall f,j$

(16) $\sum_{p\in P} XFP_{jfp} \geq (1-\varphi_j-\psi_j)\beta_j \sum_{s\in S} XSF_{sf} \quad \forall f,j$

معادله ۱۷ و ۱۸ اطمینان حاصل می‌کند که مواد بازیافتی با کیفیت مطلوب به مراکز تولید یا بازارهای مواد بازیافتی ارسال می‌شوند و در غیر این صورت برای دفع به مراکز دفع ایمن

ارسال می‌شوند. معادله ۱۹ تعیین می‌کند که بازارهای مواد بازیافتی نباید مواد بازیافتی را بیش از تقاضای خود دریافت کنند. معادله ۲۰ تضمین می‌کند که تمام قطعات بازسازی شده باید به مراکز تولید منتقل شوند .

$$(17)\sum_{b\in B} XNB_{inb} + \sum_{z\in Z} XNZ_{inz} = \left(\sum_{f\in F}\sum_{j\in J}\lambda_{ij}XFN_{jfn}\right)(1-\rho_i) \qquad \forall i,n$$

$$(18)\sum_{p\in P} XNP_{inp} = \rho_i\left(\sum_{f\in F}\sum_{j\in J}\lambda_{ij}XFN_{jfn}\right) \qquad \forall i,n$$

$$(19)\sum_{n\in N} XNZ_{inz} \le mi_{iz} \qquad \forall i,n$$

$$(20)\sum_{b\in B} XRB_{jrb} = \sum_{f\in F} XFR_{jfr} \qquad \forall j,r$$

معادله ۲۱ تعداد و نوع وسایل نقلیه حمل و نقل مورد نیاز برای انتقال محصولات از مراکز توزیع به مشتریان را تعیین می‌کند. تمام محدودیت‌های حمل و نقل به طور کامل در پیوست ۳ آمده است .

$$(21)XDM_{dm} \le \sum_{v\in V} vv_v VDM_{vdm} \qquad \forall d,m$$

معادله ۲۲ تضمین می‌کند که حجم مواد خام مختلف ارسال شده از تامین‌کنندگان به مراکز تولید از ظرفیت آن تامین‌کنندگان بیشتر نباشد. تمام محدودیت‌های ظرفیت به طور کامل در پیوست ۳ آمده است .

$$(22)\sum_{b\in B} XIB_{iab} \le xai_{ai} \qquad \forall i,a$$

معادله ۲۳ نشان می‌دهد که انرژی مورد نیاز برای فرآیندهای تولید زنجیره تامین باید توسط مرکز انرژی خورشیدی تامین شود .

$$(23)Obj\ 3^{Production} \le C^{max} * \widehat{xac_c} \quad \forall c$$

معادله ۲٤ تضمین می‌کند که هزینه‌های آموزشی برای کارکنان شبکه از بودجه اختصاص داده شده برای این کار فراتر نمی‌رود. تمام محدودیت‌های مربوط به تعداد کارمندان به طور کامل در پیوست ۳ آمده است .

$$(24)\left(\sum_{a\in A} wa_a * TCa_a + \sum_{b\in B}\sum_{t\in T} wb_b TCb_b\, YB_{tb} + \sum_{n\in N} wn_n TCn_n YN_n + \sum_{r\in R} wr_r TCr_r YR_r + \sum_{f\in F} wf_f TCf_f YF_f\right) \le TTC$$

معادله ۲٥ تضمین می‌کند که تعداد مراکز تولیدی مجهز به فناوری‌های مختلف در حداکثر حد مجاز باقی بماند. تمام محدودیت‌های مربوط به ایجاد تسهیلات به طور کامل در پیوست ۳ توضیح داده شده است .

$$(25)\sum_{b\in B}\sum_{t\in T} YB_{tb} \le b^{max}$$

۳-۳- روش‌شناسی برای مقابله با عدم قطعیت مساله

در این تحقیق برخی از پارامترهای مسئله به دلیل ماهیت متغیر بودنشان احتمالی هستند. برای رویارویی با عدم قطعیت احتمالی، ابتدا تابع توزیع احتمال هر یک از این پارامترهای غیرقطعی با استفاده از اطلاعاتی که برای آنها در دسترس است تعیین می‌شود و سپس از طریق رویکرد برنامه‌ریزی مقید به شانس.با آنها برخورد می‌شود [٤٨]. در رویکرد برنامه‌ریزی مقید به شانس، با توجه به ماهیت احتمالی پارامترهای غیرقطعی و همچنین اطلاعاتی که از رفتار این پارامترها در دسترس است، تابع توزیع احتمال هر یک از این پارامترها تعیین می‌شود. سپس بر اساس نوع تابع توزیع احتمال، همتای قید غیرقطعی نوشته می‌شود. در نهایت، این همتای نوشتاری باعث می‌شود که محدودیت با احتمالی حداقل برابر با سطح اطمینان قابل اجرا باقی بماند. مدل (A) یک مسئله برنامه‌ریزی خطی را نشان می‌دهد که در آن پارامتر $\widetilde{K}_i$ در حالت غیرقطعی است. این پارامتر غیرقطعی از یک تابع توزیع احتمال تصادفی یکنواخت پیروی می‌کند. در مدل (B) ، همتای مسئله از طریق رویکرد برنامه‌ریزی مقید به شانس.ارائه شده است. در این مدل α به معنای مقدار سطح اطمینان است که می‌تواند مقداری بین ۰ تا ۱ بگیرد و به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته می‌شود K_i^{Low} و K_i^{Up} به معنای حد بالا و پایین پارامتر غیرقطعی با توزیع احتمال یکنواخت هستند.

$$\begin{cases} Min\ Z = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} AB_{ij}X_{ij} \\ s.t.: \\ \sum_{j=1}^{J} CD_{ij}X_{ij} \geq \widetilde{K}_i \qquad \forall i \in I \quad \widetilde{K}_i \sim Uniform\left(K_i^{Low}, K_i^{Up}\right) \\ X_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I, j \in J \end{cases} \tag{A}$$

$$\begin{cases} Min\ Z = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} AB_{ij}X_{ij} \\ s.t.: \\ Prob\left(\sum_{j=1}^{J} CD_{ij}X_{ij} \geq \widetilde{K_i}\right) \geq \alpha \qquad \forall i \in I \quad \widetilde{K_i} \sim Uniform(K_i^{Low}, K_i^{Up}) \\ \Rightarrow \sum_{j=1}^{J} CD_{ij}X_{ij} \geq \alpha(K_i^{Up} - K_i^{Low}) + K_i^{Low} \qquad \forall i \in I \\ X_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I, j \in J \end{cases} \qquad (B)$$

مدل ریاضی مسئله با رویکرد برنامه‌ریزی مقید به شانس.بازنویسی می‌شود. اول، همتای معادلات. (۷) و (۲۳) از طریق رویکرد برنامه‌ریزی مقید به شانس.نوشته شده است. α_1 و α_2 به معنای مقدار سطح اطمینان برای تقاضا و ظرفیت مرکز انرژی است. قیود (۷') و (۲۳') همتای قطعی قیود غیرقطعی هستند. با توجه به این محدودیت‌ها، واضح است که همه پارامترهای غیرقطعی از توزیع احتمال تصادفی یکنواخت پیروی می‌کنند. سایر محدودیت‌ها و توابع هدف مسئله تغییر نمی‌کنند.

$$Prob\left(\sum_{d\in D} XDM_{dm} \geq \widetilde{dm}_m\right) \geq \alpha_1 \qquad \forall m \quad \widetilde{dm}_m \sim Uniform(dm_m^{Low}, dm_m^{Up})$$
$$\Rightarrow \textstyle\sum_{d\in D} XDM_{dm} \geq \alpha_1(dm_m^{Up} - dm_m^{Low}) + dm_m^{Low} \qquad \forall m \ (7')$$
$$Prob(Obj3^{Production} \leq C^{max} \times \widetilde{xac}_c) \geq \alpha_2 \qquad \forall c \quad \widetilde{xac}_c \sim Uniform(xac_c^{Low}, xac_c^{Up})$$
$$\Rightarrow Obj3^{Production} \leq C^{max} \times [(1-\alpha_2)(xac_c^{Up} - xac_c^{Low}) + xac_c^{Low}] \qquad \forall c (23')$$

۳-۴- رویکرد حل مدل

در طراحی شبکه حلقه بسته به دلیل پارامترهای مختلف، مسئله به عنوان NP-hard شناخته می‌شود و راه‌حل‌های کلاسیک و دقیق برای آن مناسب نیستند [۳۲]. برای این منظور، الگوریتم‌های تکاملی (EA) مانند MOEA به عنوان یکی از راه‌حل‌های مطرح شده برای حل مسائل NP-hard ایجاد شده‌اند. در حالی که MOEA برای مسائل با تعداد ۲ تا ۳ هدف مناسب است، با افزایش تعداد اهداف، کارایی آنها کاهش می‌یابد و فضای جستجو گسترده می‌شود. بنابراین، MaOEAها توسعه پیدا کردند که برای مسائل با بیش از چهار تابع هدف، کارایی بالاتری دارند [۱۳]. از جمله قوی‌ترین روش‌های فراابتکاری برای حل مسائل NP-hard،

الگوریتم ژنتیک (GA) است که برای مقایسه عملکرد MOEA و MaOEA در حل مسائل چندین هدفه، مطالعه حاضر از NSGA-II و NSGA-III به عنوان دو الگوریتم پرکاربرد استفاده می‌کند. به طور خاص، NSGA-II با جستجوی قوی فضای شدنی و سرعت همگرایی سریع، به یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌ها برای حل مسائل چند هدفه تبدیل شده است [۲٦]. در مقایسه با دیگر MaOEAها، NSGA-III به دلیل همگرایی قابل توجه و توزیع مناسب، یکی از روش‌های مناسب‌تر برای حل مسائل با تعداد اهداف بالا است.

۴- پیاده‌سازی

برای ارزیابی عملکرد شبکه طراحی شده، محصولی بادوام در نظر گرفته شده است که مواد اولیه و اجزای آن قابل بازیافت و تولید مجدد هستند. این محصول از چهار ماده مس، آلومینیوم، نیکل و فولاد تشکیل شده است. فرض بر این است که در محصول نهایی از مس، فولاد و نیکل به عنوان مواد اولیه و آلومینیوم و نیکل برای ساخت قطعات مورد نیاز است. برخی از داده‌های مورد نیاز مدل از داده‌های واقعی به دست می‌آیند، در حالی که بقیه از ادبیات استخراج شده‌اند. داده‌های مربوط به این فلزات، همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، از بازار فلزات شانگهای در سال ۲۰۱۷ به دست آمده است. برای در نظر گرفتن تنوع قیمت‌ها، تقاضای انرژی، و انتشار کربن در تامین‌کنندگان مختلف این فلزات، و اطمینان از سازگاری با واقعیت در سناریوهای جهانی، مقادیر جدول ۲ با یک عامل تصادفی از ۱.۱ تا ۱.٤ برای هر تامین‌کننده مقیاس‌بندی شده است. جدول ۳ نسبت این مواد خام مورد استفاده در ساخت قطعات را نشان می‌دهد. انرژی مورد نیاز برای بازیافت این فلزات به طور قابل توجهی کمتر از انرژی مورد نیاز برای تولید آنها است. جدول ٤ مقدار انرژی مورد نیاز برای بازیافت این مواد را به عنوان درصدی از انرژی مورد نیاز برای تولید آنها نشان می‌دهد. ناوگان حمل و نقل در نظر گرفته شده شامل دو مدل کامیون دیزلی سبک و نیمه سنگین و یک مدل کامیون برقی می‌باشد. این کامیون‌ها ظرفیت‌های مختلفی برای حمل مواد و محصولات دارند که منجر به هزینه‌های متفاوت، مصرف انرژی و آلودگی هوا می‌شود. این اطلاعات در جدول ٥ ارائه شده است. داده‌های لازم برای پارامترهای باقیمانده مدل از مقاله اتابکی و همکاران [۲٤] استخراج شده است.

جدول ۲. قیمت‌های تولید مواد خام، انرژی مورد نیاز، و انتشار کربن.

مواد اولیه	مصرف انرژی (MJ/KG)	انتشار کربن (KG/KG)	قیمت ($/KG)
مس	57	3.65	2.2
آلومینیوم	218	۱۲.۷۹	7.2
فولاد	35	۲.۷۱	12.2
نیکل	64۱	۱۲.٤	0.8

جدول ۳. مصرف فلزات در قطعات.

مواد خام	قطعات		
	1	**2**	**3**
فولاد (کیلوگرم)	0	0	
مس (کیلوگرم)	0	0	0
نیکل (کیلوگرم)	1.5	2	1
آلومینیوم (کیلوگرم)	1	1	1.5

جدول ۴. انرژی مورد نیاز برای بازیافت فلزات.

مواد خام	درصد تولید اولیه
مس	15%
آلومینیوم	5% تا 10%
فولاد	20% تا 40%
نیکل	10%

جدول ۵. مصرف انرژی، هزینه و انتشار کربن مرتبط با وسایل نقلیه حمل و نقل.

کامیون	نوع سوخت	ظرفیت (Ton)	انتشار کربن (g/km)	قیمت ($/km)	مصرف انرژی (MJ/km)
1	سوخت‌های فسیلی	8.9	286	0.18	5.1
2	سوخت‌های فسیلی	15.2	540	0.32	7.3
3	انرژی الکتریکی	8.9	0	0.5	8

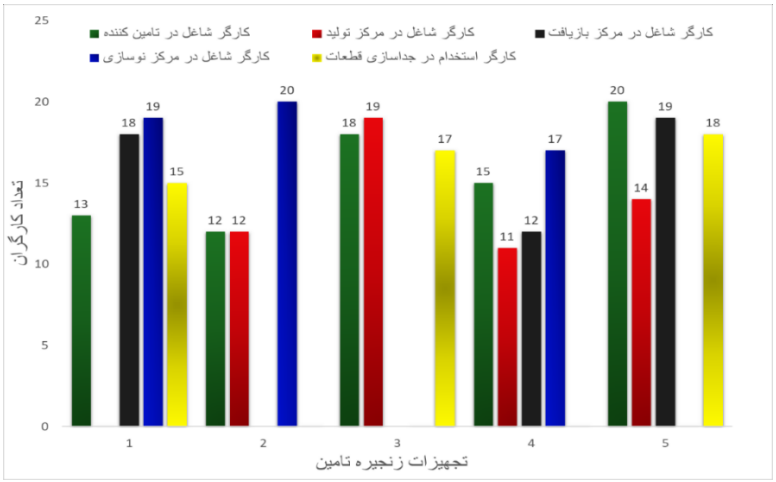
۴-۱- نتایج الگوریتم‌ها

دو الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل توسعه یافته و به دست آوردن مجموعه راه حل پارتو در نرم افزار متلب استفاده شده است. مجموعه راه‌حل‌های بدست آمده به مدیران این امکان را می‌دهد تا گزینه‌های موجود را بررسی کرده و در موقعیت‌های مختلف با توجه به خط‌مشی‌های خود تصمیمات مناسب اتخاذ کنند. نتایج بدست آمده از توابع هدف مدل و مبادله بین توابع هدف توسط الگوریتم NSGA-III تضاد بین توابع هدف را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، برای کاهش هزینه‌های شبکه، مصرف انرژی افزایش می‌یابد، کربن بیشتری منتشر می‌شود و فرصت‌های شغلی کمتری ایجاد می‌شود. همچنین، برای کاهش انتشار کربن، زنجیره تامین باید هزینه‌های بیشتری را متحمل شود. برای مقایسه بهتر کارایی بین این الگوریتم‌ها، مدل ۵ بار توسط هر یک از الگوریتم‌ها حل شده است و میانگین بهترین راه‌حل‌ها برای توابع هدف در هر اجرا در جدول ٦ نشان داده شده است. جدول ٦ برتری NSGA-III را نشان می‌دهد.

جدول ۶. مقایسه نتایج NSGA-III و NSGA-II

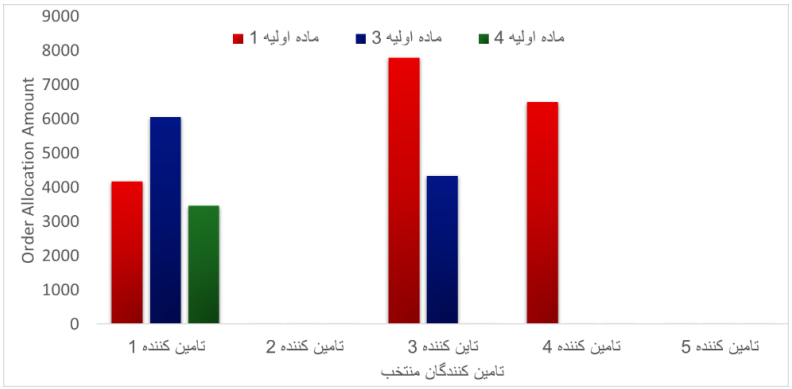
	میانگین هزینه	میانگین انتشار کربن	میانگین مصرف انرژی	میانگین اجتماعی
NSGA-III	20242284.9	596320.8	6609420.7	1090.9
NSGA-II	21668091.6	613486.3	7350841.4	1103.75

در راستای مسئولیت‌های اجتماعی زنجیره تامین، یکی از اهداف شبکه طراحی شده افزایش فرصت‌های شغلی ایجاد شده در کنار آموزش کارکنان است. شکل ۲ نتایج بدست آمده را برای تعداد کارگران مورد نیاز از مدل ریاضی را نشان می‌دهد. علاوه بر تعداد کارکنان مورد نیاز در بخش‌های عملیاتی، تجزیه و تحلیل این نتایج، تامین‌کنندگان منتخب و تاسیس تسهیلات مورد نیاز را نشان می‌دهد. مراکز تولید، بازیافت، نوسازی و جداسازی قطعات و تعداد کارگران مورد نیاز برای هر یک از آنها را می‌توان بر اساس ظرفیت مورد انتظار هر مرکز در شکل ۲ مشاهده کرد.

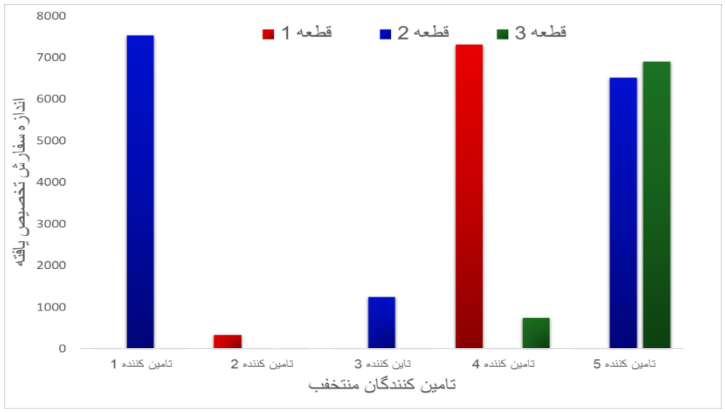


شکل ۲. تعداد کارگران شاغل در تسهیلات.

بر اساس اهداف مساله، نه تنها انتخاب تامین‌کنندگان مناسب، بلکه تخصیص کارآمد سفارشات از هر یک از آنها بسیار مهم است. شکل ۳ مقدار سفارش بهینه از هر یک از تامین‌کنندگان را برای مواد خام نشان می‌دهد. بیشترین خرید، ماده اولیه i_1 است که برای تولید بیشتر مورد نیاز است. تامین‌کنندگان ۱ و ۳ بیشترین تخصیص سفارش را دریافت می‌کنند. لازم به ذکر است که به دلیل عدم استفاده مستقیم از ماده i_2 در محصول، سفارشی برای آن وجود ندارد. شکل ٤ تخصیص بهینه سفارش برای قطعات مورد نیاز از تامین‌کنندگان را نشان می‌دهد.

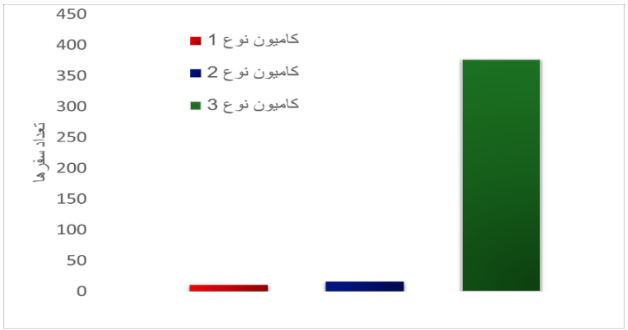


شکل ۳. انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش برای مواد خام.



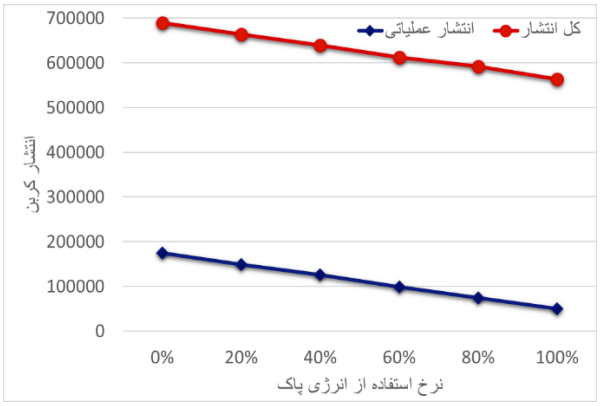
شکل ۴. انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش برای قطعات.

شکل ۵ اطلاعاتی در مورد مقدار و نوع وسایل نقلیه حمل و نقل مورد استفاده در سراسر شبکه ارائه می‌دهد. ناوگان حمل و نقل ناهمگن دارای ۳ مدل کامیون با مصرف انرژی، ظرفیت، هزینه و انتشار کربن متفاوت است. کامیون تیپ ۱ و ۲ دیزلی و کامیون تیپ ۳ برقی است. کامیون برقی هزینه بیشتری را به شبکه تحمیل می‌کند، اما انتشار کربن را که به دلیل اهمیت آلودگی هوا پرمصرف‌ترین وسیله نقلیه است، به حداقل می‌رساند. پس از آن، کامیون نوع ۲ پر استفاده‌ترین وسیله نقلیه است که به دلیل ظرفیت بیشتر و کاهش تعداد سفرهای مورد نیاز، هزینه بیشتر و انتشار کربن بیشتر را جبران می‌کند. کم استفاده‌ترین وسیله نقلیه کامیون نوع ۱ است.



شکل ۵. نوع و تعداد ناوگان وسایل نقلیه.

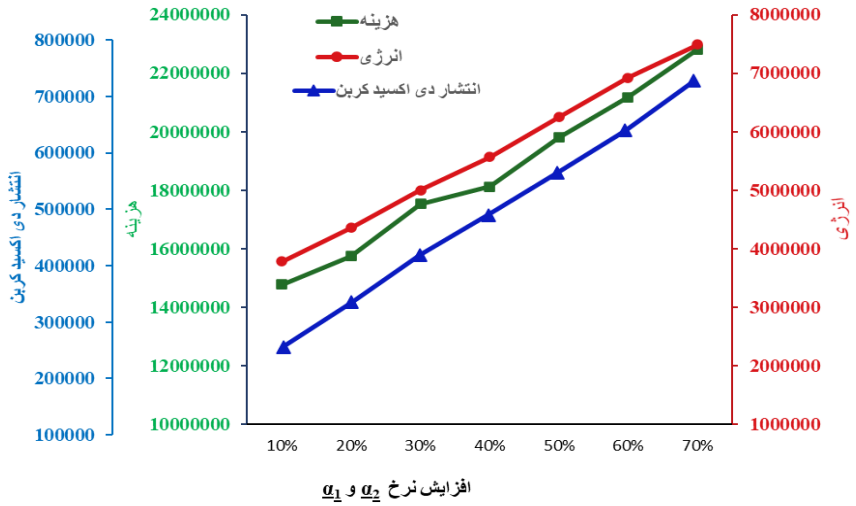
شکل ٦ واکنش شبکه به میزان مصرف انرژی پاک را نشان می‌دهد. برای این منظور، تحلیل حساسیت میزان کربن آزاد شده در بخش عملیاتی زنجیره تامین، با توجه به درصد انرژی پاک مصرفی، انجام شده است. آلودگی منتشر شده در این بخش ناشی از تولید، فرآوری، بازیافت، نوسازی و دفع است. ابتدا فرض بر این است که برای تامین برق شبکه از مرکز تولید انرژی خورشیدی استفاده نمی‌شود، سپس تنها ۲۰ درصد انرژی مورد نیاز توسط این مرکز تامین می‌شود و به همین ترتیب در هر مرحله، درصد مصرف انرژی پاک ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. ، تا ۱۰۰٪ انرژی مورد نیاز از انرژی خورشیدی تامین شود. شکل ٦ تأثیر قابل توجه انرژی پاک را در کاهش آلودگی و کربن‌زدایی عمیق نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بیشترین عامل آلودگی هوا در تسهیلات عملیاتی در هنگام استفاده ۱۰۰٪ از انرژی پاک، مربوط به کربن آزاد شده در هنگام دفع و تخریب مواد خام است.



شکل ۶. حساسیت انتشار کربن به افزایش مصرف انرژی پاک

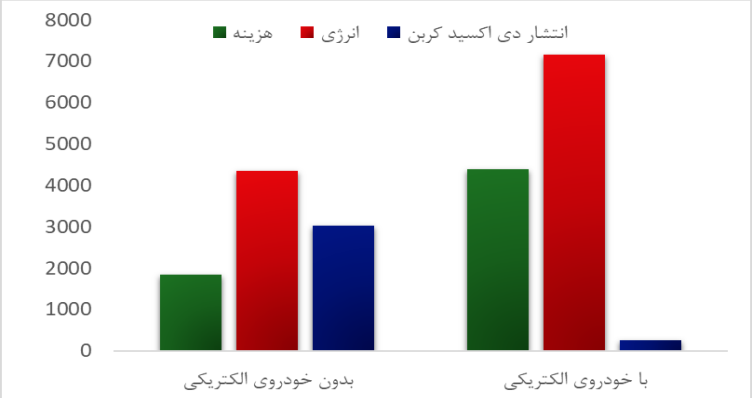
این بخش به تجزیه و تحلیل حساسیت نتایج به تغییرات در سطح اطمینان اختصاص دارد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، کاهش سطح اطمینان منجر به کاهش مقادیر تابع هدف می‌شود. این اتفاق می‌افتد زیرا مقدار کمتر α_1 و α_2 به شرایط آسان‌تر و سختگیری کمتر دلالت می‌کند. به عبارت دیگر از یک سو محافظه کاری کمتری وجود دارد و از سوی دیگر ریسک افزایش می‌یابد که نتیجه آن بهبود نتایج تابع هدف است. با توجه به نتایج، مشهود است که با کاهش سطح اطمینان، بیشترین کاهش مربوط به تابع هدف انتشار کربن و کمترین کاهش

مربوط به تابع هدف هزینه است. با افزایش سطح اطمینان، مقادیر تابع هدف افزایش می‌یابد. این اتفاق به این دلیل رخ می‌دهد که مقدار بالاتر α_1 و α_2 مستلزم شرایط سخت‌گیرانه‌تر است. به عبارت دیگر، از یک سو، محافظه کاری بالاتری وجود دارد و از سوی دیگر، ریسک کاهش می‌یابد و منجر به نتایج بدتر تابع هدف می‌شود. با توجه به نتایج، با افزایش سطح اطمینان، بیشترین افزایش مربوط به تابع هدف انتشار کربن و کمترین افزایش مربوط به تابع هدف هزینه است.



شکل ۷. آنالیز حساسیت مقادیر مختلف α_1 و α_2

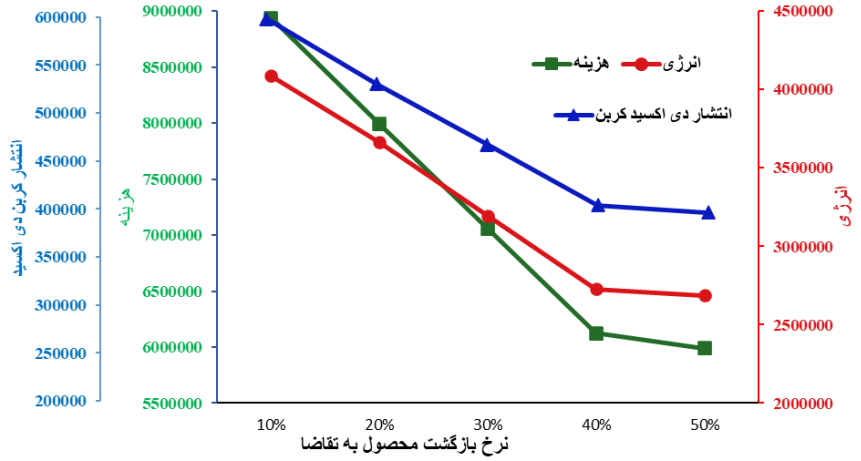
شکل ۸ آنالیز و تحلیل حساسیت استفاده یا عدم استفاده از کامیون‌های الکتریکی در ناوگان وسایل نقلیه را بر روی هزینه، مصرف انرژی (نتایج انرژی در این شکل باید در ۱۰ ضرب شود) و انتشار کربن را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، در شرایط فعلی استفاده از کامیون‌های برقی باعث افزایش مصرف انرژی و هزینه‌های سفر می‌شود. با این حال، با توجه به توافق پاریس و اهمیت دستیابی به انتشار گازهای گلخانه‌ای نزدیک به صفر، استفاده از خودروهای الکتریکی ضروری است. تولید باتری‌های لیتیومی با راندمان بالاتر می‌تواند مشکل مصرف انرژی خودروهای برقی را در آینده حل کند.



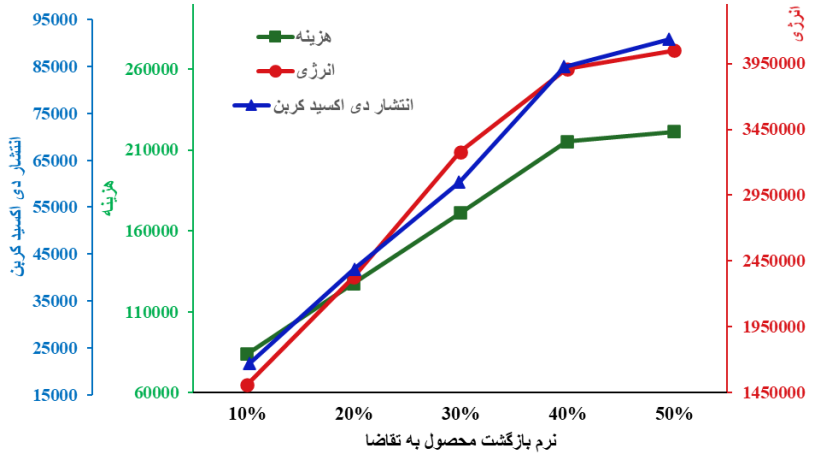
شکل ۸. تجزیه و تحلیل حساسیت ناوگان وسایل نقلیه.

شکل ۹ تا شکل ۱۲ پاسخ شبکه به تغییرات در تعداد محصولات برگشتی به شبکه را بررسی می‌کند. تعداد محصولات برگشتی به عنوان درصدی از محصولات تولیدی در نظر گرفته می‌شود که پس از پایان عمر آنها برای تولید مجدد به زنجیره تامین معکوس ارسال می‌شوند. ابتدا ۱۰ درصد از این محصولات به شبکه بازگردانده می‌شوند، سپس در هر مرحله این مقدار ۱۰ درصد افزایش می‌یابد تا نرخ بازگشت به ۵۰ درصد برسد. شکل ۹ تجزیه و تحلیل حساسیت درصد بازگشت محصولات در تامین مواد اولیه و قطعات را نشان می‌دهد. این نتایج به این واقعیت اشاره دارد که افزایش در محصولات برگشتی هزینه تخصیص مواد را کاهش می‌دهد و مصرف انرژی و تولید کربن در تامین‌کنندگان کاهش می‌یابد. این نتایج نشان دهنده تأثیر محصولات برگشتی در کاهش مصرف منابع است که منجر به حفظ آنها برای نسل آینده می‌شود که یکی از اهداف اصلی پایداری است. ضرورت طراحی یک زنجیره تامین حلقه بسته برای حفظ منابع و اجرای پایداری در این شکل مشخص شده است. شکل ۱۰ آنالیز و تحلیل حساسیت تعداد محصولات برگشتی را بر روی هزینه، مصرف انرژی و انتشار کربن در بخش عملیاتی شبکه نشان می‌دهد. با توجه به امکانات بیشتر و نیاز به پردازش در زنجیره تامین معکوس، با افزایش تعداد محصولات برگشتی، هزینه‌ها افزایش می‌یابد، انرژی بیشتری مورد نیاز است و شبکه با افزایش انتشار کربن مواجه می‌شود. لازم به ذکر است که علت اصلی انتشار کربن در بخش عملیاتی افزایش دفع مواد و تخریب قطعات در مراکز دفع ایمن می‌باشد.

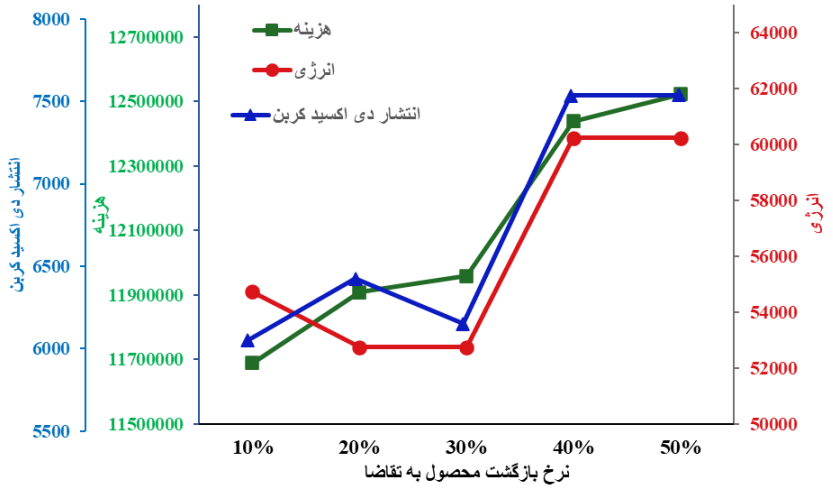
شکل ۱۱ تأثیر تغییر درصد محصولات برگشتی را بر استقرار تسهیلات نشان می‌دهد. اول اینکه به دلیل ظرفیت بالای تاسیسات در زنجیره تامین معکوس، شیب افزایش هزینه، انرژی و کربن منتشر شده کم است. اما با افزایش محصولات و نیاز به ایجاد تسهیلات بیشتر، روند رشد توابع هدف افزایش می‌یابد.



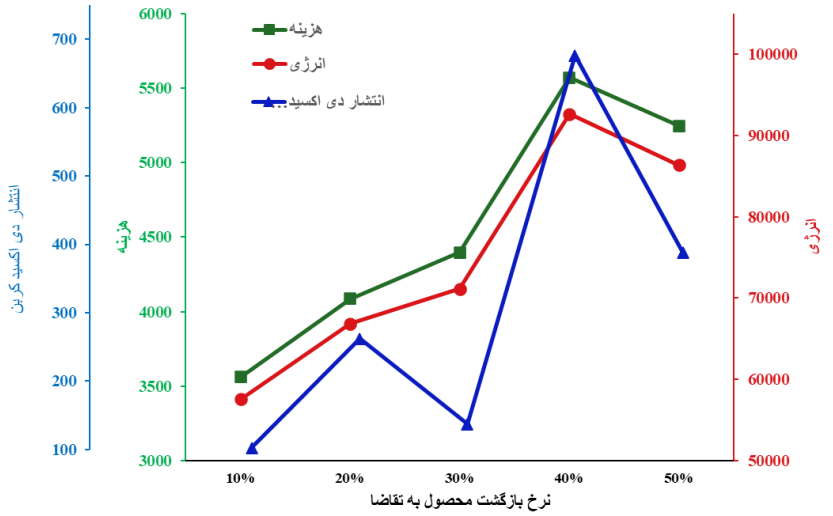
شکل ۹. اثر محصولات برگشتی بر خرید مواد.



شکل ۱۰. اثر محصولات برگشتی بر بخش عملیاتی زنجیره تامین.



شکل ۱۱. تأثیر محصولات برگشتی بر تأسیسات.



شکل ۱۲. اثر محصولات برگشتی بر حمل و نقل.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که چگونه سیستم حمل و نقل به تغییرات در تعداد محصولات برگشتی واکنش نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که با بازگشت ۳۰ درصد محصولات به چرخه تولید،

سیستم لجستیک با صرف هزینه و انرژی بیشتر سعی در کاهش آلودگی هوا دارد. بازگشت ۵۰ درصد محصولات به شبکه منجر به کاهش زیادی در حمل و نقل مواد خام و تعداد سفرهای مورد نیاز بین تامین‌کنندگان و مراکز تولید می‌شود که منجر به کاهش هزینه، مصرف انرژی و انتشار کربن در بخش حمل و نقل می‌شود. تجزیه و تحلیل نتایج شکل ۹ تا شکل ۱۲ نشان می‌دهد که افزایش بازگشت محصولات به زنجیره تامین هزینه‌های کلی شبکه و انتشار کربن توسط شبکه را کاهش می‌دهد اما مصرف انرژی افزایش می‌یابد.

۵- پیشنهادها و بینش مدیریتی

رقابت فشرده در بازارهای بین‌المللی، تقاضاهای متنوع مشتریان و کوتاه شدن چرخه‌ی عمر محصولات، مدیران را به سمت اتخاذ تصمیم‌های سریع‌تر با ریسک پایین‌تر سوق داده است. این شرایط نیازمند اتخاذ مدل‌های مدیریتی و اجرایی نوین است که بتوانند به کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری کمک کنند. یکی از این مدل‌ها، ادغام طراحی یکپارچه در تمام سطوح زنجیره تأمین حلقه بسته است. با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف، مدل توسعه یافته منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود. این مدل اجازه می‌دهد تا در صورت نیاز به افزایش هزینه‌ها در بخشی خاص، مدیریت یکپارچه بتواند این افزایش هزینه‌ها را در سایر بخش‌ها جبران کند، به طوری که تمام ذینفعان سهمی از سود داشته باشند. به‌خصوص در زمینه خرید مواد اولیه که بخش بزرگی از هزینه‌های تولید را تشکیل می‌دهد، انتخاب تامین‌کنندگان مناسب و تخصیص بهینه سفارشات نقش کلیدی در کاهش هزینه‌ها دارد. همچنین، بازگرداندن محصولات به فرآیند تولید هزینه‌های شبکه را کاهش می‌دهد، چرا که مواد اولیه با کیفیت مناسب به واحدهای تولیدی ارسال می‌شوند و مواد با کیفیت نامناسب برای تولید مجدد در بازار مواد بازیافتی فروخته می‌شوند.

در دنیای امروز، با افزایش آگاهی مشتریان و سخت‌گیرتر شدن قوانین دولتی، توجه به ابعاد زیست‌محیطی و اجتماعی برای ارتقای رقابت‌پذیری زنجیره تأمین ضروری شده است. مدل حلقه بسته زنجیره تأمین با تاکید بر پایداری، کمک قابل توجهی به حفظ منابع و کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن دارد. توابع هدف مصرف انرژی و انتشار کربن در این مدل توسعه یافته‌اند تا پایداری زیست‌محیطی تضمین شود و نتایج نشان‌دهنده کاهش مصرف انرژی و

انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این مدل به‌ویژه با تجزیه و تحلیل نتایج، اهمیت تولید انرژی پاک و کربن‌زدایی در بخش‌های مختلف زنجیره تأمین را برجسته می‌کند. این امر به مدیران کمک می‌کند تا اهمیت جریان معکوس و بازگشت محصولات را درک کنند و استراتژی‌های مناسبی برای مدیریت این جریان اتخاذ کنند.

از جنبه اجتماعی، ایجاد فرصت‌های شغلی به بهبود وضعیت اجتماعی زنجیره تأمین کمک می‌کند. مدل نشان می‌دهد که استخدام‌ها هزینه‌های اضافی برای شبکه به همراه ندارند، زیرا استخدام در هر مرکز بر اساس بهره‌وری بهینه آن مرکز انجام می‌شود. همچنین، آموزش کارکنان با هزینه نسبتاً پایینی همراه است که با افزایش کارآیی و ایمنی جبران می‌شود. این جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی به‌طور همزمان به افزایش رقابت‌پذیری زنجیره تأمین کمک می‌کنند. به‌علاوه، ناوگان وسایل نقلیه ناهمگن با استفاده از ظرفیت کامل برای حمل‌ونقل مواد و کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی توصیه می‌شود. در مواردی که استفاده کمتر از حد ظرفیت کامیون‌ها ممکن است مناسب نباشد، استفاده از وسایل نقلیه با ظرفیت کوچکتر می‌تواند مفید باشد و مصرف انرژی را کاهش دهد. این روش‌ها همگی به کاهش هزینه‌ها، بهبود کارآیی و افزایش رقابت‌پذیری در بازارهای بین‌المللی کمک می‌کنند.

۶- جمع‌بندی

مطالعه حاضر یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته را تحت شرایط غیرقطعی با هدف دستیابی به پایداری طراحی کرده است. نتایج این تحقیق به مدیران در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و عملیاتی از جمله انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارشات، مکان‌یابی و ساخت تسهیلات، انتخاب فناوری برای واحدهای تولیدی، جمع‌آوری محصولات برگشتی، پردازش، بازیافت، فروش مواد و استخدام کارکنان کمک می‌کند. این شبکه همچنین مرکز تولید انرژی پاک را برای تامین انرژی الکتریکی واحدهای عملیاتی ایجاد می‌کند. در این پژوهش از ناوگان ناهمگنی از وسایل نقلیه برای حمل و نقل مواد و محصولات استفاده می‌شود و برای احترام به بعد اجتماعی پایداری، آموزش‌هایی را برای کارکنان در جهت بهبود مسئولیت‌های اجتماعی شبکه در نظر گرفته می‌شود. این مساله با استفاده از یک مدل ریاضی چندین هدفه غیرقطعی و با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی مقید به شانس و الگوریتم‌های تکاملی (EAs) حل می‌شود.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش استفاده از انرژی خورشیدی تا ۱۰۰٪، آلودگی و کربن آزاد شده، در بخش‌های عملیاتی شبکه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما استفاده از انرژی خورشیدی به علت هزینه راه‌اندازی اولیه مرکز تولید انرژی پاک، هزینه‌های شبکه را افزایش می‌دهد. همچنین، این مطالعه تأثیر مقدار سطح اطمینان برآورده شدن محدودیت‌های غیرقطعی بر نتایج تابع هدف را آنالیز کرده و نشان می‌دهد که کاهش سطح اطمینان منجر به کاهش مقدار توابع هدف می‌شود، در حالی که افزایش آن منجر به شرایط سخت‌گیرانه‌تر و نتایجی با مطلوبیت کمتر می‌گردد. علاوه بر این، بررسی نتایج حاصل از استفاده از ناوگان حمل و نقل ناهمگن، نشان داده است که اگرچه این ناوگان، باعث افزایش مصرف انرژی و هزینه‌ها می‌شود، اما کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید را در بر دارد که با توجه به اهداف طولانی‌مدت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ضرورت دارد. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که بازگشت محصولات به زنجیره تامین هزینه‌ها و انتشار کربن در شبکه را کاهش می‌دهد اما افزایش مصرف انرژی را در پی دارد. افزایش محصولات بازگشتی به شبکه، باعث کاهش هزینه و میزان خرید مواد اولیه می‌شود، که نشان دهنده اهمیت زنجیره تامین حلقه بسته در حفظ منابع برای نسل‌های آینده و مفهوم پایداری می‌باشد. همچنین تسهیلات عملیاتی مورد نیاز در زنجیره تامین معکوس نیز فرصت‌های شغلی را افزایش می‌دهند که منجر به بهبود عملکرد شبکه از نظر مسئولیت‌های اجتماعی می‌شود.

پژوهش حاضر، با تمرکز بر طراحی و اجرای یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته و تحت شرایط غیرقطعی، در پی بهبود پایداری و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی است، که به طور قابل توجهی با مطالعات پیشین همخوانی دارد. این مطالعات شامل پژوهش‌های گویندان و همکاران [۳۰] که به بررسی ابعاد اجتماعی در گذار به سیستم‌های حلقه بسته پرداخته‌اند، ایمران و همکاران [۳۱] که تأثیرات اجتماعی فرصت‌های شغلی و توسعه اقتصادی را در نظر گرفته‌اند، و صالحی امیری و همکاران که یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته را برای صنعت طراحی و اثربخشی آن را در یک مطالعه موردی بررسی کرده‌اند. در حالی که پژوهش‌های پیشین بر تأثیر اجتماعی و اقتصادی تمرکز داشته‌اند، پژوهش ما علاوه بر این‌ها، به طور خاص به تأثیرات زیست‌محیطی و کاهش انتشار کربن از طریق افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی

فرآیندهای تولید و بازیافت می‌پردازد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده پیشرفت در رویکردهای تحلیلی و عملیاتی است که می‌تواند به مدیران در درک بهتر و اجرای استراتژی‌های پایدار در زنجیره‌های تامین کمک کند.

برای تقویت و افزایش دقت نتایج در مطالعات آینده، توجه به محدودیت‌های این تحقیق و گسترش آن با پیشنهادهای جدید ضروری است. برای افزایش قابلیت اطمینان مدل‌سازی، مطالعات بعدی باید شامل استفاده از مدل‌های حل دقیق برای حل مسائل پیچیده‌تر و معیارهای ارزیابی گسترده‌تر باشند. به منظور دخیل کردن پایداری، اهداف توسعه پایدار (SDGs) می‌توانند در پیکربندی و مدل‌سازی مسائل زنجیره تامین مورد توجه قرار گیرند. همچنین، در نظر گرفتن استانداردهای محیطی، اجتماعی و حکمرانی (ESG) هنگام ساخت تأسیسات جدید می‌تواند به کاهش ریسک‌های کسب‌وکار و افزایش پذیرش اجتماعی کمک کند. علاوه بر این، می‌توان در مطالعات آینده، هزینه‌های تأسیس تسهیلات جدید، هزینه‌های عملیاتی و ظرفیت‌های مراکز عملیاتی را به عنوان پارامترهای غیرقطعی مورد بررسی قرار داد و با استفاده از رویکردهای مختلف مانند بهینه‌سازی استوار مدل‌سازی کرد. روش‌های کاهش انتشار کربن مانند سیستم‌های درپوش و تجارت یا مالیات بر انتشار کربن نیز می‌توانند برای کربن‌زدایی عمیق در تولید مواد خام و انتخاب تامین‌کنندگان مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت، توجه به عوامل اجتماعی کیفی و تحلیل تأثیرات آن‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره اهمیت ویژه‌ای دارد، که می‌تواند به ارتقاء کیفیت نتایج کمک کند و پایداری زنجیره تامین را بهبود بخشد.

۷- منابع

[1] A. Babaeinesami, H. Tohidi, P. Ghasemi, F. Goodarzian, and E. B. Tirkolaee, "A closed-loop supply chain configuration considering environmental impacts: a self-adaptive NSGA-II algorithm," *Applied Intelligence*, vol. 52, no. 12, pp. 13478-13496 https://doi.org/10.1007/s10489-021-02944-9, 2022.

[2] F. Keshavarz-Ghorbani and S. H. R. Pasandideh, "A Lagrangian relaxation algorithm for optimizing a bi-objective agro-supply chain model considering CO2 emissions," *Annals of Operations Research,* vol. 314, no. 2, pp. 497-527 https://doi.org/10.1007/s10479-021-03936-1, 2022.

[3] M. Ehsanifar, F. Dekamini, C. Spulbar, R. Birau, M. Khazaei, and I. C. Bărbăcioru, "A Sustainable Pattern of Waste Management and Energy Efficiency in Smart Homes Using

the Internet of Things (IoT)," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5081 https://doi.org/10.3390/su15065081, 2023.

[4] M. Ramezani, M. Khazaei, F. Gholian-Jouybari, A. Sandoval-Correa, H. Bonakdari, and M. Hajiaghaei-Keshteli, "Turquoise hydrogen and waste optimization: A Bi-objective closed-loop and sustainable supply chain model for a case in Mexico," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 195, p. 114329 https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114329, 2024.

[5] Z. Yang *et al.*, "Tracking the CO2 Emissions of China's Coal Production via Global Supply Chains," *Energies*, vol. 15, no. 16, p. 5934, 2022.

[6] A. Taghipour, A. Padash, V. Etemadi, M. Khazaei, and S. Ebrahimi, "Sustainable and Circular Hotels and the Water–Food–Energy Nexus: Integration of Agrivoltaics, Hydropower, Solar Cells, Water Reservoirs, and Green Roofs," *Sustainability*, vol. 16, no. 5, p. 1985 https://doi.org/10.3390/su16051985, 2024.

[7] A. Taghipour, M. Ramezani, M. Khazaei, V. Roohparvar, and E. Hassannayebi, "Smart Transportation Behavior through the COVID-19 Pandemic: A Ride-Hailing System in Iran," *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4178 https://doi.org/10.3390/su15054178, 2023.

[8] A. Taghipour, P. Z. Foukolaei, M. Ghaedi, and M. Khazaei, "Sustainable Multi-Objective Models for Waste-to-Energy and Waste Separation Site Selection," *Sustainability*, vol. 15, no. 22, p. 15764 https://doi.org/10.3390/su152215764, 2023.

[9] E. Kouchaki Tajani, A. Ghane Kanafi, M. Daneshmand-Mehr, and A.-A. Hosseinzadeh, "A Robust Green Multi-Channel Sustainable Supply Chain based on RFID technology with considering pricing strategy and subsidizing policies," *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 18, no. 4, pp. 43-78, 2022.

[10] H. Soleimani, P. Chhetri, A. M. Fathollahi-Fard, S. Mirzapour Al-e-Hashem, and S. Shahparvari, "Sustainable closed-loop supply chain with energy efficiency: Lagrangian relaxation, reformulations and heuristics," *Annals of Operations Research*, vol. 318, no. 1, pp. 531-556 https://doi.org/10.1007/s10479-022-04661-z, 2022.

[11] S. Roshandel, M. H. Karimi Govareshaki, and M. Abbasi, "Designing a supplier development model in order to transition from outsourcing to strategic alliance," *Management Research in Iran*, vol. 27, no. 2, pp. 72-94 https://doi.org/10.4324/9780203127940-16, 2023 [In Persian].

[12] S. M. Ahmadi, A. Safaei Ghadikolaei, J. Rezaeian Zeidi, and M. Valipour Khatir, "A Mixed Integer Nonlinear Programming Model for a Green Closed-Loop Supply Chain Optimization (Case Study: Kalleh Dairy Company)," *Modern Research in Decision Making*, vol. 7, no. 1, pp. 134-164, 2022 [In Persian].

[13] C. Zhu, J. Du, F. Shahzad, and M. U. Wattoo, "Environment sustainability is a corporate social responsibility: measuring the nexus between sustainable supply chain management, big data analytics capabilities, and organizational performance," *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3379, 2022.

[14] J. Gaur, M. Amini, and A. K. Rao, "The impact of supply chain disruption on the closed-loop supply chain configuration profit: a study of sourcing policies," *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 17, pp. 5380-5400 https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1657244, 2020.

[15] S. S. Mirhosseini, M. Ramezani, M. Khazaei, and A. Azar, "Exploring and analysing the risks and challenges of implementing ERP systems: Critical system thinking," *International Journal of Information Systems and Change Management*, vol. 12, no. 3, pp. 234-258 https://doi.org/10.1504/ijiscm.2021.120325, 2021.
[16] A. Taghipour, A. Fooladvand, M. Khazaei, and M. Ramezani, "Criteria Clustering and Supplier Segmentation Based on Sustainable Shared Value Using BWM and PROMETHEE," *Sustainability*, vol. 15, no. 11, p. 8670 https://doi.org/10.3390/su15118670, 2023.
[17] A. Taghipour, A. Sohrabi, M. Ghaedi, and M. Khazaei, "A robust vaccine supply chain model in pandemics: Case of Covid-19 in Iran," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 183, p. 109465 https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109465, 2023.
[18] A. Azar, M. Kolyai, M. Amini, and A. Rajab Zadeh Qatari, "Designing an integrated mathematical model for a closed-loop supply chain," *Management Research in Iran*, 2016 [In Persian].
[19] M. D. Nayeri, M. Khazaei, and D. Abdolahbeigi, "The drivers of success in new-service development: Rough set theory approach," *International Journal of Services and Operations Management*, vol. 43, no. 4, pp. 421-439 https://doi.org/10.1504/ijsom.2022.127465, 2022.
[20] M. Bandari, A. Azar, and K. Fathi Hafshejani, "Optimizing the supply chain of hospital services," *Management Research in Iran*, vol. 27, no. 3, pp. 110-133, 2023 [In Persian].
[21] S. Jalalifar, R. Ehtesham Rasi, and A. Mohtashami, "Design a Fuzzy Goal Programming Model for Optimizing the Cost and Distance of Vehicles in the Four-Echelon Closed-Loop Supply Chain by Using Ant Colony Algorithm," *Modern Research in Decision Making*, vol. 6, no. 1, pp. 148-169, 2021 [In Persian].
[22] F. Gholian-Jouybari, O. Hashemi-Amiri, B. Mosallanezhad, and M. Hajiaghaei-Keshteli, "Metaheuristic algorithms for a sustainable agri-food supply chain considering marketing practices under uncertainty," *Expert Systems with Applications*, vol. 213, p. 118880, 2023.
[23] M. Ramezani, A. Azar, and M. Khazaei, "Gap analysis through a hybrid method: Critical systems heuristics and best worst method," in *The International Workshop on Best-Worst Method*, 2021: Springer, pp. 272-286 https://doi.org/10.1007/978-3-030-89795-6_19.
[24] M. S. Atabaki, M. Mohammadi, and B. Naderi, "New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy," *Computers & industrial engineering*, vol. 146, p. 106520 https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106520, 2020.
[25] M. Yavari and M. Geraeli, "Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods," *Journal of Cleaner Production*, vol. 226, pp. 282-305, 2019.
[26] F. Keshavarz-Ghorbani and S. H. R. Pasandideh, "Designing a multi-objective closed-loop supply chain for multi-period multi-generational products with social impacts considerations," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 177, p. 109056, 2023.
[27] R. S. Rad and N. Nahavandi, "A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount," *Journal*

of cleaner production, vol. 196, pp. 1549-1565 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.034, 2018.

[28] M. S. Bhatia and R. Kumar Srivastava, "Antecedents of implementation success in closed-loop supply chain: An empirical investigation," *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 23, pp. 7344-7360 https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1583393, 2019.

[29] D. Prajapati, S. K. Jauhar, A. Gunasekaran, S. S. Kamble, and S. Pratap, "Blockchain and IoT embedded sustainable virtual closed-loop supply chain in E-commerce towards the circular economy," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 172, p. 108530 https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108530, 2022.

[30] K. Govindan, F. Salehian, H. Kian, S. T. Hosseini, and H. Mina, "A location-inventory-routing problem to design a circular closed-loop supply chain network with carbon tax policy for achieving circular economy: An augmented epsilon-constraint approach," *International Journal of Production Economics*, vol. 257, p. 108771 https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108771, 2023.

[31] M. Imran, M. S. Habib, A. Hussain, N. Ahmed, and A. M. Al-Ahmari, "Inventory routing problem in supply chain of perishable products under cost uncertainty," *Mathematics*, vol. 8, no. 3, p. 382 https://doi.org/10.3390/math8030382, 2020.

[32] A. Salehi-Amiri, A. Zahedi, F. Gholian-Jouybari, E. Z. R. Calvo, and M. Hajiaghaei-Keshteli, "Designing a closed-loop supply chain network considering social factors; a case study on avocado industry," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 101, pp. 600-631 https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.08.035, 2022.

[33] S. Turki, S. Didukh, C. Sauvey, and N. Rezg, "Optimization and analysis of a manufacturing–remanufacturing–transport–warehousing system within a closed-loop supply chain," *Sustainability*, vol. 9, no. 4, p. 561 https://doi.org/10.3390/su9040561, 2017.

[34] A. Cheraghalipour, M. M. Paydar, and M. Hajiaghaei-Keshteli, "A bi-objective optimization for citrus closed-loop supply chain using Pareto-based algorithms," *Applied Soft Computing*, vol. 69, pp. 33-59 https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.04.022, 2018.

[35] S. Validi, A. Bhattacharya, and P. J. Byrne, "An evaluation of three DoE-guided meta-heuristic-based solution methods for a three-echelon sustainable distribution network," *Annals of Operations Research*, vol. 296, pp. 421-469, 2021.

[36] C. Bataille *et al.*, "Net-zero deep decarbonization pathways in Latin America: Challenges and opportunities," *Energy Strategy Reviews*, vol. 30, p. 100510 https://doi.org/10.18235/0002717, 2020.

[37] L. Canales-Bustos, E. Santibañez-González, and A. Candia-Véjar, "A multi-objective optimization model for the design of an effective decarbonized supply chain in mining," *International Journal of Production Economics*, vol. 193, pp. 449-464 https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.08.012, 2017.

[38] I. Karlsson, J. Rootzén, A. Toktarova, M. Odenberger, F. Johnsson, and L. Göransson, "Roadmap for decarbonization of the building and construction industry—A supply chain analysis including primary production of steel and cement," *Energies*, vol. 13, no. 16, p. 4136 https://doi.org/10.3390/en13164136, 2020.

[39] M. Zarei, M. Nasrollahi, and A. Yousefli, "Developing a closed-loop green supply chain network design in uncertain space," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 20, no. 68, pp. 165-187, 2022 [In Persian].
[40] D. Raabe *et al.*, "Circular Steel for Fast Decarbonization: Thermodynamics, Kinetics, and Microstructure Behind Upcycling Scrap into High-Performance Sheet Steel," *Annual Review of Materials Research*, vol. 54, 2024.
[41] K. Li, Z. Luo, L. Hong, J. Wen, and L. Fang, "The role of China's carbon emission trading system in economic decarbonization: Evidence from Chinese prefecture-level cities," *Heliyon*, vol. 10, no. 1, 2024.
[42] A. Mohammed and Q. Wang, "The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain," *International journal of production economics*, vol. 184, pp. 47-58 https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.016, 2017.
[43] P. Seydanlou, F. Jolai, R. Tavakkoli-Moghaddam, and A. M. Fathollahi-Fard, "A multi-objective optimization framework for a sustainable closed-loop supply chain network in the olive industry: Hybrid meta-heuristic algorithms," *Expert Systems with Applications*, vol. 203, p. 117566 https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117566, 2022.
[44] F. Goodarzian, V. Kumar, and P. Ghasemi, "Investigating a citrus fruit supply chain network considering CO2 emissions using meta-heuristic algorithms," *Annals of Operations Research*, pp. 1-57, 2022.
[45] Z. Xu, S. Pokharel, and A. Elomri, "An eco-friendly closed-loop supply chain facing demand and carbon price uncertainty," *Annals of Operations Research*, vol. 320, no. 2, pp. 1041-1067, 2023.
[46] A. A. H. Ahmadini, U. M. Modibbo, A. A. Shaikh, and I. Ali, "Multi-objective optimization modelling of sustainable green supply chain in inventory and production management," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 6, pp. 5129-5146 https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.075, 2021.
[47] K. Baghizadeh, N. Cheikhrouhou, K. Govindan, and M. Ziyarati, "Sustainable agriculture supply chain network design considering water-energy-food nexus using queuing system: A hybrid robust possibilistic programming," *Natural Resource Modeling*, vol. 35, no. 1, p. e12337 https://doi.org/10.1111/nrm.12337, 2022.
[48] M. Rahbari, A. A. Khamseh, and M. Mohammadi, "A novel multi-objective robust fuzzy stochastic programming model for sustainable agri-food supply chain: case study from an emerging economy," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 25, pp. 67398-67442 https://doi.org/10.1007/s11356-023-26305-w, 2023.
[49] A. M. Fathollahi-Fard, M. Hajiaghaei-Keshteli, and S. Mirjalili, "Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations," *Applied Soft Computing*, vol. 71, pp. 505-525 https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.025, 2018.
[50] F. Behroozi, M. Monfared, and S. M. H. Hosseini, "Investigating the conflicts between different stakeholders' preferences in a blood supply chain at emergencies: a trade-off between six objectives," *Soft Computing*, vol. 25, no. 21, pp. 13389-13410 https://doi.org/10.1007/s00500-021-06157-7, 2021.