

بهینه‌سازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در

حمل و نقل

محسن شفیعی نیک ابادی (مسئول مکاتبات)، دانشیار. گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

E-mail: shafiei@semnan.ac.ir

مهسا اخوان راد، دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اقتصادی اداری، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

پریسا دهقان پور، کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، موسسه آموزش عالی بینالود مشهد، مشهد، ایران

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۰

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷

چکیده

امروزه دستیابی به منافع رقابتی بازار، امری ضروری است و از آنجاکه توجه به مسائل زیست‌محیطی و انرژی افزایش یافته است، طراحی شبکه‌ی زنجیره تأمین مناسب می‌تواند کمک بزرگی به این مهم کند. به همین منظور در این پژوهش یک مدل برنامه ریزی برای زنجیره تأمین حلقه بسته‌ی سبز چندمحصولی، چند دوره‌ای طراحی شده است. جنبه‌ی نوآوری تحقیق برقراری توابع هدف چندگانه اختصاصی در حوزه‌ی مدیریت انرژی مبتنی بر حمل و نقل می‌باشد که یک مدل بهینه‌سازی برای زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با چهار هدف بهینه‌سازی کربن‌دی‌اکسید، هزینه حمل و نقل، انرژی و ضایعات طراحی شده است و مدل مربوطه توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید حل گردیده است. در راستای یکپارچه‌سازی توابع هدف از روش وزن دهی به اهداف استفاده شده است، وزن اهداف با توجه به نظر خبرگان انتخاب شده است. نتایج حاصل از بررسی کارایی الگوریتم‌ها نشان می‌دهد زمانی که چهار تابع هدف را به صورت هم‌زمان در نظر می‌گیریم، الگوریتم ژنتیک بهتر عمل می‌کند همچنین با مقایسه‌ی نتایج حاصل از این دو الگوریتم کارایی الگوریتم ژنتیک برای دو تابع هدف انرژی و هزینه ثابت شد و کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای دو تابع هدف کربن دی‌اکسید و ضایعات مشخص گردید. این مقاله کمک می‌کند تا مدیران از حمل و نقل سبز و بهبود عملکرد زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌ها در کل زنجیره تأمین به‌عنوان یک استراتژی مکمل، به‌منظور کسب مزیت رقابتی پایدار سود ببرند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی حمل و نقل، زنجیره تأمین حلقه بسته سبز، مدل برنامه‌ریزی ریاضی

۱. مقدمه

حوزه علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی موجب کاهش هزینه تمام‌شده محصولات نهایی و در نتیجه رقابتی شدن آن می‌شود. از این رو هم بخش خصوصی و هم دولتی نیاز به برنامه‌ریزی دقیق جهت کاهش مصرف سوخت در مدیریت راستای زنجیره تأمین سبز دارند.

مدیریت زنجیره‌ی تأمین سبز^۳ را می‌توان به صورت ادغام تفکر زیست‌محیطی در مدیریت زنجیره‌ی تأمین تعریف کرد که شامل طراحی محصول، انتخاب تأمین‌کننده، انتخاب مواد اولیه، فرآیند تولید، بسته‌بندی محصول، تحویل کالا به مشتری و مدیریت پایان عمر محصول پس از استفاده تعریف کرد، به این ترتیب مدیریت زنجیره تأمین سبز از طراحی محصولات سبز تا فرآیند حلقه بسته‌ی بازگشت محصول را در برمی‌گیرد و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و سطح بالا و هدایت کردن زنجیره تأمین بر یک‌پایه‌ی سراسری است. مدل طراحی شده در این پژوهش توسعه یافته‌ی مدل پژوهش‌های پیشین می‌باشد و جنبه‌ی نوآوری تحقیق برقراری توابع هدف چندگانه اختصاصی در حوزه‌ی مدیریت انرژی مبتنی بر حمل و نقل و حالت عدم قطعیت می‌باشد.

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی برای زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با چهار هدف بهینه‌سازی کربن‌دی‌اکسید، هزینه حمل‌ونقل، انرژی و ضایعات طراحی شده است و مدل مربوطه توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید حل می‌گردد. سؤال اصلی که در اینجا مطرح می‌شود این است که مدل بهینه‌سازی زنجیره‌ی تأمین حلقه بسته‌ی سبز چندمحصولی با اهداف کاهش انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید ناشی از حمل‌ونقل، کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و کاهش میزان ضایعات چگونه است؟

در ادامه بخش دوم مقاله به ادبیات نظری و پیشینه پژوهش پرداخته است. در بخش سوم، مسئله موردنظر توصیف خواهد شد. بخش چهارم به ارائه مدل می‌پردازد. بخش پنجم به حل

از بین فعالیت‌های زنجیره تأمین، تدارک مواد و ملزوماتی که برای تولید کالا یا ارائه خدمات در سازمان موردنیازند، اهمیت ویژه‌ای دارد. صاحب‌نظران معتقدند که ۶۰ تا ۸۰ درصد زمان و هزینه‌های صرف شده در فرایند تولید، مربوط به تأمین اجزا و قطعات موردنیاز است. به همین جهت بخش خرید و تدارکات زنجیره تأمین دارای نقش کلیدی در کارایی و اثربخشی سازمان است و می‌تواند تأثیر مستقیمی روی کاهش هزینه‌ها، سودآوری و انعطاف‌پذیری سازمان داشته باشد. از طرفی شرایط رقابتی تولید کالا در جهان، الزامات قانونی و حساسیت‌های زیست‌محیطی، سازمان‌ها را مسئول جمع‌آوری محصولات برگشت‌خورده‌ی خودکرده است تا به احیا، بازیافت و یا انهدام این محصولات به منظور حفظ محیط‌زیست اقدام ورزند. بسیاری از شرکت‌ها دریافتند که تداخل فعالیت‌های لجستیک معکوس در زنجیره‌ی تأمین نه فقط موجب کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی می‌گردد؛ بلکه زمینه را برای کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری از طریق ارائه‌ی خدمات و محصولات جدیدی که از محصولات بازیافتی به دست می‌آیند، فراهم می‌کند. به همین جهت در دهه‌های گذشته، زنجیره‌ی تأمین حلقه بسته^۱ موضوع مهمی در مدیریت زنجیره‌ی تأمین و تحقیق در عملیات به شمار آمده و توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است.

زنجیره‌ی تأمین حلقه بسته، فرآیند زوجی زنجیره‌ی تأمین روبه‌جلو به همراه فرآیندهای لجستیک معکوس^۲ است که بهبود محصولات، بازسازی محصولات، جداسازی قطعات و استفاده از قطعات را در نظر می‌گیرد؛ هدف نهایی، به دست آوردن ارزش محصولات در حال مصرف یا مصرف‌شده توسط مشتریان است؛ ضمن آن‌که با استفاده از این روش تأثیرات مخرب زیست‌محیطی در کل زنجیره‌ی تأمین کاهش می‌یابد. علاوه بر آن انرژی تأثیر به سزایی در آلودگی‌های زیست‌محیطی دارد، بنابراین کاهش مصرف سوخت در این

بهبودسازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل و نقل

مشتری انجام می‌دهد. همچنین عبارت "زنجیره تأمین سبز" اولین بار توسط کنسرسیون تحقیقات تولید دانشگاه میچگان در سال ۱۹۹۶ به منظور مطالعه‌ی اثرات زیست‌محیطی و بهبودسازی منابع تولید زنجیره تأمین پیشنهاد داده شد. در ادبیات موضوع، معنای زنجیره تأمین سبز با توجه به درک هر نویسنده از خرید سبز تا یکپارچگی کل زنجیره‌ی تأمین متفاوت خواهد بود. بیمون (۱۹۹۹)، زنجیره تأمین سبز را به‌عنوان زنجیره تأمین سستی توسعه‌یافته که شامل فعالیت‌هایی باهدف حداقل کردن تأثیرات زیست‌محیطی در طول کل چرخه‌ی عمر محصول مانند؛ طراحی متناسب با محیط‌زیست، تأمین منابع به مقدار کافی، کاهش مواد خطرناک و استفاده مجدد و بازیافت محصولات است، یاد می‌کند.

جمشیدی و بویرحسینی (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان توسعه‌ی یک مدل ریاضی مکانیابی تسهیلات زنجیره‌ی تأمین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن اثر یادگیری به بررسی زنجیره تأمین حلقه بسته سبز پرداختند در این پژوهش با اضافه نمودن مباحث نمودار یادگیری در دو بخش تولید و بازیافت، زمان و هزینه های ساخت و بازیافت محصول را کاهش داده و اثر استفاده از این نمودار را بر روی کاهش هزینه های زنجیره تأمین مورد مطالعه قرار دادند. برای حل مدل دو هدفه و نشان دادن موازنه بین اهداف از روش محدودیت اپسیلون استفاده شده است. و سپس با استفاده از مثال عددی و تحلیل حساسیت، کاربردی بودن مدل را به اثبات رساندند.

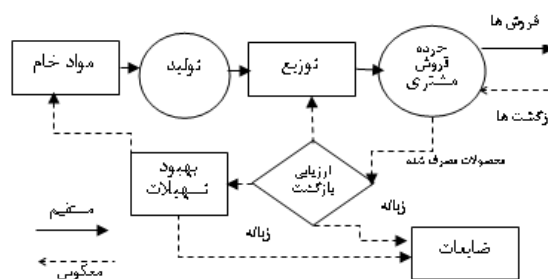
فخرزاده و همکاران (۱۳۹۸) یک مدل زنجیره تأمین حلقه-بسته سبز در حالت چند دوره ای، چندسطحی و چندمحصولی تحت عدم قطعیت را ارائه نمودند که اهداف آن شامل کمینه سازی هزینه های شبکه زنجیره تأمین، کمینه سازی انتشار گازهای خروجی حاصل از جابه جایی وسیله نقلیه در بین مراکز و حداکثرسازی قابلیت اطمینان تحویل تقاضا با توجه به قابلیت اطمینان تعریف شده برای تأمین کنندگان میباشد. مدلسازی با استفاده از برنامه ریزی خطی عددصحیح مختلط

مسئله و بالاخره بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها آتی اختصاص دارد.

۲. ادبیات پژوهش

ملاحظات زیست‌محیطی و قوانین و مقررات دولتی باعث شده است تا توجه سازمان‌ها و نهاد بیش‌ازپیش به مباحث زیست‌محیطی جلب گردد. یکی از موارد بسیار مهم در این زمینه توجه به مسئله بازیافت مواد است که به‌صورت زنجیره تأمین حلقه بسته یا معکوس نمایان شده است. سازمان‌هایی که از این موضوع استفاده می‌کنند نسبت به هم‌تایان خود در موقعیت رقابتی بهتری قرار گرفته‌اند و همچنین بر سوددهی آن‌ها نیز اثرات مثبتی مشاهده شده است.

اگر جریان مستقیم و معکوس در زنجیره‌ی تأمین را به‌صورت هم‌زمان در نظر بگیریم یک زنجیره تأمین حلقه بسته خواهیم داشت. مدل عمومی زنجیره تأمین حلقه بسته در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱. مدل عمومی زنجیره تأمین حلقه بسته (تونانوت و

همکاران، ۲۰۰۸)

با توجه به تعریف اخیر از زنجیره تأمین حلقه بسته، باید تعاریف بهتری از زنجیره تأمین حلقه بسته براساس احتیاجات کنونی ارائه شود. شورای حرفه‌ای مدیریت زنجیره تأمین^۴ (CSCMP, n.d)، زنجیره تأمین حلقه بسته را به این صورت تعریف می‌کند، قسمتی از مدیریت زنجیره‌ی تأمین که برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل کارآمد و مؤثر جریان روبه‌جلو و معکوس، ذخیره‌ی کالاها و خدمات و اطلاعات مرتبط بین نقطه‌ی مبدأ و نقطه‌ی مصرف را برای پاسخگویی به نیازهای

پرداختند. آن‌ها قیمت، کیفیت و مدیریت بازتولید را به‌عنوان متغیرهای کلیدی خود در تحقیق در نظر گرفتند. از دیگر تحقیقاتی که در زنجیره‌های تأمین حلقه بسته مسئله قیمت‌گذاری محصول را مورد مطالعه قرار داده‌اند می‌توان به تحقیقاتی مانند تحقیق طالعی زاده و همکاران (۲۰۱۸) و قمی آویلی و همکاران (۲۰۱۸) اشاره نمود. دیگر تحقیقی که به بررسی و بهینه‌سازی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت تقاضا پرداخته است، تحقیق حدادی سی سخت و رایان (۲۰۱۸) می‌باشد. آن‌ها هم‌چنین نرخ مالیات بر کربن را به‌عنوان عاملی غیرقطعی در نظر گرفتند و به مطالعه زنجیره حلقه بسته با حمل‌ونقل چندحالتی پرداختند. از دیگر تحقیقاتی که به بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن فاکتورهای محیط زیستی پرداخته است می‌توان به تحقیق فتح‌اللهی فرد و حاجی آقایی (۲۰۱۸) اشاره کرد.

محتشمی و همکاران (۲۰۲۰)، در مقاله ای با عنوان طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با استفاده از سیستم صف بندی جهت کاهش اثرات زیست محیطی و مصرف انرژی، به بررسی یک زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن لجستیک مستقیم و معکوس برای بهینه سازی زمان حمل و نقل و انتظار شبکه ناوگان حمل و نقل پرداختند. این شبکه شامل تأمین کننده، سیستم تولید، مرکز توزیع، مرکز تعمیرات، مرکز بازیافت، مرکز دفع و مرکز جمع آوری محصولات برگشتی می باشد. در این پژوهش از یک مدل دو هدفه که دارای چهار سطح برای جریان رو به جلو و چهار سطح برای جریان معکوس استفاده شده است و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک به حل مدل پرداختند.

حسینی و همکاران (۲۰۲۱)، در مقاله ای به طراحی یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه سبز و انعطاف‌پذیر برای شبکه زنجیره تأمین با استفاده از الگوریتم تکاملی قدرت پارتو پرداختند. نتایج محاسباتی نشان داد که ساختار شبکه زنجیره تأمین جهانی

انجام شده و از رویکرد دو مرحله ای قطعی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل پیشنهادی استفاده شده است. حاجیان و همکاران (۱۳۹۸) در مقاله خود صورت جدیدی از مساله مکانیابی-مسیریابی-موجودی را در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای محصولات فاسد شدنی با تأکید بر ملاحظات زیست محیطی ارائه نمودند به این صورت که همزمان مجموع هزینه های سیستم، مجموع حداکثر زمان حمل و نقل و انتشار آلاینده ها در کل شبکه کمینه شود آن ها برای حل مدل خود از رویکرد الگوریتم ژنتیک بهره گرفتند که نتایج حاصل نشان از کارایی مناسب این الگوریتم دارد.

شفيعی و همکاران (۱۴۰۰) در مقاله خود به بهینه‌سازی چندهدفه مسیریابی حرکت خودرو تحت شرایط عدم قطعیت با تأکید بر اقدامات سبز-ناب و رضایت مشتری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب نسخه-۲ و بهینه‌سازی ازدحام ذرات در شرایط قطعی و عدم قطعیت پرداختند. در پایان این الگوریتم‌ها با معیارهای ارزیابی عملکرد همچون زمان اجرا و کیفیت جواب‌ها با یکدیگر مقایسه شده و الگوریتم برتر در هر معیار مشخص گردید نتایج حاصل حاکی از کارایی مدل پیشنهادی و برتری استفاده از روش تحلیل استوار نسبت به قطعی هست.

سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷)، یک زنجیره تأمین حلقه بسته شامل؛ تأمین‌کننده، تولیدکننده، مراکز توزیع، مشتریان، مراکز انبار کالا، مراکز بازگشت و بازیافت را در نظر گرفتند. مسئله موردبررسی سه انتخاب راجع به بازیافت بانام‌های؛ بازیافت محصول، بازیافت اجزای محصول و بازیافت مواد خام را داشت. آن‌ها در مدل چندهدفه و فازی اهداف زیست‌محیطی، بهینه‌سازی سود کل، کم کردن روزهای بیکاری، حداکثر کردن سطح پاسخگویی به مشتری را در نظر گرفتند. برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک در سناریوهای مختلف استفاده شد. موادک و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی با استفاده از مدل بازی استکلبرگ به مطالعه زنجیره تأمین حلقه بسته دوسطحی

۳. روش‌شناسی پژوهش

شبکه‌ای که در این پژوهش استفاده شده، یک شبکه‌ی زنجیره‌تأمین حلقه بسته چند دوره‌ای و چندمحصولی است و می‌توان آن را در صناعی مثل بازیافت فلزات و مواد آهنی، کودهای عالی، کاغذ و زباله که قابلیت جمع‌آوری، بازیافت، انهدام، تولید و توزیع مجدد دارند بکار گرفت. در این شبکه مواد اولیه از تأمین‌کنندگان تأمین شده و وارد بخش تولید می‌گردد. سپس کالاهای آماده شده وارد بخش توزیع می‌شود و از آن جا برای مشتریان ارسال می‌گردد. در جریان معکوس زنجیره‌تأمین حلقه بسته، کالاهای بازگشتی از سمت مشتریان به محل جمع‌آوری انتقال می‌یابد. در آنجا کالاها دسته‌بندی شده و کالاهایی که از سطح مطلوبی از کیفیت برخوردارند، به‌عنوان کالای دست‌دوم وارد مراکز توزیع می‌شوند و کالاهایی که نیاز به تولید مجدد دارند، جهت ساخت مجدد وارد مراکز تولید می‌شوند، کالاهایی که نیازمند بازیابی هستند وارد مراکز بازیافت شده و مواد اولیه مراکز تولید را فراهم می‌کنند و کالاهایی هم که جزء هیچ‌کدام از دسته‌های مربوطه نیستند، وارد مراکز دفن و انهدام می‌شوند تا از محیط‌زیست به طرز مناسبی خارج شوند چون کالاها در چرخه‌ی لجستیک معکوس، به چرخه‌ی لجستیک مستقیم وارد می‌شوند، لذا شبکه یک شبکه‌ی حلقه بسته خواهد بود.

این پژوهش در پی کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه است. هزینه‌ی موردنظر در این پژوهش تنها هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل کالا، بین نقاط مختلف زنجیره‌ی تأمین است. اهداف این پژوهش بهینه‌سازی میزان انرژی که در اثر حمل کالا به نقاط مختلف زنجیره‌ی تأمین مصرف می‌شود، هزینه‌ی حمل‌ونقل، حداقل نمودن میزان ضایعاتی که به مراکز دفن و انهدام آورده می‌شود و همچنین حداقل نمودن میزان گاز کربن‌دی‌اکسید انتشار یافته از حمل‌ونقل است. الگوی زنجیره تأمین حلقه بسته در شکل ۲ نشان داده شده است.

پیشنهادی می‌تواند به تقاضای مشتریان جهانی خود به صورت سریع و همچنین سبز پاسخ دهد. براساس این نتایج، اهمیت چابکی SC با افزایش بودجه عدم قطعیت برجسته می‌شود، و برخی از استراتژی‌های شناخته‌شده کاهش در تضاد با پارادایم تولید چابک هستند.

کوآد و همکاران (۲۰۲۲)، یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه برای زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با وسایل ناهمگن طراحی نمودند که هدف آن بیشینه کردن سود زنجیره تأمین و کمینه کردن میزان انتشار کربن با توجه به سناریوهای مختلف است. که در آن یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه (MILP) برای GCLSC با در نظر گرفتن هزینه نامشخص و عدم قطعیت انتشار کربن حل شد.

گنو و همکاران (۲۰۲۲)، در مقاله ای با عنوان یک مدل برنامه‌نویسی قوی فازی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار با بهینه‌سازی چند هدفه بازده گرا به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار (SCLSC) با هدف حداقل هزینه کل، کاهش آسیب زیست محیطی و حداکثر مسئولیت اجتماعی پرداختند و به منظور مقابله با عدم قطعیت ناشی از محیط کسب و کار پویا، از یک رویکرد برنامه نویسی قوی فازی (FRP) و یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر کارایی استفاده کردند، با روش پیشنهادی، تصمیم‌گیرندگان نه تنها توانستند مجموعه ای از طرح های کارآمد را به دست آورند، بلکه توانستند طرح بهینه با بهترین عملکرد پایداری را نیز تعیین کنند.

جنبه‌ی نوآوری تحقیق برقراری توابع هدف چندگانه اختصاصی در حوزه‌ی مدیریت انرژی مبتنی بر حمل و نقل می‌باشد که یک مدل بهینه‌سازی برای زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با چهار هدف بهینه‌سازی کربن‌دی‌اکسید، هزینه حمل‌ونقل، انرژی و ضایعات طراحی شده است و مدل مربوطه توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید حل گردیده و در نهایت به مقایسه دو الگوریتم پرداخته شد.

۵. تعداد و محل قرارگیری تأمین‌کننده، تولیدکننده،

توزیع‌کننده و مشتریان ثابت و از قبل مشخص است.

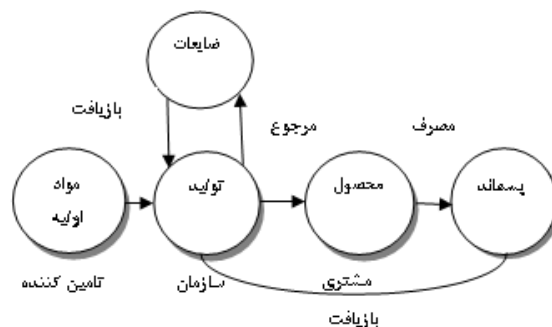
۶. تعداد و محل مراکز بازیافت، جمع‌آوری و دفن و انهدام نامشخص است و حداقل یکی از مراکز جمع‌آوری، بازیافت و دفن و انهدام باید باز باشد.

۷. محصولات واردشده در مراکز در هر دوره زمانی در همان دوره از مرکز مربوطه خارج می‌شوند و وارد دوره بعدی نمی‌شوند.

۸. مشتریان محصولات نو و دست‌دوم را یکسان فرض می‌کنیم.

۳-۲ شاخص‌ها و پارامترهای مدل

قبل از طراحی مدل شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله در جدول ۱ معرفی شده است.



شکل ۲. الگوی زنجیره تأمین حلقه بسته

۳-۱ مفروضات مدل

مفروضات مدل به شرح زیر می‌باشد.

۱. ظرفیت تسهیلات محدود است.

۲. تأمین‌کنندگان مواد اولیه خارجی هستند.

۳. مسئله‌ی موردنظر چندمحصولی است و در طی دوره‌های زمانی مختلف موردبررسی قرار می‌گیرد.

۴. به تمامی مشتریان پاسخ‌داده‌شده و تمام کالاهای مرجوعی جمع‌آوری می‌شوند.

جدول ۱. جدول شاخص‌ها، پارامترها، متغیرها

شاخص‌ها	
مجموعه تأمین‌کنندگان	$i \in \{0, \dots, I\}$
مجموعه تولیدکنندگان	$j \in \{0, \dots, J\}$
مجموعه توزیع‌کنندگان	$k \in \{0, \dots, K\}$
مجموعه مشتریان	$l \in \{0, \dots, L\}$
مراکز جمع‌آوری	$m \in \{0, \dots, M\}$
مراکز دفن زیاله	$n \in \{0, \dots, N\}$
مراکز بازیافت	$r \in \{0, \dots, R\}$
مجموعه‌ی محصولات	$x \in \{0, \dots, X\}$
مجموعه‌ی دوره‌های زمان	$t \in \{0, \dots, T\}$
پارامترها	
مقدار تقاضای مشتری l برای محصول x در دوره‌ی t	\bar{Q}_l^{xt}
مقدار بازگشت محصول x در دوره‌ی t توسط مشتری l	W_l^{pt}
نرخ ارز	$t\bar{\epsilon}$
نرخ برگشتی محصول x توسط مشتری l به مرکز جمع‌آوری m	Emx

بهبودسازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل و نقل

نرخ برگشتی محصول X از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تولید j	R_{jx}
نرخ برگشتی محصول X از مرکز جمع‌آوری m به مرکز بازیافت r	Tr_x
نرخ برگشتی محصول X از مرکز جمع‌آوری m به مرکز توزیع k	Zk_x
نرخ برگشتی محصول X از مرکز جمع‌آوری m به مرکز دفن و انهدام n	An_x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به مراکز دفن زیاله n	C_{mn}^x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز بازیافت r به تولیدکننده‌ی j	C_{rj}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از تأمین‌کننده‌ی i به تولیدکننده‌ی j	E_{ij}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از تولیدکننده‌ی j به توزیع‌کننده‌ی k	E_{jk}^x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از تأمین‌کننده‌ی i به تولیدکننده‌ی j	C_{ij}^x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از تولیدکننده‌ی j به توزیع‌کننده‌ی k	C_{jk}^x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از توزیع‌کننده‌ی k به مشتری l	C_{kl}^x
نرخ برگشتی محصول X از مرکز جمع‌آوری m به مرکز بازیافت r	Tr_x
نرخ برگشتی محصول X از مرکز جمع‌آوری m به مرکز توزیع k	Zk_x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از مشتری l به مراکز جمع‌آوری m	C_{lm}^x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به تولیدکننده‌ی j	C_{mj}^x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به توزیع‌کننده‌ی k	C_{mk}^x
هزینه‌ی جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به مراکز بازیافت r	C_{mr}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از توزیع‌کننده‌ی k به مشتری l	E_{kl}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مشتری l به مراکز جمع‌آوری m	E_{lm}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به تولیدکننده‌ی j	E_{mj}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به توزیع‌کننده‌ی k	E_{mk}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به مراکز بازیافت r	E_{mr}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز بازیافت r به تولیدکننده‌ی j	E_{rj}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به مراکز دفن زیاله n	E_{mn}^x
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزادشده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از تولیدکننده‌ی j به توزیع‌کننده‌ی k	M_{jk}^x
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزادشده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از توزیع‌کننده‌ی k به مشتری l	M_{kl}^x
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزادشده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مشتری l به مراکز جمع‌آوری m	M_{lm}^x
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزادشده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به تولیدکننده‌ی j	M_{mj}^x
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزادشده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به توزیع‌کننده‌ی k	M_{mk}^x
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزادشده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به مراکز بازیافت r	M_{mr}^x
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزادشده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز دفن زیاله n	M_{nn}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به توزیع‌کننده‌ی k	E_{mk}^x
مقدار انرژی مصرف‌شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از توزیع‌کننده‌ی k به مشتری l	E_{kl}^x

مقدار انرژی مصرف شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به مراکز بازیافت r	E_{mr}^x
مقدار انرژی مصرف شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز بازیافت r به تولیدکننده j	E_{rj}^x
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزاد شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز بازیافت r به تولیدکننده j	M_{rj}^x
ظرفیت مرکز تأمین i	$C a_i$
ظرفیت مرکز تولید j	$C a_j$
ظرفیت مرکز توزیع k	$C a_k$
مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید آزاد شده در اثر جابه‌جایی هر واحد محصول X از مراکز جمع‌آوری m به مراکز بازیافت r	M_{mr}^x
ظرفیت مرکز جمع‌آوری m	$C a_m$
ظرفیت مرکز بازیافت r	$C a_r$
ظرفیت ساخت مجدد محصولات رسیده از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تولید j	Car_{1j}
ظرفیت ساخت مجدد محصولات رسیده از مرکز بازیافت r به مرکز تولید j	Car_{2j}
ظرفیت محصولات مرجوعی در مرکز توزیع k	Car_k
احتمال وقوع سناریوی s	P_s
میزان عدم تأمین تقاضا تحت سناریوی s در دوره t	δ_{sQt}
مقدار محصول X که از تأمین‌کننده i به تولیدکننده j در دوره t انتقال می‌یابد.	V_{ij}^{xt}
مقدار محصول X که از تولیدکننده j به توزیع‌کننده k در دوره t انتقال می‌یابد.	V_{jk}^{xt}
مقدار محصول X که از مشتری l به مرکز جمع‌آوری m در دوره t انتقال می‌یابد.	V_{lm}^{xt}
مقدار محصول X که از مرکز جمع‌آوری m به تولیدکننده j در دوره t انتقال می‌یابد.	V_{mj}^{xt}
مقدار محصول X که از مرکز جمع‌آوری m به توزیع‌کننده k در دوره t انتقال می‌یابد.	V_{mk}^{xt}
مقدار محصول X که از مرکز جمع‌آوری m به مراکز بازیافت r در دوره t انتقال می‌یابد.	V_{mr}^{xt}
مقدار محصول X که از مراکز بازیافت r به تولیدکننده j در دوره t انتقال می‌یابد.	V_{rj}^{xt}
اگر مرکز جمع‌آوری m ساخته شود مساوی یک، در غیر این صورت صفر خواهد بود.	Y_m
اگر مرکز دفن و انهدام n ساخته شود مساوی یک، در غیر این صورت صفر خواهد بود.	Y_n
اگر مرکز جمع‌آوری r ساخته شود مساوی یک، در غیر این صورت صفر خواهد بود.	Y_r
اگر مرکز جمع‌آوری k ساخته شود مساوی یک، در غیر این صورت صفر خواهد بود.	Y_k

۴. روش تحقیق پیشنهادی مسئله

در این قسمت مدل مسئله تعریف می‌شود، ابتدا توابع هدف مشخص می‌گردد و در ادامه نیز محدودیت‌های مسئله با توجه به مفروضات طراحی می‌شود.

Object to:

$$\begin{aligned} \text{Minz1: } & \sum_i \sum_j \sum_x \sum_t C_{ij}^{xt} V_{ij}^{xt} * \tilde{e}x_t + \\ & \sum_j \sum_k \sum_x \sum_t C_{jk}^{xt} V_{jk}^{xt} + \sum_k \sum_l \sum_x \sum_t C_{kl}^{xt} V_{kl}^{xt} + \\ & \sum_i \sum_m \sum_x \sum_t C_{im}^{xt} V_{im}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_n \sum_x \sum_t C_{mn}^{xt} V_{mn}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_j \sum_x \sum_t C_{mj}^{xt} V_{mj}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_k \sum_x \sum_t C_{mk}^{xt} V_{mk}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_r \sum_x \sum_t C_{mr}^{xt} V_{mr}^{xt} + \sum_r \sum_j \sum_x \sum_t C_{rj}^{xt} V_{rj}^{xt} \end{aligned} \quad (1)$$

و تابع هدف چهارم میزان ضایعاتی که جمع‌آوری می‌شود را حداقل می‌کند.

$$\text{St:} \quad \sum_k V_{kl}^{xt} \geq Q_l^{xt} \quad \forall x \in X, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (5)$$

این محدودیت تضمین می‌کند که تقاضای مشتریان پاسخ داده می‌شود.

$$\sum_m V_{lm}^{xt} = W_l^{xt} \quad \forall x \in X, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (6)$$

این محدودیت تضمین می‌کند که در جریان برگشتی تمام کالاهای مرجوعی جمع‌آوری شده و به محل جمع‌آوری منتقل شود.

$$\sum_j V_{mj}^{xt} = R_j \sum_l V_{lm}^{xt} \quad \forall x \in X, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_k V_{mk}^{xt} = Z_k \sum_l V_{lm}^{xt} \quad \forall x \in X, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_r V_{mr}^{xt} = Tr_x \sum_l V_{lm}^{xt} \quad \forall x \in X, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_n V_{mn}^{xt} = An_x \sum_l V_{lm}^{xt} \quad \forall x \in X, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (10)$$

این چهار محدودیت تضمین می‌کند که مجموع کالاهایی که به مرکز جمع‌آوری m وارد می‌شود با جریان کالایی که از آن خارج می‌شود برابر است.

$$\begin{aligned} & \sum_i V_{ij}^{xt} + \sum_m V_{mj}^{xt} \\ & + \sum_r V_{rj}^{xt} = \sum_k V_{jk}^{xt} \quad \forall x \in X, \forall j \in J, \forall t \in T \end{aligned} \quad (11)$$

تابع هدف اول نشان‌دهنده‌ی حداقل سازی هزینه‌های حمل‌ونقل در جریان زنجیره‌ی تأمین حلقه بسته است.

$$\begin{aligned} \text{Minz2: } & \sum_i \sum_j \sum_x \sum_t E_{ij}^{xt} V_{ij}^{xt} + \\ & \sum_j \sum_k \sum_x \sum_t E_{jk}^{xt} V_{jk}^{xt} + \\ & \sum_k \sum_l \sum_x \sum_t E_{kl}^{xt} V_{kl}^{xt} + \sum_l \sum_m \sum_x \sum_t E_{lm}^{xt} V_{lm}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_n \sum_x \sum_t E_{mn}^{xt} V_{mn}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_j \sum_x \sum_t E_{mj}^{xt} V_{mj}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_k \sum_x \sum_t E_{mk}^{xt} V_{mk}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_r \sum_x \sum_t E_{mr}^{xt} V_{mr}^{xt} + \\ & \sum_r \sum_j \sum_x \sum_t E_{rj}^{xt} V_{rj}^{xt} \end{aligned} \quad (2)$$

تابع هدف دوم نشان‌دهنده‌ی حداقل سازی انرژی مصرف‌شده در اثر حمل‌ونقل و جابه‌جایی کالا در جریان زنجیره تأمین حلقه بسته است.

$$\begin{aligned} \text{Minz3: } & \sum_i \sum_j \sum_x \sum_t M_{ij}^{xt} V_{ij}^{xt} + \\ & \sum_j \sum_k \sum_x \sum_t M_{jk}^{xt} V_{jk}^{xt} + \\ & \sum_k \sum_l \sum_x \sum_t M_{kl}^{xt} V_{kl}^{xt} + \sum_l \sum_m \sum_x \sum_t M_{lm}^{xt} V_{lm}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_n \sum_x \sum_t M_{mn}^{xt} V_{mn}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_j \sum_x \sum_t M_{mj}^{xt} V_{mj}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_k \sum_x \sum_t M_{mk}^{xt} V_{mk}^{xt} + \\ & \sum_m \sum_r \sum_x \sum_t M_{mr}^{xt} V_{mr}^{xt} + \\ & \sum_r \sum_j \sum_x \sum_t M_{rj}^{xt} V_{rj}^{xt} \end{aligned} \quad (3)$$

این تابع هدف مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید انتشاریافته در اثر حمل‌ونقل کالا در جریان زنجیره تأمین حلقه بسته را بهینه‌سازی می‌کند.

$$\text{Minz4: } \sum_m \sum_n \sum_x \sum_t V_{mn}^{xt} \quad (4)$$

مرکز بازیافت به مرکز تولیدکننده و از مرکز جمع‌آوری به مرکز توزیع ارسال می‌شوند را نشان می‌دهند.

$$\sum_k Y_k \geq 1 \quad (23)$$

$$\sum_m Y_m \geq 1 \quad (24)$$

$$\sum_n Y_n \geq 1 \quad (25)$$

$$\sum_r Y_r \geq 1 \quad (26)$$

این چهار محدودیت تضمین می‌کنند که حداقل یکی از مراکز توزیع، جمع‌آوری، دفن و انهدام و بازیافت باز باشند.

$$R_{jx} + Z_{kx} + Tr_x + An_x = 1 \quad (27)$$

این محدودیت نشان می‌دهد که مجموع ضرایب محصولات برگشتی برابر با یک است.

$$Y_m, Y_k, Y_n, Y_r \in (0,1) \quad (28)$$

$$V_{ij}^{xt}, V_{jk}^{xt}, V_{kl}^{xt}, V_{lm}^{xt}, V_{mj}^{xt} \quad (29)$$

$$, V_{mk}^{xt}, V_{mr}^{xt}, V_{mn}^{xt} \geq 0$$

این دو محدودیت نوع متغیرهای مسئله را مشخص می‌کند.

۴-۱ روش حل

در قسمت قبل مدل بهینه‌سازی چندهدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل‌ونقل نشان داده شد. شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی در این پژوهش در دسته‌ی NP-hard قرار دارد که برای حل آن نمی‌توان از روش‌های دقیق استفاده کرد؛ با توجه به تنوع الگوریتم‌های تکاملی پس از بررسی کامل ادبیات موضوع الگوریتم‌های موجود و روش حل محاسباتی آن‌ها و همچنین با در نظر گرفتن ویژگی‌های مساله مورد مطالعه و مورد توجه قرار دادن الگوریتم‌های توسعه یافته برای این مساله، الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید به دلیل سرعت همگرایی بالا انعطاف‌پذیری بهتر در برابر مشکل بهینه محلی و راحتی پیاده‌سازی و اجرای آن انتخاب شدند، قبل از حل مدل به وسیله‌ی الگوریتم‌های فرا ابتکاری، مساله به یک مدل تک هدفه براساس روش وزن دهی به اهداف تبدیل شد، که با توجه به نظر خبرگان وزن تابع

این محدودیت نشان می‌دهد که کل کالاهای واردشده به تولیدکننده با جریان کالایی که از آن خارج می‌شود برابر است.

$$\sum_j V_{jk}^{xt} + \sum_m V_{mk}^{xt} = \sum_l V_{kl}^{xt} \quad \forall x \in X, \quad (12)$$

$$\forall k \in K, \forall t \in T$$

مقدار جریان کالایی که به توزیع‌کننده وارد می‌شود، برابر است با مقدار جریان کالایی که از آن خارج می‌شود.

$$\sum_m V_{mr}^{xt} = \sum_j V_{rj}^{xt} \quad \forall x \in X, \forall t \in T, \quad (13)$$

$$\forall t \in T$$

مقدار کالایی که به محل بازیافت وارد می‌شود برابر است با مقدار کالایی که از آن خارج می‌شود.

$$\sum_x \sum_j V_{ij}^{xt} \leq C a_i \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_x \sum_k V_{jk}^{xt} \leq C a_j \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_x \sum_l V_{kl}^{xt} \leq C a_k Y_k \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_x \sum_j V_{mj}^{xt} R_{jx} + \sum_x \sum_k V_{mk}^{xt} Z_{kx} + \sum_x \sum_r V_{mr}^{xt} Tr_x + \sum_x \sum_n V_{mn}^{xt} An_x \leq C a_m Y_m \quad (17)$$

$$\forall m \in M, \forall t \in T$$

$$\sum_x \sum_m V_{mr}^{xt} \leq C a_r Y_r \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_x \sum_m V_{mn}^{xt} \leq C a_n Y_n \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (19)$$

محدودیت‌های ۱۹-۱۴ به ترتیب مربوط به محدودیت ظرفیت مراکز تأمین‌کننده، توزیع‌کننده، تولیدکننده، مراکز جمع‌آوری، مرکز بازیافت و مرکز دفن و انهدام است.

$$\sum_x \sum_m V_{mj}^{xt} \leq C a_{r1j} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (20)$$

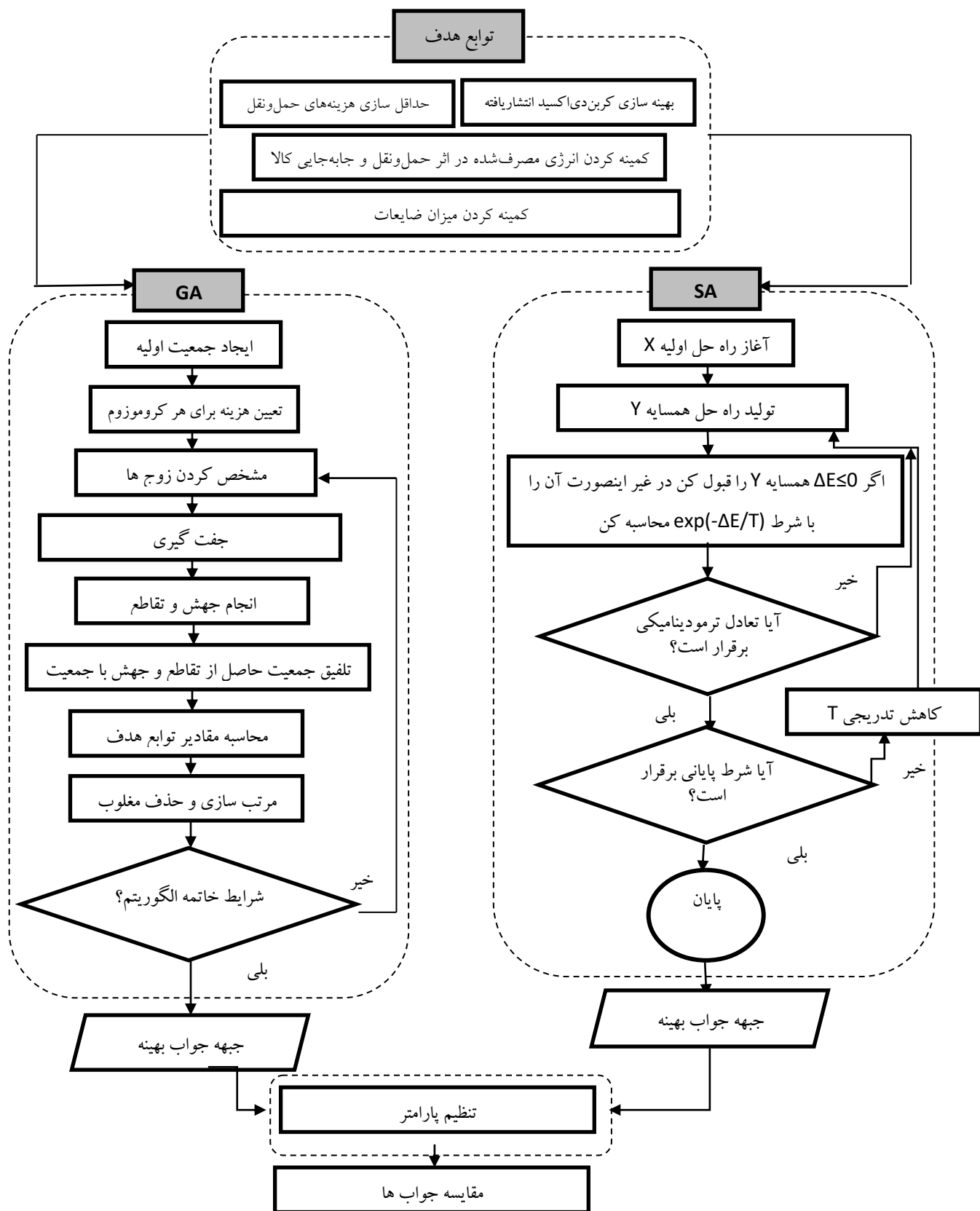
$$\sum_x \sum_r V_{rj}^{xt} \leq C a_{r2j} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (21)$$

$$\sum_x \sum_m V_{mk}^{xt} \leq C a_k Y_k \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (22)$$

محدودیت‌های ۲۲-۲۰ به ترتیب محدودیت ظرفیت برای کالاهای مرجوعی که از مرکز جمع‌آوری به مرکز تولیدکننده، از

بهبودسازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل و نقل

هدف هزینه ۰,۴، تابع هدف انرژی ۰,۲۵، تابع هدف کربن دی اکسید ۰,۱ و وزن تابع هدف ضایعات ۰,۱ مشخص شده است. در نمودار شماره ۱ مراحل اجرای پژوهش مشخص گردیده است.



نمودار ۱. مراحل اجرای پژوهش

بهینه‌سازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل و نقل

۴-۲ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک جزو دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصادفی قرار دارد. این الگوریتم، به‌طور خاصی برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده با فضای جستجوی ناشناخته مناسب است. در واقع این الگوریتم فرا ابتکاری از یک الگوریتم تکاملی منتج می‌شود که با روش‌های جستجو ادغام شده است تا در نهایت نتایج به‌دست آمده کیفیت خوبی داشته باشند. اصولاً الگوریتم‌های فرا ابتکاری از رخدادهای طبیعی الهام می‌گیرند و به دنبال جواب‌های نزدیک به بهینه بازمانی متناسب حرکت می‌کنند. الگوریتم ژنتیک نیز از همین اصول استفاده کرده است، به‌طوری‌که ایده اولیه شکل‌گیری آن از نظریه داروین بوده و بر پایه قانون ژنتیک کار می‌کند.

رجینبرگ^۶ در سال ۱۹۶۰ توانست برای این الگوریتم محاسبات تکاملی تری را ارائه دهد؛ اما طراحی گام‌های اولیه برای الگوریتم ژنتیک در دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۶۲ توسط هلند^۶ و همکارانش انجام شد. در یک نگاه کلی، الگوریتم ژنتیک به‌وسیله‌ی یک مجموعه جواب که به شکل کروموزوم به نمایش درمی‌آید، شروع می‌شود. این مجموعه را جمعیت اولیه می‌گویند. جمعیت‌های بعدی با استفاده از جواب‌های جمعیت قبلی خود به دست می‌آیند. فرآیند انتخاب برای به دست آوردن جمعیت جدید از بین جمعیت گذشته توسط تابع برازندگی و تعیین مقدار مطلوبیت آن‌ها شکل می‌گیرد. در نتیجه جواب‌هایی برای ادامه انتخاب می‌شوند که مطلوبیت بهتری نسبت به بقیه داشته باشند. این روند همین‌طور ادامه پیدا می‌کند تا شرایطی که از قبل مشخص شده است، حاصل شود.

۴-۲-۱ نحوه‌ی نمایش کروموزوم‌ها

تعداد نه کروموزوم با ساختار چهاربعدی، برای جابجایی جریان محصولات از یک مرکز به مرکز دیگر کدگذاری شده‌اند. در این ساختار هر کدام از کروموزوم‌ها مقدار محصول جابجا شده بین مراکز را در دوره‌ی موردنظر نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال (۱،۵،۲،۴) این کروموزوم نشان می‌دهد که چه مقدار از

محصول ۵ از مرکز تأمین ۴ به مرکز تولید ۲ در دوره‌ی اول جابجا شده است. برای تولید کروموزوم‌های اولیه این ساختار چهاربعدی به‌صورت تصادفی با اعداد صفر و یک پر می‌شود.

۴-۲-۲ ارزیابی کروموزوم‌ها

برای ارزیابی کروموزوم‌ها، ابتدا اعداد تصادفی ایجاد شده باید به اعداد قابل‌استفاده برای الگوریتم تبدیل شوند. برای این هدف، اعداد تصادفی به مقادیری تبدیل می‌شوند که نشان‌دهنده مقدار جریان حمل کالا در هر دوره برای هر محصول است. بعد از تشکیل این داده‌ها، ارزیابی آن‌ها به‌وسیله‌ی تابع هزینه انجام می‌شود.

۴-۲-۳ استراتژی انتخاب

انتخاب در الگوریتم ژنتیک به این معنی است که تصمیم بگیریم چگونه در هر نسل پدر مادر برای تولید نسل بعدی انتخاب شوند. هدف انتخاب در واقع انتخاب افراد شایسته است که به دنبال آن کودکانی بهتر از نسل قبل تولید شوند. رویکردهای مختلفی برای انتخاب وجود دارد. در این الگوریتم ژنتیک رویکرد انتخاب استفاده از چرخه‌ی رولت می‌باشد.

۴-۲-۴ عملگر تقاطع

در عملگر تقاطع دو والد باهم ترکیب شده و دو فرزند ایجاد می‌کنند. در این الگوریتم ژنتیک از عملگر تقاطع حسابی^۷ استفاده شده است. عملگر تقاطع حسابی به‌صورت معادله‌ی (۳۰) و (۳۱) است:

$$\text{والد دوم} \times (1-a) + \text{والد اول} \times a = \text{فرزند اول} \quad (30)$$

$$\text{والد دوم} \times a + \text{والد اول} \times (1-a) = \text{فرزند دوم} \quad (31)$$

به این صورت که a یک عدد تصادفی است که قبل از انجام تقاطع انتخاب می‌شود.

به‌عنوان مثال فرض می‌کنیم که دو والد زیر با $a=0,7$ با یکدیگر عمل تقاطع انجام می‌دهند.

$$(0,5) \times (0,1) + (0,5) \times (0,5) = \text{والد دوم}$$

$$(0,3) \times (0,5) + (0,4) \times (0,1) = \text{والد اول}$$

در نتیجه‌ی عملگر تقاطع حسابی دو فرزند زیر حاصل می‌شود.

(۶,۶۸) (۰,۱۷)(۲,۳۳)(۰,۳۶) = فرزند اول

(۶,۸۴۲)(۰,۱۴۹)(۲,۹۸۱)(۰,۴۰۳) = فرزند دوم

۴-۲-۵ عملگر جهش

برای جلوگیری از همگرایی زودرس بعد از انجام عمل تقاطع بعضی فرزندان باید دستخوش تغییر گردند. جهش نیز همانند عملگر تقاطع، امکان جستجو در یک فضای جدید در الگوریتم را به وجود می‌آورد. عملگر جهش انتخابی در این پژوهش روش جا دادن^۸ است به این صورت که یک ژن به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و در یک محل تصادفی قرار می‌گیرد.

در این پژوهش پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل نرخ تقاطع، ضریب جهش، میزان جمعیت بوسیله روش تاگوچی^۹ مشخص شده اند. روش تاگوچی پارامترها را به دو دسته ی پارامترهای قابل کنترل^{۱۰} و غیر قابل کنترل یا اغتشاشی تقسیم بندی می کند.

پارامترهای اغتشاشی^{۱۱} آنهایی هستند که بطور مستقیم قابل کنترل نیستند، چرا که حذف علائم اغتشاش اغلب کاری غیر ممکن و نشدنی است. روش تاگوچی راه حلی است که تاثیر اغتشاشات را به حداقل می رساند و تلاش می کند سطح بهینه ی پارامترها را مشخص کند. در این پژوهش، آزمایشات در سه سطح کم، متوسط و زیاد طراحی می شوند و شرط خاتمه برای الگوریتم ژنتیک تعداد ۴۰۰ آزمایش و الگوریتم شبیه سازی تبرید تعداد ۱۰۰۰ آزمایش در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مقادیر پارامترهای الگوریتم در سطوح مختلف توصیف شده است.

جدول ۲. سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم ژنتیک

	کم	متوسط	زیاد
پارامتر	۱	۲	۳
میزان جمعیت	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
ضریب تقاطع	۰,۵	۰,۷	۰,۸
ضریب جهش	۰,۱	۰,۲	۰,۳

۴-۳ الگوریتم شبیه سازی تبرید

مفهوم اصلی روش تبرید شبیه سازی شده از فرآیند فیزیکی تبرید فلزات مذاب سرچشمه می‌گیرد. در فرآیند تبرید، یک فلز مذاب با دمای بسیار بالا به تدریج خنک می‌شود. با کاهش تدریجی دما، حرکت اتم‌ها محدود می‌شود به طوری که اتم‌ها شروع به مرتب شدن نموده و تشکیل کریستال می‌دهند. سطح انرژی کریستال تشکیل شده به سرعت سرد کردن فلز بستگی دارد. اگر کاهش دما خیلی سریع صورت بگیرد، ممکن است ساختار کریستالی تشکیل نشده و به جای آن ساختاری غیر کریستالی با سطح انرژی بالا تشکیل شود. بنابراین برای رسیدن به کمترین میزان سطح انرژی، فرآیند سرد کردن باید به آرامی صورت گیرد. در زیر پارامترهای اصلی الگوریتم شبیه سازی تبرید بیان شده است.

۴-۳-۱ نمایش جواب

نمایش جواب اولیه همانند الگوریتم ژنتیک است.

۴-۳-۲ انتخاب جواب اولیه

جواب اولیه به صورت تصادفی اعدادی بین صفر و یک برای هر رشته انتخاب می‌شود. مقدار تابع هزینه به دست می‌آید، تابع هزینه ی اولیه مقدار بی نهایت دارد و با انجام فرآیند سرد کردن مقدار تابع هزینه کاهش میابد تا به مقدار بهینه دست یابد.

۴-۳-۳ مکانیزم تولید جواب همسایگی

یکی از مهم ترین موارد در الگوریتم شبیه سازی تولید، نحوه ی تولید جواب همسایگی است. این جواب دارای دو ویژگی است، به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و از روی جواب قبلی به دست می‌آید. بنابراین با همان روشی که جواب اولیه ایجاد شد جواب همسایگی نیز ایجاد می‌شود. به این صورت که ابتدا اعداد تصادفی برای هر رشته انتخاب، سپس عدد به دست آمده در شماره انتخاب قبلی، ضرب می‌گردد. از آنجایی که ممکن است عدد به دست آمده از یک بزرگ تر باشد، لذا تنها قسمت اعشاری آن انتخاب می‌شود. عدد حاصله، عددی تصادفی است که با توجه به جواب قبلی به دست آمده است.

بهینه‌سازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل‌ونقل

پارامترهای الگوریتم شبیه سازی تبرید نیز، همچون دمای اولیه، تاگوجی^{۱۲} مشخص شده اند و در جدول ۳ به نمایش گذاشته شده اند. نرخ سرمایش و تعداد تکرار در دمای ثابت بوسیله روش

جدول ۳. سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم شبیه سازی تبرید

نماد	محدوده	نماد	محدوده	نماد	محدوده	نماد	محدوده	نماد	محدوده
\bar{Q}_i^{xt}	(20,25)	C_{ij}^x	(5,8)	E_{ij}^x	(80,90)	M_{ij}^x	(30,40)	$C a_i$	(800,1000)
W_i^{pt}	(8,10)	C_{jk}^x	(8,10)	E_{jk}^x	(100,110)	M_{jk}^x	(50,60)	$C a_j$	(1000,1500)
\bar{e}_{xi}	(4000,4500)	C_{kl}^x	(12,15)	E_{kl}^x	(110,120)	M_{kl}^x	(60,70)	$C a_k$	(800,1000)
Rj_x	(0,1)	C_{im}^x	(4,6)	E_{im}^x	(80,90)	M_{im}^x	(30,40)	$C a_m$	(1000,1200)
Tr_x	(0,1)	C_{mj}^x	(3,5)	E_{mj}^x	(110,120)	M_{mj}^x	(60,70)	Car_{1j}	(100,150)
Zk_x	(0,1)	C_{mk}^x	(5,7)	E_{mk}^x	(95,105)	M_{mk}^x	(45,55)	Car_k	(100,150)
An_x	(0,1)	C_{mr}^x	(3,7)	E_{mr}^x	(105,115)	M_{mr}^x	(55,65)	$C a_r$	(400,500)
Em_x	(0,1)	C_{mn}^x	(7,9)	E_{mn}^x	(120,130)	M_{mn}^x	(70,80)	$C a_n$	(200,250)
		C_{rj}^x	(7,10)	E_{rj}^x	(140,150)	M_{rj}^x	(90,100)	Car_{2j}	(100,150)

جدول ۴. مقادیر مثال عددی

	کم	متوسط	زیاد
پارامتر	۱	۲	۳
تکرار در دمای ثابت	۱۰	۱۵	۲۰
دمای اولیه	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
نرخ سرمایش	۰,۸۵	۰,۹	۰,۹۹

جدول ۵. جدول نتایج حاصل از حل مثال عددی

مقدار تابع هدف تحت سناریوی رشد	تابع هدف
۱۰۷۷۸۲۵۰۳	هزینه‌ی حمل‌ونقل
۲۲۴۰۹۲۵	مقدار انرژی
۱۱۵۷۳۳۲	کربن‌دی‌اکسید
۲۲۹	ضایعات

شکل ۳ شبکه‌ی زنجیره تأمین این نمونه را نشان می‌دهد.

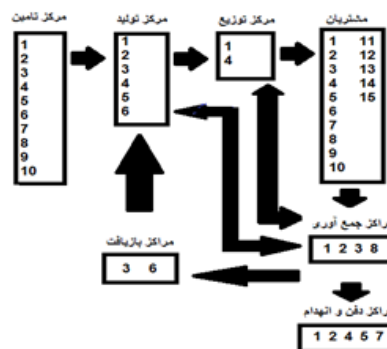
۴-۳-۴ مثال عددی

به جهت اعتبار سنجی مدل، ابتدا یک مثال عددی در ابعاد کوچک در نرم‌افزار لینگو موردبررسی قرار گرفت؛ که نتایج حل مدل در نرم‌افزار لینگو یک جواب بهینه‌ی سراسری بود. مسئله در نظر گرفته‌شده شامل ۱۰ تأمین‌کننده، ۶ تولیدکننده، ۸ توزیع‌کننده بالقوه، ۱۵ مشتری، ۸ مرکز جمع‌آوری بالقوه، ۶ مرکز بازیافت بالقوه، ۷ مرکز دفن و انهدام بالقوه است. در این نمونه که با ۱۰ محصول حل شده است. مقادیر Tr ، Rj_x و Zk_x و An_x به ترتیب ۰,۳، ۰,۲، ۰,۲، ۰,۳ و ۰,۳ در نظر گرفته‌شده است و مراکز جمع‌آوری (۱ و ۲ و ۳ و ۸)، مراکز بازیافت (۳ و ۶)، مراکز دفن و انهدام (۱ و ۲ و ۴ و ۵ و ۷) و مراکز توزیع (۱ و ۴) ساخته می‌شوند. با توجه به مثال عددی مطرح‌شده نتایج حاصل از حل مدل به‌صورت جدول ۵ می‌باشد.

در مدل مربوطه ۱۰ محصول تولیدی وجود دارد و تعداد دوره‌های زمانی برابر ۲ در نظر گرفته شده است. دیگر پارامترهای مدل در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر جدول توزیع یکنواخت گسسته در بازه (a,b) می‌باشند.

۴-۴ مقایسه‌ی الگوریتم‌های فرا ابتکاری

با توجه به اطلاعات مسئله، مدل به وسیله‌ی الگوریتم‌های فرا ابتکاری حل شده و نتایج حاصل از ۴ بار اجرا شدن الگوریتم‌ها در جدول ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۳. شبکه زنجیره تامین حلقه بسته

جدول ۶. نتایج حاصل از ۴ بار اجرا شدن الگوریتم‌های SA و GA

شماره اجرا	روش حل	حداقل کردن هزینه حمل و نقل	حداقل کردن انرژی مصرف شده	حداقل کردن گاز کربن دی‌اکسید انتشار یافته	حداقل کردن مقدار تابع هدف کلی	زمان اجرا (ثانیه)
۱	GA	۱۳۴۷۳۰۰۰	۱۵۹۴۵۰۰	۷۶۳۴۳۰	۶۵۹۴۷۰۰	۵۲۰۳,۸۸۰۲۴۵
	SA	۱۴۹۲۰۰۰۰	۱۵۸۵۹۰۰	۷۵۶۵۵۰	۷۱۷۰۷۰۰	۶۸۹,۹۲۶۴۵۱
۲	GA	۱۱۸۲۴۰۰۰	۱۵۷۱۴۰۰	۷۵۱۰۷۰	۶۰۲۵۶۶۷	۴۷۴۰,۶۹۴۳۲۴
	SA	۱۵۹۲۰۰۰۰	۱۵۹۰۸۰۰	۷۶۰۲۸۰	۷۵۷۲۳۰۰	۸۹۶,۴۲۱۰۰۷
۳	GA	۱۱۵۷۷۰۰۰	۱۵۸۶۵۰۰	۷۶۰۵۰۰	۵۸۳۴۸۰۰	۴۹۴۰,۰۵۹۲۴۲
	SA	۱۵۶۸۷۰۰۰	۱۵۸۹۱۰۰	۷۵۶۵۳۰	۷۴۷۸۲۰۰	۷۸۰,۳۸۷۹۴۷
۴	GA	۹۳۳۰۰۰	۱۵۸۰۶۰۰	۷۵۸۳۴۰	۵۱۷۶۰۰۰	۵۷۳۱,۴۶۸۱۸۳
	SA	۱۲۶۹۶۰۰۰	۱۵۸۵۳۰۰	۷۵۶۲۹۰	۷۰۸۱۰۰۰	۸۲۶,۷۹۸۲۵۵

جدول ۷. جدول زمان حل مسئله

روش حل	زمان حل (ثانیه)
الگوریتم ژنتیک	۵۲۰۳,۸۸۰۲۴۵
الگوریتم شبیه‌سازی تبرید	۶۸۹,۹۲۶۴۵۱

با توجه به جدول (۸) زمان اجرای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با توجه به بیشتر بودن میزان تکرار این الگوریتم خیلی کمتر از زمان انجام الگوریتم ژنتیک می‌باشد؛ بنابراین با توجه به کمتر بودن زمان حل مسئله توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید این الگوریتم از الگوریتم ژنتیک از نقطه نظر زمان حل مسئله کارتر می‌باشد.

حال با استفاده از این جدول به مقایسه‌ی روش‌های حل مثال عددی پرداخته می‌شود.

مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از روش‌های الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید:

مدل پیشنهادی با دو روش تکاملی الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید حل گردید. در این بخش نتایج هر یک از آن‌ها بررسی می‌شود.

۴-۵ زمان اجرای برنامه

زمان اجرای دو روش در جدول ۷ نشان داده شده است.

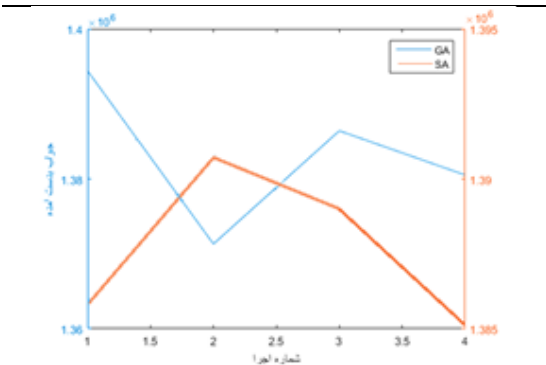
بهینه‌سازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل و نقل

جدول ۸. جدول مقایسه‌ی تنوع جواب‌های الگوریتم‌ها

تابع هدف	حداقل کردن هزینه حمل و نقل	حداقل کردن انرژی	حداقل کردن گاز کربن دی‌اکسید	حداقل کردن ضایعات	تابع هدف اصلی
تنوع جواب‌های الگوریتم	GA	GA	SA	SA	GA

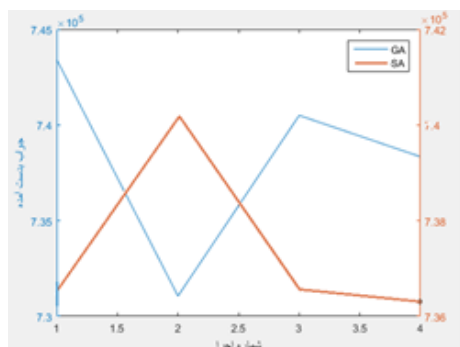
۶-۴ تنوع جواب‌های الگوریتم فرا ابتکاری

در جدول ۸ و نمودارهای ۲-۳-۴-۵-۶، نتایج مقایسه‌ی تنوع جواب‌های الگوریتم‌ها برای توابع هدف مشخص شده است، برای تابع هدف اول که حداقل کردن هزینه‌ی حمل و نقل می‌باشد الگوریتم ژنتیک جواب‌های متنوعی تولید می‌کند به همین ترتیب برای تابع هدف دوم نیز الگوریتم ژنتیک و برای توابع هدف سوم و چهارم الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جواب‌های متنوعی را تولید می‌کنند. در مجموع باید به این نکته توجه داشت که معیار تنوع به‌تنهایی نمی‌تواند دلیلی بر برتری یک الگوریتم نسبت به الگوریتم دیگر باشد، چراکه ممکن است تنوع ناشی از عملکرد خوب الگوریتم نباشد و به خاطر دور بودن از جواب بهینه این تنوع حاصل شده است.



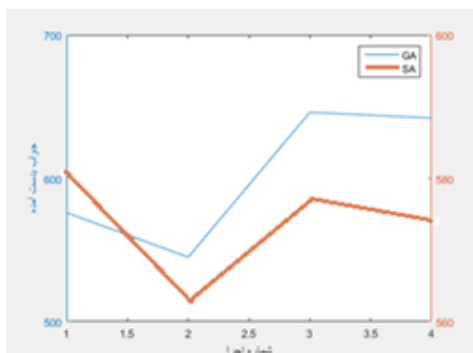
نمودار ۳. نمودار تنوع الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای تابع هدف

دوم



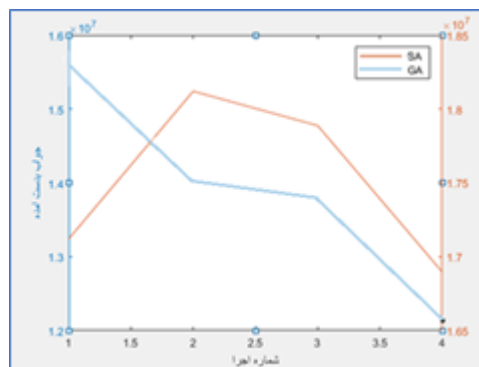
نمودار ۴. نمودار تنوع الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای تابع هدف

سوم



نمودار ۵. نمودار تنوع الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای تابع هدف

چهارم



نمودار ۲. نمودار تنوع الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای تابع هدف

اول

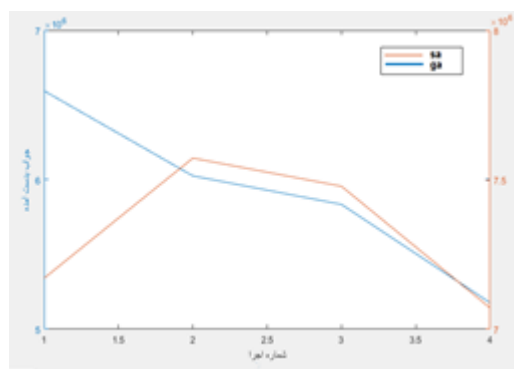
شبیه سازی تبرید از نقطه نظر تنوع برای تابع هدف اصلی کارآتر است.

۵. نتیجه گیری و پیشنهادهای تحقیق

در این تحقیق یک مدل ریاضی برای زنجیره تأمین حلقه بسته‌ی سبز که شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده، مشتریان، مراکز جمع‌آوری، مراکز دفن و انهدام و مراکز بازیافت هست ارائه شده است. مدل این پژوهش چندمحصولی و چند دوره‌ای می‌باشد که می‌توان آن را در صنایع مختلفی که قابلیت جمع‌آوری، بازیافت، انهدام، تولید و توزیع مجدد دارند بکار گرفت. در این شبکه مواد اولیه از تأمین‌کنندگان تهیه شده و وارد بخش تولید می‌شود. سپس کالاهای ساخته شده وارد بخش توزیع می‌شود، بعد از محل توزیع، کالاها برای مشتریان فرستاده می‌شود. در جریان معکوس زنجیره‌تأمین حلقه بسته، کالاهای بازگشتی از دست مشتریان به محل جمع‌آوری منتقل می‌شود. در آنجا کالاها دسته‌بندی شده و کالاهایی که سطح مطلوبی از کیفیت دارند، به عنوان کالای دست دوم وارد مراکز توزیع می‌شوند و کالاهایی که نیاز به تولید مجدد دارند، جهت ساخت مجدد وارد مراکز تولید می‌شوند، کالاهایی که نیاز به بازیابی دارند وارد مراکز بازیافت می‌شوند و مواد اولیه مراکز تولید را فراهم می‌کنند و کالاهایی که جزء هیچ کدام از دسته‌های مربوطه قرار نگیرند، وارد مراکز دفن و انهدام می‌شوند تا از محیط زیست به طرز مناسبی خارج شوند چون کالاها در چرخه‌ی لجستیک معکوس، به چرخه‌ی لجستیک مستقیم وارد می‌شوند، لذا شبکه یک شبکه‌ی حلقه بسته خواهد بود.

این پژوهش در پی کاهش اثرات زیست محیطی و هزینه است. هزینه مورد نظر در این پژوهش تنها هزینه‌های مربوط به حمل و نقل کالا، بین نقاط مختلف زنجیره‌ی تأمین است. اهداف این پژوهش بهینه سازی میزان انرژی که در اثر حمل کالا به نقاط مختلف زنجیره‌ی تأمین مصرف می‌شود، هزینه حمل و نقل، حداقل نمودن میزان ضایعاتی که به مراکز دفن و انهدام آورده می‌شود، و هم چنین حداقل نمودن میزان گاز

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره سوم (۶۰) / بهار ۱۴۰۳



نمودار ۶. نمودار تنوع جواب های الگوریتم های فرا ابتکاری برای

تابع هدف اصلی پژوهش

با توجه به نمودار ۲ تنوع جواب های الگوریتم ژنتیک نسبت به شبیه سازی تبرید بیشتر است زیرا جهش های بیشتری را نسبت به الگوریتم شبیه سازی تبرید دارد و نشان می دهد که الگوریتم ژنتیک نقاط بیشتری را برای یافتن پاسخ جستجو می کند.

با توجه به نمودار ۳ باز هم تنوع جواب های الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم شبیه سازی تبرید بیشتر است بنابراین الگوریتم ژنتیک نسبت به شبیه سازی تبرید از نقطه نظر تنوع جواب ها در تابع هدف دوم کارآتر می باشد.

با توجه به نمودار ۴ و جدول ۸ می توان گفت تنوع جواب های دو الگوریتم تقریباً یکسان است، اما با توجه به اینکه الگوریتم شبیه سازی تبرید در تکرارهای بیشتری جواب کمتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد، الگوریتم شبیه سازی تبرید از نقطه نظر تنوع جواب ها در تابع هدف سوم کارآتر است.

با توجه به نمودار ۵، می توان گفت تنوع جواب های دو الگوریتم تقریباً یکسان است و با توجه به کمتر بودن جواب الگوریتم شبیه سازی تبرید این الگوریتم از الگوریتم ژنتیک از نقطه نظر تنوع جواب ها در تابع هدف چهارم کارآتر است.

با توجه به نمودار ۶، تنوع جواب های الگوریتم ژنتیک برای تابع هدف اصلی پژوهش بیشتر از تنوع جوابهای الگوریتم شبیه سازی تبرید است. بنابراین الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم

بهبودسازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل و نقل

جهت سوق یافتن مسئله به سمت پایداری باید جنبه‌ی اجتماعی در کنار مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی در نظر گرفته شود.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Closed loop supply chain
2. Reverse logistics
3. Green supply chain management
4. Council of Supply Chain Management Professionals
5. Rechenberg
6. Holland
7. Arithmetic Crossover
8. Insert mutation
9. taguchi
10. Controllable
11. Noise factors
12. taguchi

۷. مراجع

– Rabieh M., Azar A., Modarres Yazdi M., Fetanat Fard Haghighi M. (2011) “Designing a multi-objective robust multi-sourcing mathematical model, An approach for reducing the risk of supply chain (Case study: Supply Chan of IRAN KHODRO COMPANY)”;
Industrial managements Perspective, 1: 57-77, (in Persian).
http://journal.saim.ir/article_26787_en.html

– Saneyi, M. Tavakoli Moghaddam, R. (2013). Bi-Objective Mathematical Modeling for a Closed-Loop Supply Chain Network with Risk-Pooling and Uncertain Demands. Iranian Journal of Supply Chain Management, 2014; 16(43): 4-15.

– Govindan K, Soleimani H, Kannan D, (2015), Reverse logistics and closed-loop supply chain: a comprehensive review to explore the future. Eur. J. Oper. Res. 240, 603–626.

کربن دی اکسید انتشار یافته از حمل و نقل است. به منظور طراحی مدل در قدم اول مجموعه فرضیات، اهداف و محدودیت‌های مسئله به صورت یکپارچه فرموله گردید.

جهت اعتبار سنجی مدل، مسئله در ابعاد بسیار کوچک در نرم‌افزار لینگو کد نویسی شد و اعتبار مدل مورد تأیید قرار گرفته است. جهت حل مدل در ابعاد بسیار بزرگ از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تیرید استفاده شده است و کد نویسی‌ها توسط نرم‌افزار متلب انجام گرفت. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از این دو الگوریتم کارایی الگوریتم ژنتیک برای دو تابع هدف انرژی و هزینه ثابت شد و کارایی الگوریتم شبیه‌سازی تیرید برای دو تابع هدف کربن دی‌اکسید و ضایعات مشخص گردید. با توجه به جواب‌های حاصل از مدل و نظر خبرگان، کارایی مدل پیشنهادی در بهبود تصمیم‌گیری‌های زنجیره تأمین حلقه بسته تأیید شد.

بنابراین علاوه بر این که توزیع و بازگشت کالا به زنجیره تأمین یکپارچه شده است استفاده از این مدل موجب کاهش مصرف انرژی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و در نهایت کاهش هزینه و افزایش سودآوری می‌گردد.

نتایج حاصل از مدل با تحقیقات سلطانی تهرانی و همکاران (۱۳۹۴) که مدل بهینه‌سازی دو هدفه هزینه کربن دی‌اکسید در زنجیره تأمین حلقه بسته چند دوره‌ای و چند محصولی را ارائه کردند هم‌راستا است.

در همین راستا برای تحقیقات آتی توصیه می‌گردد، پارامترهای تقاضا، نرخ ارز، هزینه و یا نرخ بازگشت به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شود و از رویکردهای فازی، بهینه‌سازی استوار و یا احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده شود. همچنین در این پژوهش تنها تأمین‌کننده خارجی است و هزینه‌ی حمل از محل تأمین‌کننده تحت تأثیر نرخ ارز است توصیه می‌شود که سایر اعضای زنجیره تأمین نیز به صورت خارجی در نظر گرفته شوند. در نهایت می‌توان توابع هدف متعدد دیگری همچون سود را به توابع هدف مدل افزود و یا جایگزین کرد. همچنین

- Jamshidi S., Boyerhassani Omid. Development of A Mathematical Model for Facility Location in Green Closed-Loop Supply Chain with Learning Effect. *Journal of Transportation Research*. 2019 [Cited 2021april24]; 16(2 (59)):91-105.
- Fakhrzad, M., Talebzadeh, P., Goodarzian, F. (2019). The green Closed-Loop Supply Chain Network Design Considering Supply Centers Reliability under Uncertainty. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 7(14), 179-197.
- Hajian, S., & Afshar Kazemi, M., & Seyed Hosseini, S., & Toloie Eshlaghy, A. (2019). Developing A Multi-Objective Model for Locating-Routing-Inventory Problem in A Multi-Period and Multi-Product Green Closed-Loop Supply Chain Network for Perishable Products. *Journal of Industrial Management (Management Knowledge)*, 11(1), 83-110.
- Shafiei Nikabadi, M., Molayi, E., Aakhavan rad, M. (2021). Optimization of Vehicle Routing Problem under Uncertainty with emphasis on Green - Lean Practices and Customer Satisfaction. *Journal of Transportation Research*, 18(1), 113-134. doi: 10.22034/tri.2021.82820
- Guo, Yurong, Quan Shi, and Chiming Guo. 2022. "A Fuzzy Robust Programming Model for Sustainable Closed-Loop Supply Chain Network Design with Efficiency-Oriented Multi-Objective Optimization" *Processes* 10, no. 10: 1963.
- Kaoud, Essam, Mohammad A. M. Abdel-Aal, Tatsuhiko Sakaguchi, and Naoki Uchiyama. 2022. "Robust Optimization for a Bi-Objective Green Closed-Loop Supply Chain with Heterogeneous Transportation System and Presorting Consideration" *Sustainability* 14, no. 16:
- Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., Karaoglan, I. (2009), "A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design", *Computers & Industrial Engineering*, 56, 521–537. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.05.012>
- Beheshti Nia, M., & Khatibi, S. (2017). Analyzing of Three Different Scenario's To Optimize Energy Consumption and Scheduling in Supply Chain. *Journal of Energy Management*, 7(1), 36-47.
- Zhang H.C, Kuo T.C, Lu H, Huang S.H, (1997), Environmentally conscious design and manufacturing; a state-of-the-art survey, *Journal of Manufacturing Systems* 16 (5).
- Linton, J.D., Klassen, R. & Jayaraman, V. (2007). "Sustainable supply chains: an introduction". *Journal of Operations Management*, 25(1): 1075-82. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.012>
- Srivastara S.K, (2007), Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews* 9 (1), 53–80.
- Sundarakani B, De Souza R, Goh M, Shun C, (2008), Measuring carbon footprints across the supply chain. In; *Proceedings of the 13th International Symposium on Logistics*, July 2008, Bangkok, Thailand, pp. 555–562.
- Handfield R. B, (1996), Green Supply Chain: Best Practices From the Furniture Industry, *Proceedings Annual Meeting of the Decision Science Institute*. USA. No.3. P.1295-1297. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(97\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(97)00004-1)
- Beamon, B. (1999). Designing the green supply chain. *Logistics Information Management*, 12(4), 332-342. <http://dx.doi.org/10.1108/09576059910284159>

- with environmental considerations". *Applied Soft Computing Journal*, 69, 232–249.
- Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (2019). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 118452.
- Hasani, A., Mokhtari, H., & Fattahi, M. (2021). A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: A real-life Case Study. *Journal of Cleaner Production*, 123199. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123199
- Alam Tabriz, A. (2006), *Meta-heuristic algorithms in Combination Optimization*, Saffar publishing.
- Haupt, Randy.L. and Haupt, Sue. E. (2004), *Practical Genetic Algorithms*, Second Edition, Wiley Interscience by Wiley.J, New Jersey, Published Simultaneously in Canad. <https://www.wiley.com/en-id/Practical+Genetic+Algorithms%2C+2nd+Edition-p-9780471671749>
- Tarokh, M., EsmaeiliGookeh, M., Torabi, S. (2012). A Model to Optimize the Design of a Reverse Logistic Network under Uncertainty. *Advances in Industrial Engineering*, 46(2), 159-173. doi: 10.22059/jieng.2012.30559
- Altiparmak,F., Gen,M., Lin,L., Karaoglan,I.(2009), “A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design”, *Computers & Industrial Engineering*, 56, 521–537. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.05.012>
- Mousavi S. M & Niaki S, T. A, (2013), Capacitated location allocation problem with stochastic location and fuzzy demand: A hybrid algorithm, *Applied Mathematical* 10281. <https://doi.org/10.3390/su14161028Soleimani>
- H, KannanGovindan b, Saghafi H, Jafari H, (2017), Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering* 109 (2017) 191–203. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1092506&dswid=6002>
- Modak, N. M., Modak, N., Panda, S., & Sana, S. S. (2018). "Analyzing structure of two-echelon closed-loop supply chain for pricing, quality and recycling management". *Journal of Cleaner Production*, 171, 512–528.
- Taleizadeh, A. A., Moshtagh, M. S., & Moon, I. (2018). "Pricing, product quality, and collection optimization in a decentralized closedloop supply chain with different channel structures: Game theoretical approach". *Journal of Cleaner Production*, 189, 406–431. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.209>.
- Ghomi-avili, M., Gholamreza, S., Naeini, J., Tavakkoli-moghaddam, R., & Jabbarzadeh, A. (2018)." A fuzzy pricing model for a green competitive closed-loop supply chain network design in the presence of disruptions". *Journal of Cleaner Production*, 188, 425–442.
- Haddadsisakht, A., & Ryan, S. M. (2018). "Closed-loop supply chain network design with multiple transportation modes under stochastic demand and uncertain carbon tax". *International Journal of Production Economics*, 195(October 2017), 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.009>.
- Fathollahi-fard, A. M., & Hajiaghahi-keshteli, M. (2018). "A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain

Modelling, 37(7), 5109–5119
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.038>

– Durand M. D, and white S.R, (2000),
Trading accuracy for speed in parallel
simulated annealing with simultaneous moves,
Elsevier parallel somputing, vol26, pp 135-
150.

بهینه‌سازی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با تأکید بر عوامل انرژی در حمل‌ونقل

محسن شفیعی نیکابادی، تمامی مقاطع تحصیلی خود را در رشته مدیریت صنعتی گرایش تولید و عملیات در دانشگاه علامه طباطبائی گذرانده است و در سال ۱۳۹۰ از مقطع دکتری این دانشگاه فارغ التحصیل شده است. زمینه تحقیقاتی ایشان و عضویت به عنوان هیئت علمی، بهبود عملکرد زنجیره تأمین و توسعه مدل‌های دانش محور کسب و کار در زنجیره های تأمین صنایع می باشد. هم اکنون ایشان، دانشیار گروه مدیریت صنعتی دانشگاه سمنان می باشد.



مهسا اخوان راد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه خيام أخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۷ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات گردید و در حال حاضر دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، بهبود عملکرد زنجیره تأمین و بهینه سازی حمل و نقل است. ایشان در حال حاضر در موسسه آموزش عالی توس مشغول تدریس می باشد.



پریسا دهقان پور، درجه کارشناسی در رشته مدیریت بازرگانی را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۷ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات از موسسه آموزش عالی بینالود گردید.

