

بررسی زنجیره تأمین حلقه‌باز و حلقه‌بسته تحت شرایط عدم قطعیت (مورد مطالعه: شرکت ایران ترانسفو)

مهسا محمدی*، حامد سلیمانی**

چکیده

یکی از عوامل اصلی رقابت در فضای رقابتی کنونی «زنجیره تأمین» است؛ به طوری که کارخانه‌ها و سازمان‌ها برای افزایش کارایی و اثربخشی، و دستیابی به اهداف و آرمان‌های خود، ملزم به داشتن یک زنجیره تأمین مناسب هستند. از طرفی به دلیل افزایش روزافزون آلودگی‌های زیست‌محیطی و الزامات دولت‌ها برای مقابله با آلودگی‌های زیست‌محیطی، سازمان‌ها ملزم به به‌کارگیری زنجیره‌های تأمین سبز هستند که مسائل زیست‌محیطی را در کنار مسائل مالی مدنظر قرار می‌دهد؛ از این رو در این پژوهش یک مدل دوهدفه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شده است که جنبه‌های زیست‌محیطی را در کنار جنبه‌های اقتصادی در نظر می‌گیرد. جنبه بسیار مهم دیگر در طراحی شبکه زنجیره تأمین، عدم قطعیت است. به دلیل تحولات اجتماعی و سیاسی و کمیابی مواد اولیه برای تولید، عدم قطعیت عامل مهمی در مدل‌های شبکه زنجیره تأمین است. به همین دلیل در این مدل با در نظر گرفتن عدم قطعیت سعی در انطباق مدل با شرایط واقعی شده است. نتایج حاکی از آن است که طراحی زنجیره‌های تأمین سبز با در نظر گرفتن عدم قطعیت باعث انعطاف‌پذیری هرچه بیشتر مدل در برابر نوسانات بازار، تحولات اجتماعی و سیاسی و غیره می‌شود. به منظور بررسی کارایی و عملکرد مدل ارائه‌شده، مدل مذکور بر روی شرکت ایران ترانسفو پیاده‌سازی شده است.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین حلقه‌بسته؛ بهینه‌سازی استوار؛ عدم قطعیت؛ بهینه‌سازی
چندهدفه؛ زنجیره تأمین سبز؛ اپسیلون محدودیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷.

۱. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی مکانیک و صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی مکانیک و صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران (نویسنده مسئول).

۱. مقدمه

زنجیره تأمین، شبکه کلی سیستم‌های توزیع و تسهیلات از قبیل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع و خرده‌فروشان است که تهیه مواد خام تا تحویل محصولات نیمه‌آماده و آماده به مشتریان را شامل می‌شود و هدف اصلی آن، تأمین نیازهای مشتریان است [۱۳]. در گذشته تمرکز مدل‌های طراحی و مدیریت شبکه زنجیره تأمین بر حداقل کردن هزینه‌های ثابت و عملیاتی بدون در نظر گرفتن جنبه‌های محیطی و اجتماعی بوده است؛ در حالی که اخیراً مسئولیت اجتماعی و موضوع‌های زیست‌محیطی نیز وارد این‌گونه مدل‌ها شده‌اند. در سال‌های اخیر با تصویب قوانین دولتی به منظور حفظ محیط‌زیست، طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته به شدت مورد توجه قرار گرفته است [۶]. هر محصولی که در زنجیره تأمین تولید، توزیع و مصرف می‌شود، تأثیر مشخصی بر محیط‌زیست می‌گذارد. موضوع‌های زیست‌محیطی در مسائل مختلف زنجیره تأمین، مانند طراحی شبکه زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی تولید، بسته‌بندی، بازیافت و حمل‌ونقل می‌توانند در نظر گرفته شوند [۲۳]. بحث پایداری یا توسعه پایدار به دلیل افزایش روزافزون نگرانی‌های زیست‌محیطی از قبیل گرم‌شدن جهانی کره زمین و نازک‌شدن لایه اوزون و همچنین مسائل اجتماعی از قبیل حقوق بشر و استفاده از کودکان در صنایع در سال‌های اخیر مورد توجه کارشناسان گرفته است [۲۱].

اساس زنجیره تأمین سبز بر یکپارچگی مدیریت محیط‌زیست و مدیریت زنجیره تأمین برای کنترل اثرات زیست‌محیطی و چرخه عمر محصول به وسیله تسهیم اطلاعات و هماهنگی و همکاری تمام اعضای زنجیره تأمین است و سه مفهوم کلی طراحی سبز (محصول)، تولید سبز (فرآیند) و بازیافت محصول را پایه‌گذاری کرده است. با توجه به محیط رقابتی که شرکت‌ها در آن‌ها فعالیت می‌کنند، انتخاب روش مناسب برای مدیریت بهینه زنجیره تأمین ضروری است [۱]. افزایش سطوح صنعتی شدن در دولت‌های توسعه‌یافته همراه با روند جهانی شدن، چالش جدیدی را در مدیریت زنجیره تأمین ایجاد کرده است. اخیراً در نتیجه افزایش چشمگیر (نمایی) انرژی و نرخ مواد مصرفی و انرژی، توسعه پایدار به عنوان یک مسئله ضروری به حساب می‌آید و رویکردهای جدید برای مدیریت زنجیره تأمین به منظور همگام‌سازی دغدغه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در طراحی زنجیره‌های تأمین، مورد نیاز است. جنبه بسیار مهم دیگر در طراحی شبکه زنجیره تأمین، بحث عدم قطعیت در پارامترهای ورودی است. به دلیل تحولات سیاسی، کمیابی مواد اولیه و نوسانات قیمت در طول افق تصمیم‌گیری استراتژیک، عدم قطعیت عامل مهمی در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین است. وجود پارامترهای ورودی احتمالی در مدل باعث انعطاف‌پذیری مدل در برابر تغییرات بازار، سرمایه‌گذاری، تحولات سیاسی و غیره می‌شود. در محیط پرتلاطم و پرقابلیت امروزی، سرعت تغییر و تحولات اطلاعات و عدم اطمینان‌ها بالا رفته و بر ابهام حاکم بر تصمیم‌گیری‌ها افزوده شده است. عدم اطمینان یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل در عین حال از

جمله مهم‌ترین مسائل مدیریت زنجیره تأمین است [۵۴]. یکی از مؤثرترین عوامل تأثیرگذار بر رقابت بین زنجیره‌های تأمین نحوه مقابله آن‌ها با اختلالات است [۵]؛ بنابراین به‌منظور برنامه‌ریزی صحیح‌تر و قابل‌اتکا باید به برنامه‌ریزی در فضای عدم‌اطمینان و ابهام پرداخت. طراحی مناسب شبکه زنجیره تأمین به دستیابی به یک ساختار بهینه منجر می‌شود که این امر مدیریت مؤثر و کارایی زنجیره تأمین را در راستای برآورده‌سازی تقاضا با حداقل هزینه و با کمترین اتلاف در زودترین زمان ممکن فراهم می‌آورد؛ از این‌رو در این پژوهش، مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز در شرایط عدم قطعیت بررسی شده است. از آنجاکه الزامات قانونی و شرایط جهانی، کارخانه‌ها را ملزم به رعایت قوانین زیست‌محیطی کرده است، در این مسئله اثرات زیست‌محیطی کل زنجیره تأمین، اعم از تولید، حمل‌ونقل، نگهداری، بازیافت و بازسازی در نظر گرفته شده است. مدیریت عدم قطعیت یکی از چالش‌های اصلی مدیریت زنجیره تأمین است. در مسائل دنیای واقعی بیشتر پارامترها از قبیل تقاضا، عرضه، هزینه نگهداری و قیمت محصول غیردقیق و غیرقطعی است. فشار مقررات دولتی برای اخذ استانداردهای زیست‌محیطی از یک طرف و رشد فزاینده تقاضای مشتریان برای عرضه محصولات سبز (بدون اثر مخرب بر محیط‌زیست) از طرف دیگر، مفهوم زنجیره تأمین سبز و زنجیره تأمین حلقه‌بسته را پدیدار ساخته است. در ادامه، مرور مبانی نظری در بخش دوم، مدل ریاضی و روش حل ارائه‌شده در بخش سوم و مطالعه موردی و نتایج در بخش چهارم بررسی می‌شود. نتیجه‌گیری نیز در بخش پنجم ارائه خواهد شد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

طراحی شبکه زنجیره تأمین با فعالیت‌های ملکوت و داسکین (۱۹۹۵) که یک مدل شبکه زنجیره تأمین تک‌دوره‌ای تحت شرایط محدودیت ظرفیت تسهیلات ارائه کردند [۳۵]، درنزر و وسولوسکی (۲۰۰۳) که یک مدل مکان‌یابی تک‌لایه‌ای و تک‌دوره‌ای با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های مرتبط با مکان‌یابی تسهیلات طراحی کردند [۱۰] و آمبروسینو و اسکاتالا (۲۰۰۵) که یک مدل پویا در شرایط قطعی برای یک شبکه چهارسطحی ارائه دادند، آغاز شد. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱) نیز یک مدل بهینه‌سازی استوار برای مدیریت عدم‌اطمینان‌های ذاتی موجود در داده‌های ورودی برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته ارائه کرده‌اند که ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته ارائه می‌شود، سپس مدل هم‌تای استوار آن به کمک روش‌های جدید در نظریه بهینه‌سازی استوار مدنظر قرار می‌گیرد [۳۸]. وانلانگدم و وانماله (۲۰۰۲) با تأکید بر اهمیت فضای عدم‌اطمینان حاکم بر زنجیره عرضه و مدیریت آن یک روش برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو را به‌عنوان پارادایمی جدید در برنامه‌ریزی زنجیره تقاضا نام بردند و بیان داشتند که مدل‌ها و روش‌های ارائه‌شده در شرایط قطعی برای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین، دیگر

جوابگوی فضای عدم‌اطمینان حاکم نبوده و کارا نیست؛ بنابراین باید برنامه‌ریزی زنجیره منطبق با فضای عدم‌اطمینان صورت پذیرد [۵۳].

از دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت می‌توان به پژوهش سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد که یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته چندتسهیلی، چنددوره‌ای و چندمحصولی را طراحی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسعه یافته حل کردند [۵۱]. در ادامه چندین پژوهش مرتبط که در سال‌های اخیر انجام شده است، بررسی می‌شود. در سال ۲۰۱۵، یک مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت شرایط عدم قطعیت توسط رویمین و همکاران (۲۰۱۵)، طراحی شد و برای مقابله با عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی ریاست استفاده کردند. در این مدل پارامترهای هزینه و تقاضا غیرقطعی در نظر گرفته شده است [۴۵]. شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته برای محصولات زیان‌بار با تقاضا و بازده غیرقطعی در سال توسط موتا و همکاران (۲۰۱۸)، بررسی و به این منظور یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ارائه شد. روش حل مورد استفاده در این پژوهش روش حل دقیق شمارش موازی است [۳۳].

درضمن، حدادسیسخت و آراین (۲۰۱۸)، یک مدل هیبریدی سه‌مرحله‌ای تصادفی استوار برای شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با چند حالت حمل‌ونقل تحت شرایط تقاضای تصادفی و عوارض کربن در حالت غیرقطعی طراحی کردند [۲۰]. سلیمانی و همکاران (۲۰۱۳)، یک مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته طراحی کردند که تأثیر منفی زنجیره بر محیط زیست، بهینه‌سازی کل سود و کاهش روزهای کاری ازدست‌رفته را در نظر می‌گیرد. برای حل این مدل الگوریتم ژنتیک به کار رفته است [۵۲]. در همین دهه، جبارزاده و همکاران (۲۰۱۷)، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت شرایط احتمال خطر فرسودگی را طراحی کردند که مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی واکنشی برای مقابله با خطرات عملیاتی و احتمال خرابی از حمل‌ونقل جانبی استفاده کند. الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل کارایی مدل ریاست توسعه داده شده است [۲۵].

یک مدل چندهدفه تصادفی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی و ریسک جانبی توسط صاحب‌جم‌نیا و همکاران (۲۰۱۸)، ارائه شد که الگوریتم‌های فراابتکاری ممتیک به‌عنوان روش حل به‌کار گرفته شده است [۴۷]. راد و نهاون (۲۰۱۸)، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز چنددوره‌ای و چندمحصولی ارائه کردند که تأمین‌کنندگان با ارائه تخفیفاتی باعث ایجاد انگیزه خرید برای خریداران می‌شوند. توابع هدف شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی انتشارات زیست‌محیطی و حداکثرسازی رضایت مشتریان است [۴۰].

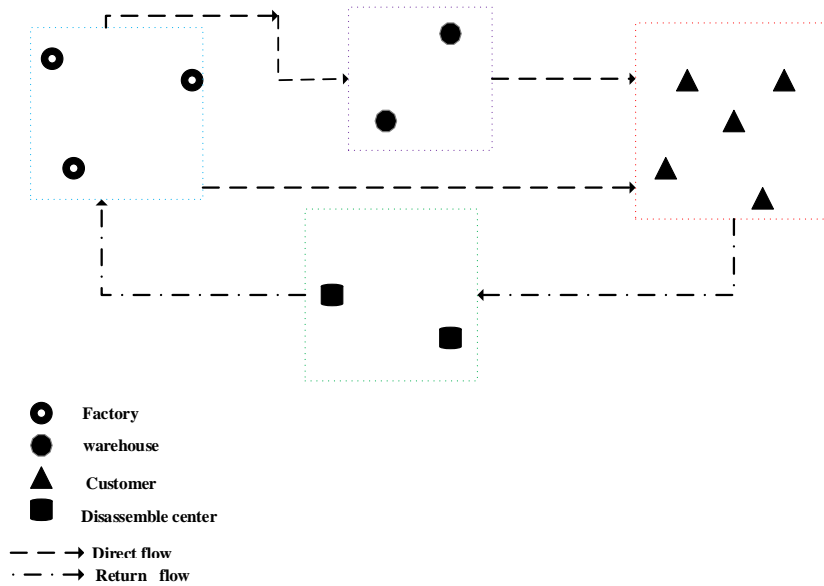
حیدری فتحیان و پسندیده (۲۰۱۸) یک شبکه زنجیره تأمین خون را با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط چندهدفه پیشنهاد دادند که به‌طور هم‌زمان کل هزینه‌های سیستم و تأثیرات منفی فعالیت‌های سیستم بر محیط‌زیست را کمینه می‌کند. در این مدل اهدا و تقاضای خون

به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده و رویکرد بهینه‌سازی ریاست برای مقابله با عدم قطعیت به‌کار گرفته شده است [۲۲]. صفار و همکاران (۱۳۹۴)، یک شبکه زنجیره تأمین چندلایه‌ای، چندمحصولی و چنددوره‌ای با بازگشت محصولات را بررسی کردند. ریسک‌های عملیاتی به‌صورت خرابی در قسمت تأمین‌کنندگان و کارخانه در نظر گرفته شد. مدل ریاضی، تأمین‌کنندگان مناسب را بر اساس معیارهایی مانند قیمت فروش، متوسط خرابی و هزینه‌های حمل‌ونقل انتخاب می‌کند. عدم قطعیت در مسئله به کمک رویکرد فازی مطرح شد و مدل فازی دوهدفه ابتدا به کمک روش خیمنز به مدل قطعی تبدیل شد. به دلیل NP-Hard بودن مسائل زنجیره تأمین، در این پژوهش برای حل مسئله در اندازه‌های بزرگ از روش NSGA II استفاده شده است [۴۸].

اگرچه پژوهشگران بسیاری با زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته سبز کار کرده‌اند؛ اما تعداد اندکی از این سهم قادر به ارزیابی هزینه‌های سیستم و تأثیر منفی خصیصه‌های زنجیره تأمین در محیط زیست در حالت عدم قطعیت با در نظر گرفتن فرض‌هایی همچون چندین گزینه حمل‌ونقل هستند. در این پژوهش تلاش می‌شود تا با در نظر گرفتن تقاضا به‌صورت غیرقطعی یک مدل چندهدفه که قادر به ارزیابی هزینه‌های سیستم و همچنین تأثیر منفی زنجیره تأمین در محیط‌زیست تحت شرایط عدم قطعیت است، طراحی شده و از رویکردهای مقابله با عدم قطعیت استفاده شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

روش‌ها و مدل‌های گوناگون برای بهینه‌سازی مدل‌های برنامه‌ریزی در سطح تاکتیکی در حوزه‌های زنجیره تأمین و زنجیره تأمین سبز وجود دارند؛ اما بیشتر آن‌ها مبتنی بر داده‌های معین و قطعی هستند؛ در نتیجه تلاش این پژوهش علمی در جهت یکپارچه‌سازی تصمیم‌های سطح تاکتیکی مرتبط با زنجیره تأمین سبز در شرایط عدم اطمینان است. شکل ۱، شمای کلی از مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱، مدل شامل چهار تسهیل (کارخانه، انبار، مشتریان، مراکز جداسازی) است. مدل به‌صورت چندمحصولی در نظر گرفته شده است و برای ایجاد ارتباط بین تسهیلات چند گزینه حمل‌ونقل (جاده‌ای، ریلی) وجود دارد. به دلیل تفاوت بین فرآیندهای تسهیلات شیوه جریان بین تسهیلات متفاوت و به سه روش است: ۱. محصول جدید؛ ۲. محصولی که از مشتری به‌منظور بازیافت جمع‌آوری و به مرکز جداسازی ارسال می‌شود و ۳. محصولی که از مرکز جداسازی به‌منظور بازسازی به کارخانه ارسال می‌شود؛ بنابراین مسئله شامل تعیین مکان بهینه تسهیلات، میزان بهینه کالاها و جریان مواد بین تسهیلات، انتخاب مناسب‌ترین گزینه حمل‌ونقل با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های سیستم و در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی در قالب میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده از سیستم است.



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز

فرضیه‌های مدل به شرح زیر است:

۱. هر واحد از محصولات تولیدشده در یک کارخانه و نگهداری شده در یک انبار بدون نقص است؛
۲. تقاضای هر مشتری همیشه توسط هر کارخانه از طریق هر انبار برآورده می‌شود؛
۳. درصد مشخصی از کل تقاضا به مرکز بازیافت فرستاده می‌شود؛
۴. تمام واحدهای محصولاتی که به مرکز بازیافت فرستاده می‌شوند، کاملاً منهدم می‌شوند؛
۵. تمام گزینه‌های حمل‌ونقل (جاده و ریلی) دارای ظرفیت نامحدود هستند؛
۶. فاصله بین گره‌های شبکه به‌وسیله مسیر مستقیم بین تسهیلات در نظر گرفته شده است؛
۷. کمبود در این مدل مجاز است؛
۸. مدل به صورت چندمحصولی در نظر گرفته شده است؛
۹. در صورت امکان، تقاضای برخی مشتریان به‌صورت مستقیم از کارخانه به مشتریان ارسال می‌شود.

روش حل. سه رویکرد اصلی مقابله با عدم قطعیت در مسائل بهینه‌سازی عبارت‌اند از:

۱. بهینه‌سازی تصادفی؛
۲. بهینه‌سازی فازی؛
۳. بهینه‌سازی استوار.

در زمینه بهینه‌سازی استوار، سوyster^۱ (۱۹۷۳)، یک روش برنامه‌ریزی استوار بدینانه برای برخورد با مسائل برنامه‌ریزی خطی دارای عدم قطعیت توسعه داد. تصمیم استوار، تصمیمی است که نسبت به عدم قطعیت تاب بیاورد و عملکرد ناشی از آن دارای حداقل نوسان باشد. یک جواب برای یک مسئله بهینه‌سازی، یک جواب استوار است اگر دارای «استواری شدنی بودن»^۲ و «استواری بهینگی»^۳ باشد. رویکردهای مختلف استوار، سطوح متفاوتی از محافظه‌کاری تأمین می‌کنند. در این پژوهش، مدل ارائه‌شده با روش بهینه‌سازی استوار توسعه داده می‌شود.

همتای استوار. مسئله به مسئله‌ای که در آن سناریوهای مختلف با احتمال وقوع معلوم قابل تعریف است، تبدیل می‌شود. فرض می‌شود K سناریو وجود دارد و مجموعه $S' = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ مجموعه‌ای از سناریوها بوده و احتمال وقوع هر سناریو P_S است و داریم:

$$\sum_{S' \in S'} P_S = 1 \quad (1)$$

مقدار ضرایب غیرقطعی C, B, A برای سناریوی $S \in S'$: (C_S, A_S, B_S)

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= cX \\ \text{st: } AX &= B \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

با فرض اینکه مقدار تابع هدف در سناریوی S به صورت $\Psi_S = C_S X$ باشد. u مقدار جریمه به‌ازای نقض محدودیت و r فاکتور ریسک‌پذیری

$$\text{min} = \sum_{S \in S'} P_S \Psi_S + r \sum_{S \in S'} P_S (\Psi_S - \sum_{S \in S'} P_S \Psi_S + 2\alpha_S) + u \sum_{S \in S'} P_S \varepsilon_S \quad (3)$$

$$\text{s. t: } A_S X + \varepsilon_S = b_S$$

$$\Psi_S - \sum_{S \in S'} P_S \Psi_S + \alpha_S \geq 0 \quad \forall S \in S'$$

$$x, \varepsilon_S, \alpha_S \geq 0$$

اندیس‌ها:

x : مجموعه کارخانه‌ها

y : مجموعه انبارها

z : مجموعه مشتریان

w : مجموعه مراکز انهدام

1. Soyster
2. Feasibility robustness
3. Optimality robustness

Λ: مجموعه نوع محصولات

i: مجموعه گزینه‌های حمل‌ونقل برای ارسال کالا از کارخانه‌ها

j: مجموعه گزینه‌های حمل‌ونقل برای ارسال کالا از انبارها

k: مجموعه گزینه‌های حمل‌ونقل برای جمع‌آوری محصولات از مشتریان و ارسال به مراکز انهدام

l: مجموعه گزینه‌های حمل‌ونقل برای ارسال کالاهای منهدم‌شده

پارامترها:

O_z : تقاضای مشتری z

$D_{\lambda z}$: هزینه کمبود مشتری z از محصول نوع λ

$E_{\lambda xyi}$: هزینه حمل‌ونقل محصول نوع λ به منظور ارسال از کارخانه x به انبار y با گزینه حمل‌ونقل i .

$E_{\lambda yzj}$: هزینه حمل‌ونقل محصول نوع λ به منظور ارسال از انبار y به مشتری z با گزینه حمل‌ونقل j .

$E_{\lambda zwk}$: هزینه حمل‌ونقل محصول نوع λ به منظور ارسال از مشتری z به مراکز انهدام w با گزینه حمل‌ونقل k .

$E_{\lambda wxl}$: هزینه حمل‌ونقل محصول نوع λ به منظور ارسال از مرکز انهدام w به کارخانه x با گزینه حمل‌ونقل l .

$E_{\lambda xzi}$: هزینه حمل‌ونقل محصول نوع λ به منظور ارسال مستقیم از کارخانه x به مشتری z با گزینه حمل‌ونقل i .

B_{xyi} : نرخ حمل‌ونقل به منظور ارسال کالا از کارخانه x به انبار y با گزینه حمل‌ونقل i .

B_{yzj} : نرخ حمل‌ونقل به منظور ارسال کالا از انبار y به مشتری z با گزینه حمل‌ونقل j .

B_{zwk} : نرخ حمل‌ونقل به منظور ارسال از مشتری z به مراکز انهدام w با گزینه حمل‌ونقل k .

B_{wxl} : نرخ حمل‌ونقل به منظور ارسال از مرکز انهدام w به کارخانه x با گزینه حمل‌ونقل l .

B_{xzi} : نرخ حمل‌ونقل به منظور ارسال مستقیم از کارخانه x به مشتری z با گزینه حمل‌ونقل i .

C_{xy} : فاصله بین کارخانه x و انبار y .

C_{yz} : فاصله بین انبار y و مشتری z .

C_{zw} : فاصله بین مشتری z و مرکز انهدام w .

C_{wx} : فاصله بین مرکز انهدام w و کارخانه x .

C_{xz} : فاصله بین کارخانه x و مشتری z .

A_x : هزینه ثابت بازگشایی کارخانه x .

A_y : هزینه ثابت بازگشایی انبار y .

A_w : هزینه ثابت بازگشایی مرکز انهدام w .

m_1 : حداقل درصدی از کالاها که باید از مشتریان جمع‌آوری شوند.

m_2 : حداقل درصدی از کالاها که باید به مراکز انهدام ارسال شوند.

$V_{\lambda x}$: هزینه متغیر تولید هر واحد کالا نوع λ در کارخانه x .

$V_{\lambda y}$: هزینه متغیر نگهداری هر واحد کالای نوع λ در انبار y .

$V_{\lambda z}$: هزینه متغیر جمع‌آوری هر واحد کالای نوع λ از مشتری z .

$V_{\lambda w}$: هزینه متغیر انهدام هر واحد محصول نوع λ در مرکز انهدام w .

$V_{\lambda r x}$: هزینه متغیر بازسازی هر واحد محصول نوع λ در کارخانه x .

Ma_x : حداکثر ظرفیت تولید کارخانه x .

Ma_y : حداکثر ظرفیت انبار y .

Ma_w : حداکثر ظرفیت مرکز انهدام w .

Mar_x : حداکثر ظرفیت بازسازی کارخانه x .

$F_{\lambda x}$: میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از تولید محصول نوع λ در کارخانه x .

$F_{\lambda y}$: میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از نگهداری محصول نوع λ در انبار y .

$F_{\lambda w}$: میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از انهدام محصول نوع λ در مرکز انهدام w .

$F_{\lambda r x}$: میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از بازسازی محصول نوع λ در کارخانه x .

G_{xyi} : میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از ارسال کالا از کارخانه x به انبار y با گزینه

حمل و نقل i .

G_{yzj} : میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از ارسال کالا از انبار y به مشتری z با گزینه

حمل و نقل j .

G_{zwk} : میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از ارسال کالا از مشتری z به مرکز انهدام w با

گزینه حمل و نقل k .

G_{wxl} : میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از ارسال کالا از مرکز انهدام w به کارخانه x با

گزینه حمل و نقل l .

G_{xzi} : میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده ناشی از ارسال مستقیم کالا از کارخانه x به مشتری z با

گزینه حمل و نقل i .

متغیرها:

H_x : متغیر باینری است اگر کارخانه بازگشایی شود مقدار ۱ می‌گیرد در غیر این صورت صفر.

H_y : متغیر باینری است اگر انبار بازگشایی شود مقدار ۱ می‌گیرد در غیر این صورت صفر.

H_w : متغیر باینری است اگر مرکز انهدام بازگشایی شود مقدار ۱ می‌گیرد در غیر این صورت صفر.
 $N_{\lambda xyi}^S$: میزان کالای ارسالی نوع λ از کارخانه x به انبار y با گزینه حمل‌ونقل i تحت سناریوی s .
 $N_{\lambda yzj}^S$: میزان کالای ارسالی نوع λ از انبار y به مشتری z با گزینه حمل‌ونقل j تحت سناریوی s .
 $N_{\lambda zwk}^S$: میزان کالای ارسالی نوع λ از مشتری z به مرکز انهدام w با گزینه حمل‌ونقل k تحت سناریوی s .

$N_{\lambda wxl}^S$: میزان کالای ارسالی نوع λ از مرکز انهدام w به کارخانه x با گزینه حمل‌ونقل l تحت سناریوی s .

$N_{\lambda xzi}^S$: میزان کالای ارسالی نوع λ از کارخانه x به مشتری z با گزینه حمل‌ونقل i تحت سناریوی s .

$R_{\lambda z}^S$: میزان کمبود محصول نوع λ مشتری z .

(۴)

$$\begin{aligned}
 obj = & \sum_{x \in X} A_x H_x + \sum_{y \in Y} A_y H_y + \sum_{w \in W} A_w H_w + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{x \in X} V_{\lambda x} \sum_{y \in Y} \sum_{i \in I} 1 N_{\lambda xyi}^S \\
 & + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{y \in Y} V_{\lambda y} \sum_{z \in Z} \sum_{j \in J} 1 N_{\lambda yzj}^S + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{z \in Z} V_{\lambda z} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} 1 N_{\lambda zwk}^S \\
 & + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{x \in X} V_{\lambda x} \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} 1 N_{\lambda xzi}^S + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{w \in W} V_{\lambda w} \sum_{x \in X} \sum_{l \in L} 1 N_{\lambda wxl}^S \\
 & + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} \sum_{i \in I} 1 E_{\lambda xyi} N_{\lambda xyi}^S + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} \sum_{j \in J} E_{\lambda yzj} N_{\lambda yzj}^S \\
 & + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{z \in Z} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} E_{\lambda zwk} N_{\lambda zwk}^S \\
 & + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{w \in W} \sum_{x \in X} \sum_{l \in L} 1 E_{\lambda wxl} N_{\lambda wxl}^S + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{x \in X} \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} 1 E_{\lambda xzi} N_{\lambda xzi}^S \\
 & + \sum_{\lambda \in \Lambda} 1 \sum_{z \in Z} R_{\lambda z}^S * D_{\lambda z}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 obj2 = & \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{x \in I} F_{\lambda x} \sum_{y \in J} \sum_{i \in M} 1 N_{\lambda xyi}^s + \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{y \in Y} F_{\lambda y} \sum_{z \in Z} \sum_{j \in J} 1 N_{\lambda yzj}^s \\
 & + \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{w \in W} F_{\lambda w} \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} 1 N_{\lambda zwk}^s + \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{x \in X} F_{\lambda r} \sum_{w \in W} \sum_{l \in L} 1 N_{\lambda wxl}^s \\
 & + \sum_{i \in I} G_{xyi} \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} 1 N_{\lambda xyi}^s C_{xy} B_{xyi} \\
 & + \sum_{j \in J} G_{yzj} \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} 1 N_{\lambda yzj}^s C_{yz} B_{yzj} \\
 & + \sum_{k \in K} G_{zwk} \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{z \in Z} \sum_{w \in W} 1 N_{\lambda zwk}^s C_{zw} B_{zwk} \\
 & + \sum_{l \in L} G_{wxl} \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{w \in W} \sum_{x \in X} 1 N_{\lambda wxl}^s C_{wx} B_{wxl} \\
 & + \sum_{i \in I} G_{xzi} \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{x \in X} \sum_{z \in Z} 1 N_{\lambda xzi}^s C_{xz} B_{xzi}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\min F1 = \sum_{s \in S'} P_s(obj)$$

$$+ r \sum_{s \in S'} P_s \left[(obj) - \sum_{s \in S'} P_s (obj) + 2\alpha_s \right] + u \sum_{s \in S'} P_s \times \epsilon_s$$

(۶)

$$\min F_2 = \sum_{s \in S'} P_s(obj2)$$

$$+ r \sum_{s \in S'} P_s \left[(obj2) - \sum_{s \in S'} P_s (obj2) + 2\alpha_s \right] + u \sum_{s \in S'} P_s \times \epsilon_s$$

(۷)

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{y \in Y} \sum_{i \in I} N_{\lambda xyi}^s + \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{z \in Z} \sum_{i \in I} N_{\lambda xzi}^s \leq Ma_x H_x \quad \forall x \in X; s \in S$$

(۸)

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{x \in X} \sum_{i \in I} N_{\lambda xyi}^s \leq Ma_y H_y \quad \forall y \in Y; s \in S$$

(۹)

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{z \in Z} \sum_{j \in J} N_{\lambda yzj}^s \leq \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{x \in X} \sum_{i \in I} N_{\lambda xyi}^s \quad \forall y \in Y; s \in S$$

(۱۰)

(۱۱)

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{y \in Y} \sum_{j \in J} N_{\lambda y z j}^s + \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{x \in X} \sum_{i \in I} N_{\lambda x z i}^s + \epsilon_s = O_z^s - R_z^s \quad \forall z \in Z; s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} N_{\lambda z w k}^s - \epsilon_s = O_z^s \quad \forall z \in Z; s \in S \quad (13)$$

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{z \in Z} \sum_{j \in J} N_{\lambda k h m}^s \leq M a_w H_w \quad \forall w \in W; s \in S \quad (14)$$

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} N_{\lambda z w k}^s + \epsilon_s = m_1 O_z^s \quad \forall z \in Z; s \in S \quad (15)$$

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{x \in X} \sum_{l \in L} N_{\lambda w x l}^s \geq m_2 \sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} N_{\lambda z w k}^s \quad \forall w \in W; s \in S \quad (16)$$

$$\sum_{\lambda \in \lambda} 1 \sum_{w \in W} \sum_{l \in L} N_{\lambda w x l}^s \leq M a_x H_x \quad \forall x \in X; s \in S \quad (17)$$

$$obj - \sum_{s \in S'} P_s(obj) + \alpha_s \geq 0 \quad (18)$$

$$obj2 - \sum_{s \in S'} P_s(obj2) + \alpha_s \geq 0 \quad (19)$$

$$N_{\lambda x y i}^s, N_{\lambda y z j}^s, N_{\lambda z w k}^s, N_{\lambda w x l}^s, N_{\lambda x z i}^s, \epsilon_s, \theta_s \geq 0 \quad (20)$$

$$H_x, H_y, H_w \in [0,1]$$

رابطه ۶، همتای استوار تابع هدف اول را نشان می‌دهد که از ۳ بخش تشکیل شده است. دو بخش اول آن برابر با میانگین و واریانس هزینه‌های کل زنجیره تأمین است. این دو بخش نشان‌دهنده استواری مدل نسبت به بهینگی است. بخش سوم تابع هدف، استواری مدل نسبت به شدنی‌بودن را با توجه به مقدار ناموجهی محدودیت‌های کنترل تحت هر سناریو اندازه‌گیری می‌کند. رابطه ۷، همتای استوار تابع هدف دوم است و از ۳ بخش تشکیل شده است که دو بخش اول آن برابر با میانگین و واریانس کل دی‌اکسید کربن منتشرشده زنجیره تأمین است. این دو بخش استواری مدل نسبت به بهینگی را نشان می‌دهد. بخش سوم تابع هدف، استواری مدل نسبت به

شدنی بودن را با توجه به مقدار ناموجهی محدودیت‌های کنترل تحت هر سناریو اندازه‌گیری می‌کند. طبق رابطه ۸، کل واحدهای محصولات ارسال شده از یک کارخانه به انبارها با هر گزینه حمل‌ونقل و همچنین کل واحدهای محصولات ارسالی به‌طور مستقیم از کارخانه به مشتریان باید کوچک‌تر یا مساوی حداکثر ظرفیت کارخانه موردنظر باشد. رابطه ۹، نشان می‌دهد که کل واحدهای محصولات واردشده به یک انبار از کارخانه‌ها با تمام گزینه‌های حمل‌ونقل باید حداکثر به اندازه ظرفیت انبار موردنظر باشد. رابطه ۱۰، محدودیت بالانس است و نشان می‌دهد که خروجی انبار باید حداکثر به اندازه ورودی انبار مربوطه باشد. رابطه ۱۱، به این موضوع اشاره دارد که اگر میزان کالای ارسالی از انبار به مشتری به اضافه میزان کالای ارسالی به‌طور مستقیم از کارخانه به مشتری بزرگ‌تر یا مساوی تقاضای مشتری مربوطه با درنظرگرفتن کمبود مجاز نباشد، آنگاه تقاضای برآورده‌نشده وجود ندارد و E_s صفر خواهد بود؛ در غیر این صورت تقاضای برآورده‌نشده وجود دارد و میزان تخطی E_s برابر با اختلاف کالای ارسالی و تقاضای مشتری خواهد بود. طبق رابطه ۱۲، اگر کل محصولات یک مشتری که وارد هر مرکز انهدام می‌شود از تقاضای مشتری مربوطه بزرگ‌تر باشد، آنگاه E_s مقدار می‌گیرد (برابر است با میزان کالای وارد شده از مشتری منهای میزان تقاضای مشتری). E_s جریمه نقض محدودیت تحت سناریوی (S). عبارت ۱۳، نشان می‌دهد که کل واحدهای محصولات واردشده به یک مرکز انهدام از هر مشتری با هر گزینه حمل‌ونقل باید از حداکثر ظرفیت مرکز انهدام موردنظر کوچک‌تر یا مساوی آن باشد. رابطه ۱۴، به این موضوع اشاره دارد که اگر کل محصولات یک مشتری که وارد هر مرکز انهدام می‌شود از حداقل درصد تقاضا که باید وارد مرکز انهدام شود، کوچک‌تر باشد، آنگاه E_s مقدار می‌گیرد (برابر است با حداقل درصد تقاضا که باید وارد مرکز انهدام شود منهای کل محصولات یک مشتری که وارد مرکز انهدام می‌شود). طبق رابطه ۱۵، کل واحدهای محصولات منهدم‌شده که از یک مرکز انهدام به هر کارخانه تحویل داده می‌شود، باید بزرگ‌تر یا مساوی حداقل درصد محصولات ارسال شده از مرکز انهدام موردنظر باشد. با توجه به رابطه ۱۶، کل واحدهای محصولات ارسال شده از هر مرکز انهدام به یک کارخانه با هر گزینه حمل‌ونقل باید کوچک‌تر یا مساوی حداکثر ظرفیت بازسازی یا تولید دوباره کارخانه مربوطه باشد. روابط ۱۷ و ۱۸، به‌منظور خطی کردن مدل هستند. عبارت ۱۹، میزان کالاهای جریان‌یافته بین تسهیلات تحت سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. عبارت ۲۰، نمایانگر متغیرهای باینری است که احداث یا عدم‌احداث تسهیلات را نشان می‌دهند.

بهینه‌سازی چندهدفه. بهینه‌سازی چندهدفه، بهینه‌سازی مسائلی است که دارای دو یا چند معیار و ویژگی بهینگی بوده و با هم در تعارض هستند. بر خلاف مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه که دارای یک جواب بهینه هستند، در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه‌ای از جواب‌ها وجود دارند که هر کدام از دیدگاهی می‌توانند بهینه باشند. این مجموعه از جواب‌ها در مسائل چندهدفه، به

«مجموعه جواب پارتو» معروف هستند؛ بنابراین الگوریتم‌های خاصی برای برخورد با این‌گونه مسائل طراحی شده‌اند.

روش اپسیلون محدودیت. در این روش یکی از توابع هدف برای بهینه‌سازی انتخاب شده و توابع دیگر به محدودیت تبدیل می‌شوند. این محدودیت‌ها حد بالایی دارند (ϵ) که می‌توان آن‌ها را مقادیر سمت راست محدودیت‌ها فرض کرد. روش محدودیت اپسیلون به شکل زیر است:

(۱۹)

$$\text{Min } F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_{31}(x), \dots, f_m(x))$$

s.t

$$C(x) \leq 0$$

در رابطه ۱۹، اگر n تعداد توابع هدف تعیین شود و اگر $n > 1$ باشد، آنگاه: $X = (x_1, x_2, x_1, \dots, x_n)$ متغیرهای تصمیم هستند و $F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_{31}(x), \dots, f_m(x))$ نشان‌دهنده فضای جواب‌های موجه است؛ همچنین $C(x)$ نمایانگر قيود و محدودیت‌های مسئله است.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

مطالعه موردی. در این قسمت مدل‌های تدوین‌شده با استفاده از داده‌های «شرکت ایران ترانسفو» اجرا می‌شوند. زنجیره تأمین شرکت یادشده حلقه‌باز است که در این پژوهش زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز روی این شرکت اجرا شده است. گروه «ایران ترانسفو» به پشتوانه نیم قرن تجربه در صنعت ترانسفورماتور، تولیدکننده پیشرو در خاورمیانه است. محصولات شرکت بخش وسیعی از ترانسفورماتورهای کوچک توزیع تا ترانسفورماتورهای بزرگ قدرت، ترانسفورماتورهای خاص متناسب با نیاز صنعت، تجهیزات ترانسفورماتور و همچنین انواع پست‌ها را دربرمی‌گیرد. محصولات شرکت شامل طراحی و تولید ترانسفورماتورهای قدرت تا ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت و توان ۲۵۰ مگاوات‌آمپر و تولید اتوترانسفورماتورهای قدرت تا ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت و توان ۳۱۵ مگاوات‌آمپر، طراحی و تولید ترانسفورماتور تکفاز قدرت با ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت و توان ۲۰۰ مگاوات‌آمپر و انواع دیگر محصولات است. زنجیره تأمین موردبررسی شرکت دارای دو کارخانه اصلی تولید، دو انبار و ۵ مشتری اصلی است و دو مرکز انهدام به‌منظور بازطراحی زنجیره تأمین شرکت در نظر گرفته شده است. با توجه به تنوع بالای محصولات شرکت، سه نوع ترانسفورماتور و دو نوع وسیله حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای برای ایجاد ارتباط بین تسهیلات در این پژوهش در نظر گرفته شده است. با توجه به احداث‌شدن کارخانه‌های یادشده در سال ۱۳۴۵ با سرمایه ۲۳۹۵۸۲۱ ریال، این هزینه به ارزش روز در نظر گرفته شده است؛ همچنین هزینه‌های احداث مراکز انهدام نیز به ارزش

روز تخمین زده شده است. حداکثر ظرفیت کارخانه، انبارها و مراکز انهدام به ترتیب ۱۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۰۵۰۰۰۰۰ است. حداقل درصد محصولاتی که باید از مشتریان جمع‌آوری شده و به مراکز انهدام ارسال شوند و همچنین حداقل درصد محصولاتی که از مراکز انهدام به کارخانه‌ها ارسال می‌شوند، ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. تقاضای مشتریان سالانه در حدود ۹۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ واحد است. میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده از سیستم ناشی از فعالیت تسهیلات و حمل‌ونقل حدود ۱۰ به‌ازای هر واحد محصول و ۱۵ گرم به‌ازای هر واحد مسافت است. هزینه‌های متغیر تسهیلات و حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد محصول و هر واحد مسافت به ترتیب به‌طور میانگین ۱۰۰۰۰۰۰ و ۱۰۰۰ تومان است. جدول ۱، نتایج حاصل از حل زنجیره تأمین حلقه‌باز و حلقه‌بسته سبز شرکت را با استفاده از روش اپسیلون محدودیت به‌ازای مقادیر مختلف اپسیلون نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج حاصل از حل زنجیره تأمین حلقه‌باز و حلقه‌بسته شرکت ایران ترانسفو

زنجیره تأمین حلقه‌بسته			زنجیره تأمین حلقه‌باز		
اپسیلون	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	اپسیلون	تابع هدف اول	تابع هدف دوم
۳۰۵۰/۰۶۷	۳۲۲۷۱/۳۴۰	۳۰۵۰/۰۶۷	۳۰۵۰/۲۰۴	۳۸۰۱۹/۴۰۸	۳۰۵۰/۲۰۴
۵۲۵۴/۹۴۲	۳۳۲۰۱/۷۸۸	۵۲۵۴/۹۴۲	۳۴۵۳/۶۳۹	۳۵۵۹۳/۷۵۰	۳۴۵۳/۶۳۹
۷۴۵۹/۷۱۸	۳۳۰۸۰/۹۸۰	۷۴۵۹/۷۱۸	۴۲۵۷/۰۷۵	۳۴۵۱۰/۶۷۴	۴۲۵۷/۰۷۵
۹۶۶۴/۶۹۳	۳۳۰۸۰/۹۸۰	۹۶۶۴/۶۹۳	۴۸۶۰/۵۱۰	۳۳۸۴۸/۵۰۱	۴۸۶۰/۵۱۰
۱۱۸۶۹/۵۶۸	۳۳۰۸۰/۹۸۰	۱۱۸۶۹/۵۶۸	۵۴۶۳/۹۴۶	۳۳۵۲۷/۳۱۲	۵۴۶۳/۹۴۶
۱۴۰۷۴/۴۴۴	۳۳۰۴۳/۲۱۰	۱۴۰۷۴/۴۴۴	۶۰۶۷/۳۸۲	۳۳۹۱۶/۹۳۷	۶۰۶۷/۳۸۲
۱۶۲۷۹/۳۱۹	۳۳۰۴۲/۶۶۰	۱۶۲۷۹/۳۱۹	۶۶۷۰/۸۱۷	۳۳۴۷۴/۰۷۹	۶۶۷۰/۸۱۷
۱۸۴۸۴/۱۹۵	۳۳۰۴۲/۶۶۰	۱۸۴۸۴/۱۹۵	۷۲۷۴/۲۵۳	۳۳۴۷۱/۸۰۱	۷۲۷۴/۲۵۳
۲۰۸۶۹/۰۷۰	۳۳۰۱۰/۳۲۴	۲۰۸۶۹/۰۷۰	۷۷۷۸/۶۸۸	۳۳۴۶۲/۱۶۵	۷۷۷۸/۶۸۸

جدول ۱، مقادیر دو تابع هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های سیستم و کمینه‌سازی میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده را به‌ازای مقادیر مختلف اپسیلون نشان می‌دهد. این مقادیر توسط روش اپسیلون محدودیت در نرم‌افزار گمز گُد شده و به‌دست آمده‌اند. جریان کالا در زنجیره رو به جلو به این صورت است که ۹۲ واحد محصول نوع دو در کارخانه سوم تولید شده و به انبار دوم با گزینه حمل‌ونقل ریلی تحت سناریو اول ارسال می‌شود؛ سپس محصول نوع سوم در کارخانه سوم تولید شده و ۸۴ واحد با گزینه حمل‌ونقل ریلی به انبار دوم تحت سناریو دوم و ۷۶ واحد به انبار دوم تحت سناریو سوم ارسال می‌شوند. در ادامه ۱۸ واحد از محصول نوع دوم از انبار دوم به مشتری دوم با گزینه حمل‌ونقل جاده‌ای تحت سناریو دوم ارسال می‌شود. درحالی‌که در مدل حلقه‌بسته این مقدار از انبار اول به مشتری سوم با گزینه حمل‌ونقل ریلی ارسال می‌گردد، مشاهده می‌شود که مدل حلقه‌بسته بیشتر از گزینه حمل‌ونقل ریلی که دی‌اکسید کربن کمتری را به محیط وارد می‌کند،

استفاده می‌کند. طبق نتایج جدول ۱، در هر دو زنجیره حلقه‌باز و حلقه‌بسته با افزایش میزان دی‌اکسید کربن منتشرشده از سیستم، کل هزینه‌های سیستم کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تناقض دو هدف است. علاوه بر این با مقایسه زنجیره تأمین فعلی شرکت (زنجیره تأمین حلقه‌باز) با زنجیره تأمین پیشنهادی (زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز) مشاهده می‌شود که تغییر زنجیره تأمین شرکت به زنجیره پیشنهادی، هزینه کم و معقولی را برای شرکت در پی دارد (هزینه زنجیره تأمین حلقه‌باز $F1=33010,324$ و زنجیره تأمین حلقه‌بسته $F1=33462,165$)؛ اما در مورد ملاحظات زیست‌محیطی زنجیره تأمین حلقه‌بسته بسیار بهتر عمل می‌کند (حلقه‌باز $F2=20689,07$ و حلقه‌بسته سبز $F2=7877,688$). در هر دو مدل ارائه‌شده، تقاضای مشتریان به‌طور کامل برآورده شده است؛ همچنین جریمه نقض محدودیت‌ها در مدل ریاست صفر است که خود دلیلی بر اثبات عملکرد مدل ریاست است. حال به تحلیل حساسیت مدل ریاست در شرایط مختلف، اعم از افزایش تسهیلات و بررسی تأثیر آن در زنجیره و همچنین افزایش تعداد سناریوها و مقادیر مختلف ضریب تعادل بین استواری مدل و استواری جواب پرداخته خواهد شد. نتایج به شرح زیر است:

با افزایش یک کارخانه، میزان هزینه‌های سیستم $0/08$ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش یک واحد انبار، میزان هزینه‌های سیستم $0/07$ درصد افزایش یافته و همچنین با افزایش یک واحد مرکز انهدام میزان هزینه‌ها $0/05$ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش اعداد سناریوها از ۳ به ۱۵۰، میزان هزینه‌های سیستم $2/9$ برابر می‌شود؛ اما نشان می‌دهد که مدل ریاست توانایی حل مسئله در اندازه بزرگ در تعداد سناریو بالا را دارا است. بررسی ضریب تعادل بین استواری مدل و استواری جواب نشان می‌دهد که با افزایش مقدار این ضریب، مدل محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌کند و میزان هزینه‌های سیستم نسبت به حالتی که این ضریب در سطوح پایین‌تری قرار دارد، کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج حاکی از آن است که در زنجیره تأمین توسعه‌یافته با توجه به اینکه مسائل مالی در کنار مسائل زیست‌محیطی مدنظر قرار گرفته است، استفاده از روش برنامه‌ریزی چندهدفه گریزناپذیر است و مشاهده شد که افزایش هزینه‌های سیستم کاهش دی‌اکسید کربن منتشرشده از سیستم را در پی دارد. تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به سیاست‌های سازمان و هیئت‌مدیره و با توجه به حساسیت مسئله که کدام هدف ارجحیت بیشتری دارد، تابع هدف اصلی را انتخاب کند و بقیه اهداف به‌عنوان اهداف فرعی در محدودیت‌ها وارد شوند. امروزه به‌دلیل الزامات دولت‌ها بسیاری از سازمان‌ها و کارخانه‌ها ملزم به در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی هستند. با توجه به اینکه عدم قطعیت در دنیای واقعی اجتناب‌ناپذیر است و به‌منظور انطباق مدل بر دنیای واقعی که بتواند قابل‌استفاده باشد، پارامتر تقاضا به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. با توجه به نیاز سازمان‌ها به روش‌های جدید برنامه‌ریزی که بتواند آن‌ها را برای مقابله با عوامل غیرقطعی و

تغییرات محیطی آماده سازد، از بهینه‌سازی ریاضی استوار استفاده شده است. یکی از مزایای این روش این است که تصمیم‌گیرنده قادر است با تبادل بین بهینگی و غیرموجه‌بودن، با توجه به حساسیت مسئله و میزان عدم قطعیت، به‌گونه‌ای وزن بین بهینگی و موجه‌بودن را تنظیم کند که به جواب موجه پایدار متناسب با شرایط سازمان خود دست یابد. این مدل با اندکی تغییر، قابلیت استفاده در صنایع مختلف را خواهد داشت. در رویکردهای برنامه‌ریزی استوار، پارامترهای غیرقطعی به‌گونه‌ای مقدار می‌گیرند که شدنی‌بودن مسئله در بیشتر حالات یا سناریوهایی که می‌تواند وقوع یابد، موجه بماند. در کل فضای موجه مسئله در رویکرد استوار محدودتر می‌شود. به‌کارگیری رویکردهایی مانند بهینه‌سازی استوار برای مقابله با عدم قطعیت، اگرچه باعث افزایش هزینه‌های سیستم می‌شود، باعث خواهد شد که عملکرد زنجیره تأمین برای مقابله با اختلالات بهبود یابد و توانایی زنجیره به‌منظور مقابله با پارامترهای غیرقطعی افزایش می‌یابد؛ همچنین طراحی زنجیره‌های سبز علاوه بر اینکه هزینه‌های چندانی به مدل تحمیل نمی‌کند در کاهش چشمگیر آلودگی‌های زیست‌محیطی نقش مؤثری ایفا می‌کند که مطالعه موردی دلیلی بر صدق این ادعا است.

در این پژوهش عدم قطعیت برای تعداد محدودی از پارامترها و متغیرها از جمله تقاضا در نظر گرفته شده است که پیشنهاد می‌شود مسئله با عدم قطعیت‌های چندگانه و پیچیده در فضای زنجیره در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد؛ همچنین ارائه هم‌تای استوار برای مدل‌های بهینه‌سازی اغلب باعث افزایش ابعاد مسئله می‌شود و در برخی از موارد به مدل‌های پیچیده‌تری می‌انجامد. با توجه به کاربردی‌بودن این مدل‌ها و ابعاد بسیار بزرگ آن‌ها در مسائل واقعی یافتن الگوریتم‌های فراابتکاری برای رسیدن به جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان معقول بسیار اهمیت دارد. علاوه بر این در نظر گرفتن مراکز بازیافت به‌منظور بازیافت محصولات و ارائه الگوریتم‌های هیوریستیک برای حل مسئله می‌تواند زمینه‌ای برای پژوهش‌های آتی باشد. در نظر گرفتن معیارهای ریسک، مانند ارزش در معرض خطر و غیره می‌تواند به‌عنوان پژوهش‌های آتی در مدل یادشده بررسی شود.

منابع

1. Abdallah, T., Diabat, A., & Simchi-Levi, D. (2010). A carbon sensitive supply chain network problem with green procurement. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
2. Akbari, A. A., & Karimi, B. (2015). A new robust optimization approach for integrated multi-echelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1-4), 229-244.
3. Amaro, A. C. S., & Barbosa-Póvoa, A. P. F. (2009). The effect of uncertainty on the optimal closed-loop supply chain planning under different partnerships structure. *Computers & Chemical Engineering*, 33(12), 2144-2158.
4. Ambrosino, D., & Scutella, M. G. (2005). Distribution network design: New problems and related models. *European journal of operational research*, 165(3), 610-624.
5. Amir Khan, M., Norang, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). A Fuzzy Mathematical Programming Model for a Supply Network Design of Raw Materials under Uncertainty—A Case Study. *International Journal of Industrial Engineering*, 25(2), 217-235.
6. Azaron, A., Brown, K. N., Tarim, S. A., & Modarres, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 129-138.
7. Azar, Adel. Najafi, SAjad. (2011). Budget planning mathematical model in public section: Robust optimization approach. *Journal of Governmental Management Perspective*, 2(8), 83-94 (In Persian).
8. Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International journal of production economics*, 55(3), 281-294.
9. Ben-Tal, A., El Ghaoui, L., & Nemirovski, A. (2009). Robust optimization (Vol. 28). Princeton University Press.
10. Ben-Tal, A., Boyd, S., & Nemirovski, A. (2006). Extending scope of robust optimization: Comprehensive robust counterparts of uncertain problems. *Mathematical Programming*, 107(1-2), 63-89.
11. Drezner, Z., & Wesolowsky, G. O. (2003). Network design: selection and design of links and facility location. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(3), 241-256.
12. Dutta, P., Das, D., Schultmann, F., & Fröhling, M. (2016). Design and planning of a closed-loop supply chain with three ways recovery and buy-back offer. *Journal of Cleaner Production*, 135, 604-619.
13. Emadabadi, A., teymoori, E., & Pishvae, M. (2019). Design of Multi-Periodical and MultiProduct Supply Chain Network with Regard to Disruption of Facilities and Communication Paths (Case Study: Subscription Plan for Publications). *Journal of Industrial Management Perspective*, (in Persian)
14. Farahani, R., Zanjirani, N., Asgari, & Davarzani, H. (2009). eds. Supply chain and logistics in national, international and governmental environment: concepts and models. Springer Science & Business Media, Springer-Verlag. 316p. (Contributions to Management Science) ISSN (print) 1431-1941 ISBN 9783790821550.
15. Ghomi-Avili, M., Naeini, S. G. 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.
15. Gladwin, T. N., Kennelly, J. J., & Krause, T. S. (1995). Shifting paradigms for sustainable development: Implications for management theory and research. *Academy of management Review*, 20(4), 874-907.
16. Govindan, K., & Soleimani, H. (2017). A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: A Journal of Cleaner Production focus. *Journal of Cleaner Production*, 142, 371-384.
17. Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603-626.
18. Govindan, K., Kaliyan, M., Kannan, D., & Haq, A. N. (2014). Barriers analysis for green supply chain management implementation in Indian industries using analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 147, 555-568.
19. Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152, 9-28.
20. 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, 118-131.
21. Gutiérrez, G. J., Kouvelis, P., & Kurawarwala, A. A. (1996). A robustness approach to uncapacitated network design problems. *European Journal of Operational Research*, 94(2), 362-376.
22. Heidari-Fathian, H., & Pasandideh, S. H. R. (2018). Green-Blood supply chain network design: Robust optimization, Bounded Objective Function & Lagrangian relaxation. *Computers & Industrial Engineering*.
23. Heidari-Fathian, H., & Pasandideh, S. H. R. (2017). Green Supply Chain Network Design under Multi mode Production and Uncertainty. *Iranian Journal of Operations Research*, 8(1), 44-60.
24. Ho, C. J. (1989). Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. *The International Journal of Production Research*, 27(7), 1115-1135.
25. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Sheu, J. B. (2017). An enhanced robustness approach for managing supply and demand uncertainties. *International Journal of Production Economics*, 183, 620-631.
26. Jamshidi, R., Ghomi, S. F., & Karimi, B. (2012). Multi-objective green supply chain optimization with a new hybrid memetic algorithm using the Taguchi method. *Scientia Iranica*, 19(6), 1876-1886.
27. Khosrojerdi, A., Zegordi, S. H., Allen, J. K., & Mistree, F. (2016). A method for designing power supply chain networks accounting for failure scenarios and preventive maintenance. *Engineering Optimization*, 48(1), 154-172.
28. Kisomi, M. S., Solimanpur, M., & Doniavi, A. (2016). An integrated supply chain configuration model and procurement management under uncertainty: a set-based robust optimization methodology. *Applied Mathematical Modelling*, 40(17-18), 7928-7947.
29. Ma, H., & Li, X. (2018). Closed-loop supply chain network design for hazardous products with uncertain demands and returns. *Applied Soft Computing*, 68, 889-899.

30. Manoochehri, Saba. Tajedin, Ali. Shirazi, Babak. (2019). Robust Integrated Optimization for Green Closed Loop Supply Chain. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(4), 61-95 (in Persian)
31. Melkote, S., & Daskin, M. S. (2001). Capacitated facility location/network design problems. *European journal of operational research*, 129(3), 481-495.
32. Mirzapour Al-E-Hashem, S. M. J., Malekly, H., & Aryanezhad, M. B. (2011). A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 134(1), 28-42.
33. Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. P. (2018). Sustainable supply chains: An integrated modeling approach under uncertainty. *Omega*, 77, 32-57.
34. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.
35. Mulvey, J. M., & Ruszczyński, A. (1995). A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization. *Operations research*, 43(3), 477-490.
36. Nurjanni, K. P., Carvalho, M. S., & Costa, L. (2017). Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. *International Journal of Production Economics*, 183, 421-432.
37. Pishvae, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
38. Pishvae, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 637-649.
39. Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2014). An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 67, 14-38.
40. Rad, R. S., & Nahavandi, N. (2018). A novel multi-objective optimization model for integrated problem of green closed loop supply chain network design and quantity discount. *Journal of Cleaner Production*. 196, 1549-1565
41. Bozorgi Amiri, A. Mansouri, S. Pishvaei, S. (2017). Multipurpose Relief Chain Network Design to Respond to Earthquake Under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 7(1), 9-36 (In Persian)
42. Rahmani, D., Ramezani, R., Fattahi, P., & Heydari, M. (2013). A robust optimization model for multi-product two-stage capacitated production planning under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 37(20-21), 8957-8971.
43. Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8), 825-843.
44. Ramudhin, A., Chaabane, A., & Paquet, M. (2010). Carbon market sensitive sustainable supply chain network design. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 5(1), 30-38.
45. Ruimin, M. A., Lifei, Y. A. O., Maozhu, J. I. N., Peiyu, R. E. N., & Zhihan, L. V. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons & Fractals*, 89, 195-202.

46. Sabri, E. H., & Beamon, B. M. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28(5), 581-598.
47. Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of cleaner production*, 196, 273-296.
48. Saffar, M. Shakori Ganjavin, H., & Razmi, J. (2019). A green closed-loop supply chain network design considering operational risk under uncertainty and solving the model with NSGAII algorithm. *Journal of advances in industrial engineering*, 49, 55-68.
49. Salema, M. I. G., Póvoa, A. P. B., & Novais, A. Q. (2009). A strategic and tactical model for closed-loop supply chains. *OR spectrum*, 31(3), 573-599.
- Schmitt, A. J., Sun, S. A., Snyder, L. V., & Shen, Z. J. M. (2015). Centralization versus decentralization: Risk pooling, risk diversification, and supply chain disruptions. *Omega*, 52, 201-212.
50. Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011). Optimal production and pricing policy for a closed loop system. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), 639-647.
51. Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., & Jafari, H. (2017). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 191-203.
52. Soleimani, H., Seyyed-Esfahani, M., & Shirazi, M. A. (2013). Designing and planning a multi-echelon multi-period multi-product closed-loop supply chain utilizing genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1-4), 917-931.
53. Van Landeghem, H., & Vanmaele, H. (2002). Robust planning: a new paradigm for demand chain planning. *Journal of operations management*, 20(6), 769-783.
54. Wang, F., Lai, X., & Shi, N. (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems*, 51(2), 262-269.

Investigating Open Loop and Closed-Loop Supply Chain under Uncertainty (Case Study: Iran Teransfo Company)

Mahsa Mohammadi*, Hamed Soleimani**

Abstract

One of the main components of competition in the current competitive environment is supply chain; therefore, organizations need to have a reliable supply chain to increase efficiency and effectiveness. Moreover, due to the increase in environmental pollution and the requirements imposed by the governments to harness polluting activities, organizations are obliged to follow green supply chain practices that account for environmental considerations along with economic aspects. Hence, in this study, a bi-objective model for a green, closed-loop supply chain under demand uncertainty is proposed which takes into account environmental consideration and economic aspects. Another important aspect of the supply chain network design is the concept of uncertainty. Due to societal and political evolutions and the scarcity of raw materials in the decision-making horizon, uncertainty is a significant measure in the models of supply chain. Indeed, in this study, the model was developed for a supply chain under uncertainty so that more compatibility with real-world conditions would be achieved. The results show that considering uncertainties makes the model more flexible. The advancement of technology and unpredictable behaviors of customers in markets have created a very complex competitive atmosphere. To evaluate the performance of the developed model, the case study of the Iran Transfo Company is considered.

Keywords: Closed-Loop Supply Chain; Robust Optimization; Uncertainty; Multi-Objective Optimization; Green Supply Chain; ϵ -Constraint Method.

Received: April 30, 2019, Accepted: Jan. 27, 2020.

1. M.Sc., Department of industrial engineering, Faculty of industrial and Mechanical engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University (IAU), Qazvin, Iran.

2. Associate Professor of Department of industrial engineering, Faculty of industrial and Mechanical engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University (IAU), Qazvin, Iran (Corresponding Author).

E-mail: hd_soleimani@yahoo.com