



روش برنامه‌ریزی استوار امکانی در مدل‌سازی مسئله شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت

جاوید قهرمانی نهر

عضو هیئت علمی پژوهشکده توسعه و برنامه‌ریزی جهاد دانشگاهی، تبریز، ایران

Javid.ghahremani@yahoo.com

مریم محرمی

کارشناس پژوهشی پژوهشکده توسعه و برنامه‌ریزی جهاد دانشگاهی، تبریز، ایران

Maryam.moh91@yahoo.com

سعیده صمدزاد

عضو هیئت علمی پژوهشکده توسعه و برنامه‌ریزی جهاد دانشگاهی، تبریز، ایران

Saeede.samadzad@gmail.com

چکیده

در این مقاله به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با هدف کاهش هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین، تحت عدم قطعیت تقاضا، نرخ بازگشت محصولات و هزینه‌های حمل‌ونقل پرداخته شده است. شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی شامل سطوح تأمین‌کننده مواد اولیه، مراکز تولیدی و بازار دست‌دوم در زنجیره تأمین روبه‌جلو و مراکز انهدام، مراکز بازیافت و بازار دست‌اول در زنجیره تأمین رو به عقب می‌باشد. برای کنترل پارامترهای غیرقطعی مسئله از برنامه‌ریزی استوار امکانی استفاده شد. برای ارزیابی مدل و همچنین بررسی متغیرهای خروجی، یک مسئله نمونه طراحی و حدود بازه‌ای پارامترهای مسئله نشان داده شد. با حل مسئله توسط نرم‌افزار GAMS مشاهده گردید، با افزایش نرخ عدم قطعیت، مقدار هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین به دلیل افزایش تقاضای بازار دست‌اول و دوم افزایش یافت. همچنین مشاهده شد با کاهش هزینه کمبود، مقدار کمبود کاهش و در نتیجه آن هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین کاهش پیدا کرده است.

واژگان کلیدی: طراحی شبکه زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی استوار امکانی، مکانیابی-تخصیص

مقدمه

زنجیره تأمین، تنها دربرگیرنده تأمین کنندگان و تولید کنندگان نبوده، بلکه علاوه بر آن بخش های حمل و نقل، عمده فروشان، خرده فروشان و حتی مشتری های آنان نیز از دیگر اجزای زنجیره به حساب می آیند. در حقیقت هدف اولیه هر زنجیره تأمین، برآوردن نیازهای مشتریان می باشد و نتیجه این فرآیند، کسب سود و درآمد برای تولید کننده و دیگر عناصر درگیر در زنجیره خواهد بود. به طور کلی، حرکت مواد از تأمین کنندگان به تولید کنندگان و سپس به توزیع کنندگان و خرده فروشان و در نهایت به مشتریان نهایی در طول زنجیره، سیر فعالیت های زنجیره تأمین را نشان می دهد. از آنجایی که زنجیره تأمین پویاست و همواره جریان مداومی از اطلاعات، پول و محصول در بین مراحل مختلف آن وجود دارد توجه به این موضوع ضروری است که این جریان های مداوم در هر دو جهت زنجیره تأمین می باشند، درحالی که به طور سنتی جهت جریان محصول به سمت مشتری و جهت جریان پول به سمت تأمین کننده فرض شده است (Abdallah et al., 2012). در یک زنجیره تأمین، تولید کننده ممکن است مواد اولیه خود را به جای یک تأمین کننده از چندین تأمین کننده فراهم نماید و از سویی دیگر محصولات خود را به تعداد زیادی توزیع کننده ارسال کند. بنابراین، بسیاری از زنجیره های تأمین به صورت شبکه های تأمین می باشند. در یک تعریف جامع می توان بیان نمود که یک زنجیره تأمین شامل همه مراحل (اعضای زنجیره) است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم در برآورده سازی خواسته های مشتریان نقش دارد. درواقع این زنجیره، تمامی موارد مرتبط با شبکه تدارکات را در برمی گیرد که شامل تأمین کنندگان، مراکز تولیدی، انبارها، مراکز توزیع، بازار خرده فروشان، مشتریان و هم چنین مواد خام، موجودی های در حال ساخت و محصولات نهایی جاری بین آنها می شود (Ghahremani et al., 2018).

اجزای زنجیره تأمین

الف) زنجیره تأمین بالادست: این بخش شامل اقداماتی است که یک شرکت در پیوند با تأمین کنندگان در اولین لایه و ارتباط آنها با تأمین کنندگان لایه های پایین تر انجام می دهد. روابط تأمین کنندگان می تواند در سطوح مختلف تا اولین تأمین کننده مواد توسعه یابد. در این قسمت، فعالیت اصلی تأمین و تهیه است (Ghahremani et al., 2018).

ب) زنجیره تأمین داخلی: این بخش شامل همه پردازش های استفاده شده به وسیله یک سازمان در تبدیل داده های حمل شده به سازمان به وسیله تأمین کنندگان به خروجی هاست از زمانی که مواد وارد سازمان می شود تا زمانی که محصول نهایی برای توزیع به خارج سازمان حرکت می کند. فعالیت های اصلی این قسمت شامل حمل مواد، مدیریت موجودی، ساخت و کنترل کیفیت است.

ج) زنجیره تأمین پایین دست: این بخش شامل همه فرآیندهای درگیر در توزیع و تحویل محصولات به مشتریان نهایی می باشد. خیلی زیاد مشاهده می شود که زنجیره تأمین، وقتی محصول واگذار یا مصرف گردد، پایان می پذیرد. فعالیت های اصلی این قسمت شامل بسته بندی، انبار و حمل است. این فعالیت ها ممکن است با استفاده از چندین توزیع کننده انجام شود مانند عمده فروشان و خرده فروشان. این قسمت می تواند به سمت راست به همین ترتیب گسترش یابد (diabat et al., 2015).

هدف زنجیره تأمین

هدف هر زنجیره تأمین، حداکثر کردن ارزش کل تولید شده است که درواقع اختلاف بین ارزش محصول نهایی برای مشتری و هزینه ای است که زنجیره تأمین در تلاش خود برای ارضاء خواسته مشتری صرف کرده است. در اغلب زنجیره های تأمین تجاری، ارزش باقابلیت سودآوری زنجیره تأمین ارتباط تنگاتنگی دارد. قابلیت سودآوری زنجیره تأمین، تفاوت بین آنچه که از مشتری به دست می آید و هزینه کلی است که در طول زنجیره تأمین صرف شده است. درواقع، سود نهایی است که بین تمام مراحل زنجیره تأمین تقسیم می شود. هر چه این قابلیت بیشتر باشد موفقیت زنجیره تأمین نیز بیشتر می باشد (Ghahremani et al., 2019). البته موفقیت زنجیره تأمین بر اساس قابلیت سودآوری زنجیره تأمین سنجیده می شود، نه بر اساس سود انفرادی هر مرحله چون حداکثر بودن سود هر مرحله الزاماً به حداکثر شدن قابلیت سودآوری زنجیره تأمین نمی انجامد.

کاهش هزینه زنجیره تأمین

شاخص اصلی بهبودی زنجیره تأمین، کاهش هزینه است. این کوشش‌ها برای استراتژی‌ها و سیاست‌های کارایی انجام می‌شود. پنج دلیل اصلی هزینه زایی عبارت‌اند از (Kaya and urek, 2016):

- عدم وضوح فرآیند زنجیره تأمین
- تغییرات رویه‌های داخلی و خارجی شرکت
- ضعف موجود در طراحی تولید
- وجود اطلاعات ناقص برای تصمیم‌گیری

انواع زنجیره تأمین

۱- زنجیره تأمین مستقیم: زنجیره مستقیم یا شبکه توزیع درواقع نماینده نگاه سنتی در مدیریت زنجیره تأمین است. زنجیره مستقیم به مراحل اشاره دارد که محصول از مبدأ تأمین‌کننده تا مقصد مشتری نهایی را در زنجیره تأمین طی می‌کند. بنابراین بر هزینه‌های زنجیره تأمین و رضایت‌مندی مشتریان تأثیر مستقیم داشته و رانه کلیدی در سودآوری کلی زنجیره محسوب می‌شود (Ghahremani et al., 2019).

۲- زنجیره تأمین معکوس: زنجیره تأمین معکوس نماینده نگاه نوین به زنجیره تأمین در قالب مدیریت زنجیره تأمین سبز می‌باشد. دلایل متعددی مانند توسعه پایدار، نگرانی‌های زیست‌محیطی، کمبود انرژی، کاهش منابع طبیعی و همچنین مسائلی مانند استفاده مجدد از محصولات معیوب، کاهش هزینه‌های بازگشت محصولات مرجوعی و بهبود آوازه شرکت موجب افزایش توجه به مدیریت زنجیره معکوس گردیده است. زنجیره تأمین معکوس به مراحل اشاره دارد که محصول برگشتی از مشتری نهایی تا مرحله بازگشت مجدد به بازار یا حذف از زنجیره را طی می‌کند. مشتری به دلایلی مانند پایان عمر محصول، خرابی محصول، از رده خارج شدن محصول و یا ملاحظات زیست‌محیطی، محصول را برمی‌گرداند و محصول یا بخشی از آن با طی مراحل مانند جمع‌آوری، مونتاژ، بازگردانی، بازیافت و حذف دوباره به زنجیره بازگردانده شده و یا از زنجیره خارج می‌شود. عمده‌تاً فرایندهای موجود در زنجیره‌های معکوس شامل جمع‌آوری، مرتب‌سازی و دسته‌بندی محصولات مرجوعی، انتقال محصولات مرجوعی به تسهیلات بازگردانی و بازیافت، انتقال محصولات قابل بازگردانی به تسهیلات تعمیر یا تولید مجدد و درنهایت حذف محصولات مرجوعی غیرقابل تعمیر می‌شود. به‌طورکلی زنجیره معکوس با ۴ اصل کاهش، جایگزینی، استفاده مجدد و بازیافت سروکار دارد (Ghahremani et al., 2019).

۳- زنجیره تأمین حلقه بسته: زنجیره معکوس به دو نوع حلقه بسته و حلقه باز تفکیک می‌شود. لجستیک معکوس ارتباط بین بازار محصولات جدید و بازار محصولات مرجوعی برقرار می‌کند. در صورتی که این دو بازار بر هم منطبق شوند، شبکه حلقه بسته و در غیر این صورت حلقه باز نامیده می‌شود. به عبارت ساده‌تر در صورتی که لجستیک مستقیم و معکوس یکپارچه شوند، تحت عنوان لجستیک حلقه بسته خوانده می‌شود. به‌عنوان نمونه، محصولات مرجوعی از دو مسیر به زنجیره مستقیم برمی‌گردند: ۱- در صورتی که بازیابی شوند، به‌عنوان محصول جدید برمی‌گردند. ۲- در صورتی که بازیابی نشوند، اجزا سالم آن به‌عنوان ماده اولیه برگشته و یا بازیافت می‌شوند. مشتری در زنجیره تأمین مستقیم و معکوس: در زنجیره تأمین مستقیم جریان محصول یا خدمت به مشتری ختم می‌شود و در



زنجیره معکوس جریان از مشتریان آغاز شده و در تسهیلات زنجیره معکوس ادامه می‌یابد و ممکن است به مشتری

برگردد (Ghahremani et al., 2019).

با توجه به مطالب بیان‌شده، در این مقاله به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل پرداخته شده است. هدف اصلی این تحقیق کمینه‌سازی هزینه‌های مکان‌یابی و تخصیص در یک شبکه زنجیره تأمین می‌باشد. برای کنترل پارامترهای غیرقطعی از روش بهینه‌سازی استوار امکانی بهره گرفته شده و داده‌های غیرقطعی به صورت فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای دستیابی به بهینه‌ترین هزینه بایستی دو تصمیم استراتژیکی و تاکتیکی (مکان‌یابی تسهیلات و تعیین مقدار بهینه جریان تسهیلات) به درستی اتخاذ گردد. این مقاله به بررسی توأم این دو تصمیم استراتژیکی تحت یک مدل ریاضی می‌پردازد.

پیشینه تحقیق

سلیمانی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی یک مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، از جمله تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع، مشتریان، مراکز انبار، مراکز برگشت و مراکز بازیافت پرداخته است که این مسئله شامل سه گزینه در مورد بازیافت، یعنی بازیافت محصول و اجزای بازیافت مواد اولیه است. مدل‌سازی این زنجیره با حسابداری از ملاحظات زیست‌محیطی، بهینه‌سازی کل سود و کاهش روزهای کاری گمشده در اثر حوادث شغلی انجام شده است، همچنین حداکثر پاسخگویی به تقاضای مشتری داده شده است. به منظور حل مدل، از الگوریتم ژنتیکی استفاده شده و سناریوهای متعدد با جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. حل این مدل تصمیماتی را در مورد باز یا بسته شدن هر یک از مؤلفه‌های شبکه و جریان بهینه محصول در بین آن‌ها اتخاذ کرده که نتایج اثبات امکان‌سنجی مدل ارائه شده و قابلیت استفاده از روش راه‌حل توسعه‌یافته را نشان داده است (Soleimani et al., 2017). پاندا و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثرات مسئولیت اجتماعی شرکت (CSR) پرداخته است و هماهنگی کانال در یک زنجیره تأمین حلقه بسته تولیدکننده-خرده‌فروشان با مسئولیت اجتماعی را با در نظر گرفتن دو حوزه حداکثر سود و مسئولیت اجتماعی از طریق بازیافت محصول بررسی کرده است. تولیدکننده مسئولیت اجتماعی دارد و با بازیافت محصول مورد استفاده که از طریق خرده‌فروش با استفاده از کانال معکوس جمع‌آوری می‌کند، آن را به نمایش می‌گذارد. مشخص شده است که انگیزه حداکثر سود غیرفعال کانال از طریق عمل CSR حاشیه سود بالاتری را نسبت به سود حداکثر رساندن هدف و قرارداد تقسیم درآمد ایجاد می‌کند که تضاد کانال را برطرف می‌کند. بازیافت یک عامل اساسی برای قیمت عمده‌فروشی و از این رو سود خالص سازنده است زیرا تغییر آن ممکن است به کاهش یا افزایش حتی قیمت عمده‌فروشی منفی منجر شود. بنابراین، باید محدودیتی از بازیافت برای سود بهینه داشته باشید. برای بهترین عملکرد کانال، تولیدکننده کلیه درآمدی را که از طریق بازیافت به صورت پاداش به دست می‌آورد، به خرده‌فروش ارائه می‌دهد. بنابراین، CSR صرفاً یک تلاش گران برای تولیدکننده است (Panda et al., 2017). امین و همکاران در سال ۲۰۱۷ در تحقیق خود یک شبکه CLSC با تولید مجدد لاستیک را بر اساس گزینه‌های بازیابی تأثیر طراحی و بهینه کرده است که هدف مدل ارائه شده بهینه‌سازی حداکثر سود کل می‌باشد. کاربرد این مدل بر اساس یک شبکه واقع‌بینانه در تورنتو، کانادا با استفاده از نقشه مورد بحث قرار گرفته است. وی در این مدل از یک روش جدید مبتنی بر درخت تصمیم استفاده کرده است تا ارزش فعلی خالص مسئله را در چندین دوره تحت منابع مختلف عدم اطمینان مانند تقاضا و بازده محاسبه کند. علاوه بر این، جریان نقدی تخفیف در این روش به عنوان یک رویکرد نوآورانه جدید در نظر گرفته شده است. این روش می‌تواند در مقایسه سودآوری گزینه‌های مختلف طراحی برای زنجیره تأمین حلقه بسته به کار رود (Amin et al., 2017).

امین و باکی همچنین در سال ۲۰۱۷ در یک بررسی با در نظر گرفتن عوامل جهانی، از جمله نرخ ارز و عوارض گمرکی، یک مدل ریاضی برای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه داده است. مدل ارائه شده یک مدل برنامه‌نویسی خطی چندمنظوره مخلوط عدد صحیح است که تحت تقاضای نامشخص می‌باشد. وی یک روش راه‌حل مبتنی بر برنامه‌نویسی فازی برای حل



مسئله بهینه‌سازی ارائه کرده است، سپس مدل را در یک شبکه اعمال می‌کند که در جنوب غربی انتاریو، کانادا واقع شده است و تجزیه و تحلیل حساسیت به اعتبار مدل را ارائه می‌کند. مدل ارائه شده عوامل جهانی، چند هدف و عدم قطعیت را هم‌زمان در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر می‌گیرد (Amin and Baki, 2017). اوزجیلان و همکاران در سال ۲۰۱۷ افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی در سراسر جهان باعث ایجاد انگیزه در تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان برای اجرای استراتژی‌های بازیافت مانند بازیابی محصول، مدیریت پسماند یا استفاده از مواد بازیافتی می‌شود. علاوه بر نگرانی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی، در بعضی از کشورها قوانین بازیافت محصولاتی مانند وسایل نقلیه پایان عمر (ELV) را نیز مجبور می‌کنند. تولیدکنندگان خودرو در ترکیه وظیفه بازگرداندن رایگان ELV ها را از مصرف‌کنندگان برای ادغام مجدد قطعات استفاده شده به صنعت را طبق مقررات ELV توسط وزارت محیط‌زیست و شهرسازی جمهوری ترکیه انجام می‌دهند. با توجه به انگیزه ذکر شده، در این مطالعه زنجیره تأمین حلقه بسته، بر اساس یک مطالعه موردی با توجه به درمان ELVs در ترکیه ارائه شده است. یک مدل برنامه‌نویسی خطی برای رسیدگی به جریان مواد معکوس با توجه به ادغام مجدد آن‌ها در زنجیره‌های عرضه روبه‌جلو ایجاد شده است. چندین سناریو CLSC برای نشان دادن عملکرد مدل پیشنهادی و کاربرد آن در صنعت خودرو مورد بحث قرار گرفته است (Özceylan et al., 2017). صاحب جم نیا و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با تأیر پایدار ارائه داده است. مدل ارائه شده باهدف بهینه‌سازی کل هزینه، تأثیرات زیست‌محیطی در ایجاد تسهیلات، پردازش لاستیک و حمل‌ونقل بین هر سطح و همچنین تأثیرات اجتماعی از جمله فرصت‌های شغلی و خسارت کار می‌باشد. برای کاهش اشکالات الگوریتم‌های متاهوریستیک موجود هنگام حل شبکه‌ها در مقیاس بزرگ، چهار الگوریتم متاهوریستیک هیبریدی جدید بر اساس مزایای موارد جدید و قدیمی توسعه داده شده است. برای ارزیابی کیفیت الگوریتم‌های ترکیبی پیشنهادی، آزمایش‌های محاسباتی گسترده، مقایسه و تحلیل حساسیت با معیارهای مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم‌های ترکیبی رویکردهای مؤثر برای حل مشکل اساسی در شبکه‌های بزرگ هستند (Sahebjamnia et al., 2018). فتح الهی فرد و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی یک مدل برنامه‌نویسی سه سطحی را برای طراحی اولین تخصیص مکان از تأیر CLSC ارائه کرده است. مدل ارائه شده در بازی استاتیک استاکبرگ بین تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و جمع‌آوری‌کنندگان در چارچوب CLSC فرموله شده است. این راه‌حل برای حل مشکلات در مقیاس بزرگ امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای حل این اشکال، در این مطالعه تعدادی از بهینه‌سازهای هیبریدی جدید با در نظر گرفتن مزایای فراشناختی اخیر پیشنهاد شده است. یک مطالعه مقایسه‌ای گسترده، کارایی مدل توسعه یافته و عملکرد بهینه‌سازهای هیبریدی را که هنگام حل مشکلات در مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است، تأیید می‌کند (Fathollahi fard et al., 2018).

همچنین حاجی آقایی و همکاران در سال ۲۰۱۸ در مطالعه‌ای، یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مخلوط جدید ایجاد کرده تا با توجه به فرض تخفیف در هزینه‌های حمل‌ونقل برای اولین بار، یک طرح شبکه زنجیره تأمین حلقه‌ای پایدار چندمنظوره ایجاد کند. برای پرداختن به مشکل، نه تنها از استعاره سنتی و اخیر استفاده شده بلکه الگوریتم‌ها با توجه به نقاط قوت خود به‌ویژه در تشدید و متنوع سازی، ترکیبی می‌شوند. برای ارزیابی کارایی و اثربخشی این الگوریتم‌ها، آن‌ها با چهار معیار ارزیابی برای تجزیه و تحلیل بهینه پارتو با یکدیگر مقایسه می‌شوند. اگرچه نتایج حاکی از عملکرد سه الگوریتم هیبریداسیون جدید پیشنهادی است، KAGA در مقایسه با سایرین راه‌حل‌های بهتری به دست می‌آورد، اما به زمان بیشتری نیاز دارد و در پایان، یک نمونه صنعتی واقعی در صنعت شیشه را برای تأیید مدل پیشنهادی و الگوریتم‌ها معرفی کرده است (Hajiaghahi keshteli et al., 2018). جبار زاده و همکاران در سال ۲۰۱۸ در طرحی یک مدل بهینه‌سازی تصادفی مستقل برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کرده است که در صورت بروز اختلالات، به‌صورت انعطاف‌پذیر عمل می‌کند. مدل ارائه شده قادر به در نظر گرفتن ترابری جانبی به‌عنوان یک استراتژی واکنش برای مقابله با خطرات عملیاتی و اختلال است. هدف این است که تصمیمات مربوط به مکان تأسیسات و مقادیر حمل‌ونقل جانبی که حداقل هزینه زنجیره تأمین را در سناریوهای مختلف

اختلال به حداقل می‌رساند، تعیین شود. یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل کارآمد مدل استوار ایجاد شده است. بینش مهم مدیریتی از اجرای مدل در یک مطالعه موردی از صنعت شیشه به دست می‌آید (Jabbarzadeh et al., 2018).

حدادی ساخت و همکاران در سال ۲۰۱۸ به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته را بهینه کرده است که جریان در هر دو جهت روبه‌جلو و معکوس را در بر می‌گیرد و در تقاضا برای هر دو محصول جدید و بازگشتی در معرض عدم اطمینان است. مدل ارائه شده یک برنامه استوار / تصادفی ترکیبی سه مرحله‌ای است که ترکیبی از سناریوهای احتمالی برای مطالبات و مقادیر برگشتی با مجموعه‌های عدم اطمینان برای نرخ مالیات کربن را نشان می‌دهد. تصمیمات مرحله اول سرمایه‌گذاری تسهیلات است، مرحله دوم مربوط به برنامه توزیع کالاهای جدید و جمع‌آوری شده پس از تحقق مطالبات و بازده است و تعداد واحدهای حمل‌ونقل در حالت‌های مختلف تصمیمات مرحله سوم است. تصمیمات مرحله دوم و سوم ممکن است با تحقق نرخ مالیات کربن تنظیم شود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که تنظیم جریان محصول به نرخ مالیات از مزایای ناچیز برخوردار است، اما امکان تنظیم ظرفیت‌های حالت حمل‌ونقل می‌تواند جایگزین ساخت تسهیلات اضافی به‌عنوان روشی برای پاسخ به عدم قطعیت مالیات کربن شود (Haddadsisakht et al., 2018). در سال ۲۰۱۹، مردان و همکاران تحقیقی یک مدل ریاضی جامع برای زنجیره تأمین حلقه بسته سبز چند دوره، چند محصول، چند مدل و دو هدف را ارائه داده است که هدف از این مدل، به حداقل رساندن کل هزینه و انتشار گازهای محیطی از طریق تصمیم‌گیری در مورد مکان تأسیسات، مبلغ حمل‌ونقل و مانده موجودی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی ذاتی مشکل و در نظر گرفتن مفروضات چند محصول، چند دوره و چند حالت کار را دشوار می‌کند و در مورد راه‌حل، الگوریتم تجزیه بندرز شتاب مؤثر اجرا شده است. سپس، نتایج محاسباتی برای مجموعه‌ای از مثال‌های عددی مورد بحث قرار گرفته است. سپس، یک تحلیل حساسیت در تلاش برای اعتبارسنجی مدل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد راه‌حل پیشنهادی منجر به کاهش بیش از ۱۳ درصد کل هزینه موردی شده و حتی می‌تواند برای کاربردهای صنعتی بزرگ‌تر و پیچیده‌تر در دنیای واقعی مورد استفاده قرار گیرد (Mardan et al., 2019).

یادگاری و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک بررسی، برای بهبود استراتژی‌هایی برای پیکربندی هم‌زمان زنجیره‌های عرضه و روبه‌جلو، یک الگوریتم ممتیک (MA) با روش رمزگذاری / رمزگشایی مبتنی بر اولویت (EPb) مبتنی بر یک استراتژی جستجوی انعطاف‌پذیر محله ترکیبی (NS) ارائه داده است. علاوه بر این، برای جلوگیری از فرآیند تعمیر وقت‌گیر در نمایندگی محلول گسسته، روشی برای تبدیل نمایندگی گسسته به روش مداوم ارائه داده است و سرانجام، برای سرعت بخشیدن به الگوریتم پیشنهادی، باز پخت شبیه‌سازی چندمرحله‌ای (MSA) در MA تعبیه شده است. نتایج ابتدا با حلال‌های تجاری مقایسه شده و سپس با سایر الگوریتم‌های ژنتیکی (GA) و کارشناسی ارشد موجود در ادبیات با روش‌های مختلف رمزگذاری / رمزگشایی و عملگرها مقایسه شده است. همه الگوریتم‌ها برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته (CLSCND) که به مکان‌یابی امکانات و همچنین اختصاص جریان محصول و هزینه‌های موجودی در یک محیط چند دوره‌ای می‌پردازد، کاربرد دارند. نتایج نشان‌دهنده کیفیت بالای HMA پیشنهادی است (Yadegari et al., 2019). در سال ۲۰۱۹ یآوری و همکاران در مطالعه‌ای، طرحی از شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز برای محصولات قابل تجزیه در شرایط نامشخص را بررسی کرده است. تقاضا، نرخ بازده و کیفیت محصولات بازگشتی به‌عنوان یک پارامتر نامشخص زنجیره در نظر گرفته شده است. بر اساس مطالعه یک شرکت لبنیات، کالایی چند دوره‌ای و چند محصولی است که شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، انبارها، خرده‌فروشان و مراکز جمع‌آوری است. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی مخلوط عدد صحیح (MILP) پیش‌بینی شده است که به‌طور هم‌زمان هزینه و آلاینده محیط‌زیست را به حداقل می‌رساند. علاوه بر این، یک مدل استوار نوآورانه برای مشکل تحت عدم اطمینان ایجاد شده است. با توجه به ماهیت NP-Hard، این تحقیق یک اکتشافی کارآمد به نام YAG برای حل مشکلات در ابعاد بزرگ ایجاد کرده است. آزمایش‌های محاسباتی انجام شده نشان می‌دهد که روش YAG دارای فاصله متوسط کمتر از ۱.۶۵ درصد از محلول بهینه در یک‌زمان معقول است. همچنین، روش YAG در بیش از ۳۴ درصد موارد، راه‌حل بهینه را پیدا می‌کند. عملکرد رویکرد استوار و روش اکتشافی در یک مطالعه موردی واقعی و طیف متنوعی از مشکلات بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل استوار در مقایسه با مدل قطعی از کیفیت بهتری برخوردار بوده و به نظر می‌رسد بسیار مطمئن‌تر

است. تأثیر طول عمر محصول، مدل سازی دو هدف و آلاینده محیط زیست در طول مطالعه در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که اثرات طول عمر و سطح عدم اطمینان محصولات برای هزینه و اهداف آلودگی محیط متفاوت است (Yavari et al., 2019).

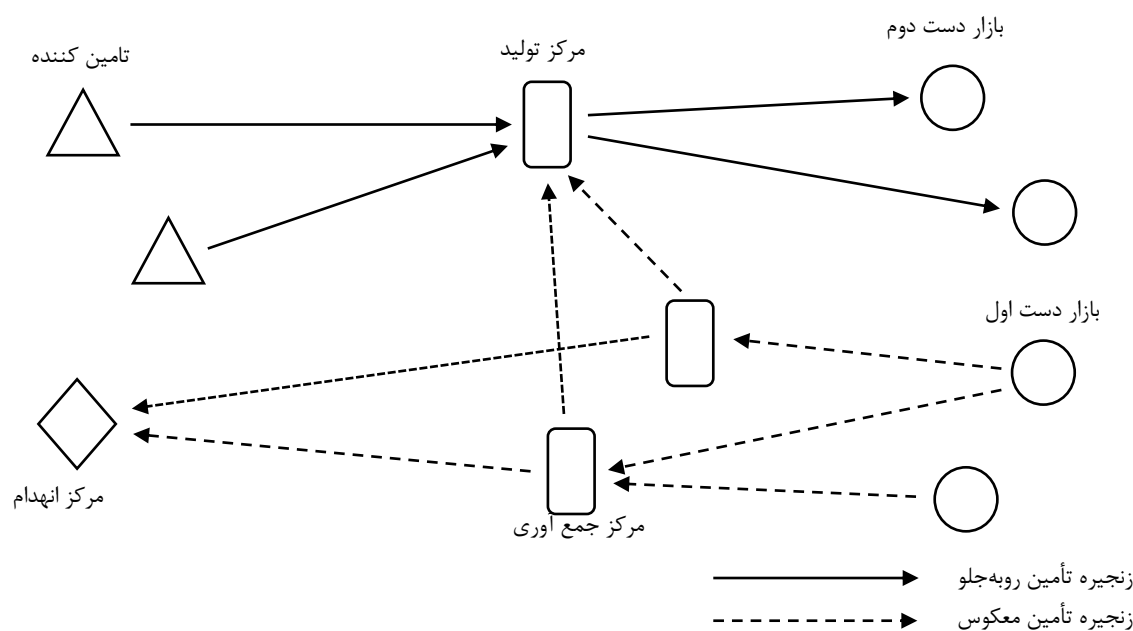
ساعدی نیا و همکاران در سال ۲۰۱۹ در تحقیقی، یک مدل برنامه نویسی عدد صحیح مخلوط غیرخطی پیشنهاد کرده است تا قیمت و موقعیت تسهیلات را در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) در نظر بگیرد تا سود کل به دست آمده با فروش محصولات جدید ICT به دست آید. ساختار این شبکه شامل تأمین کنندگان، مراکز جمع آوری و توزیع (مراکز C-D)، مراکز جداسازی قطعات و مناطق مشتری می باشد. در مراکز C-D یک سیاست موجودی بررسی مستمر اعمال می شود و فرض بر این است که زمان انجام سفارشات تصادفی است. علاوه بر این، مراکز C-D با کمبود مواجه هستند و تقاضای همبستگی بین مناطق مشتری وجود دارد که برای حل این مشکل از دو الگوریتم فرا اکتشافی استفاده کرده اند: یک الگوریتم رقابتی امپریالیستی (ICA) و یک الگوریتم ژنتیکی (GA). همچنین مراحل رمزگذاری و رمزگشایی این الگوریتم ها ارائه شده است. برای تجزیه و تحلیل عملکرد مدل ارائه شده و رویکردهای راه حل، یک مورد واقعی زنجیره تأمین حلقه بسته ICT در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل حساسیت به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مدل بر تصمیمات و سود بهینه پیاده سازی می شود. نتایج عددی نحوه اختصاص تسهیلات به یکدیگر، مدیریت موجودی و تعیین قیمت محصولات ICT را نشان می دهد. بنابراین مدل و روش های پیشنهادی می توانند به شرکت های فناوری اطلاعات و ارتباطات در تعیین سیاست های خود برای دستیابی به سود حداکثر کمک کنند (Saedinia et al., 2019).

با توجه به پیشینه تحقیقات ارائه شده در این مقاله یک مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته باهدف کاهش هزینه های کل شبکه زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. برای دستیابی به تابع هدف ذکر شده بایستی دو تصمیم استراتژیکی زیر اتخاذ گردد:

- تعداد بهینه تسهیلاتی نظیر مراکز جمع آوری و تولید چقدر است؟
- مقدار بهینه جریان تسهیلات بین سطوح مختلف شبکه زنجیره تأمین چقدر است؟

روش تحقیق

در این مقاله و مطابق با شکل (۱)، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن دو بازار دست‌اول و دست‌دوم مدل‌سازی شده است. در این شکل، ابتدا محصولات بازگشتی از بازار دست‌اول توسط مراکز جمع‌آوری، جمع‌آوری و ذخیره‌شده و پس از بازرسی با توجه به نیاز بازار دست‌دوم، محصولات قابل‌استفاده به مرکز تولید و محصولات غیرقابل‌استفاده به مرکز انهدام ارسال می‌گردد، مرکز تولید نیز با توجه به تقاضای بازار دست‌دوم از محصولات، برخی از محصولات بازار دست‌اول را به بازار دست‌دوم انتقال داده و مابقی محصولات موردنیاز را از تأمین‌کننده دریافت و پس از تولید محصولات جدید به بازار دست‌اول انتقال می‌دهد. در این مقاله مکان تسهیلات جمع‌آوری و تولید به‌صورت بالقوه در نظر گرفته‌شده و همچنین تقاضاهای بازار دست‌اول و دست‌دوم و همچنین هزینه‌های حمل‌ونقل به‌صورت عدم قطعیت لحاظ شده است.



شکل ۱- شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی

در ادامه مجموعه، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله شرح داده شده است.

مجموعه‌ها:

$i = \{1, \dots, I\}$	مجموعه تأمین‌کننده‌ها	I
$j, j' = \{1, \dots, J\}$	مجموعه مراکز تولیدی	J
$l = \{1, \dots, L\}$	مجموعه بازار دست‌دوم	L
$k = \{1, \dots, K\}$	مجموعه بازار دست‌اول	K
$c = \{1, \dots, C\}$	مجموعه مراکز جمع‌آوری	C
$d = \{1, \dots, D\}$	مجموعه مراکز انهدام	D
$p = \{1, \dots, P\}$	مجموعه محصولات	P
$m = \{1, \dots, M\}$	مجموعه مواد اولیه	M
$t = \{1, \dots, T\}$	مجموعه دوره زمانی	T

پارامترها:

هزینه تأسیس مرکز جمع‌آوری c	H_c
هزینه تأسیس مرکز تولید j	U_j



هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد محصول p بین مراکز تولیدکننده j و j' در دوره زمانی t	$\bar{Tr}_{jj'pt}$
هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد محصول p بین مراکز جمع آوری c و بازار دستا اول k در دوره زمانی t	$\bar{Tr}_{ckpt}$
هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد محصول p بین مراکز جمع آوری c و مرکز انهدام d در دوره زمانی t	$\bar{Tr}_{cdpt}$
هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد محصول p بین مراکز جمع آوری c و مرکز تولید j در دوره زمانی t	$\bar{Tr}_{cjpt}$
هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد محصول p بین مراکز تولید j و بازار دست دوم l در دوره زمانی t	$\bar{Tr}_{jlpt}$
هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد ماده اولیه m بین مراکز تأمین کننده i و مرکز تولید j در دوره زمانی t	$\bar{Tr}_{ijmt}$
هزینه تولید به ازای یک واحد محصول p توسط مرکز تولید j	C_{jp}
مقدار محصولات برگشتی p از بازار دستا اول k در دوره زمانی t	Φ_{kpt}
مقدار تقاضای بازار دست دوم l از محصولات بازتولید p در دوره زمانی t	$\bar{D}_{lpt}$
درصد کاهش ظرفیت مرکز جمع آوری c برای محصول p در دوره t	γ_{cpt}
درصد کاهش ظرفیت انبار مرکز تولید j برای محصول p در دوره t	α_{jpt}
درصد کاهش ظرفیت مرکز تولید j برای محصول p در دوره t	β_{jpt}
درصد کاهش ظرفیت انبار مرکز انهدام d برای محصول p در دوره t	δ_{dpt}
درصد کاهش ظرفیت تأمین کننده i برای ماده اولیه m در دوره t	τ_{imt}
درصد انهدام برای محصول p در دوره t	λ_{pt}
حداکثر ظرفیت انبار مرکز تولید j از محصول p	a_{jp}
حداکثر ظرفیت مرکز تولید j از محصول p	b_{jp}
حداکثر ظرفیت مرکز انهدام d از محصول p	f_{dp}
حداکثر ظرفیت تأمین کننده i از ماده اولیه m	ε_{im}
حداکثر ظرفیت مرکز جمع آوری c از محصول p	$capC_{cp}$
هزینه جریمه مواجهه با کمبود در بازار دست دوم l از محصول p در دوره زمانی t	π_{lpt}
هزینه نگهداری محصول p در انبار مرکز تولید j از در انتهای دوره زمانی t	h_{jpt}
مقدار ماده اولیه m مورد نیاز برای تولید یک محصول نهایی p	ξ_{mp}
مقدار ماده اولیه m به دست آمده از بازیافت محصول p	χ_{mp}

متغیرهای تصمیم:

مقدار محصول انتقال یافته p بین مراکز جمع آوری c و مرکز انهدام d در دوره زمانی t	U_{cdpt}
مقدار محصول انتقال یافته p بین مراکز جمع آوری c و مرکز تولید j در دوره زمانی t	W_{cjpt}
مقدار ماده اولیه انتقال یافته m بین تأمین کننده i و مرکز تولید j در دوره زمانی t	X_{ijmt}
مقدار محصول انتقال یافته p بین مراکز تولید j و بازار دست دوم l در دوره زمانی t	V_{jlpt}
مقدار محصول انتقال یافته p بین مراکز تولید j و j' در دوره زمانی t	$N_{jj'pt}$
کل مقدار محصول جمع آوری شده p توسط مراکز جمع آوری c از بازار دستا اول k در دوره زمانی t	V'_{ckpt}
در صورتی که مرکز جمع آوری c تأسیس گردد، مقدار ۱ و در غیر این صورت ۰ می گیرد.	Y_c
در صورتی که مرکز تولید j تأسیس گردد، مقدار ۱ و در غیر این صورت ۰ می گیرد.	Z_j
مقدار کمبود رخ داده در بازار دست دوم l از محصول p در دوره زمانی t	O_{lpt}
مقدار موجودی ذخیره شده در انبار مرکز تولید j از محصول p در انتهای دوره زمانی t	G_{jpt}
مقدار محصول تولید شده p در مرکز تولیدی j در دوره زمانی t	Q_{jpt}



مدل سازی شبکه چند سطحی زنجیره تأمین حلقه بسته در حالت غیرقطعی

با توجه به بیان مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم بیان شده، مسئله طراحی شبکه چند سطحی زنجیره تأمین حلقه بسته به عنوان یک مدل برنامه ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط به صورت ذیل مدل سازی می شود:

$$\begin{aligned} Min \omega = & \sum_{c=1}^C H_c Y_c + \sum_{j=1}^J U_j Z_j + \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T \bar{T}r_{ckpt} V'_{ckpt} + \sum_{c=1}^C \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \bar{T}r_{cdpt} U_{cdpt} + \\ & \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \bar{T}r_{cjpt} W_{cjpt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \bar{T}r_{ijmt} X_{ijmt} + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \bar{T}r_{jlpt} V_{jlpt} + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \bar{T}r_{jj'pt} N_{jj'pt} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \pi_{lpt} O_{lpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T h_{jpt} G_{jpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{cjp} Q_{jpt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{c=1}^C V'_{ckpt} \geq \bar{\Phi}_{kpt}, \quad \forall c, p, t \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K V'_{ckpt} \leq (1 - \gamma_{cpt}) cap C_{cp} Y_c, \quad \forall c, t \quad (3)$$

$$\lambda_{pt} \sum_{k=1}^K V'_{ckpt} = \sum_{d=1}^D U_{cdpt}, \quad \forall c, p, t \quad (4)$$

$$(1 - \lambda_{pt}) \sum_{k=1}^K V'_{ckpt} = \sum_{j=1}^J W_{cjpt}, \quad \forall c, p, t \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J V_{jlpt} + O_{lpt} \geq \bar{D}_{lpt}, \quad \forall l, p, t \quad (6)$$

$$G_{jpt} = G_{jpt-1} + Q_{jpt} + \sum_{j'=1}^J N_{j'jpt} - \sum_{j'=1}^J N_{jj'pt} - \sum_{l=1}^L V_{jlpt}, \quad \forall j, p, t \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^P \xi_{mp} Q_{jpt} \leq \sum_{i=1}^I X_{ijmt} + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \chi_{mp} W_{cjpt}, \quad \forall m, t \quad (8)$$

$$G_{jpt} \leq (1 - \alpha_{jpt}) a_{jp} Z_j, \quad \forall j, p, t \quad (9)$$

$$Q_{jpt} \leq (1 - \beta_{jpt}) b_{jp} Z_j, \quad \forall j, p, t \quad (10)$$

$$\sum_{c=1}^C U_{cdpt} \leq (1 - \delta_{dpt}) f_{dp}, \quad \forall d, p, t \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijmt} \leq (1 - \tau_{imt}) \varepsilon_{im}, \quad \forall i, m, t \quad (12)$$

$$U_{cdpt}, W_{cjpt}, X_{ijmt}, V_{jlpt}, N_{jj'pt}, V'_{ckpt}, O_{lpt}, G_{jpt}, Q_{jpt} \geq 0 \quad (13)$$

$$Y_c, Z_j \in \{0,1\} \quad (14)$$

رابطه (۱) مقدار تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد و شامل کمینه‌سازی مقدار کل هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته می‌باشد. رابطه (۲) کل میزان جریان محصولات برگشتی را که توسط مراکز جمع‌آوری، جمع‌آوری شده‌اند نشان می‌دهد. محدودیت (۳) حداکثر ظرفیت حمل‌ونقل محصولات را توسط وسیله نقلیه در دسترس نشان می‌دهد. رابطه (۴) مقدار محصول انتقال‌یافته از مرکز جمع‌آوری به مرکز انهدام را نشان می‌دهد. رابطه (۵) نیز درصدی از محصولات قابل‌استفاده مجدد را که از مرکز جمع‌آوری به مرکز تولید ارسال می‌شود، نشان می‌دهد. رابطه (۶) مقدار برآورد تقاضای بازار دست‌دوم را نشان می‌دهد. رابطه (۷) معادله تعادل در مرکز تولید را نشان می‌دهد و شامل مقدار محاسبه موجودی در انتهای هر دوره زمانی می‌باشد. رابطه (۸) مقدار مواد اولیه موردنیاز برای تولید محصولات جدید را نشان می‌دهد و مقدار محصول نهایی برابر است با مقدار محصولات برگشتی از بازار دست‌دوم و مواد اولیه تبدیل‌شده به محصول نهایی از سوی تأمین‌کننده است. رابطه (۹) ظرفیت انبار محصولات نهایی در انتهای هر دوره زمانی را نشان می‌دهد. رابطه (۱۰) ظرفیت تولید محصولات جدید در مرکز تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۱۱) و (۱۲) به ترتیب ظرفیت مراکز انهدام و تأمین‌کننده مواد اولیه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۳) و (۱۴) نیز نوع و جنس متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی

با توجه به ذات پویا و نوسانی برخی از پارامترهای مهم (از جمله هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های نگهداری، تقاضا و ظرفیت تسهیلات بالقوه) که تعیین آن‌ها مافوق برنامه‌ریزی است و همچنین در دسترس نبودن و حتی غیرقابل حصول بودن داده‌های تاریخی موردنیاز در مرحله طراحی، این پارامترها عمدتاً با تکیه بر نظرات و تجارب ذهنی کارشناسان تخمین زده می‌شود؛ بنابراین، پارامترهای مبهم فوق به‌عنوان داده غیرقطعی در قالب اعداد فازی دوزنقه‌ای به شرح زیر فرموله شده است:

$$\bar{Tr}_{ckpt} = (Tr_{ckpt}^1, Tr_{ckpt}^2, Tr_{ckpt}^3, Tr_{ckpt}^4)$$

$$\bar{Tr}_{cdpt} = (Tr_{cdpt}^1, Tr_{cdpt}^2, Tr_{cdpt}^3, Tr_{cdpt}^4)$$

$$\bar{Tr}_{jj'pt} = (Tr_{jj'pt}^1, Tr_{jj'pt}^2, Tr_{jj'pt}^3, Tr_{jj'pt}^4)$$

$$\bar{Tr}_{cjpt} = (Tr_{cjpt}^1, Tr_{cjpt}^2, Tr_{cjpt}^3, Tr_{cjpt}^4)$$

$$\bar{Tr}_{jlpt} = (Tr_{jlpt}^1, Tr_{jlpt}^2, Tr_{jlpt}^3, Tr_{jlpt}^4)$$

$$\bar{Tr}_{ijmt} = (Tr_{ijmt}^1, Tr_{ijmt}^2, Tr_{ijmt}^3, Tr_{ijmt}^4)$$

$$\bar{D}_{lpt} = (D_{lpt}^1, D_{lpt}^2, D_{lpt}^3, D_{lpt}^4)$$

$$\bar{\Phi}_{kpt} = (\Phi_{kpt}^1, \Phi_{kpt}^2, \Phi_{kpt}^3, \Phi_{kpt}^4)$$

شایان‌ذکر است که برای تصمیم‌گیری‌های بلندمدت، ارزیابی هزینه حمل‌ونقل، تقاضا و میزان بازگشت محصولات، سخت و حتی گاهی غیرممکن است. حتی اگر یک نفر بتواند یک تابع توزیع احتمالی برای این پارامترها را برآورد کند، ممکن است که این پارامترها رفتار مشابهی با داده‌های گذشته نداشته باشند. لذا این پارامترها که در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت تغییر می‌کند به‌عنوان داده‌های فازی در نظر گرفته شده است. مدل نهایی بهینه‌سازی استوار امکانی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی به شرح روابط زیر می‌باشد:

$$Minw = E[\omega] + \xi(f_{(\max)} - E[\omega]) + \eta_1 \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left[(D_{lpt}^4 - D_{lpt}^3 - \varphi(D_{lpt}^4 - D_{lpt}^3)) \right] + \quad (15)$$

$$\eta_2 \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left[(\phi_{kpt}^4 - \phi_{kpt}^3 - \varpi(\phi_{kpt}^4 - \phi_{kpt}^3)) \right]$$

s. t.:

$$E[w] = \sum_{c=1}^C H_c Y_c + \sum_{j=1}^J U_j Z_j + \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{ckpt}^1 + Tr_{ckpt}^2 + Tr_{ckpt}^3 + Tr_{ckpt}^4}{4} \right) V'_{ckpt} +$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{cdpt}^1 + Tr_{cdpt}^2 + Tr_{cdpt}^3 + Tr_{cdpt}^4}{4} \right) U_{cdpt} +$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{cjpt}^1 + Tr_{cjpt}^2 + Tr_{cjpt}^3 + Tr_{cjpt}^4}{4} \right) W_{cjpt} +$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{ijmt}^1 + Tr_{ijmt}^2 + Tr_{ijmt}^3 + Tr_{ijmt}^4}{4} \right) X_{ijmt} + \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{jlpt}^1 + Tr_{jlpt}^2 + Tr_{jlpt}^3 + Tr_{jlpt}^4}{4} \right) V_{jlpt} +$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \left(\frac{Tr_{jj'pt}^1 + Tr_{jj'pt}^2 + Tr_{jj'pt}^3 + Tr_{jj'pt}^4}{4} \right) N_{jj'pt} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \pi_{lpt} O_{lpt} +$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T h_{jpt} G_{jpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{cjp} Q_{jpt}$$

$$f_{(\max)} = \sum_{c=1}^C H_c Y_c + \sum_{j=1}^J U_j Z_j + \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T Tr_{ckpt}^4 V'_{ckpt} + \sum_{c=1}^C \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Tr_{cdpt}^4 U_{cdpt} +$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Tr_{cjpt}^4 W_{cjpt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T Tr_{ijmt}^4 X_{ijmt} + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Tr_{jlpt}^4 V_{jlpt} +$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Tr_{jj'pt}^4 N_{jj'pt} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \pi_{lpt} O_{lpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T h_{jpt} G_{jpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T C_{cjp} Q_{jpt}$$

$$\sum_{c=1}^C V'_{ckpt} \geq (1 - \varpi) \phi_{kpt}^3 + \varpi \phi_{kpt}^4, \quad \forall c, p, t \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^K V'_{ckpt} \leq (1 - \gamma_{cpt}) cap C_{cp} Y_c, \quad \forall c, p, t \quad (19)$$

$$\lambda_{pt} \sum_{k=1}^K V'_{ckpt} = \sum_{d=1}^D U_{cdpt}, \quad \forall c, p, t \quad (20)$$

$$(1 - \lambda_{pt}) \sum_{k=1}^K V'_{ckpt} = \sum_{j=1}^J W_{cjpt}, \quad \forall c, p, t \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^J V_{jlpt} + O_{lpt} \geq (1 - \varphi) D_{lpt}^3 + \varphi D_{lpt}^4, \quad \forall l, p, t \quad (22)$$



$$G_{jpt} = G_{jpt-1} + Q_{jpt} + \sum_{j'=1}^J N_{j'jpt} - \sum_{j'=1}^J N_{jj'pt} - \sum_{l=1}^L V_{jlpt}, \quad \forall j, p, t \quad (23)$$

$$\sum_{p=1}^P \xi_{mp} Q_{jpt} \leq \sum_{i=1}^I X_{ijmt} + \sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P \chi_{mp} W_{cjpt}, \quad \forall m, t \quad (24)$$

$$G_{jpt} \leq (1 - \alpha_{jpt}) a_{jp} Z_j, \quad \forall j, p, t \quad (25)$$

$$Q_{jpt} \leq (1 - \beta_{jpt}) b_{jp} Z_j, \quad \forall j, p, t \quad (26)$$

$$\sum_{c=1}^C U_{cdpt} \leq (1 - \delta_{dpt}) f_{dp}, \quad \forall d, p, t \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijmt} \leq (1 - \tau_{imt}) \varepsilon_{im}, \quad \forall i, m, t \quad (28)$$

$$U_{cdpt}, W_{cjpt}, X_{ijmt}, V_{jlpt}, N_{jj'pt}, V'_{ckpt}, O_{lpt}, G_{jpt}, Q_{jpt} \geq 0 \quad (29)$$

$$Y_c, Z_j \in \{0, 1\} \quad (30)$$

در تابع هدف اول رابطه (۱۵)، عبارت اول به مقدار مورد انتظار تابع هدف اول با استفاده از مقادیر متوسط پارامترهای غیرقطعی مدل اشاره دارد. عبارت دوم به هزینه جریمه برای انحراف بیش از مقدار مورد انتظار تابع هدف اول (استواری بهینگی) اشاره می‌کند. جمله سوم نیز هزینه کل جریمه انحراف از تقاضا (پارامتر غیرقطعی) را نشان می‌دهد. از این رو، پارامتر ξ ضریب وزنی تابع هدف، η هزینه جریمه عدم برآورد تقاضا می‌باشد. پارامتر φ و ω به عنوان ضرایب تصحیح در مقدار سطوح فازی اعداد را نشان می‌دهد که بایستی عددی مابین ۰.۵ و ۱ باشد.

یافته‌ها

در این بخش از مقاله به حل مدل و بررسی متغیرهای خروجی مسئله پرداخته شده است. از این رو یک مسئله نمونه مطابق با جدول (۱) طراحی و به دلیل عدم دسترسی به داده های واقعی، از داده های تصادفی استفاده شده است. جدول (۲) حدود بازه ای پارامترهای قطعی و غیرقطعی مسئله را بر اساس تابع توزیع یکنواخت نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای غیرقطعی مسئله به صورت تابع توزیع دوزنقه ای در نظر گرفته شده و دارای ۴ سطح می‌باشد.

جدول ۱- اندازه مسئله نمونه شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی

مجموعه	شرح	تعداد	مجموعه	شرح	تعداد
I	مجموعه تأمین‌کننده‌ها	۵	D	مجموعه مراکز انهدام	۳
J	مجموعه مراکز تولیدی	۵	P	مجموعه محصولات	۲
L	مجموعه بازار دست‌دوم	۱۰	M	مجموعه مواد اولیه	۲
K	مجموعه بازار دست‌اول	۱۲	T	مجموعه دوره زمانی	۳
C	مجموعه مراکز جمع‌آوری	۸			

بر اساس جدول (۱)، ۵ تأمین‌کننده، ۵ مرکز تولیدی، ۱۰ بازار دست‌اول و ۱۲ بازار دست‌دوم در ۳ دوره زمانی در نظر گرفته شده است. تعداد مواد اولیه و محصولات نهایی ۲، تعداد مراکز انهدام ۳ و تعداد مراکز جمع‌آوری ۸ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- حدود بازه ای پارامترهای مسئله بر اساس توزیع یکنواخت

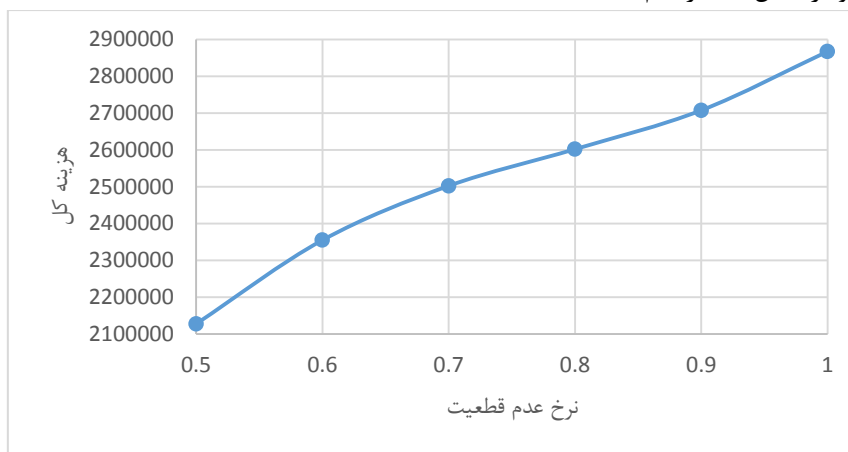
پارامتر	حدود بازه‌ای	پارامتر	حدود بازه‌ای
H_c, U_j	$\sim U(120000, 150000)$	CC_{jp}	$\sim U(3, 5)$
$capC_{cp}$	$\sim U(1000, 1200)$	$b_{jp}, f_{dp}, \varepsilon_{im}$	$\sim U(800, 1000)$
π_{lpt}	$\sim U(100, 120)$	h_{jpt}	$\sim U(4, 5)$
ξ_{mp}, χ_{mp}	$\sim U(1, 3)$	a_{jp}	$\sim U(300, 400)$
$\gamma_{cpt}, \alpha_{jpt}, \beta_{jpt}$	$\sim U(0/2, 0/5)$	$\delta_{dpt}, \tau_{imt}, \lambda_{pt}$	$\sim U(0/2, 0/5)$
پارامتر غیر قطعی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
$\bar{Tr}_{jj'pt}, \bar{Tr}_{ckpt}, \bar{Tr}_{cdpt}, \bar{Tr}_{cjpt}, \bar{Tr}_{jlpt}, \bar{Tr}_{ijmt}$	$\sim U(10, 15)$	$\sim U(15, 20)$	$\sim U(20, 25)$
Φ_{kpt}	$\sim U(80, 100)$	$\sim U(100, 120)$	$\sim U(120, 200)$
$\bar{D}_{lpt}$	$\sim U(60, 80)$	$\sim U(80, 100)$	$\sim U(100, 150)$
	سطح ۴	سطح ۳	سطح ۴
	$\sim U(25, 30)$	$\sim U(20, 25)$	$\sim U(25, 30)$
	$\sim U(200, 400)$	$\sim U(120, 200)$	$\sim U(200, 400)$
	$\sim U(150, 300)$	$\sim U(100, 150)$	$\sim U(150, 300)$

پس از حل مسئله مقدار تابع هدف ۲۱۲۷۲۲۲.۹۵۹ به دست آمده است که شامل تأسیس ۴ مرکز جمع‌آوری شماره ۱-۳-۴ و ۳ مرکز تولید شماره ۱-۲-۴ می‌باشد. مقدار تابع هدف فوق در نرخ عدم قطعیت ۰.۵ حاصل شده است. از این رو برای تحلیل حساسیت بیشتر مسئله، مقدار نرخ عدم قطعیت در نرخ‌های مختلف عدم قطعیت بین ۰.۵ تا ۱ تغییر کرده و مقدار تابع هدف و همچنین مکان‌یابی تسهیلات بالقوه در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- حدود بازه‌ای پارامترهای قطعی و غیرقطعی مسئله بر اساس توزیع یکنواخت

نرخ عدم قطعیت	مقدار تابع هدف	مکان تسهیلات جمع‌آوری	مکان تسهیلات تولیدی
۰.۵	۲۱۲۷۲۲۲.۹۵۹	۷-۴-۳-۱	۴-۲-۱
۰.۶	۲۳۵۴۵۶۷.۰۶۴	۷-۶-۵-۴-۱	۴-۲-۱
۰.۷	۲۵۰۲۰۰۰.۸۱۶	۷-۶-۵-۴-۱	۴-۲-۱
۰.۸	۲۶۰۱۷۸۰.۳۲۲	۷-۶-۴-۳-۱	۴-۳-۲-۱
۰.۹	۲۷۰۷۲۷۶.۰۸۸	۸-۷-۳-۲-۱	۵-۴-۲-۱
۱	۲۸۶۷۰۰۴.۳۹۲	۷-۶-۵-۴-۳-۱	۴-۳-۲-۱

مطابق با جدول (۳) مشاهده می‌شود با افزایش نرخ عدم قطعیت، مقدار تقاضای کل بازار دست‌اول و دست‌دوم افزایش یافته و به همین دلیل مقدار انتقال محصولات بین سطوح مختلف افزایش یافته است. از این رو هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین به دلیل افزایش مقدار حمل‌ونقل، تولید و انهدام افزایش یافته است. برای بررسی روند تغییرات مقدار تابع هدف در مقابل تغییرات نرخ عدم قطعیت، نمودار شکل (۲) ترسیم شده است.



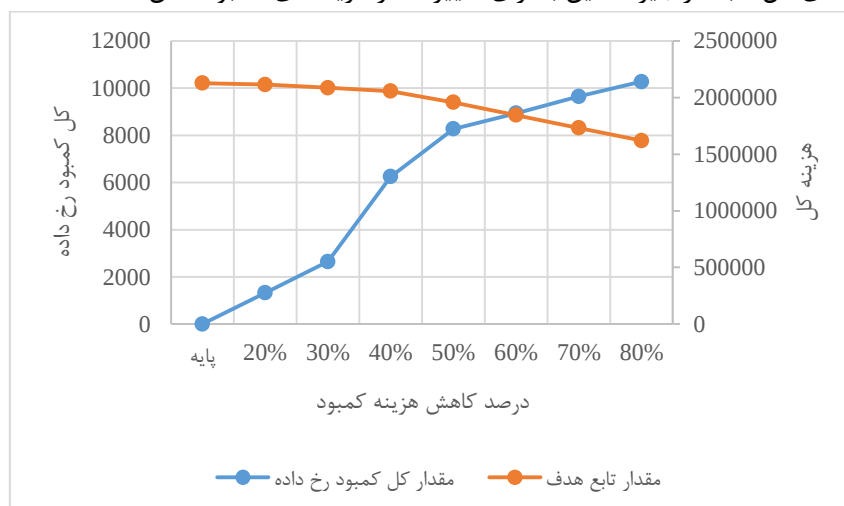
شکل ۲- روند تغییرات مقدار تابع هدف مسئله در مقابل تغییرات نرخ عدم قطعیت

در ادامه به بررسی تغییرات مقدار تابع هدف و مقدار کل کمبود رخ داده در مقابل تغییرات هزینه کمبود پرداخته شده است. از این رو هزینه کمبود به اندازه ۲۰ الی ۸۰ درصد کاهش یافته و تغییرات مقدار تابع هدف و کمبود در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- حدود بازه ای پارامترهای قطعی و غیرقطعی مسئله بر اساس توزیع یکنواخت

درصد کاهش هزینه کمبود	مقدار تابع هدف	مقدار کل کمبود رخ داده
پایه	۲۱۲۷۲۲۲.۹۵۹	۰
%۲۰	۲۱۱۳۷۹۲.۳۸۹	۱۳۲۶.۴۲۰
%۳۰	۲۰۸۶۴۰۹.۷۰۵	۲۶۵۰.۵۲۵
%۴۰	۲۰۵۶۴۳۵.۸۰۹	۶۲۵۰.۵۹۶
%۵۰	۱۹۵۷۰۷۰.۶۶۰	۸۲۷۱.۵۴۰
%۶۰	۱۸۴۴۴۹۱.۴۳۶	۸۹۳۶.۲۶۴
%۷۰	۱۷۳۱۹۱۲.۲۱۳	۹۶۴۵.۳۶۴
%۸۰	۱۶۱۹۳۳۲.۹۸۹	۱۰۲۷۱.۵۴۰

با توجه به جدول (۴) مشاهده می گردد با کاهش هزینه کمبود، به دلیل تعادل بین هزینه ها، مقدار کمبود افزایش یافته و به دلیل پایین بودن هزینه کمبود نسبت به هزینه های تولید، سیستم با کمبود بیشتر مواجه شده و هزینه های کل شبکه زنجیره تأمین کاهش پیدا کرده است. در حالی که در حالت پایه مقدار کمبود برابر ۰ گزارش شده است. در شکل (۳) روند تغییرات مقدار کمبود و هزینه های کل شبکه زنجیره تأمین به ازای تغییرات در هزینه های کمبود نشان داده شده است.



شکل ۳- روند تغییرات مقدار تابع هدف مسئله و کمبود در مقابل تغییرات هزینه کمبود

با توجه به مطالب بیان شده مشاهده شد با افزایش نرخ عدم قطعیت، تعداد تسهیلات جمع آوری و تولید به دلیلی افزایش تقاضای بازار دست دوم و افزایش نرخ برگشت محصولات بازار دست اول، افزایش یافته است. همچنین میتوان بیان کرد که در بدبینانه ترین حالت (افزایش ۱۰۰٪ تقاضای بازار دست اول و دوم) هزینه های کل شبکه زنجیره تأمین از مقدار ۲۸۶۷۰۰۴.۳۹۲ بیشتر نخواهد شد.

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با هدف کاهش هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین، تحت عدم قطعیت تقاضا، نرخ بازگشت محصولات و هزینه‌های حمل و نقل پرداخته شد. برای کنترل پارامترهای غیرقطعی مسئله از برنامه‌ریزی استوار امکانی استفاده شد. برای ارزیابی مدل و همچنین بررسی متغیرها خروجی، یک مسئله نمونه طراحی و حدود بازه ای پارامترهای مسئله نشان داده شد. با حل مسئله توسط نرم افزار GAMS مشاهده گردید، با افزایش نرخ عدم قطعیت، مقدار هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین به دلیل افزایش تقاضای بازار دست‌اول و دوم افزایش یافت. همچنین مشاهده شد با کاهش هزینه کمبود، مقدار کمبود کاهش و در نتیجه آن هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین کاهش پیدا کرده است.

برای بهبود مقاله حاضر، پیشنهاد‌های زیر برای محققین ارائه شده است:

- ۱- در نظر گرفتن مسیریابی وسیله نقلیه در جمع‌آوری محصولات
- ۲- استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مسائل در سایزهای بزرگتر
- ۳- در نظر گرفتن تخفیف نموی در تأمین مواد اولیه برای تولید محصولات جدید

منابع

- Abdallah, T., Diabat, A., & Simchi-Levi, D. (2012). Sustainable supply chain design: a closed-loop formulation and sensitivity analysis. *Production Planning & Control*, 23(2-3), 120-133.
- Amin, S. H., Zhang, G., & Akhtar, P. (2017). Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, 73, 82-91.
- Amin, S. H., & Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 316-330.
- Diabat, A., Abdallah, T., & Henschel, A. (2015). A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration. *Computers & Operations Research*, 54, 245-256.
- Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations. *Applied Soft Computing*, 69, 232-249.
- Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., & Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert Systems with Applications*, 116, 454-471.
- Ghahremani Nahr, J., Kian, R., & Rezazadeh, H. (2018). A modified priority-based encoding for design of a closed-loop supply chain network using a discrete league championship algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018.
- 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.
- Hajiaghaei-Keshteli, M., & Fard, A. M. F. (2018). Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition. *Neural Computing and Applications*, 1-35.
- Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178-191.
- Kaya, O., & Urek, B. (2016). A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain. *Computers & Operations Research*, 65, 93-103.
- Mardan, E., Govindan, K., Mina, H., & Gholami-Zanjani, S. M. (2019). An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*.
- Özceylan, E., Demirel, N., Çetinkaya, C., & Demirel, E. (2017). A closed-loop supply chain network design for automotive industry in Turkey. *Computers & industrial engineering*, 113, 727-745.
- Panda, S., Modak, N. M., & Cárdenas-Barrón, L. E. (2017). Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling. *International Journal of Production Economics*, 188, 11-21.

- Saedinia, R., Vahdani, B., Etebari, F., & Nadjafi, B. A. (2019). Robust gasoline closed loop supply chain design with redistricting, service sharing and intra-district service transfer. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 123, 121-141.
- Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-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.
- 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.
- Yadegari, E., Alem-Tabriz, A., & Zandieh, M. (2019). A memetic algorithm with a novel neighborhood search and modified solution representation for closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 418-436.
- Yavari, M., & Zaker, H. (2019). An integrated two-layer network model for designing a resilient green-closed loop supply chain of perishable products under disruption. *Journal of Cleaner Production*, 230, 198-218.