

طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله سبز و تاب‌آور تحت ریسک اختلال با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری شبکه

بهنام افشارپور^۱، عزیزاله جعفری^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

خلاصه

با بیشتر شدن استفاده از اینترنت و توسعه هرچه بیشتر تجارت الکترونیک، هر روزه بر تعداد مشتریانی که قصد خرید اینترنتی دارند افزوده می‌شود، همچنین در محیط‌های کسب‌وکار امروزی که با عدم قطعیت‌های زیادی روبه‌رو هستند، زنجیره‌های تأمین خیلی بیشتر از قبل در معرض ریسک‌های اختلال قرار دارند. این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی دوهدفه (هدف اقتصادی و هدف زیست‌محیطی) برای طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله (خرده‌فروش برخط و خرده‌فروش برون‌خط) که از استراتژی‌های تاب‌آوری برای روبه‌رو شدن با اختلال‌ها استفاده می‌کند، ارائه می‌دهد. نوآوری این پژوهش طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله است که تحت ریسک‌های اختلال و عملیاتی قرار می‌گیرد و برای اولین بار دو استراتژی تاب‌آوری تأمین‌کننده پشتیبان و انتقالات جانبی برای مقابله با آن‌ها در نظر گرفته شده‌اند، ضمن این‌که انعطاف‌پذیری شبکه نیز برای بار اول در چنین زنجیره‌ای مدل‌سازی می‌شود، به این معنی که تقاضاهای مشتریان به طرق دیگری مانند برون‌سپاری، استخدام موقت کارکنان و غیره نیز می‌توانند برآورده شوند. به دلیل پیچیده بودن مسأله برای حل آن در ابعاد بزرگ از رویکرد آزادسازی لاگرانژ استفاده شده است که عملکرد مناسب آن توسط محاسبات انجام شده تأیید می‌شود. محاسبات انجام شده نشان دادند که بکارگیری استراتژی‌های تاب‌آوری می‌تواند ۳/۷ درصد باعث کاهش هزینه‌ها و ۲۵/۵ درصد باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی شوند. به علاوه بکارگیری انعطاف‌پذیری شبکه ۲۶ درصد در کاهش هزینه‌ها و ۷۹ درصد در کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی نقش داشته است. صنعت تولید تایر نمونه‌ای از بکارگیری این مدل در دنیای واقعی است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

بازنگری ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

پذیرش ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

طراحی شبکه زنجیره تأمین

زنجیره تأمین حلقه‌بسته

دوکاناله

تاب‌آوری

انعطاف‌پذیری شبکه

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر خیلی از کشورها رشد سریع اقتصادی را تجربه کرده‌اند که این امر منجر به بیشتر شدن ضایعات و کمبود منابع شده است. به عنوان یک پاسخ به این مشکلات، بازیافت ضایعات تبدیل به چالشی شده است که باید مورد بررسی قرار گیرد. زنجیره‌های تأمین

حلقه‌بسته به عنوان ابزارهای مهم در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و مصرف مواد خام ظاهر شده‌اند. با توسعه اینترنت و تجارت الکترونیک، انتقال از زنجیره تأمین حلقه‌بسته تک‌کاناله سنتی به زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله گریزناپذیر شده است، به طوری که زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله با هر دو زیرساخت‌های فروش برخط^۲ و کانال‌های

پایدار با در نظر گرفتن تقاضای حساس به قیمت، مشوق‌های مصرف‌کننده و سطوح مختلف کیفیت محصول پرداخته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که قیمت‌گذاری تشویقی تأثیرات مثبتی بر روی محصولات برگشتی در شبکه لجستیک معکوس دارد.

زنجیره‌های تأمین با ریسک‌های اختلال گوناگونی مواجه می‌شوند، به‌طوری‌که این ریسک‌ها اثرات مخربی بر روی عملکرد و اهداف زنجیره ایجاد می‌کنند و عموماً منشاء آن‌ها براساس تعامل زنجیره‌تأمین با محیط خارجی شکل می‌گیرد. یک زنجیره‌تأمین تاب‌آور به زنجیره‌تأمینی گفته می‌شود که توانمندی روبه‌رو شدن با عواقب ریسک‌ها را برای برگشت به حالت اولیه یا رسیدن به یک وضعیت مناسب‌تر بعد از وقوع اختلال را داشته باشد [۱۰]. مهرجودی و شفیع [۱۱] یک زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته پایدار و تاب‌آور طراحی کردند و از استراتژی‌های منبع‌یابی چندگانه^۲ و تأمین‌کننده پشتیبان^۳ و تسهیم اطلاعات^۴ به‌عنوان استراتژی‌های تاب‌آوری استفاده نمودند. آن‌ها مطالعه خود را در صنعت تایر به‌کار گرفتند. نتایج نشان دادند که استراتژی‌های منبع‌یابی چندگانه و تأمین‌کننده پشتیبان نقش مکملی در تأمین تقاضای بالا در طول اختلال دارند. اکبری کاسگری و همکاران [۱۲] به طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته پایدار و تاب‌آور در صنعت مس پرداختند. از استراتژی تأمین‌کننده پشتیبان برای کاهش اثرات منفی حاصل از زمین‌لرزه‌ها در عملیات معدن‌کاری استفاده شده است. نتایج نشان دادند که استراتژی تاب‌آوری تأمین‌کننده پشتیبان باعث افزایش پاسخ‌گویی زنجیره می‌شود.

براساس رواج برنامه‌های اینترنتی و رشد پیوسته تجارت الکترونیک، مدل فروش‌های سنتی به مدل فروش‌های دوکاناله (برخط و برون خط)^۵ توسعه پیدا کرده‌اند. در سال‌های اخیر، محققین بیشتر بر روی زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله از نقطه‌نظرهای قیمت‌گذاری و هماهنگی و طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله پژوهش نموده‌اند [۱]. لیو و همکاران [۱۳] تصمیمات قیمت‌گذاری و تولید را در زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نقش مهم هزینه فروش کانال در تعیین قیمت بهینه تولیدکننده و استراتژی تولید را تعیین نمود. ژانگ و همکاران [۱۴] مکانیزم هماهنگی زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته دوکاناله را با در نظر گرفتن کیفیت محصول و برگشتی‌ها مورد بررسی قرار دادند. در مقایسه با مدل‌های غیر هماهنگ، مکانیزم هماهنگی پیشنهادی آن‌ها در کاهش رقابت قیمت خرده‌فروشی و افزایش سود کل مؤثر بود. فتح‌اللهی‌فرد و همکاران [۱۵] یک مدل شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله چندمحصولی و چنددوره‌ای برای تایر توسعه دادند. آن‌ها الگوریتم‌های فراابتکاری را برای مسأله خود در نظر گرفتند. کائود و همکاران [۱۶] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط نوآورانه را که تجارت الکترونیک را با زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته چندلایه و چنددوره‌ای، با لحاظ نمودن پویایی‌های دوکاناله در تسهیلات تولید و بازیابی یکپارچه

خرده‌فروشی سنتی همراه می‌شود، که پیچیدگی و عدم پیش‌بینی‌پذیری بیشتری را به‌همراه دارد [۱]. در سال‌های اخیر توجه بیشتری به تحقیق بر روی بهینه‌سازی زنجیره‌تأمین دوکاناله شده است، هرچند پژوهش‌های بیشتری برای طراحی زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله نیاز است.

به‌غیر از ملاحظات زیست‌محیطی در یک طراحی شبکه زنجیره‌تأمین موثر باید برای ریسک اختلال^۱ که به دلایلی نظیر زلزله، سیل، حملات تروریستی، توفان و غیره و همچنین پیشامدهای غیرمترقبه عملیاتی مانند خرابی تجهیزات، قطع برق، سوانح صنعتی و غیره ایجاد می‌شود، راهکارهایی اندیشیده شود [۲]. ریسک‌های اختلال نه فقط باعث نتایج اجرایی و عملیاتی جدی، مانند هزینه حمل‌ونقل بیشتر، تأخیرات سفارش، کمبود موجودی و ازدست دادن مشتری می‌شوند، بلکه همچنین اثرات چشم‌گیری روی عملکرد اقتصادی شرکت‌ها دارند [۳]. نتایج منفی مهم اختلال‌ها و فقدان هر مدرکی دال بر بازیابی سریع، نیاز به توجه نزدیک نمودن به ریسک‌های اختلال را در سطح طراحی زنجیره‌تأمین نشان می‌دهد [۴].

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین شکل و ساختار یک زنجیره‌تأمین را معین می‌کند و بر عملکرد و هزینه‌های آن تأثیری مستقیم دارد و تصمیماتی نظیر تعیین تعداد، اندازه و مکان تسهیلات در زنجیره را دربر می‌گیرد و همچنین امکان دارد تصمیمات دیگری مانند سیاست‌های مدیریت توزیع، موجودی و حمل‌ونقل به‌علاوه تصمیماتی شامل تکمیل تقاضای مشتریان نیز شامل آن شود [۵]. طراحی شبکه زنجیره‌تأمین معکوس به‌معنای معین نمودن تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات جمع‌آوری، بازیافت و مراکز دفع و همچنین امکان دارد شامل تصمیماتی نظیر موجودی‌ها و میزان جریان بین تسهیلات مختلف باشد [۶].

۲. مرور ادبیات

بیشتر شدن اهمیت اهداف زیست‌محیطی و رشد فزاینده محدودیت‌ها در دنیای امروز، باعث شده است که تصمیم‌گیرندگان در تصمیمات خود توجه به عوامل زیست‌محیطی را در دستور کار خود قرار دهند. همچنین از نقطه‌نظر اجتماعی نیز عملکرد زنجیره‌های تأمین مورد بررسی واقع شده‌اند. ژاله‌چیان و همکاران [۷] در تحقیقی به طراحی یک زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته پایدار با اخذ تصمیمات مکان‌یابی، موجودی و مسیریابی تحت عدم قطعیت پرداختند. آن‌ها از یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی برای مقابله با عدم قطعیت استفاده نمودند. در پژوهشی دیگر موتا و همکاران [۸] یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته پایدار تحت شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن حالت‌های حمل‌ونقل متفاوت طراحی نمودند. عدم قطعیت موجود در این مسأله با بکارگیری رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی مدیریت شده است. در تحقیقی دیگر موگاله و همکاران [۹] به طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته

4. Information sharing

5. Offline

1. Disruption

2. Multiple sourcing

3. Backup supplier

می‌کرد، ارائه نمودند. کازانکولو و همکاران [۱۷] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای یک شبکه زنجیره تأمین دوکاناله سبز با لحاظ نمودن اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه دادند.

محققین عموماً روش‌های مختلفی را برای مدیریت عدم قطعیت در زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته به‌کار می‌گیرند، شامل برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی فازی و بهینه‌سازی استوار. این رویکردها به شناسایی اثر عوامل عدم قطعیت، مانند تقاضای بازار، تأمین، و فرآیندهای بازیافت بر روی برنامه‌ریزی، زمان‌بندی و مدیریت کل زنجیره تأمین، کمک می‌کند [۱]. در مقایسه با رویکردهای برنامه‌ریزی تصادفی، رویکردهای بهینه‌سازی استوار برای مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کمتر به‌کار گرفته شده‌اند. کیوان‌شکوه و همکاران [۱۸] یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته استوار که عدم قطعیت‌ها در تقاضاها و نرخ‌های برگشتی را در نظر می‌گرفت، توسعه دادند. مدل آن‌ها بر این فرض استوار است که انعطاف‌پذیری در پوشش ویژگی‌های تقاضای تأمین شده و برگشتی‌های جمع‌آوری شده وجود دارد. پایدار و همکاران [۱۹] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را که برای زنجیره تأمین روغن موتور استفاده شده، ارائه دادند. برای روبه‌رو شدن با عدم قطعیت‌ها در مقادیر روغن جمع‌آوری شده، نویسندگان از رویکرد بهینه‌سازی استوار معرفی شده به‌وسیله مالوی و همکاران [۲۰] استفاده نمودند. در ادبیات بکارگیری اختلال در طراحی زنجیره حلقه‌بسته، عموماً ریسک اختلال را به‌صورت عدم قطعیت تصادفی لحاظ می‌نمایند. هاتفی و جولایی [۲۱] یک مدل استوار برای طراحی یک سیستم لجستیک روبه جلو-معکوس که اختلال‌ها را در تسهیلات در نظر می‌گیرد، فرمول‌بندی نمودند. مدل ارائه شده یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تک‌دوره‌ای و تک‌محصولی را ارائه می‌دهد. جبارزاده و همکاران [۲] زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت ریسک‌های اختلال و عملیاتی طراحی کردند. آن‌ها از استراتژی انتقالات جانبی به‌عنوان یک استراتژی تاب‌آوری برای مقابله با ریسک اختلال در شبکه استفاده نمودند. همچنین آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی را برای کمینه نمودن هزینه کلی زنجیره، توسعه دادند. نتایج نشان دادند که بکارگیری استراتژی انتقالات جانبی نقش مهمی در کاهش هزینه کلی زنجیره دارد. روش بهینه‌سازی استوار آن‌ها روش معرفی شده توسط آقزاف و همکاران [۲۲] بود. لطفی و همکاران [۲۳] یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار، تاب‌آور، ریسک‌گریز و استوار برای روبه‌رو شدن با نوسانات تقاضا بر اثر اختلالی مانند همه‌گیری ویروس کرونا طراحی نمودند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه تصادفی استوار دومرحله‌ای را برای بیان مسئله پیشنهادی خود به‌کار گرفتند. آن‌ها از رویکرد بهینه‌سازی استوار مالوی و همکاران [۲۰] در مسئله خود استفاده نمودند.

مطالعه حاضر یک مدل ریاضی را ارائه می‌دهد که به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین دوکاناله پایدار و تاب‌آور می‌پردازد.

سوالات تحقیق در این پژوهش عبارتند از:

(۱) آیا می‌توان یک مدل شبکه زنجیره تأمین دوکاناله پایدار و تاب‌آور

برای محصولاتمانند تایر، با لحاظ نمودن ویژگی‌های مهمی مانند مکانیابی تسهیلات و تخصیص، مقادیر تولید، فرآیندهای برگشتی‌ها و بازیافت، مدیریت موجودی تسهیل طراحی نمود؟
(۲) استراتژی‌های تاب‌آوری منظور شده در این تحقیق چقدر می‌توانند در اهداف مسئله به‌طور مثبتی تأثیرگذار باشند؟
(۳) روش بهینه‌سازی استوار به‌کارگرفته شده در این مسئله چقدر می‌تواند به‌طور مؤثر در مدیریت عدم قطعیت موجود در مسئله تأثیرگذار باشد؟

هدف از انجام این پژوهش ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی تحت عدم قطعیت حاصل از اختلال، برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله پایدار و تاب‌آور است. این مسئله در نظر دارد نتایج حاصل از اختلال را بر روی شبکه نشان داده و تأثیر به‌کارگیری استراتژی‌های تاب‌آوری را در این شبکه لحاظ کرده و عدم قطعیت موجود در شبکه را با یک رویکرد بهینه‌سازی استوار مدیریت نماید.

طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله برای محصولاتی مانند تایر که تحت عدم قطعیت اختلال قرار می‌گیرد و برای مقابله با آن از استراتژی‌های تاب‌آوری استفاده می‌شود و بکارگیری مفهوم پایداری در طراحی این شبکه، نوآوری اصلی این مسئله است. نوآوری دیگر موجود در این مسئله استفاده از استراتژی انعطاف‌پذیری شبکه است، انعطاف‌پذیری یک زنجیره تأمین معمولاً در سطح برنامه‌ریزی عملیاتی لحاظ می‌شود. مطالعات اخیر مانند پژوهش یو و سولوانگ [۲۴] روشن نموده‌اند که انعطاف‌پذیری شبکه ممکن است اثر مهمی روی تصمیمات مکانیابی بگذارند. برخی از گزینه‌های اجرای شبکه انعطاف‌پذیر برای تطبیق ظرفیت عبارتند از، برون‌سپاری، استخدام کارگران موقت و اجاره تجهیزات. جدول (۱) برخی ویژگی‌های مختلف مقالاتی که نزدیکی بیشتری با کار پژوهشی حاضر دارند را نشان می‌دهد. براساس مرور ادبیات برخی شکاف‌های تحقیقاتی برای کار پژوهشی حاضر وجود دارند. به‌رغم تلاش‌هایی که برای تضمین هر دو مفهوم پایداری و تاب‌آوری در مسائل طراحی زنجیره تأمین انجام شده است، هنوز شکاف تحقیقاتی در این حیطه وجود دارد، مخصوصاً زمانی که لجستیک معکوس اعمال می‌شود و شبکه به‌صورت حلقه‌بسته می‌باشد و به‌طور خاص‌تر زمانی که کانال‌های فروش به‌صورت دوگانه هستند. براساس آخرین مطالعاتی که توسط نویسندگان این پژوهش انجام شده، اول این که تحقیقی که به طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز دوکاناله با در نظر گرفتن تاب‌آوری بپردازد، در ادبیات وجود ندارد. دوم این که فقط یک کار تحقیقاتی در زمینه طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته دیده شد که از استراتژی انعطاف‌پذیری شبکه استفاده نموده بود، ولی آن پژوهش به‌صورت دوکاناله طراحی نشده بود و از استراتژی‌های تاب‌آوری هم در آن به‌کار گرفته نشده است.

نوآوری‌های این پژوهش:

(۱) ارائه یک مدل ریاضیاتی جدید برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله
(۲) لحاظ نمودن مفاهیم پایداری و تاب‌آوری به‌طور هم‌زمان در یک

مدل پرداخته می شود. در بخش ۵-۲ به بررسی عملکرد محاسباتی روش آزادسازی لاگرانژ پرداخته می شود. در بخش ۵-۳ به ارائه پیشنهادات مدیریتی پرداخته خواهد شد و نهایتاً در بخش ۶ متعلق به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادهای آتی است.

۳. رویکردها

۳-۱. تعریف مسأله

این مقاله یک مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز و تاب آور دوکاناله چنددوره ای و چندمحصولی را ارائه می دهد. شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته شامل دو بخش جدا، همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، می باشد. زنجیره تأمین روبه جلو شامل تأمین کنندگان، مراکز تولید، مراکز توزیع، خرده فروشان برون خط و یک خرده فروش برخط می شود. زنجیره تأمین معکوس شامل مراکز جمع آوری و معاینه، یک مرکز دفع و مراکز بازیافت می شود.

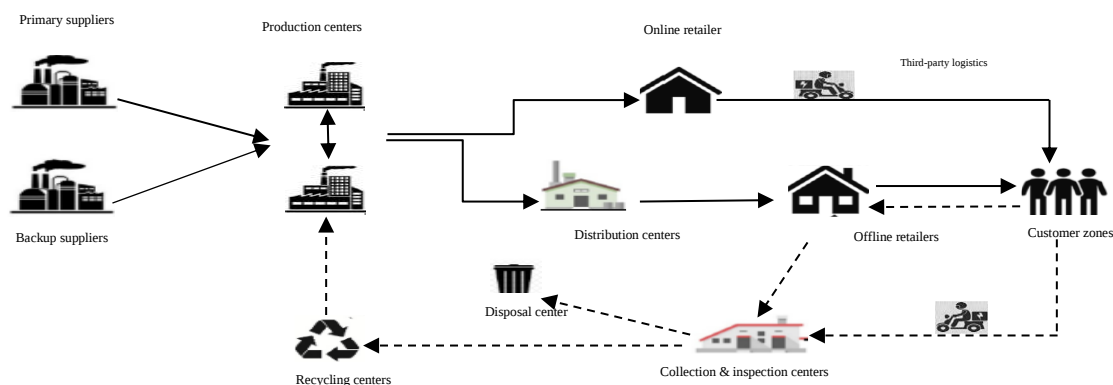
شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته دوکاناله

(۳) لحاظ نمودن ریسک های اختلال و عملیاتی در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته دوکاناله و ارائه یک رویکرد تصادفی استوار و یکارگیری برخی استراتژی های تاب آوری برای مقابله با ریسک ها (۴) ارائه مفهوم انعطاف پذیری شبکه در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته دوکاناله

ساختار این مقاله به این ترتیب است که در بخش ۳ به رویکردهای روبه رو شدن با مسأله پرداخته می شود. در بخش ۳-۱ به تعریف مسأله پرداخته خواهد شد، در بخش ۳-۲ متعلق به معرفی پارامترها و متغیرهای مسأله است. در بخش ۳-۳ به مدل سازی های ریاضی تصادفی و در بخش ۳-۴ به مدل سازی استوار تصادفی پرداخته خواهد شد. سپس در بخش ۴ به تعریف روش های حل مدل پرداخته و بعد در ۴-۱ روش آزادسازی لاگرانژ توضیح داده می شود. در بخش ۴-۲ یافتن حد پایین و در بخش ۴-۳ یافتن حد بالا و در بخش ۴-۴ روش به روزرسانی حدود بالا و پایین نشان داده خواهد شد. در بخش ۵ نتایج محاسباتی نمایش داده می شوند. در قسمت ۵-۱ به تحلیل حساسیت

جدول (۱). مروری بر مطالعات انجام شده در موضوع مورد پژوهش

نویسندگان	سال	پایان	سبز	تاب آور	حلقه بسته (تک کاناله)	حلقه بسته (دو کاناله)	تصادفی	فازی	روباست	تک دوره ای	چند دوره ای	انعطاف پذیری شبکه	رویکرد مقابله با عدم قطعیت
ژاله چیان و همکاران [۷]	۲۰۱۶	*			*		*	*		*			برنامه ریزی تصادفی امکانی
کیوان شکوه و همکاران [۱۸]	۲۰۱۶				*		*		*				بهینه سازی استوار تصادفی ترکیبی
جبارزاده و همکاران [۲]	۲۰۱۸			*	*		*			*			برنامه ریزی تصادفی استوار
موتا و همکاران [۸]	۲۰۱۸	*			*		*			*			برنامه ریزی تصادفی
یو و سولوانگ [۲۴]	۲۰۲۰		*		*		*	*		*	*	*	مدل ریاضی چند هدفه فازی-تصادفی
مهرجردی و شفیع [۱۱]	۲۰۲۱	*		*	*		*			*			برنامه ریزی تصادفی
لطفی و همکاران [۲۳]	۲۰۲۱	*		*	*		*			*			برنامه ریزی تصادفی استوار
اکبری کاسگری و همکاران [۱۲]	۲۰۲۲	*		*	*		*			*			برنامه ریزی تصادفی
والی سیر و روغبیان [۲۵]	۲۰۲۲	*		*	*		*		*	*			بهینه سازی استوار تصادفی ترکیبی
گائو و همکاران [۱]	۲۰۲۴				*		*		*	*			بهینه سازی استوار داده محور
تحقیق حاضر	۲۰۲۵		*	*	*		*		*	*	*	*	برنامه ریزی تصادفی استوار



شکل (۱). ساختار شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دو کاناله

برگشتی که به مراکز بازیافت ارسال می‌شوند، در این مراکز عملیات بازیافت بر روی آن‌ها انجام شده و از آن‌ها مواد خام تهیه می‌شود و به مراکز تولید فرستاده می‌شوند.

همچنین این شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دو کاناله به صورت سبز طراحی شده یعنی دو هدف اقتصادی و زیست‌محیطی را دربر می‌گیرد. هدف اقتصادی آن کمینه نمودن هزینه‌های شبکه و هدف زیست‌محیطی آن کمینه نمودن موارد منفی زیست‌محیطی مربوط به تأسیس تسهیلات، حمل‌ونقل محصولات و موارد حاصل از عملکرد تسهیلات (شامل تولید، جمع‌آوری و معاینه و بازیافت) است.

در طراحی این شبکه ریسک اختلال هم در نظر گرفته شده است، به‌طوری‌که فرض شده است تأمین‌کنندگان و مراکز تولید در معرض اختلال‌های تصادفی قرار دارند. به کلامی دیگر، زمانی‌که اختلال رخ می‌دهد، ظرفیت‌های تأمین‌کنندگان و مراکز تولید تا اندازه‌ای تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این اختلال‌ها شبکه را به صورت جزئی و نه به طور کامل تحت تأثیر قرار می‌دهند. منشاء این اختلال‌ها دلایلی نظیر زلزله، سیل، حملات تروریستی، توفان و غیره و همچنین پیشامدهای غیرمترقبه عملیاتی مانند خرابی تجهیزات، قطع برق، سوانح صنعتی و غیره می‌باشند، که در مدل ریاضی تحقیق حاضر سه سناریو برای وقوع اختلال تعریف شده است که احتمال هر سناریو S با π_s مشخص می‌شود (جمع احتمالات سناریوها برابر ۱ می‌شود). این نوع ریسک‌ها می‌توانند اثرات منفی روی اهداف، عملکرد و جریان‌های طبیعی یک زنجیره تأمین داشته باشند. یکی از تأثیراتی که تعریف سناریوها بر روی شبکه می‌گذارند بر روی ظرفیت تأمین‌کنندگان اصلی و مراکز تولید است که تحت تأثیر اختلال واقع می‌شوند که در نتیجه آن ظرفیت تأمین تأمین‌کنندگان اصلی و ظرفیت تولید و نگهداری موجودی مراکز تولید کاهش می‌یابند و در نتیجه آن، ممکن است شبکه دچار کمبود مواد اولیه یا محصولات تولیدی در زنجیره شوند. در مسأله حاضر، زمانی‌که یک اختلال رخ می‌دهد، ظرفیت تأمین‌کنندگان اصلی و ظرفیت تولید و نگهداری موجودی مراکز تولید به صورت جزئی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. برای کاهش تأثیرات منفی اختلال‌ها، دو استراتژی تأمین‌کننده پشتیبان و انتقالات جانبی اتخاذ شده‌اند. استراتژی تأمین‌کننده پشتیبان یکی از عمومی‌ترین استراتژی‌ها در مقابله با

تأمین‌کنندگان مواد خام مورد نیاز تولیدکنندگان را تأمین می‌کند. پس از این که مواد خام به تولیدکنندگان ارسال شد، محصولات توسط تولیدکنندگان تولید می‌شوند. محصولات تولیدی توسط تولیدکنندگان از طریق دو کانال فروش به دست مشتریان می‌رسند. اولین کانال فروش، خرده‌فروش برخط هست که درصدی از محصولات تولید شده در تولیدکنندگان به آن ارسال می‌شوند و دومین کانال فروش، خرده‌فروشان برون خط هستند، به‌طوری‌که بخشی از محصولات تولیدی توسط تولیدکنندگان به مراکز توزیع ارسال می‌شوند و سپس از آنجا به خرده‌فروشان برون خط فرستاده می‌شوند. ارسال تقاضای مشتریان از کانال برخط توسط لجستیک شخص ثالث انجام می‌شود که هزینه آن در مدل محاسبه می‌شود ولی اثر زیست‌محیطی آن در نظر گرفته نمی‌شود. خرده‌فروشان برون خط چندین مسئولیت را عهده‌دار هستند، که این‌ها شامل فروش محصولات به مشتریان، پردازش برگشتی‌ها برای موارد کم کیفیت یا معیوب و جمع‌آوری محصولات که به پایان عمر خود رسیده‌اند، می‌باشند. جمع‌آوری محصولات برگشتی از دو طریق صورت می‌گیرند، یکی این‌که درصدی از محصولاتی که از خرده‌فروشان برون خط خریداری شده‌اند، توسط مشتریان به خرده‌فروشان برون خط برگردانده می‌شوند و پس از آن محصولات برگشت داده شده براساس عیب‌ها، و محصولاتی که به پایان عمر خود رسیده‌اند، از خرده‌فروشان برون خط به مراکز جمع‌آوری و معاینه ارسال می‌شوند. از طرفی دیگر محصولات برگشتی (معیوب یا کارکرده) حاصل از محصولاتی که مشتریان از خرده‌فروش برخط خریده‌اند، به‌طور مستقیم از مشتریان توسط لجستیک شخص ثالث به مراکز جمع‌آوری و معاینه ارسال می‌گردند، که هزینه آن در مدل محاسبه می‌شود ولی اثرات زیست‌محیطی آن صرف‌نظر شده است. پس از آن که محصولات برگشتی در مراکز جمع‌آوری و معاینه گردآوری شدند، مورد آزمایش، معاینه و مرتب‌سازی قرار می‌گیرند و بعد از آن محصولات برگشتی که معیارهای لازم برای بازیافت را دارند به مراکز بازیافت ارسال می‌شوند و بقیه محصولات که معیارهای لازم را کسب ننموده‌اند به مرکز نابودسازی برای مدیریت ضایعات ارسال می‌شوند، که هزینه نابودسازی در مدل محاسبه می‌شود ولی از هزینه حمل‌ونقل و اثرات زیست‌محیطی آن صرف‌نظر شده است. محصولات

اختلال می باشد و در زمانی که متوسط تقاضا بالا است بسیار کمک کننده است و چون تأمین مواد اولیه در هر زنجیره تأمینی از اهمیت بالایی برخوردار است از این رو هنگامی که تأمین کننده اصلی در معرض اختلال است این استراتژی بسیار راهگشا است. استراتژی تأمین کننده پشتیبان به این معنی است که اگر تأمین کنندگان اصلی با اختلال روبه رو شوند و نتوانند مواد خام مورد نیاز مراکز تولید را به طور کامل تهیه کنند، تأمین کنندگان پشتیبان کمبود مواد اولیه را جبران می کنند. بدین ترتیب با بکارگیری این استراتژی شبکه کمتر دچار کمبود مواد اولیه می شود. زمانی که مراکز تولید دچار اختلال می شوند بخشی از ظرفیت تولید خود را ممکن است از دست بدهند و در این حالت امکان دارد یک مرکز تولید نتواند همه تقاضای خود را برآورده کند، مثلاً اگر فرض کنیم یک مرکز تولید دچار اختلال شود و به دلیل از دست دادن بخشی از ظرفیت تولید خود نتواند تقاضای خود را برآورده نماید و دچار کمبود شود، یکی از استراتژی های تاب آوری که در این بحران می تواند کمک کننده باشد استراتژی انتقالات جانبی است به این معنی که در این مواقع مراکز تولید دیگر که کمتر تحت تأثیر اختلال واقع شده اند با انتقال بخشی از موجودی در دسترس خود به آن مرکز تولید که تحت تأثیر اختلال قرار گرفته کمک کرده و سعی می کنند که تقاضای آن را تأمین کنند. بدین ترتیب با بکارگیری این استراتژی مراکز تولید و در نتیجه کل شبکه کمتر دچار کمبود محصولات می شوند.

۲-۳. پارامترها و متغیرهای مسأله

در این بخش به معرفی پارامترها و متغیرهای مسأله تحقیق حاضر پرداخته می شود. در جدول (۲) به معرفی مجموعه ها و در جدول (۳) به معرفی پارامترها و در جدول (۴) به معرفی متغیرهای مسأله پرداخته خواهد شد.

جدول (۲). تعریف مجموعه ها

مجموعه ها	
$p = (1, 2, \dots, P)$	محصولات
$j = (1, 2, \dots, J)$	تأمین کنندگان اصلی
$b = (1, 2, \dots, B)$	تأمین کنندگان کمکی
$m = (1, 2, \dots, M)$	مراکز تولید
$i = (1, 2, \dots, I)$	مراکز توزیع
$f = (1, 2, \dots, F)$	خرده فروشان برون خط
$c = (1, 2, \dots, C)$	مشتریان
$k = (1, 2, \dots, K)$	مراکز جمع آوری/معاینه
$r = (1, 2, \dots, R)$	مراکز بازیافت
$t = (1, 2, \dots, T)$	دوره های برنامه ریزی
$s = (1, 2, \dots, S)$	سناریوهای تصادفی
$w = (1, 2, \dots, W)$	تکنولوژی های تولید

جدول (۳). تعریف پارامترهای مسأله

پارامترها	
$FC(m, w), FC_j, FC_k, FC_r, FC_b$	هزینه ثابت تأسیس مرکز تولید m با تکنولوژی w ، انتخاب تأمین کننده اصلی j ، هزینه تأسیس مرکز جمع آوری/معاینه k ، هزینه تأسیس مرکز بازیافت r ، انتخاب تأمین کننده کمکی b
$tc(p, s), tr_s$	هزینه حمل و نقل محصول p تحت سناریو s ، هزینه حمل و نقل مواد اولیه تحت سناریو s
$dis(j, m), dis(b, m), dis(m, i), diso_m, dis(i, f), dis(f, k), dis(k, r), dis(r, m), dis(m, m')$	فاصله بین تأمین کننده اصلی j با مرکز تولید m ، تأمین کننده پشتیبان b با مرکز تولید m ، مرکز تولید m با مرکز توزیع i ، مرکز تولید m با خرده فروش f ، مرکز توزیع i با خرده فروش برون خط f ، خرده فروش برون خط f با مرکز جمع آوری/معاینه k ، مرکز جمع آوری/معاینه k با مرکز بازیافت r ، مرکز بازیافت r با مرکز تولید m ، مرکز تولید m با مرکز تولید m'
$mc(p, m, w, s)$	هزینه تولید محصول p در مرکز تولید m با تکنولوژی w تحت سناریو s
$ch(p, m, s)$	هزینه نگهداری محصول p در مرکز تولید m تحت سناریو s

مفروضات این پژوهش عبارت هستند از:

- تقاضای مشتری، درصد برگشتی محصولات و نرخ محصولات بازیافتی غیرقطعی هستند و وابسته به سناریو می باشند.
- محصولات فروخته شده به صورت برخط و آنهایی که به صورت برخط بازگردانده می شوند توسط لجستیک شخص ثالث حمل می شوند و محصولات برگشتی ایجاد شده از طریق کانال های برخط مستقیم به مراکز جمع آوری و معاینه ارسال می شوند. انتشارات کربن تولید شده به وسیله لجستیک شخص ثالث در فرایند حمل و نقل لحاظ نمی شوند.
- فقط بازگشتی ها براساس مشکلات کیفی لحاظ خواهند شد. خرده فروشان برون خط، برگشتی های برون خط را مدیریت می کنند، درحالی که برگشتی های برخط به صورت مستقیم به مراکز جمع آوری و معاینه تحویل داده می شوند.
- مکانیابی مراکز توزیع و مرکز دفع و حمل و نقل محصولات ضایعات لحاظ نشده اند.
- احتمال اختلال برای تأمین کنندگان پشتیبان خیلی کوچک است بنابراین تأمین کنندگان پشتیبان همیشه در دسترس هستند.
- اختلال ها دلایل مختلفی دارند که تأمین کنندگان اصلی و مراکز تولید با آن ها روبه رو می شوند.
- هر مرکز توزیع که تأسیس می شود حداکثر و فقط یک تکنولوژی تولید به آن تخصیص می یابد.
- یکی از کاربردهای واقعی مسأله تعریف شده در پژوهش حاضر در

اثرات زیست‌محیطی حاصل از مرتب‌سازی یک واحد محصول برگشتی کارکرده تحت سناریو S
$EQ_{(p,c,s)}, ERQ_{(p,c,s)}$
اثرات زیست‌محیطی یک واحد محصول p برای مشتری C تحت ظرفیت منقطع در هر دو کانال‌های روبه‌جلو و معکوس
$\lambda_{(j,s)}, \lambda'_{(m,p,s)}, \lambda''_{(m,s)}$
درصد کاهش در ظرفیت تأمین‌کننده اصلی j، درصد کاهش در ظرفیت تولید مرکز تولید m برای تولید محصول p، درصد کاهش در ظرفیت نگهداری مرکز تولید m تحت سناریو S
π_s
احتمال رخ دادن سناریو S

جدول (۴). تعریف متغیرهای مسئله

متغیرها
$OJ_j, OB_b, OM_{(m,w)}, OK_k, ORR_r$
اگر تأمین‌کننده اصلی j، تأمین‌کننده پشتیبان b انتخاب شوند برابر ۱ در غیر این‌صورت برابر ۰، اگر مرکز تولید m با تکنولوژی w، مرکز جمع‌آوری و معاینه k، مرکز بازافت r تأسیس شوند برابر ۱ در غیر این‌صورت برابر ۰ می‌شوند
$JM_{(j,m,t,s)}, BM_{(b,m,t,s)}$
میزان مواد اولیه انتقال یافته از تأمین‌کننده اصلی j به مرکز تولید m در دوره t تحت سناریو S، میزان مواد اولیه انتقال یافته از تأمین‌کننده پشتیبان b به مرکز تولید m در دوره t تحت سناریو S
$MI_{(p,m,t,s)}, MO_{(p,m,t,s)}$
میزان محصول p انتقال یافته از مرکز تولید m به مرکز توزیع i در دوره t تحت سناریو S، میزان محصول p انتقال یافته از مرکز تولید m به خرده‌فروش برخط در دوره t تحت سناریو S
$IFF_{(p,i,f,t,s)}$
میزان محصول p انتقال یافته از مرکز توزیع i به خرده‌فروش f در دوره t تحت سناریو S
$FK_{(p,f,k,t,s)}, CK_{(p,c,k,t,s)}$
میزان محصول کارکرده p برگشتی از خرده‌فروش برون خط f به مرکز جمع‌آوری/معاینه k در دوره t تحت سناریو S، میزان محصول کارکرده p برگشتی از مشتری C به مرکز جمع‌آوری/معاینه k در دوره t تحت سناریو S
$KR_{(p,k,r,t,s)}, KD_{(p,k,t,s)}$
میزان محصول کارکرده p انتقال یافته از مرکز جمع‌آوری/معاینه k به مرکز بازافت r در دوره t تحت سناریو S، میزان محصول کارکرده p انتقال یافته از مرکز جمع‌آوری/معاینه k به مرکز دفع در دوره t تحت سناریو S
$RM_{(r,m,t,s)}$
میزان مواد خام بازافت شده در مرکز بازافت r انتقال داده شده به مرکز تولید m در دوره t تحت سناریو S
$MMP_{(p,m,m',t,s)}$
میزان محصول p انتقال یافته از مرکز تولید m به مرکز تولید m' در دوره t تحت سناریو S بنابر استراتژی انتقالات جانبی
$QO_{(p,c,t,s)}, QRO_{(p,c,t,s)}$
میزان محصول p برای مشتری C تحت ظرفیت منقطع (انعطاف‌پذیری شبکه) در کانال روبه‌جلو در دوره t تحت سناریو S، میزان محصول p برای مشتری C تحت ظرفیت منقطع در کانال معکوس در دوره t تحت سناریو S
$ma_{(p,m,w,t,s)}, iv_{(p,m,t,s)}$

$RCA_{(j,s)}, RCB_{(b,s)}$
هزینه خرید مواد خام از تأمین‌کننده اصلی j در سناریو S، هزینه خرید مواد خام از تأمین‌کننده پشتیبان b در سناریو S
$cd_{(i,s)}, cc_{(p,s)}, rc_{(r,s)}, dd_s$
هزینه توزیع یک واحد محصول در مرکز توزیع i، هزینه جمع‌آوری و معاینه محصول p، هزینه بازافت یک واحد محصول در مرکز بازافت r، هزینه دفع در مرکز نابودسازی تحت سناریو S
rmm_p
درصد ضایعات مواد خام حاصل از تولید یک واحد محصول p
$\omega, \delta_{(p,s)}, \alpha_{(p,s)}, \beta_p$
میزان مواد خام به‌دست آمده از بازافت یک واحد محصول، نرخ محصول p که به مرکز بازافت ارسال می‌شوند تحت سناریو S، درصد برگشتی محصول p تحت سناریو S، درصد مشتریان کانال برخط برای محصول p
$oc_{(p,c,s)}, orc_{(p,c,s)}, ol_{(p,t)}, rol_{(p,t)}$
هزینه محصول p برای مشتری C تحت ظرفیت منقطع در هر دو کانال‌های روبه‌جلو و معکوس تحت سناریو S، حد انعطاف‌پذیری ظرفیت محصول p در هر دو کانال‌های روبه‌جلو و معکوس در دوره t
$DEM_{(p,c,t,s)}$
تقاضای محصول p از مشتری C در دوره t تحت سناریو S
$cap_j, cap_b, cap_{(p,m)}, cap_k, cap_r, cap_i, caph_m$
ظرفیت تأمین‌کننده اصلی j، ظرفیت تأمین‌کننده پشتیبان b، ظرفیت مرکز تولید m برای محصول p، ظرفیت مرکز جمع‌آوری/معاینه k، ظرفیت مرکز بازافت r، ظرفیت مرکز توزیع i و ظرفیت نگهداری موجودی مرکز تولید m
$ivo_{(p,m)}$
موجودی اولیه محصول p در مرکز تولید m
$dco_{(c,s)}, dcl_{(c,k,s)}$
هزینه تحویل واحد محصول ارسالی از خرده‌فروش برخط به محدوده مشتری C تحت سناریو S، هزینه تحویل واحد محصول معیوب برگشتی از محدوده مشتری C به مرکز جمع‌آوری/معاینه k تحت سناریو S
$rcp_{(p,s)}, re_{(p,c,t)}$
هزینه خرید یک واحد محصول کارکرده p تحت سناریو S، تعداد محصول کارکرده p در مشتری C در دوره t
$eo_{(m,w)}, eo_k, eo_r$
اثرات زیست‌محیطی حاصل از تأسیس مرکز تولید m با تکنولوژی w، اثرات زیست‌محیطی حاصل از تأسیس مرکز جمع‌آوری/معاینه k و اثرات زیست‌محیطی حاصل از تأسیس مرکز بازافت r
$ep_{(p,m,w,s)}, er_{(r,s)}$
اثرات زیست‌محیطی تولید یک واحد محصول p در مرکز تولید m با تکنولوژی w تحت سناریو S، اثرات زیست‌محیطی بازافت یک واحد محصول در مرکز بازافت r تحت سناریو S
$et_{(j,m,s)}, et_{(b,m,s)}, et_{(m,i,s)}, et_{(i,f,s)}, et_{(f,k,s)}, et_{(m,m',s)}, eto_{(m,s)}, et_{(k,r,s)}, et_{(r,m,s)}$
اثرات زیست‌محیطی حمل‌ونقل یک واحد محصول بین تأمین‌کننده اصلی j و مرکز تولید m، تأمین‌کننده پشتیبان b و مرکز تولید m، مرکز تولید m و مرکز توزیع i، مرکز توزیع i و خرده‌فروش برون خط f، خرده‌فروش برون خط f و مرکز جمع‌آوری/معاینه k، مرکز تولید m و مرکز تولید m'، مرکز تولید m و خرده‌فروش برخط، مرکز جمع‌آوری/معاینه k و مرکز بازافت r، مرکز بازافت r و مرکز تولید m تحت سناریو S
EUP_s

$$\begin{aligned}
 & \sum_{p,k,r,t} tc_{(p,s)} dis_{(k,r)} KR_{(p,k,r,t,s)} \\
 & + \sum_{p,m,t} tc_{(p,s)} diso_m MO_{(p,m,t,s)} \\
 & + \sum_{p,c,t} dco_{(c,s)} gp_{(p,c,t,s)} \\
 & + \sum_{p,c,k,t} dcl_{(c,k,s)} CK_{(p,c,k,t,s)} \\
 & + \sum_{\substack{p,m,m',t \\ (m' \in M / \{m\})}} tc_{(p,s)} dis_{(m,m')} MMP_{(p,m,m',t,s)} \quad \forall:
 \end{aligned}
 \tag{۶}$$

$$\begin{aligned}
 & RC \\
 & = \sum_{t,p} \left(\sum_{f,c} rcp_{(p,s)} rf_{(p,f,c,t,s)} \right. \\
 & + \left. \left(\sum_{f,c} rf_{(p,f,c,t,s)} + \alpha_{(p,s)} (g_{(p,f,c,t,s)} \right. \right. \\
 & + \left. \left. gp_{(p,c,t,s)} \right) \right) cc_{(p,s)} \quad \forall s
 \end{aligned}
 \tag{۷}$$

$$\begin{aligned}
 & DC \\
 & = \sum_{p,k,t} dd_s KD_{(p,k,t,s)} \quad \forall s
 \end{aligned}
 \tag{۸}$$

$$\begin{aligned}
 & SC \\
 & = \sum_{j,m,t} RCA_{(j,s)} JM_{(j,m,t,s)} \\
 & + \sum_{b,m,t} RCB_{(b,s)} BM_{(b,m,t,s)} \quad \forall s
 \end{aligned}
 \tag{۹}$$

$$\begin{aligned}
 & MC \\
 & = \sum_{p,i,f,t} cd_{(i,s)} IFF_{(p,i,f,t,s)} \\
 & + \sum_{r,m,t} rc_{(r,s)} RM_{(r,m,t,s)} \quad \forall s
 \end{aligned}
 \tag{۱۰}$$

$$\begin{aligned}
 & QC \\
 & = \sum_{p,c,t} oc_{(p,c,s)} QO_{(p,c,t,s)} \\
 & + \sum_{p,c,t} orc_{(p,c,s)} QRO_{(p,c,t,s)} \quad \forall s
 \end{aligned}
 \tag{۱۱}$$

$$\begin{aligned}
 & FE \\
 & = \sum_{m,w} eo_{(m,w)} OM_{(m,w)} + \sum_k eo_k OK_k \\
 & + \sum_r eo_r ORR_r \quad \forall s
 \end{aligned}
 \tag{۱۲}$$

$$\begin{aligned}
 & PE \\
 & = \sum_{p,m,w,t} ep_{(p,m,w,s)} ma_{(p,m,w,t,s)} \\
 & + \sum_{r,m,t} er_{(r,s)} RM_{(r,m,t,s)} \quad \forall s
 \end{aligned}
 \tag{۱۳}$$

میزان محصول p تولیدی در مرکز تولید m تحت تکنولوژی w ، میزان موجودی محصول p در مرکز تولید m در دوره t تحت سناریو s

$rf_{(p,f,c,t,s)}$
میزان محصول p کارکرده جمع آوری شده از مشتری c در خرده فروش f در دوره t تحت سناریو s

$g_{(p,f,c,t,s)}, gp_{(p,c,t,s)}$
تعداد محصول p فروخته شده از خرده فروش f برون خط k در دوره t تحت سناریو s ، تعداد محصول p فروخته شده از خرده فروش f برخط به مشتری c در دوره t تحت سناریو s

$fr_{(t,s)}$
میزان محصولات برگشتی به کار گرفته شده برای بازیافت مواد خام در دوره t تحت سناریو s

۳-۳. فرمول سازی مدل تصادفی

مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز و تاب آور دوکاناله تصادفی این پژوهش به صورت زیر فرموله می شود:

$$\min Z_{ec} = FC + \sum_s \pi_s (IC + PC + TC + RC + DC + SC + MC + QC) \tag{۱}$$

$$\min Z_{en} = FE + \sum_s \pi_s (PE + TE + QE) \tag{۲}$$

$$\begin{aligned}
 FC = & \sum_j FC_j OJ_j + \sum_b FC_b OB_b \\
 & + \sum_{m,w} FC_{(m,w)} OM_{(m,w)} \\
 & + \sum_k FC_k OK_k \\
 & + \sum_r FC_r ORR_r
 \end{aligned}
 \tag{۳}$$

$$IC = \sum_{p,m,t} ch_{(p,m,s)} iv_{(p,m,t,s)} \quad \forall s \tag{۴}$$

$$\begin{aligned}
 PC = & \sum_{p,m,w,t} mc_{(p,m,w,s)} ma_{(p,m,w,t,s)} \quad \forall s
 \end{aligned}
 \tag{۵}$$

$$\begin{aligned}
 TC = & \sum_{j,m,t} tr_s dis_{(j,m)} JM_{(j,m,t,s)} \\
 & + \sum_{b,m,t} tr_s dis_{(b,m)} BM_{(b,m,t,s)} \\
 & + \sum_{p,m,i,t} tc_{(p,s)} dis_{(m,i)} MI_{(p,m,i,t,s)} \\
 & + \sum_{p,i,f,t} tc_{(p,s)} dis_{(i,f)} IFF_{(p,i,f,t,s)} \\
 & + \sum_{p,f,k,t} tc_{(p,s)} dis_{(f,k)} FK_{(p,f,k,t,s)} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 iv_{(p,m,t,s)} &= iv_{(p,m,t-1,s)} + \sum_w ma_{(p,m,w,t,s)} \\
 &+ \sum_{\substack{m' \in M \\ \{m\}}} MMP_{(p,m',m,t,s)} \\
 &- MO_{(p,m,t,s)} \\
 &- \sum_i MI_{(p,m,i,t,s)} \\
 &- \sum_{\substack{m' \in M \\ \{m\}}} MMP_{(p,m,m',t,s)}
 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\forall m, p, t > 1, s$$

$$\sum_m MI_{(p,m,i,t,s)} = \sum_f IFF_{(p,i,f,t,s)} \quad \forall p, i, t, s \quad (20)$$

$$\sum_i IFF_{(p,i,f,t,s)} = \sum_c g_{(p,f,c,t,s)} \quad \forall p, f, t, s \quad (21)$$

$$\sum_m MO_{(p,m,t,s)} = \sum_c gp_{(p,c,t,s)} \quad \forall p, t, s \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 \sum_k FK_{(p,f,k,t,s)} &= \alpha_{(p,s)} \sum_c g_{(p,f,c,t,s)} \\
 &+ \sum_c rf_{(p,f,c,t,s)} \quad \forall p, f, t, s \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\sum_k CK_{(p,c,k,t,s)} = \alpha_{(p,s)} gp_{(p,c,t,s)} \quad \forall p, c, t, s \quad (24)$$

$$\sum_f FK_{(p,f,k,t,s)} + \sum_c CK_{(p,c,k,t,s)} =$$

$$\sum_r KR_{(p,k,r,t,s)} + KD_{(p,k,t,s)} \quad \forall p, k, t, s \quad (25)$$

$$\sum_r KR_{(p,k,r,t,s)}$$

$$= \delta_{(p,s)} \left(\sum_f FK_{(p,f,k,t,s)} \right) \quad (26)$$

$$+ \sum_c CK_{(p,c,k,t,s)} \quad \forall p, k, t, s$$

$$\sum_{k,r,p} KR_{(p,k,r,t,s)} = fr_{(t,s)} \quad \forall t, s \quad (27)$$

$$\sum_{r,m} RM_{(r,m,t,s)} = \omega fr_{(t,s)} \quad \forall t, s \quad (28)$$

$$\sum_m JM_{(j,m,t,s)} \leq (1 - \lambda_{(j,s)}) cap_j OJ_j \quad \forall j, t, s \quad (29)$$

$$\sum_m BM_{(b,m,t,s)} \leq cap_b OB_b \quad \forall b, t, s \quad (30)$$

$$ma_{(p,m,w,t,s)} \leq (1$$

$$- \lambda'_{(m,p,s)}) cap_{(p,m)} OM_{(m,w)} \quad \forall p, m, w, t, s \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
 TE &= \sum_{j,m,t} et_{(j,m,s)} dis_{(j,m)} JM_{(j,m,t,s)} \\
 &+ \sum_{b,m,t} et_{(b,m,s)} dis_{(b,m)} BM_{(b,m,t,s)} \\
 &+ \sum_{p,m,i,t} et_{(m,i,s)} dis_{(m,i)} MI_{(p,m,i,t,s)} \\
 &+ \sum_{p,i,f,t} et_{(i,f,s)} dis_{(i,f)} IFF_{(p,i,f,t,s)} \\
 &+ \sum_{p,f,k,t} et_{(f,k,s)} dis_{(f,k)} FK_{(p,f,k,t,s)}
 \end{aligned} \quad (14)$$

$$+ \sum_{p,k,r,t} et_{(k,r,s)} dis_{(k,r)} KR_{(p,k,r,t,s)}$$

$$+ \sum_{r,m,t} et_{(r,m,s)} dis_{(r,m)} RM_{(r,m,t,s)}$$

$$+ \sum_{p,m,t} eto_{(m,s)} diso_m MO_{(p,m,t,s)}$$

$$+ \sum_{\substack{p,m,m',t \\ (m' \in M/\{m\})}} et_{(m,m',s)} dis_{(m,m')} MMP_{(p,m,m',t,s)}$$

$$+ \sum_{p,f,c,t} (rf_{(p,f,c,t,s)} + \alpha_{(p,s)} (g_{(p,f,c,t,s)} + gp_{(p,c,t,s)})) EUP_s \quad \forall s$$

$$QE = \sum_{p,c,t} EQ_{(p,c,s)} QO_{(p,c,t,s)} \quad (15)$$

$$+ \sum_{p,c,t} ERQ_{(p,c,s)} QRO_{(p,c,t,s)} \quad \forall s$$

$$S.t.$$

$$\sum_w OM_{(m,w)} \leq 1 \quad \forall m \quad (16)$$

$$\sum_j JM_{(j,m,t,s)} + \sum_b BM_{(b,m,t,s)}$$

$$+ \sum_r RM_{(r,m,t,s)} \quad (17)$$

$$= \sum_p (1 - rmm_p) \sum_w ma_{(p,m,w,t,s)} \quad \forall m, t, s$$

$$iv_{(p,m,1,s)} = ivo_{(p,m)} + \sum_w ma_{(p,m,w,1,s)}$$

$$+ \sum_{\substack{m' \in M/\{m\}}} MMP_{(p,m',m,1,s)} - MO_{(p,m,1,s)} \quad (18)$$

$$- \sum_i MI_{(p,m,i,1,s)}$$

$$- \sum_{\substack{m' \in M/\{m\}}} MMP_{(p,m,m',1,s)} \quad \forall m, p, s$$

شامل اثرات منفی زیست محیطی حاصل از عملیات های تولید محصولات و بازیافت مواد اولیه می باشد. قسمت سوم اثرات منفی زیست محیطی حاصل از حمل و نقل محصولات را محاسبه می کند و قسمت چهارم اثرات منفی زیست محیطی مرتبط با تکمیل تقاضا به وسیله ظرفیت منعطف در هر دو لجستیک روبه جلو و معکوس را نشان می دهد.

محدودیت (۱۶) برای هر مرکز تولیدی تضمین می کند که، اگر آن مرکز تولید تأسیس شود، حداکثر یک تکنولوژی تولید باید انتخاب شود. محدودیت (۱۷) بیان می کند که مواد خام مورد نیاز برای تولید محصولات، به وسیله تأمین کنندگان اصلی و پشتیبان و مراکز بازیافت تأمین می شوند. محدودیت های (۱۸) - (۲۲) توازن جریان محصولات در مسیر روبه جلو شبکه زنجیره تأمین را تضمین می نماید. محدودیت (۲۳) بیان می دارد که تعداد محصولات کار کرده انتقال یافته از خرده فروش برون خط، برابر است با مجموع محصولاتی که به پایان عمر خود رسیده اند و محصولات برگشت داده شده ارسالی توسط مشتریان. محدودیت (۲۴) نشان دهنده این است که محصولات برگشتی ایجاد شده از کانال برخط به طور مستقیم به مرکز جمع آوری/معاینه با لجستیک شخص ثالث انتقال داده می شوند. محدودیت های (۲۵) - (۲۸) توازن جریان محصولات مرتبط با مسیر معکوس شبکه را تضمین می نماید. محدودیت های (۲۹) - (۳۵) اطمینان می دهند که نباید از حد ظرفیت بیشینه تسهیلات تجاوز شود. محدودیت های (۳۶) و (۳۷) حدود بالای تقاضاهای مشتری تکمیل شده به وسیله ظرفیت منعطف، در هر دو کانال های روبه جلو و معکوس را تنظیم می نماید. محدودیت های (۳۸) و (۳۹) تأمین تقاضا در کانال روبه جلو زنجیره تأمین حلقه بسته را نشان می دهند، به طوری که تضمین می کنند که تقاضای مشتری باید در همه سناریوها به وسیله تولید و گزینه های منعطف تأمین شوند. محدودیت (۴۰) بیان می دارد که همه محصولات برگشتی ایجاد شده در هر محدوده مشتری، بایستی عملیات مناسبی دریافت نمایند. نوع متغیرهای تصمیم در محدودیت (۴۱) تعیین می شوند.

۳-۴. فرمول بندی مدل بهینه سازی استوار تصادفی

در این بخش یک رویکرد بهینه سازی استوار برای توسعه برنامه ریزی تصادفی ارائه شده، به کار گرفته می شود. رویکردهای بهینه سازی استوار تکنیک های قدرتمندی برای مدیریت انواع عدم قطعیت هستند. رویکرد بهینه سازی استوار ارائه شده توسط مالوی و همکاران [۲۰] واریانس را به عنوان یک معیار تغییر پذیری در تابع هدف مدل های برنامه ریزی تصادفی دومرحله ای تعریف می کند. بعد از آن آقزاف و همکاران [۲۲] این رویکرد را با بکارگیری بیشینه تاسف به عنوان معیار تغییر پذیری توسعه دادند. تاسف یک جواب، تحت یک سناریو معلوم، از اختلاف بین هزینه جواب تحت آن سناریو و هزینه جواب بهینه در سناریو اسمی به دست آورده می شود. در پژوهش حاضر از تکنیک بهینه سازی استوار معرفی شده به وسیله آقزاف و همکاران [۲۲] استفاده شده است. رویکرد آن ها به طور خلاصه در ادامه تشریح شده است:

اگر S را به عنوان یک مجموعه از سناریوها و s را یک سناریو و π_s

$$\sum_p iv_{(p,m,t,s)} \leq (1 - \lambda''_{(m,s)}) caph_m \sum_w OM_{(m,w)} \quad \forall m, t, s \quad (32)$$

$$\sum_{p,f} IFF_{(p,i,f,t,s)} \leq cap_i \quad \forall i, t, s \quad (33)$$

$$\sum_{p,f} FK_{(p,f,k,t,s)} + \sum_{p,c} CK_{(p,c,k,t,s)} \leq cap_k OK_k \quad \forall k, t, s \quad (34)$$

$$\sum_m RM_{(r,m,t,s)} \leq cap_r ORR_r \quad \forall r, t, s \quad (35)$$

$$\sum_c QO_{(p,c,t,s)} \leq ol_{(p,t)} \quad \forall p, t, s \quad (36)$$

$$\sum_c QRO_{(p,c,t,s)} \leq rol_{(p,t)} \quad \forall p, t, s \quad (37)$$

$$\sum_f g_{(p,f,c,t,s)} + (1 - \beta_p) QO_{(p,c,t,s)} \geq (1 - \beta_p) DEM_{(p,c,t,s)} \quad \forall p, c, t, s \quad (38)$$

$$gp_{(p,c,t,s)} + \beta_p QO_{(p,c,t,s)} \geq \beta_p DEM_{(p,c,t,s)} \quad \forall p, c, t, s \quad (39)$$

$$\sum_k FK_{(p,f,k,t,s)} + \sum_k CK_{(p,c,k,t,s)} + QRO_{(p,c,t,s)} \geq re_{(p,c,t)} \quad \forall p, c, t, s \quad (40)$$

$$JM_{(j,m,t,s)}, BM_{(b,m,t,s)}, MI_{(p,m,i,t,s)}, MO_{(p,m,t,s)}, IFF_{(p,i,f,t,s)}, FK_{(p,f,k,t,s)}, CK_{(p,c,k,t,s)}, KR_{(p,k,r,t,s)}, KD_{(p,k,t,s)}, RM_{(r,m,t,s)}, MMP_{(p,m,m',t,s)}, QO_{(p,c,t,s)}, QRO_{(p,c,t,s)}, ma_{(p,m,w,t,s)}, iv_{(p,m,t,s)}, rf_{(p,f,c,t,s)}, g_{(p,f,c,t,s)}, gp_{(p,c,t,s)}, fr_{(t,s)} \geq 0$$

$$OJ_j, OB_b, OM_{(m,w)}, OK_k, ORR_r \in \{0,1\}$$

عبارت (۱) تابع هدف اقتصادی مسأله را نشان می دهد که هزینه ها را کمینه می کند. قسمت اول آن شامل هزینه های ثابت تأسیس تسهیلات و انتخاب تأمین کنندگان است. قسمت دوم هزینه نگهداری موجودی در مرکز تولید است. قسمت سوم هزینه تولید در مرکز تولید می باشد. قسمت چهارم هزینه حمل و نقل بین تسهیلات مختلف زنجیره است. قسمت پنجم هزینه خرید و جمع آوری/معاینه محصولات کار کرده برگشتی را محاسبه می کند. قسمت ششم هزینه دفع محصولات ضایعات را نشان می دهد. قسمت هفتم هزینه خرید مواد اولیه از تأمین کنندگان اصلی و پشتیبان را نشان می دهد. قسمت هشتم هزینه های توزیع محصولات در مراکز توزیع و بازیافت مواد اولیه را در مراکز بازیافت محاسبه می کند. قسمت نهم هزینه تکمیل تقاضا به وسیله ظرفیت منعطف، مانند هزینه برون سپاری و غیره را در هر دو کانال های روبه جلو و معکوس نشان می دهد.

بعد زیست محیطی با بکارگیری تابع هدف دوم در عبارت (۲) بهینه می شود، که شامل چهار قسمت است. قسمت اول شامل اثرات زیست محیطی منفی حاصل از تأسیس تسهیلات است. قسمت دوم

Subject to:

$$[(IC + PC + TC + RC + DC + SC + MC + QC) - A_{1s}^*] \leq H \quad (50)$$

$$[(PE + TE + QE) - A_{2s}^*] \leq Q \quad (51)$$

Constraints (3)-(41)

باید توجه داشت که یک هزینه و اثر زیست‌محیطی بهینه کل زنجیره تأمین تحت سناریو S (یعنی، A_{1s}^* و A_{2s}^* دو پارامتر ورودی برای مدل هستند و می‌توانند به وسیله حل مدل قطعی در معادلات (52) و (53) به دست آیند:

$$\min_{s \in S} A_{1s} = FC + (IC + PC + TC + RC + DC + SC + MC + QC) \quad (52)$$

$$\min_{s \in S} A_{2s} = FE + (PE + TE + QE) \quad (53)$$

Constraints (3)-(41)

۴. روش‌های حل مدل

به دلیل این که مدل ارائه شده در این مسأله دوهدفه است برای حل آن بایستی از یک روش حل چندهدفه استفاده گردد. یکی از عمومی‌ترین رویکردها تبدیل مسأله چندهدفه به یک مسأله تک‌هدفه است. برای نمونه این تکنیک توسط والی‌سیر و روغنیان [۲۵] مورد استفاده واقع شده است. مسأله دوهدفه ارائه شده در این تحقیق می‌تواند به یک مسأله تک‌هدفه با بکارگیری معادله زیر تبدیل شود:

$$\text{Min } Z = (W_{ec} \left(\frac{Z_{ec} - Z_{ec}^*}{Z_{ec}^*} \right)^p + W_{en} \left(\frac{Z_{en} - Z_{en}^*}{Z_{en}^*} \right)^p)^{\frac{1}{p}} \quad (54)$$

به‌طوری‌که Z_{ec}^* و Z_{en}^* مقادیر بهینه توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی را نشان می‌دهند. W_{ec} و W_{en} اوزان این اهداف هستند و می‌توانند به وسیله کارشناسان یا تصمیم‌گیرندگان تعیین شوند. مقدار P برابر ۱ تنظیم می‌شود، قرار دادن مقادیر بالاتر موجب غیرخطی شدن و در نتیجه افزایش پیچیدگی می‌شوند.

۴-۱. روش آزادسازی لاگرانژ

آزادسازی لاگرانژ یک روش قدرتمند برای حل مسائل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح است و با موفقیت برای حل مسائل طراحی زنجیره تأمین بکار گرفته شده است. کارهای پژوهشی [۲]، [۲۵]، [۲۶] روش آزادسازی لاگرانژ را با موفقیت برای طراحی شبکه زنجیره تأمین به کار گرفته‌اند. مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته که دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به مسائل طراحی شبکه عادی دارند، همانند مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین در سری مسائل NP-hard دسته‌بندی می‌شوند [۲۷]. در ادامه به تشریح الگوریتم آزادسازی لاگرانژ پرداخته خواهد شد.

در روش لاگرانژ محدودیت‌های سخت را با ضریب لاگرانژ که در این تحقیق با μ نشان داده شده است به تابع هدف انتقال می‌یابند. در مسائل برنامه‌ریزی خطی مقدار این ضریب لاگرانژ اگر برابر با مقدار بهینه متغیر دوگان شود، آنگاه مقدار بهینه تابع هدف برابر مقدار تابع هدف مسأله لاگرانژ می‌شود. ولی در مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح

را احتمال رخ دادن سناریو S بنامیم و همچنین اگر A_s یک مسأله کمینه‌سازی قطعی برای هر سناریو S و $s \in S$ و A_s^* مقدار بهینه برای A_s باشد، سپس رویکرد توسعه داده شده برای فرمول‌سازی استوار توسط آفراف و همکاران [۲۲] به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min } \eta \sum_{s \in S} \pi_s A_s + (1 - \eta) \max_{s \in S} (A_s - A_s^*) \quad (42)$$

Subject to:

$$x \in X \quad (43)$$

جایی‌که $x \in X$ فضای موجه برای مسأله را تحت همه سناریوها نشان می‌دهد. رابطه (42) شامل دو عبارت است. عبارت اول مقدار مورد انتظار مسأله A_s و عبارت دوم بیشینه تاسف برای مسأله A_s در همه سناریوها را نشان می‌دهد. همچنین وزن η یک پارامتری است که بین بازه $[0, 1]$ قرار دارد، به‌طوری‌که می‌تواند به وسیله برنامه‌ریز برای بیان مبادله‌ای بین مقدار مورد انتظار و بیشینه تاسف تنظیم شود. برای بکارگیری رویکرد استوار بر روی مدل ارائه شده در پژوهش حاضر، هزینه و اثرات زیست‌محیطی کل زنجیره تأمین تحت هر سناریو می‌تواند به صورت زیر فرموله شوند:

$$A_{1s} = FC + (IC + PC + TC + RC + DC + SC + MC + QC) \quad \forall s \quad (44)$$

$$A_{2s} = FE + (PE + TE + QE) \quad \forall s \quad (45)$$

با جایگزینی A_{1s} و A_{2s} از معادلات (44) و (45) در عبارت (42)، همتای استوار مدل تحقیق حاضر به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & \eta \sum_s \pi_s (FC + IC + PC + TC + RC + DC + SC + MC + QC) \\ & + (1 - \eta) \max_{s \in S} [(FC + IC + PC + TC + RC + DC + SC + MC + QC) - A_{1s}^*] \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \min \quad & \eta \sum_s \pi_s (FE + PE + TE + QE) + \\ & (1 - \eta) \max_{s \in S} [(FE + PE + TE + QE) - A_{2s}^*] \end{aligned} \quad (47)$$

Subject to:

Constraints (3)-(41)

توابع هدف (46) و (47) به خاطر این که آن‌ها به‌طور هم‌زمان شامل عملگرهای min و max هستند، غیرخطی می‌باشند. هرچند آن‌ها می‌توانند با اضافه شدن متغیرهای تصمیم جدید H و Q و اضافه نمودن محدودیت‌های (50) و (51) به صورت زیرخطی شوند (این روش خطی‌سازی به این شکل است که max و عبارات داخل آن‌را در دو تابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی به ترتیب برابر H و Q قرار داده، سپس چون همان‌طور که بیان شد H و Q مقدار max عبارات داخل آن‌ها هستند، بنابراین آن‌ها بیشترین مقدار عبارات هستند، پس می‌توان محدودیت‌های (50) و (51) را برای آن‌ها اعمال نمود):

$$\begin{aligned} \min \quad & FC + \eta \sum_s \pi_s (IC + PC + TC + RC + DC + SC + MC + QC) \\ & + (1 - \eta) H \end{aligned} \quad (48)$$

$$\min FE + \eta \sum_s \pi_s (PE + TE + QE) + (1 - \eta) Q \quad (49)$$

$$\sum_m \sum_t \sum_s \mu_{mts}^2 \left(\sum_p iv_{(p,m,t,s)} - (1 - \lambda''_{(m,s)}) caph_m \sum_w OM_{(m,w)} \right)$$

S.t.

Constraints (3)-(28), (30)-(31), (33)-(41) and (50)-(51) به طوری که μ_{mts}^2 و μ_{jts}^1 ضرایب نامنفی لاگرانژ را نشان می دهند. مقدار بهینه هدف مسئله لاگرانژ (۵۵) یک حد پایین برای مسئله اصلی ایجاد می کند [۲۸].

۳-۴. یافتن یک حد بالا

در هر تکرار فرایند لاگرانژ، یک حد بالا به صورت زیر به دست می آید. برای محاسبه حد بالا، مدل ریاضی ارائه شده حل می شود، به طوری که متغیرهای OJ_j و $OM_{(m,w)}$ ثابت می شوند و مقادیر آن ها برابر مقادیر به دست آمده از حل مدل لاگرانژ قرار خواهد گرفت.

۴-۴. به روز رسانی حدود بالا و پایین

در هر تکرار فرایند لاگرانژ، ضرایب μ_{mts}^2 و μ_{jts}^1 به روز رسانی می شوند و حدود بالا و پایین محاسبه می شوند. در این تحقیق از رویکرد بهینه سازی زیرگرادیان معرفی شده به وسیله فیشر [۲۸] برای به روز رسانی مقادیر ضرایب لاگرانژ در هر تکرار استفاده شده است.

$$\sigma_n^1 = \frac{\theta(UB^n - LB^n)}{\sum_j \sum_t \sum_s (\sum_m JM_{(j,m,t,s)} - (1 - \lambda_{(j,s)}) cap_j OJ_j)^2} \quad (56)$$

$$\sigma_n^2 = \frac{\theta(UB^n - LB^n)}{\sum_m \sum_t \sum_s (\sum_p iv_{(p,m,t,s)} - (1 - \lambda''_{(m,s)}) caph_m \sum_w OM_{(m,w)})^2} \quad (57)$$

در معادلات (۵۶) و (۵۷)، n شماره تکرار الگوریتم را نشان می دهد. UB^n و LB^n بهترین حدود بالا و پایین یافت شده تا تکرار n را مشخص می نماید. θ در اولین تکرار برابر ۲ لحاظ می شود و اگر بعد از ۲ تکرار پی در پی هیچ بهبودی در مقدار حد پایین به دست نیاید، این مقدار نصف می شود. در نهایت، σ_n^1 و σ_n^2 مقادیر اندازه گام هستند. مقادیر ضرایب لاگرانژ در هر تکرار به صورت زیر به روز رسانی می شوند: برای به روز رسانی ضرایب لاگرانژ بایستی ضریب لاگرانژ قبلی را به اندازه قدم σ_n (اندازه قدم نه خیلی باید کوچک باشد که خیلی وقت گیر شود و نه خیلی بزرگ باشد که از نقطه حداکثر تابع بگذرد) در جهت حرکت d_n (یعنی مقداری که اطمینان حاصل شود تابع افزایش خواهد داشت، که برای تعیین آن از تابع لاگرانژ نسبت به μ مشتق گرفته می شود) اضافه نموده، ولی در این حالت ممکن است که ضریب لاگرانژ بعدی منفی شود ولی ضریب لاگرانژ باید همیشه نامنفی باشد، به همین دلیل ضریب لاگرانژ بعدی به صورت زیر به دست آورده می شود:

$$\mu_{jts}^{1,n+1} = \max \left\{ 0, \mu_{jts}^{1,n} + \sigma_n^1 \left(\sum_m JM_{(j,m,t,s)} - (1 - \lambda_{(j,s)}) cap_j OJ_j \right) \right\} \quad (58)$$

چون دوگان نداریم، باید از روش های دیگری برای به دست آوردن ضریب لاگرانژ استفاده کرد، یکی از این روش ها روش زیرگرادیان است. در مسائل کمینه سازی برنامه ریزی عدد صحیح لازم است که بیشینه تابع لاگرانژ به دست آورده شود. تابع لاگرانژ یک تابع قطعه قطعه خطی مقعر می باشد و بنابراین یک تابع مشتق پذیر نیست و برای تعیین مقدار بهینه آن نمی توان از روش گرادیان استفاده کرد و باید تغییراتی در آن اعمال نمود.

این روش برای تهیه حدهای بالا و پایین یک مقدار هدف بهینه، اجازه دادن به یک تصمیم گیرنده برای فهمیدن این که چقدر یک بهترین جواب موجه یافت شده از بهینه فاصله دارد، توانمند است. منطق پشت آزادسازی لاگرانژ این است که به وسیله آن خیلی از مسائل سخت می توانند به مسائل آسانتری تبدیل شوند. در این روش، با پیروی از یک رویکرد تکرار پذیر و بهبود حد پایین (در مسائل کمینه سازی) جواب بهینه یا نزدیک به بهینه به دست آورده می شود [۲۸]. ابتدا، یک حد بالا و یک حد پایین برای مسئله لحاظ می شوند و مدل لاگرانژ به وسیله آزادسازی برخی محدودیت ها و اضافه نمودن آن ها به تابع هدف با ضرایب لاگرانژ ساخته می شود. هر زمان که این الگوریتم اجرا می شود، مدل لاگرانژ حل شده و اگر بهبودی حاصل شود، حد پایین جدید جایگزین حد پایین قبلی خواهد شد. حد بالا هم در طول اجرای الگوریتم می تواند بهبود یابد. این رویکرد تا زمانی که شرط توقف حاصل شود ادامه می یابد.

۴-۲. یافتن یک حد پایین

در این تحقیق برای حل مسئله حاضر در ابعاد بزرگ از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده شده است و دلیل انتخاب این روش این بود که، این روش جدا از این که یک روش حل دقیق می باشد، کمک می کند محدودیت های پیچیده ای که در مدل وجود دارند (که این محدودیت ها با اجرای آزمایشات و محاسبات عددی انتخاب شده اند) از قیدها آزاد شده و از محدودیت ها حذف می شوند و به صورت جریمه به تابع هدف اضافه می شوند و به این ترتیب مسئله آزاد شده اغلب خیلی آسانتر از مسئله اصلی حل می شود و معمولاً زمان حل را در ابعاد بزرگ کاهش می دهد.

یک حد پایین می تواند به وسیله آزادسازی تعداد یک یا بیشتر از محدودیت ها که مسئله را برای حل آسانتر می نماید به دست آورده شود، حتی اگر آزادسازی موجب عدم موجه بودن شود [۲۸]. محدودیت های (۲۹) و (۳۲) با توجه به بررسی های انجام شده آزاد شده اند، چرا که مدل حاصل برای حل آسانتر خواهد شد. با آزادسازی این محدودیت ها، مدل لاگرانژ را به صورت زیر شکل داده می شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= W_{ec} \left(\frac{Z_{ec} - Z_{ec}^*}{Z_{ec}^*} \right) + W_{en} \left(\frac{Z_{en} - Z_{en}^*}{Z_{en}^*} \right) \\ &+ \sum_j \sum_t \sum_s \mu_{jts}^1 \left(\sum_m JM_{(j,m,t,s)} - (1 - \lambda_{(j,s)}) cap_j OJ_j \right) + \end{aligned} \quad (55)$$

۵۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	cap_k, cap_i
۱۰۰۰۰-۶۰۰۰۰	cap_r
۲۶۰۰-۱۷۵۰۰	$caph_m$
۱-۱۰	$eo_{(m,w)}, eo_k, eo_r$
۰/۰-۱۰/۱	$ep_{(p,m,w,s)}, er_{(r,s)}$
۰/۰۰۰-۱۰/۱	اثرات زیست‌محیطی حمل‌ونقل
۰/۰۰۰-۱۰/۱	$EQ_{(p,c,s)}, ERQ_{(p,c,s)}$
۰/۱-۰/۲	$\lambda_{(j,s)}, \lambda'_{(m,p,s)}, \lambda''_{(m,s)}$

تعداد سناریوها برابر ۳ در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده حالت‌های خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه هستند، که این سناریوها وضعیت‌های مختلف تقاضای مشتریان، ظرفیت تسهیلات با در نظر داشتن اندازه اختلال‌ها، هزینه‌ها، اثرات زیست‌محیطی و نرخ برگشتی‌ها را نشان می‌دهند، که با توجه به داده‌های تاریخی موجود در نظر گرفته شده‌اند. داده‌های ارائه شده در بالا از مقالات مرتبط در ادبیات موضوع استخراج شده است (مشابه مقالات [۲۴] و [۲۵]).

در این تحقیق، مدل‌های ارائه شده برای تعیین تصمیمات طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته بهینه در نرم‌افزار گمز نسخه ۲۴/۱/۲ کدنویسی شده‌اند. مدل‌ها روی یک کامپیوتر با ۴ گیگا بایت رم و پردازشگر با ویژگی‌های Intel(R) Core(TM) i3-2120 CPU @ 3.30GHz بر روی سیستم عامل ویندوز ۱۰ (۶۴ بیت) اجرا شده‌اند.

در جداول (۳) و (۴) مقایسه و تفاوت میزان توابع هدف هزینه و زیست‌محیطی به‌ازای سناریوهای مختلف برای مدل‌های تصادفی و استوار آورده شده‌اند.

جدول (۳). مقایسه تابع هدف هزینه در رویکردهای تصادفی و

استوار تحت سناریوهای مختلف

کل هزینه زنجیره تأمین			سناریوها
درصد تغییرات	رویکرد استوار	رویکرد تصادفی	
-۱/۵۵٪	۱۹۲۵۷۳۷/۲۱۷	۱۹۵۶۰۸۹/۵۸۵	۱
-۱/۰۱٪	۲۹۷۹۸۹۱/۸۸۶	۳۰۱۰۵۵۷/۰۴۳	۲
-۱/۴۱٪	۳۵۱۲۲۵۶/۴۹۶	۳۵۶۲۴۶۰/۱۳۷	۳

جدول (۴). مقایسه تابع هدف زیست‌محیطی در رویکردهای تصادفی و

استوار تحت سناریوهای مختلف

کل اثرات زیست‌محیطی زنجیره تأمین			سناریوها
درصد تغییرات	رویکرد استوار	رویکرد تصادفی	
۰/۲۹٪	۱۷۶۵۸۵/۲۸۵	۱۷۶۰۷۱/۹۲۷	۱
-۳/۸۳٪	۲۵۳۶۱۰/۱۴۲	۲۶۳۶۹۹/۸۴۱	۲
-۱/۰۸٪	۳۲۴۹۱۸/۷۲۱	۳۲۸۴۷۹/۷۵۷	۳

نتایج عددی در جدول (۳) نشان می‌دهد که رویکرد بهینه‌سازی استوار در هر سه سناریو دارای هزینه‌های کمتری نسبت به رویکرد بهینه‌سازی تصادفی است. نتایج به‌دست آمده در جدول (۴) رویکرد بهینه‌سازی استوار فقط در سناریو ۱ عملکرد ضعیف‌تری نسبت به روش

$$\mu_{jts}^{2,n+1} = \max \left\{ 0, \mu_{jts}^{2,n} + \sigma_n^2 \left(\sum_p iv_{(p,m,t,s)} - (1 - \lambda''_{(m,s)}) caph_m \sum_w OM_{(m,w)} \right) \right\} \quad (۵۹)$$

الگوریتم تا زمانی که شرط توقف برآورده شود، ادامه می‌یابد. شرط توقف می‌تواند رسیدن به یک اندازه گام معین، رسیدن به یک زمان CPU از پیش تعیین شده یا یک تعداد تکرار معین، یا رسیدن به یک اختلاف درصد مطلوب بین حدود بالا و پایین باشد. در این تحقیق شرط توقف الگوریتم، رسیدن به یک تعداد تکرار معین است.

۵. نتایج محاسباتی

در این قسمت محاسبات و تجزیه و تحلیل‌های عددی برای یک نمونه محاسباتی و نمونه‌های تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

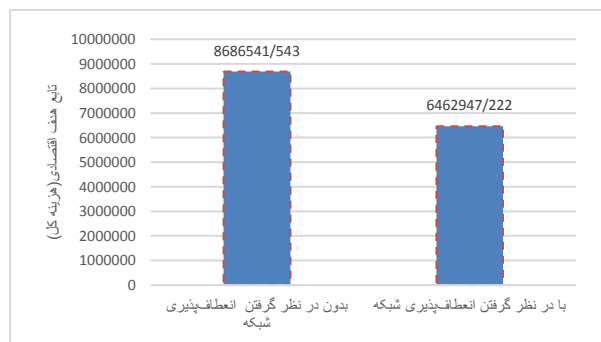
در نمونه محاسباتی مورد نظر ۲ نوع محصول با ۳ تکنولوژی ساخت در ۴ مرکز تولید که به‌صورت بالقوه وجود دارند، تولید می‌شوند. ۳ تأمین‌کننده اصلی و ۴ تأمین‌کننده پشتیبان به‌صورت بالقوه حاضر هستند. ۵ مرکز جمع‌آوری/معاینه و ۵ مرکز بازیافت نیز به حالت بالقوه موجود هستند و تعداد مراکز توزیع به‌صورت ثابت ۹ عدد است. تعداد مراکز مشتریان ۵ است و تعداد خرده‌فروشان برون خط نیز ۵ است. تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی ۲ است. خلاصه‌ای از حدود پارامترهای مهم مسأله در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲). مقادیر و حدود پارامترهای اصلی مسأله

۶۰-۱۲۰	FC_j
۶۵-۱۲۵	FC_b
۲۰۰۰۰-۸۰۰۰۰	$FC_{(m,w)}$
۱۰۰۰۰-۴۰۰۰۰	FC_k
۵۰۰۰۰-۱۵۰۰۰۰	FC_r
۰/۰۰۴-۰/۰۰۸	$tc_{(p,s)}, tr_s$
۷-۱۸	$RCA_{(j,s)}$
۱۰-۲۰	$RCB_{(b,s)}$
۱۰۰-۲۰۰۰	حدود فواصل بین تسهیلات
۳۰-۴۰	$mc_{(p,m,w,s)}$
۰/۰۰۴-۰/۰۰۶	$ch_{(p,m,s)}, cd_{(t,s)}, cc_{(p,s)}$
۰/۲-۰/۳۵	β_p
۰/۴-۰/۶	ω
۰/۶-۰/۷	$\delta_{(p,s)}$
۰/۲۵-۰/۵۰	$\alpha_{(p,s)}$
۴۰-۶۰	$oc_{(p,c,s)}$
۲۰-۳۰	$orc_{(p,c,s)}$
۱۰۰۰-۵۰۰۰	$DEM_{(p,c,t,s)}$
۶۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	cap_j, cap_b
۳۰۰۰-۲۰۰۰۰	$cap_{(p,m)}$

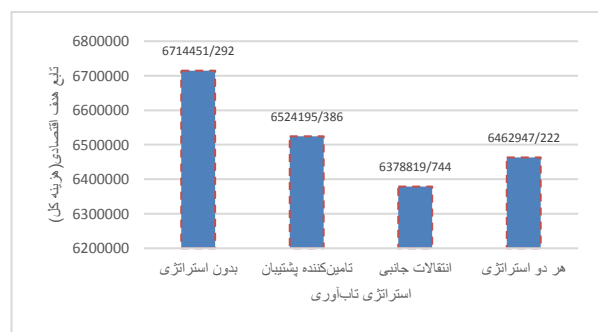
اولیه خود را فقط از یک یا دو تأمین کننده تهیه کند، در این صورت احتمال دارد این شبکه زنجیره تأمین دچار کمبود مواد اولیه شود و در نتیجه امکان دارد تولید در آن کم شده یا متوقف شود. نهایتاً با بالا رفتن هزینه های کمبود، هزینه های زنجیره تأمین نیز افزایش می یابد و از طرف دیگر با کاهش شهرت شرکت ها و افزایش نارضایتی مشتریان، بقای زنجیره به خطر می افتد. با بکارگیری استراتژی هایی مانند تأمین کننده پشتیبان و انتقالات جانبی هزینه ها کاهش می یابند و در نتیجه اثر اختلال ها از منظر اقتصادی تا حدودی بی اثر می شوند. از لحاظ زیست محیطی هم نبود استراتژی های تاب آوری، به دلیل تخصیص های ناکارا، باعث افزایش اثرات منفی زیست محیطی می شوند. اول از همه این که، بروز اختلال در زنجیره و نبود تاب آوری در آن ممکن است باعث مختل یا متوقف شدن فعالیت های لجستیک معکوس شود و در نتیجه مواد اولیه حاصل از بازیافت محصولات برگشتی کاهش یافته و زنجیره مجبور به تأمین بیشتر مواد اولیه خود از تأمین کنندگان شود، که این مسأله باعث استفاده بیشتر از منابع طبیعی می شود و از سوی دیگر باعث انباشته شدن محصولات که به پایان عمر خود رسیده اند در طبیعت می شود، که هر دو این موارد برای محیط زیست مشکل آفرین هستند. از طرف دیگر به دلیل کاهش ظرفیت تسهیلات بر اثر اختلال، ممکن است حمل و نقل های اضافی به شبکه تحمیل شود که این باعث رشد اثرات منفی زیست محیطی خواهد شد و از سویی دیگر کمبود ظرفیت باعث تأسیس تسهیلات بیشتر می شود، که از این سو نیز باعث افزایش اثرات منفی زیست محیطی در زنجیره می شود. در شکل های (۴) و (۵) اثر بکارگیری رویکرد انعطاف پذیری شبکه (ظرفیت منعطف) بر روی توابع هدف مورد بررسی واقع شده اند.

همان طور که در شکل های (۴) و (۵) ملاحظه می شود بکارگیری رویکرد انعطاف پذیری شبکه تأثیر چشم گیری در کاهش هزینه ها و اثرات منفی زیست محیطی دارد. به طوری که با بکارگیری انعطاف پذیری شبکه هزینه ها ۲۶ درصد کاهش می یابند و همچنین اثرات منفی زیست محیطی به مقدار ۷۹ درصد کاهش دارند. همان طور که پیش از این بیان شد، انعطاف پذیری شبکه ممکن است اثر مهمی روی تصمیمات مکانیابی بگذارند. برخی از گزینه های اجرای شبکه انعطاف پذیر برای تطبیق ظرفیت عبارتند از، برون سپاری، استخدام کارگران موقت و اجاره تجهیزات.

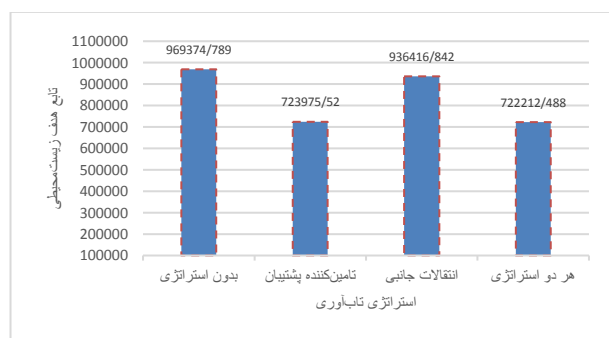


شکل (۴). تأثیر بکارگیری انعطاف پذیری شبکه روی تابع هدف اقتصادی

تصادفی نشان می دهد و در دو سناریو دیگر عملکرد آن بهتر است. شکل های (۲) و (۳) اثر استراتژی های تاب آوری روی جنبه های اقتصادی و زیست محیطی را نشان می دهند. در این قسمت ۴ حالت مختلف لحاظ شده است. در اولین حالت هیچ استراتژی تاب آوری مورد بحث قرار نمی گیرد. در آخرین حالت، همه استراتژی های تاب آوری به کار گرفته می شوند و سایر حالت ها یعنی در حالت دوم استراتژی تأمین کننده پشتیبان و در حالت سوم استراتژی انتقالات جانبی لحاظ شده اند.



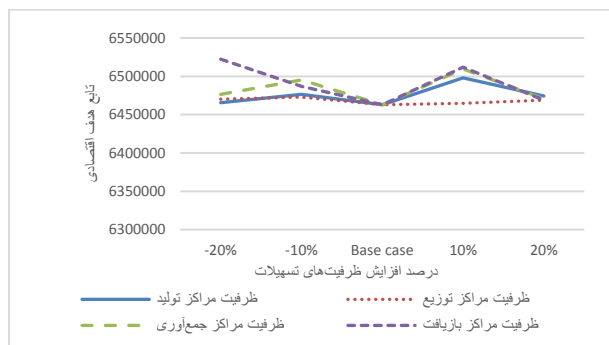
شکل (۲). تأثیر استراتژی های تاب آوری روی تابع هدف اقتصادی



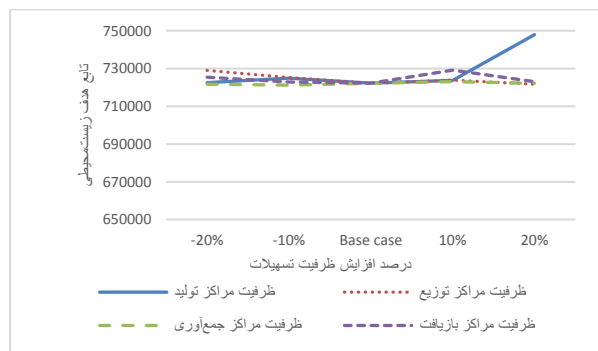
شکل (۳). تأثیر استراتژی های تاب آوری روی تابع هدف زیست محیطی

مطابق با شکل های (۲) و (۳) اثر استراتژی های تاب آوری را روی جنبه های اقتصادی و زیست محیطی می توان ملاحظه نمود. بر روی بعد اقتصادی استراتژی تأمین کننده پشتیبان هزینه ها را به مقدار ۳ درصد بهبود می دهد و بکارگیری استراتژی انتقالات جانبی هزینه ها را نسبت به حالت بدون استراتژی ۵ درصد کاهش می دهد، و بکارگیری هر دو استراتژی به صورت هم زمان باعث بهبود تابع هدف اقتصادی (هزینه) به میزان ۳/۷ درصد می شود. در بعد زیست محیطی بکارگیری استراتژی تأمین کننده پشتیبان باعث بهبود ۲۵ درصدی در این تابع هدف شد و بکارگیری استراتژی انتقالات جانبی باعث بهبود این هدف به اندازه ۳/۳ درصد شد و در نهایت بکارگیری هر دو استراتژی تاب آوری باعث بهبود ۲۵/۵ درصدی این تابع هدف شد. از این رو تاب آوری اثرات مهمی بر روی اهداف اقتصادی و زیست محیطی دارد. عدم توجه به تاب آوری، زنجیره تأمین را در برآورده نمودن تقاضاهای مشتریان ناتوان می سازد. به طور مثال اگر یک اختلال رخ دهد و این اختلال باعث کمبود تأمین مواد اولیه از سمت تأمین کنندگان شود و شبکه مواد

تعداد مراکز توزیع بیشتری (با ظرفیت بالاتر) به کار گرفته شده‌اند و در نتیجه فعالیت‌های عملیاتی کاهش یافته‌اند و در نتیجه باعث می‌شود اثرات منفی زیست‌محیطی کاهش یابند. در حالت افزایش ظرفیت ۱۰٪ مرکز توزیع، بررسی شد که تعداد مراکز توزیع کمتری نسبت به حالت پایه به کار گرفته شده‌اند و فعالیت‌های عملیاتی افزایش یافته و در نتیجه اثرات منفی زیست‌محیطی افزایش یافته‌اند.



شکل (۶). تأثیر تغییرات ظرفیت‌ها روی تابع هدف اقتصادی



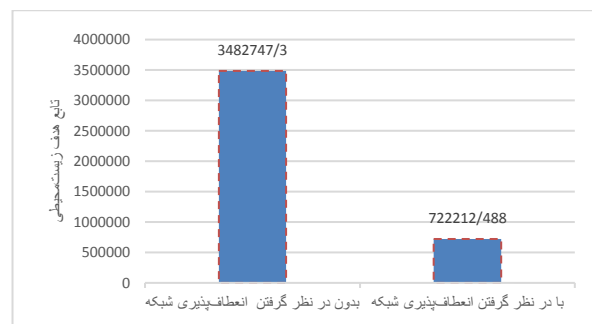
شکل (۷). تأثیر تغییرات ظرفیت‌ها روی تابع هدف زیست‌محیطی

• تحلیل حساسیت ظرفیت انعطاف‌پذیری شبکه
شکل‌های (۸) و (۹) مقادیر مختلف توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌ازای مقادیر مختلف ظرفیت انعطاف‌پذیری شبکه نشان می‌دهند.



شکل (۸). تأثیر افزایش انعطاف‌پذیری شبکه روی هزینه‌ها

همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود اگر انعطاف‌پذیری شبکه را به میزان ۲۰٪- مورد پایه شود، هزینه‌ها ۲۶٪ نسبت به



شکل (۵). تأثیر بکارگیری انعطاف‌پذیری شبکه روی تابع هدف زیست‌محیطی

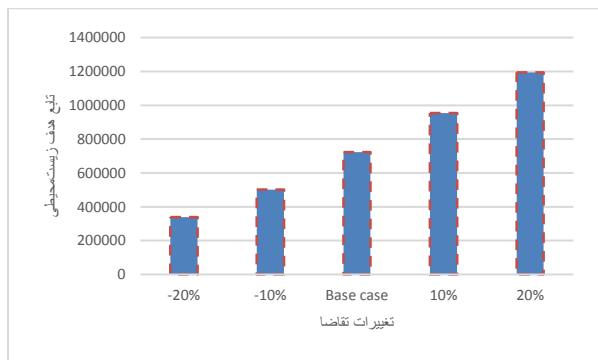
۵-۱. تحلیل حساسیت

در این بخش، چندین آنالیز حساسیت برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده و آنالیز اثر برخی پارامترهای مهم روی پاسخ‌های بهینه انجام شده است.

• تحلیل حساسیت ظرفیت‌های تسهیلات

شکل‌های (۶) و (۷) اثر تغییرات ظرفیت تسهیلات، بر روی مقدار کل هزینه و اثرات زیست‌محیطی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود با کاهش یا افزایش ظرفیت تسهیلات نسبت به مورد پایه هزینه‌های متفاوتی به شبکه اعمال می‌شود. به‌طوری‌که در شکل (۶) دیده می‌شود روند افزایش یا کاهش هزینه‌ها با لحاظ نمودن ظرفیت‌های متفاوت مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری/معاینه و بازیافت به‌جز مواردی اندک روندی همانند دارند. مشاهده می‌شود که با کاهش ۲۰٪ ظرفیت‌های همه مراکز، به‌جز ظرفیت مرکز بازیافت، هزینه‌ها نسبت به حالت پایه تغییر چندانی ندارند. در مراکز بازیافت با کاهش ظرفیت، هزینه‌های عملیاتی افزایش یافته و همچنین هزینه‌های مرتبط با بکارگیری ظرفیت منعطف نیز افزایش می‌یابند. با کاهش ظرفیت مراکز تسهیلات به اندازه ۱۰٪ ملاحظه می‌شود هزینه‌ها نسبت به حالت پایه بیشتر هستند، که این عموماً به‌دلیل افزایش هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های بکارگیری ظرفیت منعطف است. با افزایش ۱۰٪ ظرفیت تسهیلات هزینه‌ها به‌جز مرکز توزیع، نسبت به حالت پایه افزایش یافته‌اند که این به‌علت افزایش هزینه نگهداری موجودی و هزینه‌های حمل‌ونقل است. از طرفی دیگر با افزایش ۲۰٪ ظرفیت تسهیلات هزینه‌ها کاهش می‌یابند که مشاهده شد دلیل این امر بکارگیری استراتژی انتقال جانبی و کاهش هزینه‌های عملیاتی به‌دلیل افزایش ظرفیت به اندازه مناسب است.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، تغییرات ظرفیت تسهیلات به‌جز مواردی اندک، کمتر باعث ایجاد تغییرات زیاد در تابع هدف زیست‌محیطی شده است. به‌عنوان نمونه با افزایش ۲۰٪ ظرفیت مراکز توزیع نسبت به مورد پایه، ملاحظه می‌شود که اثرات زیست‌محیطی ۰/۰۸٪ کاهش می‌یابند و همچنین با افزایش ۱۰٪ ظرفیت مراکز توزیع نسبت به مورد پایه، اثرات زیست‌محیطی ۰/۲۲٪ افزایش می‌یابند، علت این امر این است که با لحاظ نمودن این که تعداد و مکان مراکز توزیع ثابت هستند، در افزایش ۲۰٪ ظرفیت مرکز توزیع



شکل (۱۱). رفتار تابع هدف زیست محیطی طبق تغییرات تقاضا

مطابق با شکل (۱۰)، با افزایش تقاضا، تابع هدف اقتصادی افزایش می یابد. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش تقاضا به مقدار ۲۰٪ بیشتر از مورد پایه، هزینه های عملیاتی ۲۱٪ افزایش می یابند. مطابق با شکل (۱۱) با افزایش میزان تقاضا مقدار تابع هدف زیست محیطی افزایش می یابد، به طوری که با کاهش تقاضا به مقدار ۲۰٪- تقاضای پایه، اثرات منفی زیست محیطی به میزان ۵۲٪ کاهش می یابد و با افزایش تقاضا به میزان ۲۰٪ از مقدار تقاضای پایه اثرات منفی زیست محیطی ۶۵٪ افزایش می یابند.

۵-۲. بررسی عملکرد روش آزادسازی لاگرانژ

برای بررسی عملکرد روش آزادسازی لاگرانژ، ۸ مثال عددی براساس داده های به دست آمده از ادبیات موضوع در جدول (۲) تولید شده اند. جدول (۵) مقادیر این مثال های عددی را نشان می دهد. جدول (۶) به مقایسه حل مثال های عددی به دست آمده از روش نرم افزار گمز (حل کننده سیپلکس) و روش آزادسازی لاگرانژ می پردازد. حد زمانی توقف برای هر دو روش ۳۶۰۰۰ ثانیه لحاظ شده است.

جدول (۵). مسائل تولید شده

شماره مسأله	ابعاد مسأله
۱	(۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۹,۱۰,۱۱,۱۲,۱۳,۱۴,۱۵,۱۶,۱۷,۱۸,۱۹,۲۰,۲۱,۲۲,۲۳,۲۴,۲۵,۲۶,۲۷,۲۸,۲۹,۳۰,۳۱,۳۲,۳۳,۳۴,۳۵,۳۶,۳۷,۳۸,۳۹,۴۰,۴۱,۴۲,۴۳,۴۴,۴۵,۴۶,۴۷,۴۸,۴۹,۵۰,۵۱,۵۲,۵۳,۵۴,۵۵,۵۶,۵۷,۵۸,۵۹,۶۰,۶۱,۶۲,۶۳,۶۴,۶۵,۶۶,۶۷,۶۸,۶۹,۷۰,۷۱,۷۲,۷۳,۷۴,۷۵,۷۶,۷۷,۷۸,۷۹,۸۰,۸۱,۸۲,۸۳,۸۴,۸۵,۸۶,۸۷,۸۸,۸۹,۹۰,۹۱,۹۲,۹۳,۹۴,۹۵,۹۶,۹۷,۹۸,۹۹,۱۰۰,۱۰۱,۱۰۲,۱۰۳,۱۰۴,۱۰۵,۱۰۶,۱۰۷,۱۰۸,۱۰۹,۱۱۰,۱۱۱,۱۱۲,۱۱۳,۱۱۴,۱۱۵,۱۱۶,۱۱۷,۱۱۸,۱۱۹,۱۲۰,۱۲۱,۱۲۲,۱۲۳,۱۲۴,۱۲۵,۱۲۶,۱۲۷,۱۲۸,۱۲۹,۱۳۰,۱۳۱,۱۳۲,۱۳۳,۱۳۴,۱۳۵,۱۳۶,۱۳۷,۱۳۸,۱۳۹,۱۴۰,۱۴۱,۱۴۲,۱۴۳,۱۴۴,۱۴۵,۱۴۶,۱۴۷,۱۴۸,۱۴۹,۱۵۰,۱۵۱,۱۵۲,۱۵۳,۱۵۴,۱۵۵,۱۵۶,۱۵۷,۱۵۸,۱۵۹,۱۶۰,۱۶۱,۱۶۲,۱۶۳,۱۶۴,۱۶۵,۱۶۶,۱۶۷,۱۶۸,۱۶۹,۱۷۰,۱۷۱,۱۷۲,۱۷۳,۱۷۴,۱۷۵,۱۷۶,۱۷۷,۱۷۸,۱۷۹,۱۸۰,۱۸۱,۱۸۲,۱۸۳,۱۸۴,۱۸۵,۱۸۶,۱۸۷,۱۸۸,۱۸۹,۱۹۰,۱۹۱,۱۹۲,۱۹۳,۱۹۴,۱۹۵,۱۹۶,۱۹۷,۱۹۸,۱۹۹,۲۰۰,۲۰۱,۲۰۲,۲۰۳,۲۰۴,۲۰۵,۲۰۶,۲۰۷,۲۰۸,۲۰۹,۲۱۰,۲۱۱,۲۱۲,۲۱۳,۲۱۴,۲۱۵,۲۱۶,۲۱۷,۲۱۸,۲۱۹,۲۲۰,۲۲۱,۲۲۲,۲۲۳,۲۲۴,۲۲۵,۲۲۶,۲۲۷,۲۲۸,۲۲۹,۲۳۰,۲۳۱,۲۳۲,۲۳۳,۲۳۴,۲۳۵,۲۳۶,۲۳۷,۲۳۸,۲۳۹,۲۴۰,۲۴۱,۲۴۲,۲۴۳,۲۴۴,۲۴۵,۲۴۶,۲۴۷,۲۴۸,۲۴۹,۲۵۰,۲۵۱,۲۵۲,۲۵۳,۲۵۴,۲۵۵,۲۵۶,۲۵۷,۲۵۸,۲۵۹,۲۶۰,۲۶۱,۲۶۲,۲۶۳,۲۶۴,۲۶۵,۲۶۶,۲۶۷,۲۶۸,۲۶۹,۲۷۰,۲۷۱,۲۷۲,۲۷۳,۲۷۴,۲۷۵,۲۷۶,۲۷۷,۲۷۸,۲۷۹,۲۸۰,۲۸۱,۲۸۲,۲۸۳,۲۸۴,۲۸۵,۲۸۶,۲۸۷,۲۸۸,۲۸۹,۲۹۰,۲۹۱,۲۹۲,۲۹۳,۲۹۴,۲۹۵,۲۹۶,۲۹۷,۲۹۸,۲۹۹,۳۰۰,۳۰۱,۳۰۲,۳۰۳,۳۰۴,۳۰۵,۳۰۶,۳۰۷,۳۰۸,۳۰۹,۳۱۰,۳۱۱,۳۱۲,۳۱۳,۳۱۴,۳۱۵,۳۱۶,۳۱۷,۳۱۸,۳۱۹,۳۲۰,۳۲۱,۳۲۲,۳۲۳,۳۲۴,۳۲۵,۳۲۶,۳۲۷,۳۲۸,۳۲۹,۳۳۰,۳۳۱,۳۳۲,۳۳۳,۳۳۴,۳۳۵,۳۳۶,۳۳۷,۳۳۸,۳۳۹,۳۴۰,۳۴۱,۳۴۲,۳۴۳,۳۴۴,۳۴۵,۳۴۶,۳۴۷,۳۴۸,۳۴۹,۳۵۰,۳۵۱,۳۵۲,۳۵۳,۳۵۴,۳۵۵,۳۵۶,۳۵۷,۳۵۸,۳۵۹,۳۶۰,۳۶۱,۳۶۲,۳۶۳,۳۶۴,۳۶۵,۳۶۶,۳۶۷,۳۶۸,۳۶۹,۳۷۰,۳۷۱,۳۷۲,۳۷۳,۳۷۴,۳۷۵,۳۷۶,۳۷۷,۳۷۸,۳۷۹,۳۸۰,۳۸۱,۳۸۲,۳۸۳,۳۸۴,۳۸۵,۳۸۶,۳۸۷,۳۸۸,۳۸۹,۳۹۰,۳۹۱,۳۹۲,۳۹۳,۳۹۴,۳۹۵,۳۹۶,۳۹۷,۳۹۸,۳۹۹,۴۰۰,۴۰۱,۴۰۲,۴۰۳,۴۰۴,۴۰۵,۴۰۶,۴۰۷,۴۰۸,۴۰۹,۴۱۰,۴۱۱,۴۱۲,۴۱۳,۴۱۴,۴۱۵,۴۱۶,۴۱۷,۴۱۸,۴۱۹,۴۲۰,۴۲۱,۴۲۲,۴۲۳,۴۲۴,۴۲۵,۴۲۶,۴۲۷,۴۲۸,۴۲۹,۴۳۰,۴۳۱,۴۳۲,۴۳۳,۴۳۴,۴۳۵,۴۳۶,۴۳۷,۴۳۸,۴۳۹,۴۴۰,۴۴۱,۴۴۲,۴۴۳,۴۴۴,۴۴۵,۴۴۶,۴۴۷,۴۴۸,۴۴۹,۴۵۰,۴۵۱,۴۵۲,۴۵۳,۴۵۴,۴۵۵,۴۵۶,۴۵۷,۴۵۸,۴۵۹,۴۶۰,۴۶۱,۴۶۲,۴۶۳,۴۶۴,۴۶۵,۴۶۶,۴۶۷,۴۶۸,۴۶۹,۴۷۰,۴۷۱,۴۷۲,۴۷۳,۴۷۴,۴۷۵,۴۷۶,۴۷۷,۴۷۸,۴۷۹,۴۸۰,۴۸۱,۴۸۲,۴۸۳,۴۸۴,۴۸۵,۴۸۶,۴۸۷,۴۸۸,۴۸۹,۴۹۰,۴۹۱,۴۹۲,۴۹۳,۴۹۴,۴۹۵,۴۹۶,۴۹۷,۴۹۸,۴۹۹,۵۰۰,۵۰۱,۵۰۲,۵۰۳,۵۰۴,۵۰۵,۵۰۶,۵۰۷,۵۰۸,۵۰۹,۵۱۰,۵۱۱,۵۱۲,۵۱۳,۵۱۴,۵۱۵,۵۱۶,۵۱۷,۵۱۸,۵۱۹,۵۲۰,۵۲۱,۵۲۲,۵۲۳,۵۲۴,۵۲۵,۵۲۶,۵۲۷,۵۲۸,۵۲۹,۵۳۰,۵۳۱,۵۳۲,۵۳۳,۵۳۴,۵۳۵,۵۳۶,۵۳۷,۵۳۸,۵۳۹,۵۴۰,۵۴۱,۵۴۲,۵۴۳,۵۴۴,۵۴۵,۵۴۶,۵۴۷,۵۴۸,۵۴۹,۵۵۰,۵۵۱,۵۵۲,۵۵۳,۵۵۴,۵۵۵,۵۵۶,۵۵۷,۵۵۸,۵۵۹,۵۶۰,۵۶۱,۵۶۲,۵۶۳,۵۶۴,۵۶۵,۵۶۶,۵۶۷,۵۶۸,۵۶۹,۵۷۰,۵۷۱,۵۷۲,۵۷۳,۵۷۴,۵۷۵,۵۷۶,۵۷۷,۵۷۸,۵۷۹,۵۸۰,۵۸۱,۵۸۲,۵۸۳,۵۸۴,۵۸۵,۵۸۶,۵۸۷,۵۸۸,۵۸۹,۵۹۰,۵۹۱,۵۹۲,۵۹۳,۵۹۴,۵۹۵,۵۹۶,۵۹۷,۵۹۸,۵۹۹,۶۰۰,۶۰۱,۶۰۲,۶۰۳,۶۰۴,۶۰۵,۶۰۶,۶۰۷,۶۰۸,۶۰۹,۶۱۰,۶۱۱,۶۱۲,۶۱۳,۶۱۴,۶۱۵,۶۱۶,۶۱۷,۶۱۸,۶۱۹,۶۲۰,۶۲۱,۶۲۲,۶۲۳,۶۲۴,۶۲۵,۶۲۶,۶۲۷,۶۲۸,۶۲۹,۶۳۰,۶۳۱,۶۳۲,۶۳۳,۶۳۴,۶۳۵,۶۳۶,۶۳۷,۶۳۸,۶۳۹,۶۴۰,۶۴۱,۶۴۲,۶۴۳,۶۴۴,۶۴۵,۶۴۶,۶۴۷,۶۴۸,۶۴۹,۶۵۰,۶۵۱,۶۵۲,۶۵۳,۶۵۴,۶۵۵,۶۵۶,۶۵۷,۶۵۸,۶۵۹,۶۶۰,۶۶۱,۶۶۲,۶۶۳,۶۶۴,۶۶۵,۶۶۶,۶۶۷,۶۶۸,۶۶۹,۶۷۰,۶۷۱,۶۷۲,۶۷۳,۶۷۴,۶۷۵,۶۷۶,۶۷۷,۶۷۸,۶۷۹,۶۸۰,۶۸۱,۶۸۲,۶۸۳,۶۸۴,۶۸۵,۶۸۶,۶۸۷,۶۸۸,۶۸۹,۶۹۰,۶۹۱,۶۹۲,۶۹۳,۶۹۴,۶۹۵,۶۹۶,۶۹۷,۶۹۸,۶۹۹,۷۰۰,۷۰۱,۷۰۲,۷۰۳,۷۰۴,۷۰۵,۷۰۶,۷۰۷,۷۰۸,۷۰۹,۷۱۰,۷۱۱,۷۱۲,۷۱۳,۷۱۴,۷۱۵,۷۱۶,۷۱۷,۷۱۸,۷۱۹,۷۲۰,۷۲۱,۷۲۲,۷۲۳,۷۲۴,۷۲۵,۷۲۶,۷۲۷,۷۲۸,۷۲۹,۷۳۰,۷۳۱,۷۳۲,۷۳۳,۷۳۴,۷۳۵,۷۳۶,۷۳۷,۷۳۸,۷۳۹,۷۴۰,۷۴۱,۷۴۲,۷۴۳,۷۴۴,۷۴۵,۷۴۶,۷۴۷,۷۴۸,۷۴۹,۷۵۰,۷۵۱,۷۵۲,۷۵۳,۷۵۴,۷۵۵,۷۵۶,۷۵۷,۷۵۸,۷۵۹,۷۶۰,۷۶۱,۷۶۲,۷۶۳,۷۶۴,۷۶۵,۷۶۶,۷۶۷,۷۶۸,۷۶۹,۷۷۰,۷۷۱,۷۷۲,۷۷۳,۷۷۴,۷۷۵,۷۷۶,۷۷۷,۷۷۸,۷۷۹,۷۸۰,۷۸۱,۷۸۲,۷۸۳,۷۸۴,۷۸۵,۷۸۶,۷۸۷,۷۸۸,۷۸۹,۷۹۰,۷۹۱,۷۹۲,۷۹۳,۷۹۴,۷۹۵,۷۹۶,۷۹۷,۷۹۸,۷۹۹,۸۰۰,۸۰۱,۸۰۲,۸۰۳,۸۰۴,۸۰۵,۸۰۶,۸۰۷,۸۰۸,۸۰۹,۸۱۰,۸۱۱,۸۱۲,۸۱۳,۸۱۴,۸۱۵,۸۱۶,۸۱۷,۸۱۸,۸۱۹,۸۲۰,۸۲۱,۸۲۲,۸۲۳,۸۲۴,۸۲۵,۸۲۶,۸۲۷,۸۲۸,۸۲۹,۸۳۰,۸۳۱,۸۳۲,۸۳۳,۸۳۴,۸۳۵,۸۳۶,۸۳۷,۸۳۸,۸۳۹,۸۴۰,۸۴۱,۸۴۲,۸۴۳,۸۴۴,۸۴۵,۸۴۶,۸۴۷,۸۴۸,۸۴۹,۸۵۰,۸۵۱,۸۵۲,۸۵۳,۸۵۴,۸۵۵,۸۵۶,۸۵۷,۸۵۸,۸۵۹,۸۶۰,۸۶۱,۸۶۲,۸۶۳,۸۶۴,۸۶۵,۸۶۶,۸۶۷,۸۶۸,۸۶۹,۸۷۰,۸۷۱,۸۷۲,۸۷۳,۸۷۴,۸۷۵,۸۷۶,۸۷۷,۸۷۸,۸۷۹,۸۸۰,۸۸۱,۸۸۲,۸۸۳,۸۸۴,۸۸۵,۸۸۶,۸۸۷,۸۸۸,۸۸۹,۸۹۰,۸۹۱,۸۹۲,۸۹۳,۸۹۴,۸۹۵,۸۹۶,۸۹۷,۸۹۸,۸۹۹,۹۰۰,۹۰۱,۹۰۲,۹۰۳,۹۰۴,۹۰۵,۹۰۶,۹۰۷,۹۰۸,۹۰۹,۹۱۰,۹۱۱,۹۱۲,۹۱۳,۹۱۴,۹۱۵,۹۱۶,۹۱۷,۹۱۸,۹۱۹,۹۲۰,۹۲۱,۹۲۲,۹۲۳,۹۲۴,۹۲۵,۹۲۶,۹۲۷,۹۲۸,۹۲۹,۹۳۰,۹۳۱,۹۳۲,۹۳۳,۹۳۴,۹۳۵,۹۳۶,۹۳۷,۹۳۸,۹۳۹,۹۴۰,۹۴۱,۹۴۲,۹۴۳,۹۴۴,۹۴۵,۹۴۶,۹۴۷,۹۴۸,۹۴۹,۹۵۰,۹۵۱,۹۵۲,۹۵۳,۹۵۴,۹۵۵,۹۵۶,۹۵۷,۹۵۸,۹۵۹,۹۶۰,۹۶۱,۹۶۲,۹۶۳,۹۶۴,۹۶۵,۹۶۶,۹۶۷,۹۶۸,۹۶۹,۹۷۰,۹۷۱,۹۷۲,۹۷۳,۹۷۴,۹۷۵,۹۷۶,۹۷۷,۹۷۸,۹۷۹,۹۸۰,۹۸۱,۹۸۲,۹۸۳,۹۸۴,۹۸۵,۹۸۶,۹۸۷,۹۸۸,۹۸۹,۹۹۰,۹۹۱,۹۹۲,۹۹۳,۹۹۴,۹۹۵,۹۹۶,۹۹۷,۹۹۸,۹۹۹,۱۰۰۰,۱۰۰۱,۱۰۰۲,۱۰۰۳,۱۰۰۴,۱۰۰۵,۱۰۰۶,۱۰۰۷,۱۰۰۸,۱۰۰۹,۱۰۱۰,۱۰۱۱,۱۰۱۲,۱۰۱۳,۱۰۱۴,۱۰۱۵,۱۰۱۶,۱۰۱۷,۱۰۱۸,۱۰۱۹,۱۰۲۰,۱۰۲۱,۱۰۲۲,۱۰۲۳,۱۰۲۴,۱۰۲۵,۱۰۲۶,۱۰۲۷,۱۰۲۸,۱۰۲۹,۱۰۳۰,۱۰۳۱,۱۰۳۲,۱۰۳۳,۱۰۳۴,۱۰۳۵,۱۰۳۶,۱۰۳۷,۱۰۳۸,۱۰۳۹,۱۰۴۰,۱۰۴۱,۱۰۴۲,۱۰۴۳,۱۰۴۴,۱۰۴۵,۱۰۴۶,۱۰۴۷,۱۰۴۸,۱۰۴۹,۱۰۵۰,۱۰۵۱,۱۰۵۲,۱۰۵۳,۱۰۵۴,۱۰۵۵,۱۰۵۶,۱۰۵۷,۱۰۵۸,۱۰۵۹,۱۰۶۰,۱۰۶۱,۱۰۶۲,۱۰۶۳,۱۰۶۴,۱۰۶۵,۱۰۶۶,۱۰۶۷,۱۰۶۸,۱۰۶۹,۱۰۷۰,۱۰۷۱,۱۰۷۲,۱۰۷۳,۱۰۷۴,۱۰۷۵,۱۰۷۶,۱۰۷۷,۱۰۷۸,۱۰۷۹,۱۰۸۰,۱۰۸۱,۱۰۸۲,۱۰۸۳,۱۰۸۴,۱۰۸۵,۱۰۸۶,۱۰۸۷,۱۰۸۸,۱۰۸۹,۱۰۹۰,۱۰۹۱,۱۰۹۲,۱۰۹۳,۱۰۹۴,۱۰۹۵,۱۰۹۶,۱۰۹۷,۱۰۹۸,۱۰۹۹,۱۱۰۰,۱۱۰۱,۱۱۰۲,۱۱۰۳,۱۱۰۴,۱۱۰۵,۱۱۰۶,۱۱۰۷,۱۱۰۸,۱۱۰۹,۱۱۱۰,۱۱۱۱,۱۱۱۲,۱۱۱۳,۱۱۱۴,۱۱۱۵,۱۱۱۶,۱۱۱۷,۱۱۱۸,۱۱۱۹,۱۱۲۰,۱۱۲۱,۱۱۲۲,۱۱۲۳,۱۱۲۴,۱۱۲۵,۱۱۲۶,۱۱۲۷,۱۱۲۸,۱۱۲۹,۱۱۳۰,۱۱۳۱,۱۱۳۲,۱۱۳۳,۱۱۳۴,۱۱۳۵,۱۱۳۶,۱۱۳۷,۱۱۳۸,۱۱۳۹,۱۱۴۰,۱۱۴۱,۱۱۴۲,۱۱۴۳,۱۱۴۴,۱۱۴۵,۱۱۴۶,۱۱۴۷,۱۱۴۸,۱۱۴۹,۱۱۵۰,۱۱۵۱,۱۱۵۲,۱۱۵۳,۱۱۵۴,۱۱۵۵,۱۱۵۶,۱۱۵۷,۱۱۵۸,۱۱۵۹,۱۱۶۰,۱۱۶۱,۱۱۶۲,۱۱۶۳,۱۱۶۴,۱۱۶۵,۱۱۶۶,۱۱۶۷,۱۱۶۸,۱۱۶۹,۱۱۷۰,۱۱۷۱,۱۱۷۲,۱۱۷۳,۱۱۷۴,۱۱۷۵,۱۱۷۶,۱۱۷۷,۱۱۷۸,۱۱۷۹,۱۱۸۰,۱۱۸۱,۱۱۸۲,۱۱۸۳,۱۱۸۴,۱۱۸۵,۱۱۸۶,۱۱۸۷,۱۱۸۸,۱۱۸۹,۱۱۹۰,۱۱۹۱,۱۱۹۲,۱۱۹۳,۱۱۹۴,۱۱۹۵,۱۱۹۶,۱۱۹۷,۱۱۹۸,۱۱۹۹,۱۲۰۰,۱۲۰۱,۱۲۰۲,۱۲۰۳,۱۲۰۴,۱۲۰۵,۱۲۰۶,۱۲۰۷,۱۲۰۸,۱۲۰۹,۱۲۱۰,۱۲۱۱,۱۲۱۲,۱۲۱۳,۱۲۱۴,۱۲۱۵,۱۲۱۶,۱۲۱۷,۱۲۱۸,۱۲۱۹,۱۲۲۰,۱۲۲۱,۱۲۲۲,۱۲۲۳,۱۲۲۴,۱۲۲۵,۱۲۲۶,۱۲۲۷,۱۲۲۸,۱۲۲۹,۱۲۳۰,۱۲۳۱,۱۲۳۲,۱۲۳۳,۱۲۳۴,۱۲۳۵,۱۲۳۶,۱۲۳۷,۱۲۳۸,۱۲۳۹,۱۲۴۰,۱۲۴۱,۱۲۴۲,۱۲۴۳,۱۲۴۴,۱۲۴۵,۱۲۴۶,۱۲۴۷,۱۲۴۸,۱۲۴۹,۱۲۵۰,۱۲۵۱,۱۲۵۲,۱۲۵۳,۱۲۵۴,۱۲۵۵,۱۲۵۶,۱۲۵۷,۱۲۵۸,۱۲۵۹,۱۲۶۰,۱۲۶۱,۱۲۶۲,۱۲۶۳,۱۲۶۴,۱۲۶۵,۱۲۶۶,۱۲۶۷,۱۲۶۸,۱۲۶۹,۱۲۷۰,۱۲۷۱,۱۲۷۲,۱۲۷۳,۱۲۷۴,۱۲۷۵,۱۲۷۶,۱۲۷۷,۱۲۷۸,۱۲۷۹,۱۲۸۰,۱۲۸۱,۱۲۸۲,۱۲۸۳,۱۲۸۴,۱۲۸۵,۱۲۸۶,۱۲۸۷,۱۲۸۸,۱۲۸۹,۱۲۹۰,۱۲۹۱,۱۲۹۲,۱۲۹۳,۱۲۹۴,۱۲۹۵,۱۲۹۶,۱۲۹۷,۱۲۹۸,۱۲۹۹,۱۳۰۰,۱۳۰۱,۱۳۰۲,۱۳۰۳,۱۳۰۴,۱۳۰۵,۱۳۰۶,۱۳۰۷,۱۳۰۸,۱۳۰۹,۱۳۱۰,۱۳۱۱,۱۳۱۲,۱۳۱۳,۱۳۱۴,۱۳۱۵,۱۳۱۶,۱۳۱۷,۱۳۱۸,۱۳۱۹,۱۳۲۰,۱۳۲۱,۱۳۲۲,۱۳۲۳,۱۳۲۴,۱۳۲۵,۱۳۲۶,۱۳۲۷,۱۳۲۸,۱۳۲۹,۱۳۳۰,۱۳۳۱,۱۳۳۲,۱۳۳۳,۱۳۳۴,۱۳۳۵,۱۳۳۶,۱۳۳۷,۱۳۳۸,۱۳۳۹,۱۳۴۰,۱۳۴۱,۱۳۴۲,۱۳۴۳,۱۳۴۴,۱۳۴۵,۱۳۴۶,۱۳۴۷,۱۳۴۸,۱۳۴۹,۱۳۵۰,۱۳۵۱,۱۳۵۲,۱۳۵۳,۱۳۵۴,۱۳۵۵,۱۳۵۶,۱۳۵۷,۱۳۵۸,۱۳۵۹,۱۳۶۰,۱۳۶۱,۱۳۶۲,۱۳۶۳,۱۳۶۴,۱۳۶۵,۱۳۶۶,۱۳۶۷,۱۳۶۸,۱۳۶۹,۱۳۷۰,۱۳۷۱,۱۳۷۲,۱۳۷۳,۱۳۷۴,۱۳۷۵,۱۳۷۶,۱۳۷۷,۱۳۷۸,۱۳۷۹,۱۳۸۰,۱۳۸۱,۱۳۸۲,۱۳۸۳,۱۳۸۴,۱۳۸۵,۱۳۸۶,۱۳۸۷,۱۳۸۸,۱۳۸۹,۱۳۹۰,۱۳۹۱,۱۳۹۲,۱۳۹۳,۱۳۹۴,۱۳۹۵,۱۳۹۶,۱۳۹۷,۱۳۹۸,۱۳۹۹,۱۴۰۰,۱۴۰۱,۱۴۰۲,۱۴۰۳,۱۴۰۴,۱۴۰۵,۱۴۰۶,۱۴۰۷,۱۴۰۸,۱۴۰۹,۱۴۱۰,۱۴۱۱,۱۴۱۲,۱۴۱۳,۱۴۱۴,۱۴۱۵,۱۴۱۶,۱۴۱۷,۱۴۱۸,۱۴۱۹,۱۴۲۰,۱۴۲۱,۱۴۲۲,۱۴۲۳,۱۴۲۴,۱۴۲۵,۱۴۲۶,۱۴۲۷,۱۴۲۸,۱۴۲۹,۱۴۳۰,۱۴۳۱,۱۴۳۲,۱۴۳۳,۱۴۳۴,۱۴۳۵,۱۴۳۶,۱۴۳۷,۱۴۳۸,۱۴۳۹,۱۴۴۰,۱۴۴۱,۱۴۴۲,۱۴۴۳,۱۴۴۴,۱۴۴۵,۱۴۴۶,۱۴۴۷,۱۴۴۸,۱۴۴۹,۱۴۵۰,۱۴۵۱,۱۴۵۲,۱۴۵۳,۱۴۵۴,۱۴۵۵,۱۴۵۶,۱۴۵۷,۱۴۵۸,۱۴۵۹,۱۴۶۰,۱۴۶۱,۱۴۶۲,۱۴۶۳,۱۴۶۴,۱۴۶۵,۱۴۶۶,۱۴۶۷,۱۴۶۸,۱۴۶۹,۱۴۷۰,۱۴۷۱,۱۴۷۲,۱۴۷۳,۱۴۷۴,۱۴۷۵,۱۴۷۶,۱۴۷۷,۱۴۷۸,۱۴۷۹,۱۴۸۰,۱۴۸۱,۱۴۸۲,۱۴۸۳,۱۴۸۴,۱۴۸۵,۱۴۸۶,۱۴۸۷,۱۴۸۸,۱۴۸۹,۱۴۹۰,۱۴۹۱,۱۴۹۲,۱۴۹۳,۱۴۹۴,۱۴۹۵,۱۴۹۶,۱۴۹۷,۱۴۹۸,۱۴۹۹,۱۵۰۰,۱۵۰۱,۱۵۰۲,۱۵۰۳,۱۵۰۴,۱۵۰۵,۱۵۰۶,۱۵۰۷,۱۵۰۸,۱۵۰۹,۱

جدول (۶). مقایسه عملکرد حاصل از روش آزادسازی لاگرانژ با حل مسأله با نرم‌افزار گمز

شماره مسائل	سیپلکس		مقدار درصد شکاف	آزادسازی لاگرانژ	
	تابع هدف اقتصادی	تابع هدف زیست‌محیطی		تابع هدف اقتصادی	تابع هدف زیست‌محیطی
۱	۵۰۹۹۳۸۷/۵۳۳	۴۹۰۰۴۷/۹۰۰	۰/۲۱٪	۵۱۰۶۱۱۶/۲۶۵	۴۹۱۵۰۶/۸۸۵
۲	۸۴۸۴۶۲۶/۵۳۰	۱۰۱۵۹۷۹/۶۰۵	۱/۶٪	۸۶۸۶۳۶۱/۰۳۳	۱۰۲۳۸۷۸/۸۸۴
۳	۱۴۴۳۷۲۲۰	۲۵۰۵۳۹۲/۳۴۹	۲/۴٪	۱۴۵۰۷۴۷۰	۲۶۱۵۱۱۰/۸۹۹
۴	۱۵۲۴۸۶۷۰	۲۶۹۲۵۳۵/۴۵۷	۳٪	۱۵۳۸۰۸۹۰	۲۷۷۹۳۰۵/۷۵۳
۵	۱۹۴۹۹۴۱۰	۳۶۲۱۶۰۱/۲۱۸	۴/۱٪	۱۹۵۵۸۴۱۰	۳۹۰۷۱۳۱/۳۲۰
۶	۴۱۱۷۶۸۵۰	۸۴۴۴۰۴۹/۱۱۵	۱۵/۷٪	۴۲۱۷۵۰۲۰	۱۰۸۹۳۶۶۰
۷	--	--	--	۵۵۱۶۲۸۹۰	۶۱۸۰۴۵۱/۲۲۳
۸	--	--	--	۶۴۹۵۸۴۶۰	۱۰۶۵۸۷۳۰

در جدول (۶) در ستون اول شماره مسائل تولید شده، ملاحظه می‌شود. در دو ستون بعدی مقادیر توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی به‌دست آمده از حل‌کننده سیپلکس دیده می‌شوند. در دو ستون آخر مقادیر این توابع هدف با روش آزادسازی لاگرانژ ملاحظه می‌شوند. در ستون درصد شکاف، میزان درصد شکاف (گپ) توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی به‌دست آمده بین روش‌های آزادسازی لاگرانژ و سیپلکس نشان داده شده است. مسائل تولید شده شماره ۷ و ۸ با روش سیپلکس در مدت زمان حل مقرر شده نتوانستند به هیچ جوابی برسند. همان‌طور که در جدول (۶) ملاحظه می‌شود روش آزادسازی لاگرانژ توانایی دستیابی به جواب‌هایی با کیفیت مناسب در همه نمونه مسائل را دارد. جدول (۷) مقایسه زمان‌های حل روش‌های آزادسازی لاگرانژ و سیپلکس را نشان می‌دهد.

جدول (۷). مقایسه زمان حل رویکردهای مختلف (ثانیه)

شماره مسائل	سیپلکس	آزادسازی لاگرانژ
۱	۱۲	۴۴
۲	۷۵	۳۸۷
۳	۶۲	۴۳۴
۴	۱۳۳	۹۶۴
۵	۱۹۸	۱۴۴۰
۶	۲۱۶۰	۳۹۰۰
۷	>۳۶۰۰۰	۱۰۰۹۸
۸	>۳۶۰۰۰	۲۱۵۱۵

همان‌گونه که در جدول (۶) ملاحظه می‌شود روش آزادسازی لاگرانژ می‌تواند در همه مثال‌ها جواب‌هایی با کیفیت بالا ارائه دهد. بالاترین مقدار درصد شکاف بین دو روش ۱۵/۷ درصد بوده است که آن در یک مثال با اندازه متوسط رخ داده است و در اندازه‌های کوچک بیشترین شکاف بین دو روش ۴/۱ درصد بوده است. علاوه بر این گمز در مثال‌های ۷ و ۸ که اندازه‌های بزرگ هستند، قادر به یافتن جواب در ۳۶۰۰۰ ثانیه نبوده است، این درحالی است که روش آزادسازی لاگرانژ قبل از این زمان به جواب بهینه رسیده است.

۳-۵. پیشنهادهای مدیریتی

زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله ارائه شده در این پژوهش که به‌صورت

کلی مدل‌سازی شده است می‌تواند علاوه بر صنعت تولید تأیر که در این پژوهش به آن اشاره شد در بسیاری از صنایع دیگر مورد استفاده واقع شود. این مدل، مکانیابی و جریان بهینه مواد و محصولات را در بین تسهیلات مختلف زنجیره‌تأمین تعیین می‌نماید که بدین ترتیب می‌تواند کمکی برای مهندسان و مدیران لجستیک و زنجیره‌تأمین باشد. به لحاظ نمودن طراحی زنجیره‌تأمین به‌صورت دوکاناله و با ارائه فروش محصولات از دو طریق به مشتریان و باتوجه به هزینه‌های آن و همچنین طراحی زنجیره‌تأمین به‌صورت حلقه‌بسته، این مدل می‌تواند به مدیران ارشد شرکت‌ها در طراحی زنجیره‌تأمین، به‌صورت دوکاناله و حلقه‌بسته یا بدون در نظر گرفتن این موارد کمک نماید. همچنین استفاده از استراتژی انعطاف‌پذیری شبکه نشان داد که می‌تواند به مدیران و مهندسان لجستیک و زنجیره‌تأمین در کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی کمک شایانی کند. نتایج و محاسبات نشان دادند که با بکارگرفتن ظرفیت‌های بالاتر این استراتژی، هزینه‌ها مقداری در حدود ۲۷ درصد، اثرات زیست‌محیطی بین ۸۲ درصد تا ۹۷ درصد کاهش می‌یابند. ازطرفی دیگر نتایج و محاسبات این پژوهش نشان دادند که عدم توجه به ریسک‌های زنجیره‌تأمین می‌تواند باعث بالا رفتن هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی شوند. در این پژوهش برای مقابله با ریسک‌های زنجیره‌تأمین و اختلال از استراتژی‌های تاب‌آوری استفاده شده است. استفاده از استراتژی‌های تاب‌آوری تأمین‌کننده پشتیبان و انتقالات جانبی چه به لحاظ اقتصادی و چه از جنبه زیست‌محیطی ثمربخش ارزیابی شد (شکل‌های (۲) و (۳) را ملاحظه نمایید). مدیران و مهندسان لجستیک و زنجیره‌تأمین شرکت‌ها می‌توانند با شناسایی ریسک‌های عملیاتی و اختلال‌هایی که زنجیره‌تأمین آن‌ها را تهدید می‌نمایند، بااستفاده مناسب از مدل ارائه شده، تاب‌آوری زنجیره‌تأمین خود را در برابر این ریسک‌ها افزایش دهند. برنامه‌ریزی استوار به‌کار گرفته شده در این پژوهش به مدیران و تصمیم‌گیرندگان برای تنظیم اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی کمک می‌کند، به‌طوری‌که اگر آن‌ها تمایل به ایجاد برنامه‌هایی با تغییرپذیری کمتر داشته باشند می‌توانند مقدار η را کاهش دهند که این امر باعث ایجاد برنامه‌هایی با تغییرپذیری کمتر و درنتیجه بیشینه تاسف کمتر، در مقابل هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی بیشتر می‌شوند. در مقابل اگر بخواهند هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی کمتر ولی تغییرپذیری بیشتر داشته باشند،

می‌توانند مقدار پارامتر η را افزایش دهند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این پژوهش، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله پایدار (سبز) تحت شرایط اختلال مورد مطالعه واقع شده است. در بخش ادبیات موضوع به مروری اجمالی بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار، طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تاب‌آور و طراحی شبکه زنجیره تأمین دوکاناله پرداخته شد. همان‌طور که اشاره شد طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله سبز تحت اختلال و در نظر گرفتن استراتژی‌های تاب‌آوری، کمتر در ادبیات موضوع مورد مطالعه واقع شده است. همچنین در نظر گرفتن این مسأله با رویکرد انعطاف‌پذیری شبکه، موردی است که در ادبیات موضوع در نظر گرفته نشده است. در پژوهش حاضر فرض شده است که تأمین‌کنندگان اصلی و مراکز تولید دچار ریسک‌های اختلال می‌شوند. جهت فرمول‌بندی مسأله، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط خطی دوهدفه (تابع هدف اقتصادی (هزینه) و تابع هدف زیست‌محیطی) ارائه شده است. از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای استوار برای روبه‌رو شدن و مدیریت عدم قطعیت استفاده شده است، که همان‌طور که نشان داده شد اگر خواسته شود تغییرپذیری کمتر ولی توابع هدف بدتر باشند باید ضریب وزنی η کاهش داده شود. برای افزایش تاب‌آوری شبکه در مقابل ریسک‌های اختلال، دو استراتژی تاب‌آوری (تأمین‌کننده پشتیبان و انتقالات جانبی) لحاظ شده‌اند. محاسبات انجام شده و نتایج حاصل نشان دادند که بکارگیری استراتژی‌های تاب‌آوری بر روی هر دو تابع هدف مسأله تأثیر مثبتی دارند، به‌طوری که با در نظر گرفتن هر دو استراتژی تاب‌آوری هزینه‌ها ۳/۷ درصد کاهش یافتند و اثرات زیست‌محیطی ۲۵/۵ درصد کاهش داشتند. از طرفی دیگر بکارگیری رویکرد انعطاف‌پذیری شبکه هم تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش هزینه‌ها و اثرات منفی زیست‌محیطی دارد، به‌طوری که با بکارگیری این رویکرد هزینه‌ها ۲۶ درصد و اثرات زیست‌محیطی ۷۹ درصد کاهش داشتند. به دلیل این که مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین جزء مسائلی محسوب می‌شود که مدل آن دارای پیچیدگی است و حل آن‌ها در ابعاد بزرگ بسیار زمان‌بر است، در تحقیق حاضر از یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل مسائل در ابعاد مختلف استفاده شده است، که کارایی آن، با مجموعه‌ای از مثال‌های عددی نشان داده شد و در بخش محاسبات، نتایج حاصل از حل مسأله با الگوریتم آزادسازی لاگرانژ با نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز مقایسه شده که در نتیجه آن دیده شد که الگوریتم لاگرانژ در اندازه‌های کوچک و متوسط با درصد اختلاف کمی نتایج مطلوبی به دست می‌دهد و در اندازه‌های بزرگ هم که نرم‌افزار گمز قادر به حل مسأله در زمان تعیین شده نبود، الگوریتم لاگرانژ در زمان مقرر شده پاسخ‌گو بود. در کل، نوآوری این مطالعه، ارائه یک مدل جدید برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله سبز تاب‌آور با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری شبکه است. در

مقایسه با تحقیقات قبلی که محققین بیشتر بر روی زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله از نقطه‌نظرهای قیمت‌گذاری و هماهنگی و طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله پژوهش نموده‌اند، در تحقیق حاضر سعی در ارائه مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته دوکاناله تحت ریسک اختلال و ریسک‌های عملیاتی بوده است و برای مقابله با این ریسک‌ها از استراتژی‌های تاب‌آوری استفاده شده است و از طرف دیگر، آن تحقیقاتی که این ریسک‌ها را در طراحی شبکه زنجیره خود به کار گرفته بودند، شبکه خود را به صورت دوکاناله لحاظ نکرده بودند.

برای ارائه پیشنهادهای آتی می‌توان به افزودن تابع هدف اجتماعی به مسأله اشاره نمود. لحاظ نمودن انواع استراتژی‌های تاب‌آوری دیگر می‌تواند در این تحقیق مورد بررسی قرار گیرند. برای حل این مسأله در ابعاد بزرگ می‌توان روش‌های حل مناسب دیگری را مانند، روش‌های دقیق یا روش‌های فراابتکاری توسعه داد. همچنین اضافه نمودن سایر تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی به این مسأله می‌تواند به عنوان تحقیقات آتی، اعمال گردند. مدل ارائه شده در این پژوهش را می‌توان برای صنایعی که محصولاتی از لاستیک و یا پلاستیک ساخته می‌شوند، به خوبی توسعه داد، مثلاً در تولید محصولی مانند تایر می‌تواند بسیار کارا باشد.

مراجع

- [1] Y. Gao, S. Lu, H. Cheng, and X. Liu, (2024). "Data-driven robust optimization of dual-channel closed-loop supply chain network design considering uncertain demand and carbon cap-and-trade policy," *Comput. Ind. Eng.*, 187: 109811. doi: 10.1016/j.cie.2023.109811.
- [2] A. Jabbarzadeh, M. Haughton, and A. Khosrojerdi, (2018). "Computers & Industrial Engineering Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application," *Comput. Ind. Eng.*, 116: 178–191, doi: 10.1016/j.cie.2017.12.025.
- [3] P. Peng, L. V. Snyder, A. Lim, and Z. Liu, (2011). "Reliable logistics networks design with facility disruptions," *Transp. Res. Part B Methodol.*, 45 (8): 1190–1211. doi: 10.1016/j.trb.2011.05.022.
- [4] K. B. Hendricks, V. R. Singhal, and R. Zhang, (2009). "The effect of operational slack, diversification, and vertical relatedness on the stock market reaction to supply chain disruptions," *J. Oper. Manag.*, 27 (3): 233–246, doi: 10.1016/j.jom.2008.09.001.
- [5] R. Z. Farahani, S. Rezapour, T. Drezner, and S. Fallah, (2014). "Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications," *Omega*, 45: 92–118. doi: 10.1016/j.omega.2013.08.006.
- [6] M. S. Pishvaei, M. Rabbani, and S. A. Torabi, (2011). "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty," *Appl. Math. Model.*, 35 (2): 637–649. doi: 10.1016/j.apm.2010.07.013.
- [7] M. Zhalechian, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Zahiri, and M. Mohammadi, (2016). "Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, 89: 182–214. doi: 10.1016/j.tre.2016.02.011.
- [8] B. Mota, M. I. Gomes, A. Carvalho, and A. P. Barbosa-Povoa, (2018). "Sustainable supply chains: An integrated

- supply chain network design using accelerated Benders decomposition,” *Eur. J. Oper. Res.*, 249 (1): 76–92. doi: [10.1016/j.ejor.2015.08.028](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.028).
- [19] M. M. Paydar, V. Babaveisi, and A. S. Safaei, (2017). “An engine oil closed-loop supply chain design considering collection risk,” *Comput. Chem. Eng.*, 104: 38–55. doi: [10.1016/j.compchemeng.2017.04.005](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.04.005).
- [20] J. M. Mulvey, R. J. Vanderbei, and S. A. Zenios, (1995). “Robust Optimization of Large-Scale Systems,” *Oper. Res.*, vol. 43 (2): 264–281. doi: [10.1287/opre.43.2.264](https://doi.org/10.1287/opre.43.2.264).
- [21] S. M. Hatefi and F. Jolai, (2014). “Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions,” *Appl. Math. Model.*, 38, 9–10: 2630–2647. doi: [10.1016/j.apm.2013.11.002](https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.11.002).
- [22] E.-H. Aghezzaf, C. Sitompul, and N. M. Najid, (2010). “Models for robust tactical planning in multi-stage production systems with uncertain demands,” *Comput. Oper. Res.*, 37 (5): 880–889. doi: [10.1016/j.cor.2009.03.012](https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.012).
- [23] R. Lotfi, Z. Sheikhi, M. Amra, M. AliBakhshi, and G.-W. Weber, (2021). “Robust optimization of risk-aware, resilient and sustainable closed-loop supply chain network design with Lagrange relaxation and fix-and-optimize,” *Int. J. Logist. Res. Appl.*: 1–41. doi: [10.1080/13675567.2021.2017418](https://doi.org/10.1080/13675567.2021.2017418).
- [24] H. Yu and W. D. Solvang, (2020). “A fuzzy-stochastic multi-objective model for sustainable planning of a closed-loop supply chain considering mixed uncertainty and network flexibility,” *J. Clean. Prod.*, 266: 121702, doi: [10.1016/j.jclepro.2020.121702](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121702).
- [25] M. M. Vali-siar and E. Roghanian, (2022). “Sustainable , resilient and responsive mixed supply chain network design under hybrid uncertainty with considering COVID-19 pandemic disruption,” *Sustain. Prod. Consum.*, 30: 278–300, doi: [10.1016/j.spc.2021.12.003](https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.003).
- [26] B. Fahimnia, A. Jabbarzadeh, A. Ghavamifar, and M. Bell, (2017). “Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters,” *Int. J. Prod. Econ.*, 183: 700–709, doi: [10.1016/j.ijpe.2015.11.007](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.11.007).
- [27] H. Soleimani and G. Kannan, (2015). “A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks,” *Appl. Math. Model.*, 39 (14): 3990–4012. doi: [10.1016/j.apm.2014.12.016](https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.12.016).
- [28] M. L. Fisher, (2004). “The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems,” *Manage. Sci.*, 50 (12): 1861–1871. doi: [10.1287/mnsc.1040.0263](https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0263).
- modeling approach under uncertainty,” *Omega*, 77: 32–57, doi: [10.1016/j.omega.2017.05.006](https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.05.006).
- [9] D. G. Mogale, A. De, A. Ghadge, and E. Aktas, (2022). “Multi-objective modelling of sustainable closed-loop supply chain network with price-sensitive demand and consumer’s incentives,” *Comput. Ind. Eng.*, 168: 108105. doi: [10.1016/j.cie.2022.108105](https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108105).
- [10] A. Ganguly, D. Chatterjee, and H. Rao, (2018). “The Role of Resiliency in Managing Supply Chains Disruptions,” in *Supply Chain Risk Management*, Singapore: Springer Singapore: 237–251. doi: [10.1007/978-981-10-4106-8_14](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4106-8_14).
- [11] Y. Z. Mehrjerdi and M. Shafiee, (2021). “A resilient and sustainable closed-loop supply chain using multiple sourcing and information sharing strategies,” *J. Clean. Prod.*, 289: 125141. doi: [10.1016/j.jclepro.2020.125141](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125141).
- [12] M. Akbari-Kasgari, H. Khademi-Zare, M. B. Fakhrazad, M. Hajiaghahi-Keshteli, and M. Honarvar, (2022). “Designing a resilient and sustainable closed-loop supply chain network in copper industry,” *Clean Technol. Environ. Policy*, 24 (5): 1553–1580, doi: [10.1007/s10098-021-02266-x](https://doi.org/10.1007/s10098-021-02266-x).
- [13] Z. Liu, J. Chen, C. Diallo, and U. Venkatadri, (2021). “Pricing and production decisions in a dual-channel closed-loop supply chain with (re)manufacturing,” *Int. J. Prod. Econ.*, 232: 107935, doi: [10.1016/j.ijpe.2020.107935](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107935).
- [14] Z. Zhang, S. Liu, and B. Niu, (2020). “Coordination mechanism of dual-channel closed-loop supply chains considering product quality and return,” *J. Clean. Prod.*, 248: 119273. doi: [10.1016/j.jclepro.2019.119273](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119273).
- [15] A. M. Fathollahi-Fard, M. A. Dulebenets, M. Hajiaghahi-Keshteli, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Safaeian, and H. Mirzahosseini, (2021). “Two hybrid meta-heuristic algorithms for a dual-channel closed-loop supply chain network design problem in the tire industry under uncertainty,” *Adv. Eng. Informatics*, 50: 101418. doi: [10.1016/j.aei.2021.101418](https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101418).
- [16] E. Kaoud, M. A. M. Abdel-Aal, T. Sakaguchi, and N. Uchiyama, (2020). “Design and Optimization of the Dual-Channel Closed Loop Supply Chain with E-Commerce,” *Sustainability*, 12 (23): 10117. doi: [10.3390/su122310117](https://doi.org/10.3390/su122310117).
- [17] Y. Kazancoglu, D. Yuksel, M. D. Sezer, S. K. Mangla, and L. Hua, (2022). “A Green Dual-Channel Closed-Loop Supply Chain Network Design Model,” *J. Clean. Prod.*, 332: 130062. doi: [10.1016/j.jclepro.2021.130062](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130062).
- [18] E. Keyvanshokoh, S. M. Ryan, and E. Kabir, (2016). “Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop



DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2025.30588.2197>

Designing Green and Resilient Dual-Channel Closed-Loop Supply Chain Network Under Disruption Risk Considering Network Flexibility

Behnam Afsharpour¹, Azizollah Jafari^{2*}

¹ PhD Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 - 10 - 2024

Revised: 10 - 1 - 2025

Accepted: 2 - 2 - 2025

Keywords:

Supply Chain Network Design
Closed-Loop Supply Chain
Dual-Channel
Resilience
Network Flexibility

ABSTRACT

With the increasing use of the Internet and the further development of e-commerce, the number of customers who intend to shop online is increasing every day. In today's business environments that face many uncertainties, supply chains are much more exposed to disruption risks than before. This research presents a two-objective stochastic robust optimization model (economic objective and environmental objective) to design a dual-channel closed-loop supply chain network (online retailer and offline retailer) that uses resilience strategies to deal with disruptions. The innovation of this research is the design of a dual-channel closed-loop supply chain network that is subject to disruption and operational risks, and for the first time, two resilience strategies of backup suppliers and lateral transshipment are considered to deal with them. In addition, network flexibility is also modeled for the first time in such a chain, meaning that customer demands can also be met in other ways such as outsourcing, temporary employment of employees, etc. Due to the complexity of the problem, the Lagrangian relaxation approach has been used to solve it on a large scale, and its proper performance is confirmed by the calculations. The calculations showed that the use of resilience strategies can reduce costs by 3.7% and reduce environmental impacts by 25.5%. In addition, the use of network flexibility has contributed to a 26% reduction in costs and a 79% reduction in negative environmental impacts. The tire manufacturing industry is an example of the application of this model in the real world.

* Corresponding author. A. Jafari
Tel.: 021-46142365; E-mail address: a.jafari@usc.ac.ir