

## بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی تاب‌آور تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلال: مطالعه موردی

محمد مهدی والی سیر<sup>۱</sup>، عماد روغنیان<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### خلاصه

امروزه زنجیره‌های تأمین در معرض ریسک‌های مختلفی قرار دارند. بی‌توجهی به این ریسک‌ها می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را برای آن‌ها به وجود آورد. از سوی دیگر، موضوع بازطراحی در مواقعی که زنجیره‌تأمین با توجه به تغییر شرایط بهینگی خود را از دست می‌دهد یا نیاز به تغییر دارد دارای اهمیت است. در این مقاله برخلاف غالب پژوهش‌های ادبیات موضوع، مسئله بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلال موردبررسی قرار می‌گیرد. ساختار شبکه موردبررسی در این پژوهش، ترکیبی حلقه‌باز و بسته می‌باشد که در ادبیات موضوع به‌ندرت موردتوجه قرار گرفته است. برای مدیریت عدم‌قطعیت مسئله یک مدل جدید بهینه‌سازی استوار تصادفی ارائه شده است. مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی فرمول‌بندی شده که تابع هدف آن بهینه‌سازی سود می‌باشد. به علت پیچیدگی بالای مدل و وجود چالش برای حل آن در ابعاد بزرگ، یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ ارائه شده و عملکرد خوب آن توسط محاسبات مربوطه نشان داده شده است. به منظور سنجش کارایی و اعتبار مدل یک مطالعه موردی در صنعت تیر خودرو ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از استراتژی‌های تاب‌آوری برای ارتقای سودآوری زنجیره‌تأمین و جلوگیری از ضرر اختلالات بسیار مؤثر می‌باشند. همچنین استفاده از شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی نسبت به شبکه زنجیره‌تأمین روبه‌جلو باعث افزایش سود کل زنجیره‌تأمین می‌شود.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۹/۵

پذیرش ۱۳۹۹/۵/۲۸

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

طراحی شبکه زنجیره تأمین

تاب‌آوری

ریسک‌های عملیاتی و اختلال

برنامه‌ریزی تصادفی

شبکه ترکیبی حلقه باز و بسته

### ۱. مقدمه

مکانیابی-تخصیص اهمیت ویژه‌ای دارد، که این تصمیمات می‌توانند در سه دسته راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی تقسیم‌بندی گردد [۱]. زنجیره‌های تأمین امروزه در معرض ریسک‌های مختلف قرار دارند. ریسک‌های زنجیره‌تأمین بر اساس منشأ عدم قطعیت می‌توانند به دو دسته ریسک‌های عملیاتی و ریسک‌های اختلال تقسیم‌بندی گردند [۴]. ریسک‌های عملیاتی ریشه در عدم قطعیت ذاتی زنجیره‌تأمین دارند، مانند عدم قطعیت در عرضه، تقاضا، زمان تحویل، زمان‌های حمل‌ونقل و هزینه‌ها. احتمال رخ دادن این ریسک‌ها بالا و تأثیرات منفی آن معمولاً کم و کوتاه‌مدت است [۵]. اختلال زنجیره‌تأمین

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین قسمتی کلیدی و مهم از فرایند برنامه‌ریزی در مدیریت زنجیره‌تأمین است و زیرساخت و ساختار فیزیکی زنجیره‌تأمین را تعیین می‌کند و به‌طور مستقیم بر سودآوری شرکت و عملکرد کلی آن تأثیرگذار است [۱، ۳]. طراحی شبکه زنجیره‌تأمین اغلب مرتبط با تصمیمات راهبردی مدیریت زنجیره‌تأمین است. با توجه به پیچیدگی شبکه‌های زنجیره‌تأمین در فضای کسب‌وکار امروز، توجه به تصمیمات مختلف برنامه‌ریزی دیگر در کنار تصمیمات سنتی

\* نویسنده مسئول: عماد روغنیان

تلفن: ۰۲۱-۸۴۰۶۳۳۴۸، پست الکترونیکی: [e\\_roghanian@kntu.ac.ir](mailto:e_roghanian@kntu.ac.ir)

سایر عوامل بهیچگی خود را از دست می‌دهد. در این حالات دو راه‌حل وجود دارد یکی طراحی یک زنجیره تأمین جدید از ابتدا است و دیگری طراحی مجدد زنجیره تأمین موجود با توجه به تسهیلات کنونی. راه اول از نظر اقتصادی و عملیاتی کارا نیست؛ بنابراین در این شرایط بازطراحی شبکه زنجیره تأمین مد نظر قرار می‌گیرد [۱۴]. همچنین ممکن است باز طراحی زنجیره تأمین به دلیل افزایش توانایی آن برای مقابله با اختلالات و یا افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین انجام شود.

بحث دیگری که در این پژوهش مورد توجه است، لجستیک معکوس می‌باشد. یک زنجیره تأمین در حالت کلاسیک خود (زنجیره تأمین روبه‌جلو)، ترکیبی از فرایندها به منظور تأمین تقاضای مشتریان می‌باشد و شامل قسمت‌های مختلف مانند تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، انبارها و مراکز توزیع، خرده‌فروشان و مشتریان است. از آنجایی که مشتریان برای همیشه از محصولات استفاده نمی‌کنند، مسئولیت‌های زنجیره تأمین تا پایان دوره عمر محصول ادامه می‌یابد. به‌طور سنتی محصول پس از اتمام دوره عمرش باید دفن یا سوزانده شود. سالانه تنها در آمریکا حدود ۱۲ میلیارد تن زباله صنعتی و ۴۸۰ میلیون تن زباله خانگی تولید می‌گردد و این آمار رو به افزایش است [۱۵]. بنابراین مسئله دورریزهای صنعتی و خانگی حائز اهمیت فراوان است. وجود زنجیره تأمین معکوس برای جمع‌آوری کالاهای برگشتی برای بازیافت، بازیابی و ساخت مجدد، تعمیر و یا انهدام آن‌ها از جهت صرفه‌جویی و سودآوری اقتصادی و محیط زیستی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد [۱۶]. نتایج برخی از پژوهش‌ها حاکی از کاهش ۴۰ تا ۶۰ درصدی هزینه‌های تولید در صورت مدیریت مناسب لجستیک معکوس می‌باشند [۱۷]. لجستیک معکوس در حالت کلی از مصرف‌کنندگان نهایی یعنی جایی که محصولات استفاده شده جمع‌آوری می‌گردد، شروع می‌شود و سپس تصمیمات مختلفی روی محصولات بازگشتی اعمال می‌شود. به‌طور کلی می‌توان ساختارهای شبکه‌های زنجیره تأمین را به سه دسته تقسیم نمود: شبکه‌های زنجیره تأمین روبه‌جلو، شبکه‌های زنجیره تأمین معکوس و شبکه‌های زنجیره تأمین یکپارچه روبه‌جلو و معکوس. مورد آخر را می‌توان در سه دسته زنجیره تأمین حلقه‌بسته، حلقه‌باز و ترکیبی حلقه‌بسته و حلقه‌باز طبقه‌بندی کرد [۱۸]. در شبکه‌های حلقه بسته محصولات و مواد تعمیر شده و یا بازیابی شده در شبکه می‌مانند و پس از انجام کارهای لازم به مراکز می‌مانند مراکز تولید و یا توزیع منتقل می‌شوند [۱۹]. اما اگر محصولات برگشتی یا بازیابی شده و یا مواد بازیافت شده و قابل استفاده به تولیدکنندگان اصلی برنگردند، زنجیره تأمین اصلی را ترک کنند و برای مقاصد متفاوت و یا مشابه دیگری وارد زنجیره تأمین دیگری شوند، به چنین زنجیره‌تأمینی زنجیره تأمین حلقه‌باز می‌گویند [۲۰]. همچنین ممکن است شبکه زنجیره تأمینی از ترکیب شبکه‌های حلقه‌باز و حلقه‌بسته به وجود بیاید یعنی بخشی از محصولات و مواد بازگشتی و بازیافتی در داخل شبکه باقی بمانند و مورد استفاده قرار گیرند و بخشی نیز وارد زنجیره‌های تأمین دیگر گردند [۲۱، ۲۲].

بر اساس ضرورت‌های اشاره شده، مهم‌ترین سؤالات پژوهش پیش‌رو

رویدادی است که ممکن است در بخشی از زنجیره تأمین به علت حوادث و بلایای طبیعی (مانند سیل و زلزله) و یا اقدامات عمدی یا غیرعمدی انسان‌ها (مانند اعتصاب کارکنان، جنگ و حمله‌های تروریستی) و یا عوامل فنی (مانند خرابی تجهیزات و بروز اشکال در سیستم‌های اطلاعاتی) رخ دهد، که بر روی زنجیره تأمین تأثیر اساسی گذاشته و تأثیرات نامطلوبی را بر اهداف، عملکرد زنجیره تأمین و جریان طبیعی فرایندهای آن می‌گذارد. به‌طور کلی این ریسک‌ها ناشی از تعامل یک زنجیره تأمین با محیط بیرونی آن می‌باشند و تأثیرات آن‌ها بسیار بیشتر از ریسک‌های عملیاتی است [۶، ۷]. سازمان‌ها نیازمند برنامه‌ریزی با دقت هرچه تمام‌تر در برابر ریسک‌های مربوط به زنجیره تأمین هستند. اگر سازمانی در تأمین تقاضای مشتریان خود شکست بخورد، دچار عواقب جدی اعم از کاهش رضایت مشتریان، بدبینی و بی‌اعتمادی نسبت به شرکت و تورم قیمت‌ها خواهد شد [۸]. تحقیقات نشان می‌دهند که میانگین هزینه بحران‌های طبیعی (مانند سیل، زلزله، شیوع بیماری‌ها و ...) و ساخته دست بشر (مانند حوادث تروریستی، جنگ، اعتصاب‌ها و ...) از سال ۱۹۶۰ بیش از ده برابر افزایش یافته است. در بسیاری از اوقات این حوادث باعث ایجاد اختلال در کسب‌وکارها می‌گردند [۹]. تاب‌آوری یک زنجیره تأمین تا حد زیادی وابسته به ساختار و طراحی آن است [۱۰]. به‌طور کلی تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین عبارت است از توانایی شبکه به بازگشت به وضعیت اصلی یا رسیدن به یک وضعیت مطلوب‌تر پس از مختل شدن آن [۱۱]. بنابراین، طراحی صحیح شبکه‌های زنجیره تأمین با در نظر گرفتن تاب‌آوری می‌تواند در جلوگیری از مختل شدن زنجیره تأمین و یا کمینه‌سازی آسیب‌های ناشی از آن نقش چشمگیری ایفا نماید.

برای برخورد با ریسک‌های عملیاتی با توجه به پارامترهای غیرقطعی و ماهیت مسئله تحت مطالعه (فضای عدم قطعیت و محیط تصمیم‌گیری)، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود. از جمله این روش‌ها، برنامه‌ریزی فازی، برنامه‌ریزی تصادفی و بهینه‌سازی استوار می‌باشند [۱]. به منظور مقابله با ریسک‌های اختلال و افزایش تاب‌آوری شبکه نیز از استراتژی‌هایی استفاده می‌شود. برخی از مهم‌ترین استراتژی‌های تاب‌آوری عبارت‌اند از: منبع‌یابی چندگانه، تقویت تسهیلات، توسعه ظرفیت تسهیلات، تغییر مسیرهای حمل‌ونقل (مسیریابی مجدد)، برون‌سپاری، نگهداری موجودی اورژانسی و ... [۸]. گاهی ساختار یک شبکه زنجیره تأمین با توجه به برنامه‌های راهبردی شرکت تغییر می‌کند. به‌طور مثال، تولید محصولات جدید باعث اضافه شدن بازارها و مشتریان جدید می‌شود و بازطراحی ساختار زنجیره تأمین را ضروری می‌نماید [۱۲]. همچنین هنگامی که شرکت به دنبال ایجاد لجستیک معکوس در زنجیره تأمین خود می‌باشد نیز بحث بازطراحی کاربرد دارد [۱۳]. برخلاف مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین، مسئله بازطراحی شبکه زنجیره تأمین با یک شبکه که در حال حاضر وجود دارد شروع می‌شود و هدف، طراحی یک شبکه جدید است. به‌طور کلی، مواقعی وجود دارند که ساختار شبکه کنونی یک زنجیره تأمین با توجه به تغییرات بازار و یا تولید محصولی جدید و یا

را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- ۱- منظور از بازطراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین چیست؟
  - ۲- آیا می‌توان مدل مناسبی جهت تقویت تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین ارائه داد؟
  - ۳- چگونه می‌توان تأثیرات ناشی از ریسک‌های عملیاتی و اختلال در زنجیره‌های تأمین را به حداقل رساند؟
  - ۴- توسعه استراتژی‌های تاب‌آوری چگونه هدف زنجیره‌تأمین را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد؟
  - ۵- در نظر گرفتن ساختارهای ترکیبی حلقه‌باز و بسته، چه رجحان و برتری‌ای نسبت به رویکردهای پیشین دارد؟
- در این مقاله، تلاش شده است که مفاهیم بازطراحی، لجستیک معکوس و تاب‌آوری که اهمیت آن‌ها بیان شد مورد توجه قرار گیرند و شکاف‌های تحقیقاتی مرتبط تا حد امکان پوشش داده شوند. بنابراین، در این پژوهش، مسئله بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلال مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبکه زنجیره‌تأمین مورد مطالعه، شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی حلقه‌باز و حلقه‌بسته است. مسئله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شده و به دلیل پیچیدگی بالای حل آن در مسائل با اندازه‌های بزرگ، رویکرد آزادسازی لاگرانژ مورد استفاده قرار گرفته است. ادامه مقاله به این صورت تقسیم‌بندی شده است: در بخش دوم پژوهش‌های پیشین مرور می‌شوند. در بخش سوم مسئله مورد نظر شرح داده می‌شود. بخش چهارم روش حل مورد استفاده را تشریح می‌کند. قسمت پنجم مربوط به نتایج محاسباتی و معرفی مطالعه موردی می‌باشد. در نهایت بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و بیان پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی می‌پردازد.

## ۲. ادبیات موضوع

ادبیات موضوع در این پژوهش به سه بخش تقسیم شده است. بخش اول مرور بر پژوهش‌های پیشین در زمینه مسئله بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین است. در قسمت بعد پژوهش‌های طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور مرور می‌شوند. در بخش سوم نیز پژوهش‌های مربوط به طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

برخی از پژوهش‌ها مسئله بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین را مورد توجه قرار دادند. بخشی از این پژوهش‌ها در زنجیره‌های تأمین روبه‌جلو و بخش دیگر در حوزه زنجیره‌تأمین معکوس و یا حلقه‌بسته انجام گرفته‌اند. در بخش اول، ملو<sup>۱</sup> و همکاران [۲۳] مسئله بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین را در حالت قطعی مورد مطالعه قرار دادند. جهانی و همکاران [۱۴] بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین را با توجه به عدم قطعیت در قیمت و تقاضا مورد مطالعه قرار دادند. اخیراً فتاحی و همکاران [۲۴] مسئله بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین را با در نظر گرفتن تقاضای

وابسته به قیمت تصادفی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای استفاده نمودند. در بخش دوم از پژوهش‌ها، در مقاله خاتمی و همکاران [۱۳] مسئله اضافه کردن زنجیره‌تأمین معکوس به یک زنجیره‌تأمین روبه‌جلو و هم‌زمان طراحی مجدد شبکه زنجیره‌تأمین روبه‌جلو مورد بررسی قرار گرفت. نویسندگان عدم قطعیت در میزان تقاضا و کالاهای برگشتی را مورد توجه قرار دادند. در باب بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین معکوس نیز می‌توان به کارهای بینگ<sup>۲</sup> و همکاران [۲۵] و فیتوسسپون<sup>۳</sup> و همکاران [۲۶] اشاره نمود.

برخی از محققان مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور را با در نظر گرفتن ریسک‌های اختلال مورد بررسی قرار دادند. پنگ<sup>۴</sup> و همکاران [۲۷] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی ارائه دادند و از استراتژی منبع‌یابی چندگانه برای مقابله با اختلالات استفاده کردند. آزاد و همکاران [۲۸] مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تحت ریسک‌های اختلال در تسهیلات و حمل‌ونقل را مطالعه نمودند. آن‌ها برای فرمول‌بندی مسئله خود یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی ارائه دادند. در این پژوهش، استراتژی‌های تقویت تسهیلات و مدهای حمل‌ونقل پشتیبان برای مقابله با ریسک‌ها پیشنهاد شدند. رضاپور و همکاران [۲۹] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور تحت ریسک‌های اختلال در شرایط رقابت ارائه دادند. محققان در این پژوهش از استراتژی‌های ظرفیت تولید اضافی در تأمین‌کنندگان، منبع‌یابی چندگانه و نگهداری موجودی اضافی در خرده‌فروشان برای افزایش تاب‌آوری شبکه و مقابله با ریسک‌های اختلال استفاده نمودند. در پژوهش‌های دیگر علاوه بر ریسک‌های اختلال، ریسک‌های عملیاتی نیز در نظر گرفته شده‌اند. صالحی‌صدقیانی و همکاران [۳۰] به مطالعه مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین خرده‌فروشی در شرایط وجود ریسک‌های عملیاتی و اختلال پرداختند. استفاده از تسهیلات تأمین پشتیبان به‌عنوان یک استراتژی برای افزایش تاب‌آوری در این مقاله مورد توجه قرار گرفت. نورایی و ملت‌پرست [۳۱] به بررسی هزینه‌ها و سرمایه‌گذاری‌ها در توانایی‌های زنجیره‌تأمین پرداختند به گونه‌ای که زنجیره‌تأمین در برابر ریسک‌ها پاسخ‌گویی لازم را داشته باشد. آن‌ها از استراتژی منبع‌یابی چندگانه برای بهبود تاب‌آوری شبکه زنجیره‌تأمین استفاده کردند. جبارزاده و همکاران [۳] یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی تصادفی استوار برای مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین در شرایط وجود ریسک‌های عرضه و تقاضا و ریسک‌های اختلال ارائه کردند. آن‌ها از استراتژی‌های تقویت تسهیلات و داشتن تسهیلات پشتیبان برای افزایش تاب‌آوری استفاده کردند. حسنی و خسروچردی [۳۲] از استراتژی‌های تولید محصولات نیمه‌ساخته، پراکنده‌سازی تسهیلات، تقویت تسهیلات، موجودی اضافی و منبع‌یابی چندگانه به عنوان استراتژی‌های پیشگیرانه و از استراتژی استفاده از فهرست مواد جایگزین به عنوان استراتژی واکنشی استفاده نمودند. آن‌ها یک مدل

3. Feitó-Cespón

4. Peng

1. Melo

2. Bing

همکاران [۴۰] یک شاخص جدید برای تاب‌آوری زنجیره‌تأمین ارائه کردند که عبارت بود از میزان افزایش هزینه مورد انتظار مربوط به یک اختلال. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی مخروطی کوادراتیک عدد صحیح مختلط با رویکرد تصادفی برای مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ارائه کردند. مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور در حوزه مهندسی سلامت نیز مورد توجه قرار گرفته است. حائری و همکاران [۴۱] مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین خون را با رویکرد تاب‌آور مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها افزایش تاب‌آوری را بر اساس معیارهای بحرانی بودن، پیچیدگی گره‌ها و جریان‌ها و میزان تأمین تقاضای مشتریان، به عنوان یکی از توابع هدف در نظر گرفتند. اخیراً توکر<sup>۱</sup> و همکاران [۴۲] به مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور در زنجیره‌تأمین دارو به منظور جلوگیری از کمبود توجه نمودند. آن‌ها از استراتژی‌های ظرفیت اضافی در تسهیلات و نگهداری موجودی اطمینان برای افزایش تاب‌آوری استفاده کردند. همان‌طور که از مرور ادبیات موضوع مشخص است، همه مقالات جز یک مقاله مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور را در شبکه‌های روبه‌جلو بررسی نموده‌اند و مباحث لجستیک معکوس، شبکه‌های حلقه‌بسته و حلقه‌باز و یا ترکیب آن‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین بحث بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور نیز تنها در یک مقاله بررسی شده است.

با توجه به تعداد بسیار زیاد پژوهش‌های انجام شده در مسائل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین معکوس، حلقه‌باز و حلقه‌بسته در ادامه به مرور پژوهش‌های کاملاً مرتبط با موضوع یعنی پژوهش‌های طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی حلقه‌باز و حلقه‌بسته می‌پردازیم. از سیلان [۲۲] به مطالعه مسئله بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی حلقه‌باز و حلقه‌بسته در حالت قطعی پرداختند. این مقاله را می‌توان به‌عنوان یکی از مقالات پایه اصلی تحقیق حاضر نام برد. نویسندگان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ایجاد کردند. در واقع شبکه مورد بررسی آن‌ها شامل یک شبکه حلقه‌باز و یک شبکه حلقه‌بسته بود. استفاده از اجزاء مشابه برای تولید کالاهای منحصربه‌فرد نقطه مشترک این دو زنجیره‌تأمین بود. زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته و زنجیره‌تأمین روبه‌جلو هر کدام کالایی متفاوت تولید می‌نمایند و بین این دو کالا اجزای مشترکی وجود دارد. در زنجیره‌تأمین معکوس اجزایی که قابلیت استفاده مجدد دارند به دو بخش تقسیم می‌شوند. قسمتی از آن‌ها به کارخانه‌های زنجیره‌تأمین تحویل داده می‌شوند و قسمتی دیگر که می‌توانند توسط زنجیره‌تأمین دیگر مصرف شوند به آن زنجیره‌تأمین منتقل می‌گردند. مسعودی‌پور و همکاران [۴۳] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته با در نظر گرفتن کیفیت محصولات برگشتی ارائه دادند. آن‌ها فرض کردند که بخشی از کالاهای برگشتی با توجه به کیفیتشان می‌توانند وارد زنجیره‌تأمین دیگری شوند و در آن مورد استفاده قرار بگیرند. چنین موضوعی در پژوهش صاحب‌جمع‌نیا و همکاران [۴۴] نیز مورد توجه قرار گرفته است. در دو مقاله اخیر، صرفاً میزان ورود کالا به زنجیره‌های

برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه دادند و بهینه‌سازی استوار را برای برخورد با پارامترهای غیرقطعی به کار بردند. استراتژی فهرست مواد جایگزین همچنین در پژوهش دهقانی و همکاران [۳۳] مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور سلول‌های خورشیدی را مطالعه کردند و از استراتژی‌های تقویت تسهیلات و منبع‌یابی چندگانه به عنوان استراتژی‌های پیشگیرانه در کنار استراتژی واکنشی بیان شده استفاده کردند. فتاحی و همکاران [۳۴] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای برای مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور و پاسخگو ارائه دادند. آن‌ها تقویت تسهیلات و تغییر تخصیص مشتریان به منابع تأمین تقاضا را به‌ترتیب به عنوان استراتژی‌های پیشگیرانه و واکنشی مطرح نمودند. نویسندگان در این تحقیق تقاضا را وابسته به زمان تحویل در نظر گرفتند. بهزادی و همکاران [۳۵] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای شامل یک تابع فسادپذیری برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین را در صنعت کشاورزی ارائه دادند. آن‌ها وجود ریسک‌های عملیاتی و اختلال را در نظر گرفتند و استراتژی‌های تسهیلات پشتیبان و منبع‌یابی چندگانه را برای افزایش تاب‌آوری شبکه به کار بردند. صیوحی و همکاران [۸] یک رویکرد ترکیبی بر اساس تحلیل پوششی داده‌ها و برنامه‌ریزی ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور پیشنهاد دادند. آن‌ها برای مقابله با اختلالات تأمین‌کنندگان از استراتژی‌های منبع‌یابی چندگانه، تقویت تأمین‌کنندگان و نگهداری موجودی اضافی استفاده کردند. قوامی‌فر و همکاران [۳۶] رقابت درون زنجیره‌تأمین را در مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور در نظر گرفتند. ریسک‌های عملیاتی و اختلال در پژوهش نامبرده مدنظر قرار گرفت و از استراتژی منبع‌یابی چندگانه برای مقابله با اختلالات بهره‌برداری شد. بتانی و همکاران [۳۷] تاب‌آوری را در شبکه زنجیره‌تأمین غذا بررسی نمودند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی ارائه کردند و از استراتژی منبع‌یابی چندگانه برای افزایش تاب‌آوری شبکه استفاده نمودند. پژوهش‌هایی که تا اینجا به آن‌ها اشاره شد در شبکه‌های زنجیره‌تأمین روبه‌جلو انجام شده‌اند. اخیراً، جبارزاده و همکاران [۳۸] مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته تاب‌آور را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها وجود اختلالات را در مراکز تأمین، تولید، جمع‌آوری و دفع در نظر گرفتند و همچنین عدم قطعیت در پارامترهای مسئله از جمله تقاضا و هزینه‌ها را مورد توجه قرار دادند. استراتژی مورد استفاده در این تحقیق برای افزایش تاب‌آوری شبکه، انتقال عرضی بود. در پژوهش علیخانی و ترابی [۳۹] مسئله بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین خرده‌فروشی با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی و اختلال مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای عدد صحیح ارائه دادند. استراتژی‌های تاب‌آوری مورد استفاد در این مقاله عبارتند از استراتژی‌های مستحکم‌سازی تسهیلات، نگهداری موجودی احتیاطی، ایجاد ظرفیت اضافی، تحویل مستقیم به فروشگاه‌ها و پوشش چندگانه. فتاحی و

باز یافت شدن دارند شناسایی می‌گردند و به مراکز باز یافت/دمونتاژ تحویل داده می‌شوند. پس از انجام باز یافت و یا دمونتاژ بخشی از مواد و محصولات باز یافت یا دمونتاژ شده به کارخانه‌های زنجیره‌تأمین اصلی تحویل داده می‌شوند و بخشی دیگر به زنجیره‌تأمین‌های دیگر منتقل می‌گردند. در زنجیره‌تأمین‌های دیگر نیز کارخانه‌ها با استفاده از مواد و محصولات دریافتی منتقل شده محصولات خود را تولید و به مشتریان مربوطه می‌رسانند. اقلامی که جنبه ضایعات دارند و قابل مصرف نیستند نیز به مراکز دفع منتقل می‌شوند. شکل (۱) نمایی از زنجیره‌تأمین توضیح داده شده را نشان می‌دهد. در اینجا حالت ترکیبی حلقه‌باز و بسته در بخش پایینی این شکل که ورود کالاهای باز یافتی را به زنجیره‌تأمین‌های دیگر نشان می‌دهد کاملاً مشهود است. در این مسئله اختلال در برخی تسهیلات زنجیره‌تأمین شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز جمع‌آوری/بازرسی و مراکز باز یافت مد نظر است. با وقوع اختلال در تسهیلات ممکن است ظرفیت آن‌ها به‌طور جزئی و یا کامل از بین برود. برای مقابله با ریسک‌های اختلالی مجموعه‌ای از استراتژی‌های تاب‌آوری شامل منبع‌یابی چندگانه، تقویت تسهیلات ظرفیت‌های تولید اضافی، توزیع چندکاناله و تنظیم قیمت محصولات باز یافتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تأمین ثانویه مورد توجه قرار گرفته و جزئیات دیگری در این مورد مطرح نشده است. هر سه مقاله اشاره شده مسئله را در حالت قطعی بررسی نموده‌اند و مباحث ریسک و تاب‌آوری در آن‌ها لحاظ نشده است. پژوهش‌هایی که ارتباط بیشتری با مسئله تحت بررسی در این مقاله دارند در جدول (۱) آورده شده‌اند و ویژگی‌های اصلی آن‌ها مشخص شده است.

مشارکت و نوآوری پژوهش حاضر در ادبیات موضوع را می‌توان از چند بعد مورد بررسی قرار داد. با توجه به جدول (۱)، در پژوهش‌های پیشین حالت زنجیره‌تأمین ترکیبی حلقه‌باز و حلقه‌بسته بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی حلقه‌باز و بسته که حالتی کلی‌تر از شبکه‌های حلقه‌باز و حلقه‌بسته است در نظر گرفته می‌شود و یک مدل جدید برای آن ارائه می‌گردد. بحث تاب‌آوری نیز در مقالاتی که لجستیک معکوس را در نظر گرفته‌اند بسیار کم دیده شده است و این موضوع در مقاله حاضر مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی و بهینه‌سازی استوار ارائه شده در این پژوهش هر دو نوع ریسک‌های عملیاتی و اختلال را در نظر می‌گیرند و با استفاده از استراتژی‌های تاب‌آوری شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی مورد نظر را تاب‌آور می‌نمایند. از سوی دیگر همان‌طور که از جدول (۱) مشخص است. بحث بازطراحی شبکه زنجیره‌تأمین تاب‌آور نیز تنها در یک مقاله بررسی شده و در این قسمت نیز شکاف تحقیقاتی وجود دارد. مدل ارائه شده در مقاله حاضر این مورد را نیز پوشش می‌دهد. موضوع مهم دیگر آن است که زنجیره‌تأمین معکوس نیز مانند زنجیره‌تأمین روبه‌جلو چند محصولی در نظر گرفته شده و برای آن محصولات قیمت تعیین می‌شود که این کار نیز در مقالات مرتبط با زنجیره‌تأمین ترکیبی انجام نشده است. مقاله حاضر به حل مسائل در ابعاد بزرگ نیز توجه می‌نماید و با ارائه یک روش آزادسازی لاگرانژ این گونه مسائل را حل می‌کند. در نهایت کاربرد واقعی مسئله مورد بررسی در قالب یک مطالعه موردی در صنعت تایر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

### ۳. بیان مسئله و مدل‌سازی ریاضی

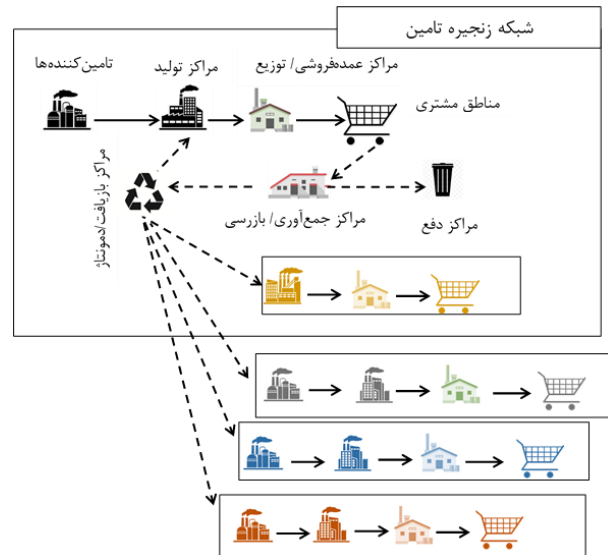
در این بخش، در ابتدا مسئله مورد بررسی تشریح می‌گردد، سپس با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مدل ریاضی مسئله فرمول‌بندی می‌شود و در مرحله بعد مدل به یک مدل استوار توسعه می‌یابد.

#### ۳-۱. بیان مسئله

در زنجیره‌تأمین مورد نظر، مواد اولیه توسط تأمین‌کنندگان مختلف تأمین و به کارخانه‌ها تحویل داده می‌شود. کارخانه‌ها محصولات نهایی را تولید می‌نمایند و آن‌ها را برای مراکز توزیع ارسال می‌کنند و در نهایت محصولات توسط مراکز توزیع به دست مشتریان می‌رسند. همچنین امکان توزیع محصولات بین مشتریان از کارخانه‌ها (حالت توزیع دو کاناله) نیز وجود دارد. محصولات پس از استفاده توسط مشتریان در جریان معکوس توسط مراکز جمع‌آوری/بازرسی جمع‌آوری می‌شوند و اقلام و محصولات که قابلیت استفاده مجدد و



- $tc_e$  هزینه حمل هر واحد محصول
- $\overline{tc}_q$  هزینه حمل هر واحد محصول بازیافتی  $q$
- $da_{ip}$  فاصله بین تامین‌کننده  $i$  و مرکز تولید  $p$
- $db_{pj}$  فاصله بین تولیدکننده  $p$  و مرکز توزیع  $j$
- $dc_{jc}$  هزینه حمل و نقل یک واحد کالا بین مرکز توزیع  $j$  و مشتری  $c$
- $de_{ck}$  فاصله بین مشتری  $c$  و مرکز جمع‌آوری/بازرسی  $k$
- $dg_{kh}$  فاصله بین مرکز جمع‌آوری/بازرسی  $k$  و مرکز بازیافت  $h$
- $dh_{ku}$  فاصله بین مرکز جمع‌آوری/بازرسی  $k$  و مراکز دفع  $u$
- $dj_{hp}$  فاصله بین مرکز بازیافت  $h$  و مرکز تولید  $p$
- $di_{pc}$  فاصله بین مرکز تولید  $p$  و مشتری  $c$
- $dk_{hg}$  فاصله بین مرکز بازیافت  $h$  و زنجیره‌تأمین  $g$
- $mc_{pe}$  هزینه تولید هر واحد محصول  $e$  در مرکز تولید  $p$
- $ce_{pe}$  هزینه اضافه کردن یک واحد ظرفیت برای محصول  $e$  به مرکز تولید  $p$
- $cd_j$  هزینه توزیع هر واحد محصول در مرکز توزیع  $j$
- $cc_k$  هزینه جمع‌آوری/بازرسی هر واحد محصول در مرکز جمع‌آوری/بازرسی  $k$
- $rc_h$  هزینه بازیافت مواد اولیه از محصولات بازگشتی در مرکز بازیافت  $h$
- $\overline{rc}_{qh}$  هزینه تولید هر واحد محصول بازیافتی  $q$  در مرکز بازیافت  $h$
- $dp_u$  هزینه دفع هر واحد محصول در مرکز دفع  $u$
- $cr_i$  هزینه خرید هر واحد ماده اولیه از تامین‌کننده  $i$
- $pr_e$  قیمت فروش هر واحد محصول نوع  $e$
- $ud_{ec}$  هزینه عدم‌تأمین تقاضای هر واحد محصول نوع  $e$  برای مشتری  $c$
- $\overline{ud}_{ag}$  هزینه عدم‌تأمین تقاضای هر واحد محصول بازیافتی نوع  $q$  برای زنجیره‌تأمین  $g$
- $pr'_{lga}$  قیمت پیشنهادی سطح  $l$  برای محصول  $q$  برای فروش به زنجیره‌تأمین  $g$
- $rm_e$  مقدار مواد اولیه موردنیاز برای تولید هر واحد محصول نوع  $e$
- $\delta_e$  میزان مواد اولیه بازیافتی حاصل از بازیافت یک واحد محصول نوع  $e$
- $\beta_q$  مقدار محصول تولیدی  $q$  حاصل از بازیافت هر واحد محصول
- $d_{ces}$  تقاضای مشتری  $c$  برای محصول نوع  $e$  تحت سناریوی  $s$
- $dr_{gltqs}$  تقاضای زنجیره‌تأمین  $g$  مربوط به سطح قیمت  $l$  برای محصول بازیافتی  $q$  تحت سناریوی  $s$
- $dre_{ga}$  یک پارامتر صفر و یک؛ ۱ اگر زنجیره‌تأمین  $g$  نیاز به محصول بازیافتی  $q$  داشته باشد، ۰ در غیر این صورت



شکل (۱): نمایی از زنجیره‌تأمین ترکیبی مورد نظر

### ۲-۳. نماد گذاری

برای فرمول‌بندی مسئله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی ارائه شده است. در ادامه به معرفی مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و ارائه مدل ریاضی پرداخته می‌شود.

#### مجموعه‌ها

- $P$  مجموعه مراکز تولید (اندیس  $p$ )
- $I$  مجموعه تامین‌کنندگان (اندیس  $i$ )
- $J$  مجموعه مراکز توزیع (اندیس  $j$ )
- $C$  مجموعه مشتریان (اندیس  $c$ )
- $K$  مجموعه مراکز جمع‌آوری/بازرسی (اندیس  $k$ )
- $H$  مجموعه مراکز بازیافت (اندیس  $h$ )
- $U$  مجموعه مراکز دفع (اندیس  $u$ )
- $A$  مجموعه سطوح تقویت (اندیس  $a$ )
- $E$  مجموعه محصولات (اندیس  $e$ )
- $G$  مجموعه زنجیره‌های تأمین (اندیس  $g$ )
- $Q$  مجموعه محصولات بازیافتی (اندیس  $q$ )
- $L$  مجموعه سطوح قیمت (اندیس  $l$ )
- $S$  مجموعه سناریوها (اندیس  $s$ )

#### پارامترها

- $fs_i$  هزینه ثابت انتخاب تامین‌کننده  $i$
- $fp_{pa}$  هزینه ثابت باز کردن مرکز تولیدی  $p$  با سطح تقویت  $a$
- $fd_j$  هزینه ثابت باز کردن مرکز توزیع  $j$
- $fc_k$  هزینه ثابت باز کردن مرکز جمع‌آوری/بازرسی  $k$
- $fl_{ha}$  هزینه ثابت باز کردن مرکز بازیافت  $h$  با سطح تقویت  $a$
- $tr$  هزینه حمل هر واحد ماده اولیه

بازرسی  $k$  و مرکز بازیافت  $h$  تحت سناریوی  $S$   
 میزان جریان محصول نوع  $e$  بین مرکز جمع‌آوری/  
 بازرسی  $k$  و مرکز دفع  $u$  تحت سناریوی  $S$   
 میزان جریان مواد بازیافتی بین مرکز بازیافت  $h$  و  
 مرکز تولید  $p$  تحت سناریوی  $S$   
 میزان جریان محصول بازیافتی  $q$  بین مرکز بازیافت  
 $h$  و زنجیره تأمین  $g$  تحت سناریوی  $S$   
 میزان محصولات برگشتی که برای بازیافت مواد اولیه  
 مورد استفاده قرار می‌گیرند تحت سناریوی  $S$   
 میزان محصولات برگشتی از نوع  $e$  که برای تولید  
 محصولات بازیافتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تحت  
 سناریوی  $S$   
 میزان تقاضای تأمین نشده از محصول نوع  $e$  مربوط  
 به مشتری  $c$  تحت سناریوی  $S$   
 میزان تقاضای تأمین نشده از محصول بازیافتی  $q$  با  
 سطح قیمت  $l$  مربوط به زنجیره تأمین  $g$  تحت  
 سناریوی  $S$   
 یک متغیر صفر و یک؛ ۱ اگر تأمین‌کننده  $i$  انتخاب  
 شود، ۰ در غیر این صورت  
 یک متغیر صفر و یک؛ ۱ اگر مرکز تولید  $p$  با سطح  
 تقویت  $a$  ایجاد شود، ۰ در غیر این صورت  
 یک متغیر صفر و یک؛ ۱ اگر مرکز توزیع  $j$  ایجاد  
 شود، ۰ در غیر این صورت  
 یک متغیر صفر و یک؛ ۱ اگر مرکز جمع‌آوری/بازرسی  
 $k$  ایجاد شود، ۰ در غیر این صورت  
 یک متغیر صفر و یک؛ ۱ اگر مرکز بازیافت  $h$  با سطح  
 تقویت  $a$  ایجاد شود، ۰ در غیر این صورت  
 یک متغیر صفر و یک؛ ۱ اگر سطح قیمت  $l$  برای  
 محصول بازیافتی  $q$  برای فروش به زنجیره تأمین  $g$   
 در سناریوی  $S$  انتخاب شود، ۰ در غیر این صورت

۳-۳. فرمول‌بندی مدل تصادفی

مدل ریاضی تصادفی مسئله به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max:} \\
 & \sum_s \pi_s \left( \sum_e \left( \sum_c \left( \sum_j O_{ejcs} \right) + \left( \sum_p t_{epcs} \right) pr_e \right) + \right. \\
 & \quad \left. \sum_g \sum_l \sum_q (v_{lqgs} dr_{glqs} pr'_{lgq} \right. \\
 & \quad \left. - \omega'_{glqs} pr'_{lgq} \right) \\
 & - \left( \sum_p \sum_a f p_{pa} x_{pa} + \sum_i f s_i s s_i + \sum_j f d_j y_j + \right. \\
 & \quad \left. \sum_k f c_k z_k + \sum_h \sum_a f l_{ha} r h_{ha} \right)
 \end{aligned}$$

$cps_i$  ظرفیت تأمین‌کننده تأمین  $i$   
 $cpp_{pe}$  ظرفیت اولیه مرکز تولید  $p$  برای تولید محصول نوع  $e$   
 $cep_{pe}$  حداکثر ظرفیت قابل اضافه شدن به مرکز تولید  $p$  برای  
 محصول نوع  $e$   
 $cdp_{pe}$  ظرفیت مرکز تولید  $p$  برای توزیع محصول نوع  $e$   
 $cpd_j$  ظرفیت مرکز توزیع  $j$   
 $cp_c k$  ظرفیت مرکز جمع‌آوری/بازرسی  $k$   
 $cpl_h$  ظرفیت مرکز بازیافت  $h$   
 $\alpha_{ce}$  درصد محصولات بازگشتی از نوع  $e$  از مشتری  $c$   
 $\gamma_e$  درصد محصولات بازگشتی از نوع  $e$  ارسالی از مراکز  
 جمع‌آوری/بازرسی به مراکز بازیافت  
 $\lambda_{paes}$  درصد کاهش ظرفیت مرکز تولید  $p$  با سطح تقویت  $a$   
 برای تولید محصول  $e$  تحت سناریوی  $S$   
 $\lambda'_{pas}$  درصد کاهش ظرفیت توزیع مرکز تولید  $p$  با سطح  
 تقویت  $a$  تحت سناریوی  $S$   
 $\eta_{is}$  درصد کاهش ظرفیت تأمین‌کننده  $i$  تحت سناریوی  $S$   
 $w_p$  یک پارامتر صفر و یک؛ ۱ اگر مرکز تولید  $p$  قبلاً  
 تأسیس شده باشد، ۰ در غیر این صورت  
 $w'_j$  یک پارامتر صفر و یک؛ ۱ اگر مرکز توزیع  $j$  قبلاً  
 تأسیس شده باشد، ۰ در غیر این صورت  
 $\varphi_{js}$  درصد کاهش ظرفیت مرکز توزیع  $j$  تحت سناریوی  $S$   
 $\mu_{ks}$  درصد کاهش ظرفیت مرکز جمع‌آوری/بازرسی  $k$  تحت  
 سناریوی  $S$   
 $\xi_{haes}$  درصد کاهش ظرفیت مرکز بازیافت  $h$  با سطح تقویت  
 $a$  برای محصول  $e$  تحت سناریوی  $S$   
 $\pi_s$  احتمال رخ دادن سناریوی  $S$   
 $M$  یک عدد بزرگ مثبت

متغیرهای تصمیم

$q_{ips}$  مقدار جریان مواد اولیه بین تأمین‌کننده  $i$  و مرکز  
 تولید  $p$  تحت سناریوی  $S$   
 $ma_{eps}$  میزان محصول تولیدی نوع  $e$  در مرکز تولید  $p$  تحت  
 سناریوی  $S$   
 $ac_{pes}$  میزان ظرفیت اضافه شده به مرکز تولید  $p$  برای تولید  
 محصول نوع  $e$  تحت سناریوی  $S$   
 $v_{epjs}$  میزان جریان محصول نوع  $e$  بین مرکز تولید  $p$  و  
 مرکز توزیع  $j$  تحت سناریوی  $S$   
 $t_{epcs}$  میزان جریان محصول نوع  $e$  بین مرکز تولید  $p$  و  
 مشتری  $c$  تحت سناریوی  $S$   
 $O_{ejcs}$  میزان جریان محصول نوع  $e$  بین مرکز توزیع  $j$  و  
 مشتری  $c$  تحت سناریوی  $S$   
 $n_{ecks}$  میزان جریان محصول نوع  $e$  بین مشتری  $c$  و مرکز  
 جمع‌آوری/بازرسی  $k$  تحت سناریوی  $S$   
 $b_{ekhs}$  میزان جریان محصول نوع  $e$  بین مرکز جمع‌آوری/



$$\alpha_{ce} \left( \sum_j o_{ejcs} + \sum_p t_{epcs} \right) = \sum_k n_{ecks} \quad \forall e, c, s \quad (11)$$

$$\sum_c n_{ecks} = \sum_h b_{ekhs} + \sum_u b'_{ekus} \quad \forall e, k, s \quad (12)$$

$$\sum_k \sum_h b_{ekhs} \leq \gamma_e \sum_c \sum_k n_{ecks} \quad \forall e, s \quad (13)$$

$$\sum_k \sum_e \sum_h b_{ekhs} = f r_s + f g_s \quad \forall s \quad (14)$$

$$\sum_h \sum_p f_{hps} = \delta f r_s \quad \forall s \quad (15)$$

$$\sum_h \sum_g \sum_q f'_{qhgs} = f g_s \quad \forall s \quad (16)$$

$$\sum_h \sum_g f'_{qhgs} \leq \beta_q f g_s \quad \forall q, s \quad (17)$$

$$\sum_l v_{lqgs} = d r_{egq} \quad \forall q, g, s \quad (18)$$

$$\omega'_{glqs} \leq v_{lqgs} d r_{glqs} \quad \forall q, l, g, s \quad (19)$$

$$\sum_h f'_{qhgs} + \sum_l \omega'_{glqs} = \sum_l d r_{glqs} v_{lqgs} \quad \forall q, g, s \quad (20)$$

$$\sum_p q_{ips} \leq c p s_i (1 - \eta_{is}) s s_i \quad \forall i, s \quad (21)$$

$$m a_{eps} \leq c p p_{pe} \sum_a (1 - \lambda_{pas}) x_{pa} \quad \forall e, p, s \quad (22)$$

$$\sum_e \sum_c t_{epcs} \leq c d p_p \sum_a (1 - \lambda'_{pas}) x_{pa} \quad \forall p, s \quad (23)$$

$$a c_{eps} \leq c e p_{pe} \sum_a x_{pa} \quad \forall e, p, s \quad (24)$$

$$\sum_c \sum_e o_{ejcs} \leq c p d_j (1 - \varphi_{js}) y_j \quad \forall j, s \quad (25)$$

$$\sum_c \sum_k n_{ecks} \leq c p c_k (1 - \mu_{ks}) z_k \quad \forall k, s \quad (26)$$

$$\sum_g \sum_q f'_{qhgs} + \sum_p f_{hps} \leq c p l_h \sum_a (1 - \xi_{has}) r h_{ha} \quad \forall k, s \quad (27)$$

$$q_{ips}, m a_{eps}, a c_{pes}, t_{epcs}, v_{epjs}, o_{ejcs}, n_{ecks}, b_{ekhs}, b'_{ekus}, f_{hps}, f'_{qhgs}, f r_s, f g_s, \omega_{ces}, \omega'_{glqs}, t_{epcs} \geq 0, s s_i, x_{pa}, y_i, z_k, r h_{ha}, v_{lqgs} \in \{0, 1\}, N E I \in R, \quad (28)$$

تابع هدف (۱) عبارت است از بیشینه‌سازی درآمد خالص زنجیره‌تأمین که برابر است با جمع کل درآمدها منهای جمع کل هزینه‌های زنجیره‌تأمین. قسمت اول تابع هدف جمع کل درآمدهای زنجیره‌تأمین را نشان می‌دهد که برابر است با درآمد فروش کالاهای اصلی و بازیافتی. قسمت دوم و سوم به ترتیب هزینه‌های ثابت و متغیر زنجیره‌تأمین را نشان می‌دهند. هزینه‌های زنجیره‌تأمین مورد نظر شامل هزینه‌های ایجاد تسهیلات، انتخاب تأمین‌کنندگان، خرید، حمل‌ونقل، تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازرسی و بازیافت می‌باشد. محدودیت (۲) بیان می‌نماید که مواد اولیه موردنیاز برای تولید محصولات از طریق تأمین‌کنندگان و یا مراکز بازیافت تأمین می‌گردد. محدودیت (۳) تضمین می‌کند که یک مرکز تولیدی در صورتی می‌تواند محصول تولید کند که ایجاد شده باشد. محدودیت‌های (۵) و

$$+ \sum_p \sum_j \sum_e t c_e v_{epjs} d b_{pj}$$

$$+ \sum_j \sum_c \sum_e t c_e o_{ejcs} d c_{jc}$$

$$+ \sum_p \sum_c \sum_e t c_e t_{epcs} d i_{pc}$$

$$+ \sum_c \sum_k \sum_e t c_e n_{ecks} d e_{ck}$$

$$+ \sum_k \sum_h \sum_e t c_e b_{ekhs} d_{gkh}$$

$$+ \sum_k \sum_u \sum_e t c_e b'_{ekus} d h_{ku}$$

$$+ \sum_h \sum_p t r f_{hps} d j_{hp}$$

$$+ \sum_q \sum_h \sum_g \bar{t} c_q f'_{qhgs} d k_{hg}$$

$$+ \sum_i \sum_p c r_i q_{ips}$$

$$+ \sum_p \sum_e m c_{pe} m a_{eps}$$

$$+ \sum_j \sum_e \sum_c c d_j o_{ejcs}$$

$$+ \sum_c \sum_k \sum_e c c_k n_{ecks}$$

$$+ \sum_u \sum_k \sum_e d p_u b'_{ekus}$$

$$+ \sum_h \sum_p r c_h f_{hps}$$

$$+ \sum_q \sum_g \bar{r} c_{qh} f'_{qhgs}$$

$$+ \sum_c \sum_e u d_{ec} \omega_{ces}$$

$$+ \sum_q \sum_g \bar{u} d_{qg} \omega'_{glqs}$$

$$\sum_i q_{ips} + \sum_h f_{hps} = \sum_e r m_e (m a_{eps} + a c_{eps}) \quad \forall p, s \quad (2)$$

$$m a_{eps} + a c_{pes} \leq M \sum_a x_{pa} \quad \forall p, e, s \quad (3)$$

$$m a_{eps} + a c_{pes} - \sum_c t_{epcs} = \sum_j v_{epjs} \quad \forall p, e, s \quad (4)$$

$$\sum_a x_{pa} \geq w_p \quad \forall p \quad (5)$$

$$\sum_a x_{pa} \leq 1 \quad \forall p \quad (6)$$

$$y_j \geq w'_j \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_a r h_{ah} \leq 1 \quad \forall h \quad (8)$$

$$\sum_p v_{epjs} = \sum_c o_{ejcs} \quad \forall j, e, s \quad (9)$$

$$\sum_j o_{ejcs} + \sum_p t_{epcs} + \omega_{ces} = d_{ces} \quad \forall e, c, s \quad (10)$$

$$\text{Min } \rho \sum_s \pi_s F_s + (1 - \rho) \text{Max}_{s \in S} (F_s - F_s^*) \quad (29)$$

s.t:

$$x \in X \quad (30)$$

که در آن  $x \in X$  نشان دهنده فضای شدنی مسئله با در نظر گرفتن همه سناریوها می‌باشد. قسمت اول در عبارت (۲۹) نشان دهنده مقدار انتظاری تابع هدف و قسمت دوم حداکثر تاسف را به ازای همه سناریوها نشان می‌دهد. ضریب وزنی  $\rho$  می‌تواند مقداری در بازه  $[0, 1]$  داشته باشد و توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. اگر تصمیم‌گیرنده تمایل به تولید جواب‌هایی با تغییرپذیری کمتر و تابع هدف بدتر داشته باشد باید این مقدار را کاهش دهد. برای سهولت در محاسبات و تطبیق با مدل استوار ارائه شده، تابع هدف در منفی یک ضرب می‌شود و مسئله به یک مسئله کمینه‌سازی تبدیل می‌گردد. بر اساس توضیحات داده شده مدل هم‌تای استوار به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min:} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left( \sum_p \sum_a f p p_a x_{pa} + \sum_i f s_i s s_i + \sum_j f d_j y_j \right. \\ & + \sum_k f c_k z_k + \sum_h \sum_a f l_{ha} r h_{ha} \\ & + \sum_s \pi_s \left( \sum_i \sum_p t r q_{ips} d a_{ip} \right. \\ & + \sum_p \sum_j \sum_e t c_e v e p j s d b_{pj} \\ & + \sum_j \sum_c \sum_e t c_e o e j c s d c_{jc} \\ & + \sum_p \sum_c \sum_e t c_e t e p c s d i_{pc} \\ & + \sum_c \sum_k \sum_e t c_e n e c k s d e_{ck} \\ & + \sum_k \sum_h \sum_e t c_e b e k h s d g_{kh} \\ & + \sum_k \sum_u \sum_e t c_e b' e k u s d h_{ku} \\ & + \sum_h \sum_p t r f_{hps} d j_{hp} \\ & + \sum_q \sum_h \sum_g \bar{t} c_q f'_{qhgs} d k_{hg} \\ & + \sum_i \sum_p c r_i q_{ips} \\ & + \sum_p \sum_e m c_{pe} m a_{eps} \\ & \left. + \sum_j \sum_e \sum_c c d_j o e j c s \right) \end{aligned}$$

(۷) تضمین می‌کنند که مراکز تولید و توزیع موجود نباید بسته شوند و فعال باقی می‌مانند. محدودیت‌های (۴) و (۹) به ترتیب بیان می‌نمایند که محصولات از مراکز تولید به توزیع و از مراکز توزیع به مناطق مشتری ارسال می‌شوند. محدودیت (۶) و (۸) به ترتیب بیان می‌نمایند که برای هر مرکز تولید و باز یافت می‌توان حداکثر یک سطح تقویت انتخاب کرد. محدودیت‌های (۱۰) و (۲۰) مربوط به تعادل تقاضا به ترتیب برای محصولات اولیه زنجیره تأمین و محصولات باز یافتی می‌باشند. محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۷) تعادل جریان مواد را در بخش معکوس زنجیره تأمین تضمین می‌کنند. محدودیت (۱۸) اطمینان حاصل می‌کند که برای هر محصول به منظور فروش به هر زنجیره تأمین تحت هر سناریو، تنها یک سطح قیمت باید انتخاب شود. محدودیت (۱۹) بیان می‌نماید که میزان تقاضای تأمین نشده هر محصول باز یافتی در هر زنجیره تأمین تحت هر سناریو کمتر یا مساوی با تقاضای در سطح قیمت انتخابی است. محدودیت‌های (۲۱) تا (۲۷) عدم تجاوز از حداکثر ظرفیت تسهیلات را با توجه به اختلالات تضمین می‌نمایند. در نهایت، محدودیت (۲۸) نشان دهنده نوع و بازه متغیرهاست.

### ۳-۴. فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی

در این قسمت یک رویکرد بهینه‌سازی استوار ارائه می‌شود تا مدل تصادفی ارائه شده به یک فرمول‌بندی استوار توسعه یابد. براساس پژوهش‌های مروری انجام شده در ادبیات در حوزه بهینه‌سازی استوار، از جمله مقالات گابریل<sup>۱</sup> و همکاران [۴۶]، گوریسن<sup>۲</sup> و همکاران [۴۷] و برتسیماس<sup>۳</sup> و همکاران [۴۸]، از بین روش‌های معروف و کارآمد برای بهینه‌سازی استوار، تنها روش ارائه شده توسط مولوی<sup>۴</sup> [۴۹]، سناریو محور است و ابزاری کارا برای مسائل مدیریت زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت به حساب می‌آید [۵۰]. او واریانس پاسخ‌ها را به عنوان معیاری از تغییرپذیری به تابع هدف مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای اضافه نمود و یک مدل بهینه‌سازی استوار ارائه داد. تغییر این مقدار باعث تولید جواب‌هایی می‌گردد که مقدار تابع هدف آن‌ها بدتر است اما میزان تغییرپذیری آن‌ها کمتر می‌باشد. آقزاف<sup>۵</sup> و همکاران [۵۱] این روش را توسعه دادند. آن‌ها حداکثر تاسف را به عنوان معیار تغییرپذیری به تابع هدف اضافه کردند. میران تاسف برای هر سناریو عبارت است از اختلاف مقدار تابع هدف تحت سناریو و مقدار بهینه تابع هدف برای آن سناریو؛ یعنی زمانی که در حقیقت مدل به صورت قطعی با دانستن اتفاق افتادن آن سناریو اجرا می‌شود. در مقاله حاضر از این روش استفاده شده است چرا که روشی نسبتاً جدیدی است و برای در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی و اختلال بسیار کارا است [۳۸]. روش ارائه شده توسط آقزاف و همکاران به صورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned}
 & + \sum_c \sum_k \sum_e cc_k n_{ecks} \\
 & + \sum_u \sum_k \sum_e dp_u b'_{ekus} \\
 & + \sum_h \sum_p r_c h f_{hps} \\
 & + \sum_q \sum_g \bar{r} c_{qh} f'_{qhgs} \\
 & + \sum_c \sum_e u d_{ec} \omega_{ces} \\
 & + \sum_q \sum_g \bar{u} d_{qg} (\omega'_{glqs}) \\
 & - (\sum_e (\sum_c (\sum_j o_{ejcs})) \\
 & + (\sum_p t_{epcs}) pr_e) \\
 & + \sum_g \sum_l \sum_q (v_{lqgs} \\
 & \quad dr_{glqs} pr'_{lgq} - \\
 & \quad \omega'_{glqs} pr'_{lgq})) \\
 & - F_s^*)
 \end{aligned}$$

s.t:

محدودیت‌های (۴) تا (۲۸).

با توجه به اینکه عبارت (۳۱) غیرخطی است. متغیر جدیدی به نام  $Y$  تعریف و محدودیت (۳۳) اضافه شده است. مدل ریاضی به صورت زیر خواهد بود:

Min:

$$\begin{aligned}
 & \rho (\sum_p \sum_a f p_{pa} x_{pa} + \sum_i f s_i s s_i + \sum_j f d_j y_j \\
 & + \sum_h \sum_a f l_{ha} r h_{ha}) + \\
 & \sum_s \pi_s (\sum_i \sum_p tr * q_{ips} da_{ip} \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_e tc_e v_{epjs} db_{pj} \\
 & + \sum_j \sum_c \sum_e tc_e o_{ejcs} dc_{jc} \\
 & + \sum_p \sum_c \sum_e tc_e t_{epcs} di_{pc} \\
 & + \sum_c \sum_k \sum_e tc_e n_{ecks} de_{ck} \\
 & + \sum_k \sum_h \sum_e tc_e b_{ekhs} dg_{kh} \\
 & + \sum_k \sum_u \sum_e tc_e b'_{ekus} dh_{ku} \\
 & + \sum_h \sum_p tr * f_{hps} dj_{hp} \\
 & + \sum_q \sum_h \sum_g \bar{t} c_q f'_{qhgs} dk_{hg}
 \end{aligned} \tag{۳۲}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_c \sum_k \sum_e cc_k n_{ecks} \\
 & + \sum_u \sum_k \sum_e dp_u b'_{ekus} \\
 & + \sum_h \sum_p r_c h f_{hps} \\
 & + \sum_q \sum_g \bar{r} c_{qh} f'_{qhgs} \\
 & + \sum_c \sum_e u d_{ec} \omega_{ces} \\
 & + \sum_q \sum_g \bar{u} d_{qg} (\omega'_{glqs}) \\
 & - (\sum_s \pi_s (\sum_e (\sum_c (\sum_j o_{ejcs})) \\
 & + (\sum_p t_{epcs}) pr_e) \\
 & + \sum_g \sum_l \sum_q (v_{lqgs} dr_{glqs} pr'_{lgq} \\
 & \quad - \omega'_{glqs} pr'_{lgq})) + \\
 & (1 - \rho) Max (\sum_{s \in S} \sum_p \sum_a f p_{pa} x_{pa} \\
 & + \sum_i f s_i s s_i + \sum_j f d_j y_j \\
 & + \sum_k f c_k z_k \\
 & + \sum_h \sum_a f l_{ha} r h_{ha} \\
 & + \sum_i \sum_p tr * q_{ips} da_{ip} \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_e tc_e v_{epjs} db_{pj} \\
 & + \sum_j \sum_c \sum_e tc_e o_{ejcs} dc_{jc} \\
 & + \sum_p \sum_c \sum_e tc_e t_{epcs} di_{pc} \\
 & + \sum_c \sum_k \sum_e tc_e n_{ecks} de_{ck} \\
 & + \sum_k \sum_h \sum_e tc_e b_{ekhs} dg_{kh} \\
 & + \sum_k \sum_u \sum_e tc_e b'_{ekus} dh_{ku} \\
 & + \sum_h \sum_p tr f_{hps} dj_{hp} \\
 & + \sum_q \sum_h \sum_g \bar{t} c_q f'_{qhgs} dk_{hg} \\
 & + \sum_i \sum_p cr_i q_{ips} \\
 & + \sum_p \sum_e mc_{pe} ma_{eps} \\
 & + \sum_j \sum_e \sum_c cd_j o_{ejcs}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_c \sum_k \sum_e cc_k n_{ecks} + \sum_j \sum_e \sum_c cd_j o_{ejcs} \\
 & + \sum_u \sum_k \sum_e dp_u b'_{ekus} + \sum_h \sum_p rchf_{hps} \\
 & + \sum_q \sum_g \bar{r}c_{qh} f'_{qhgs} + \sum_c \sum_e ud_{ec} \omega_{ces} \\
 & + \sum_q \sum_g \bar{u}d_{qg} \omega'_{glqs}) \\
 & - (\sum_e (\sum_c (\sum_j o_{ejcs}) + (\sum_p t_{epcs}) pr_e) \\
 & \quad + \sum_g \sum_l \sum_q (v_{lqgs} dr_{glqs} pr'_{lgq} \\
 & \quad \quad - \omega'_{glqs} pr'_{lgq})) \\
 & - F_s^*) \leq Y
 \end{aligned}$$

و محدودیت‌های (۴) تا (۲۸).

مقدار بهینه تابع هدف برای هر سناریو  $F_s^*$  در حقیقت ورودی مدل ارائه شده است و با استفاده از حل مدل زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \text{Min: } F_s^* = & \sum_p \sum_a fp_{pa} x_{pa} + \sum_i fs_i ss_i \\
 & + \sum_j fd_j y_j + \sum_k fc_k z_k \\
 & + \sum_h \sum_a fl_{ha} rh_{ha} \\
 & + \sum_i \sum_p trq_{ips} da_{ip} \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_e tc_e v_{epjs} db_{pj} \\
 & + \sum_j \sum_c \sum_e tc_e o_{ejcs} dc_{jc} \\
 & + \sum_p \sum_c \sum_e tc_e t_{epcs} di_{pc} \\
 & + \sum_c \sum_k \sum_e tc_e n_{ecks} de_{ck} \\
 & + \sum_k \sum_h \sum_e tc_e b_{ekhs} dg_{kh} \\
 & + \sum_k \sum_u \sum_e tc_e b'_{ekus} dh_{ku} \\
 & + \sum_h \sum_p trf_{hps} dj_{hp} \\
 & + \sum_q \sum_h \sum_g \bar{t}c_q f'_{qhgs} dk_{hg} \\
 & + \sum_i \sum_p cri_{qips} \\
 & + \sum_p \sum_e mc_{pe} ma_{eps} \\
 & + \sum_c \sum_k \sum_e cc_k n_{ecks}
 \end{aligned}$$

(۳۴)

$$\begin{aligned}
 & + \sum_i \sum_p cri_{qips} \\
 & + \sum_p \sum_e mc_{pe} ma_{eps} \\
 & + \sum_j \sum_e \sum_c cd_j o_{ejcs} \\
 & + \sum_c \sum_k \sum_e cc_k n_{ecks} \\
 & + \sum_u \sum_k \sum_e dp_u b'_{ekus} \\
 & + \sum_h \sum_p rchf_{hps} \\
 & + \sum_q \sum_g \bar{r}c_{qh} f'_{qhgs} \\
 & + \sum_c \sum_e ud_{ec} \omega_{ces} \\
 & + \sum_q \sum_g \bar{u}d_{qg} \omega'_{glqs}) \\
 & - (\sum_s \pi_s (\sum_e (\sum_c (\sum_j o_{ejcs}) \\
 & \quad + (\sum_p t_{epcs}) pr_e) \\
 & \quad + \sum_g \sum_l \sum_q (v_{lqgs} dr_{glqs} pr'_{lgq} \\
 & \quad \quad - \omega'_{glqs} pr'_{lgq})) \\
 & + (1 - \rho) Y
 \end{aligned}$$

s.t:

$$\begin{aligned}
 & \sum_p \sum_a fp_{pa} x_{pa} + \sum_i fs_i ss_i + \sum_j fd_j y_j + \sum_k fc_k z_k + \sum_h \sum_a fl_{ha} rh_{ha} \\
 & + \sum_i \sum_p trq_{ips} da_{ip} \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_e tc_e v_{epjs} db_{pj} \\
 & + \sum_j \sum_c \sum_e tc_e o_{ejcs} dc_{jc} \\
 & + \sum_p \sum_c \sum_e tc_e t_{epcs} di_{pc} \\
 & + \sum_c \sum_k \sum_e tc_e n_{ecks} de_{ck} \\
 & + \sum_k \sum_h \sum_e tc_e b_{ekhs} dg_{kh} \\
 & + \sum_k \sum_u \sum_e tc_e b'_{ekus} dh_{ku} \\
 & + \sum_h \sum_p trf_{hps} dj_{hp} \\
 & + \sum_q \sum_h \sum_g \bar{t}c_q f'_{qhgs} dk_{hg} \\
 & + \sum_i \sum_p cri_{qips} + \sum_p \sum_e mc_{pe} ma_{eps}
 \end{aligned} \tag{۳۳}$$

ساخته می‌شود. مدل دوگان لاگرانژ با آزاد کردن محدودیت‌هایی و اضافه نمودن آن‌ها به تابع هدف به همراه ضرایب لاگرانژ ساخته می‌شود. در هر بار اجرای الگوریتم، مدل دوگان لاگرانژ حل می‌گردد و حد پایین در صورت بهبود جایگزین حد پایین قبلی می‌شود. همچنین حد بالا می‌تواند در طول اجرای الگوریتم بهبود یابد. این رویه در تکرارهایی ادامه می‌یابد تا شرط توقف حاصل شود. اگر در هر تکرار شرط توقف برقرار نبود باید ضرایب مدل دوگان لاگرانژ به‌روز شود. این مراحل به همراه شبه کد الگوریتم در قسمت‌های بعد ارائه شده‌اند.

#### ۴-۱. پیدا کردن حد پایین

با آزاد کردن یک یا چند محدودیت می‌توان برای مسئله یک حد پایین استخراج نمود. در مسئله حاضر، محدودیت‌های ۲۵، ۲۶ و ۲۷ آزاد می‌شوند. این محدودیت‌ها مربوط به ظرفیت تسهیلات هستند و آزادسازی آن‌ها پیچیدگی حل مدل را به مراتب کاهش می‌دهد (با انجام محاسبات و آزمایش‌های متعدد این محدودیت‌ها انتخاب شدند). با آزادسازی این محدودیت‌ها، مدل دوگان لاگرانژ را به‌صورت زیر تشکیل می‌دهیم:

$$\text{Min:} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left( \sum_p \sum_a f p p_a x_{pa} + \sum_i f s_i s s_i + \sum_j f d_j y_j \right. \\ & \left. + \sum_h \sum_a f l_{ha} r h_{ha} \right) + \\ & \sum_s \pi_s \left( \sum_i \sum_p t r q_{ips} d a_{ip} \right. \\ & \left. + \sum_p \sum_j \sum_e t c_e v_{epjs} d b_{pj} \right. \\ & \left. + \sum_j \sum_c \sum_e t c_e o_{ejcs} d c_{jc} \right. \\ & \left. + \sum_p \sum_c \sum_e t c_e t_{epcs} d i_{pc} \right. \\ & \left. + \sum_c \sum_k \sum_e t c_e n_{ecksk} d e_{ck} \right. \\ & \left. + \sum_k \sum_h \sum_e t c_e b_{ekhs} d g_{kh} \right. \\ & \left. + \sum_k \sum_u \sum_e t c_e b'_{ekus} d h_{ku} \right. \\ & \left. + \sum_h \sum_p t r f_{hps} d j_{hp} \right. \\ & \left. + \sum_q \sum_h \sum_g \bar{t} c_q f'_{qhgs} d k_{hg} \right. \\ & \left. + \sum_i \sum_p c r_i q_{ips} \right. \\ & \left. + \sum_p \sum_e m c_{pe} m a_{eps} \right. \\ & \left. + \sum_j \sum_e \sum_c c d_j o_{ejcs} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_j \sum_e \sum_c c d_j o_{ejcs} \\ & + \sum_u \sum_k \sum_e d p_u b'_{ekus} \\ & + \sum_h \sum_p r c_h f_{hps} \\ & + \sum_q \sum_g \bar{r} c_q f'_{qhgs} \\ & + \sum_c \sum_e u d_{ec} \omega_{ces} \\ & + \sum_q \sum_g \bar{u} d_{qg} (\omega'_{glqs}) \\ & + \left( \sum_e \left( \sum_c \left( \sum_j o_{ejcs} \right) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \left( \sum_p t_{epcs} \right) p r_e \right) \right) \\ & + \sum_g \sum_l \sum_q \left( v_{lqgs} d r_{glqs} p r'_{lgq} \right. \\ & \quad \left. - \omega'_{glqs} d r_{glqs} \right) \end{aligned}$$

s.t:

محدودیت‌های (۴) تا (۲۸).

#### ۴. روش حل

مسائل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین از دسته مسائل NP-hard می‌باشند [۵۲]. علاوه‌براین، مسائل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته که غالباً دارای پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به مسائل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین عادی هستند در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرند [۱۶]. مسئله موردبررسی در این مقاله نیز با توجه به در نظر گرفتن ساختار ترکیبی حلقه‌باز و حلقه‌بسته، حداقل دارای پیچیدگی یک مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته است. به عبارت دیگر، این مسئله علاوه‌بر داشتن پیچیدگی‌های یک مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته، با توجه به داشتن متغیرهای صحیح بیشتر و ساختار پیچیده‌تر در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد. برای حل مسئله در سایزهای بزرگ از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ استفاده شده است. آزادسازی لاگرانژ روشی قدرتمند برای حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است و در حل مسائل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین نیز به‌طور موفقیت‌آمیزی مورداستفاده قرار گرفته است [۳۸، ۵۴-۵۳]. در ادامه فرایند الگوریتم آزادسازی لاگرانژ تشریح می‌گردد.

در روش آزادسازی لاگرانژ برای یک مسئله پیچیده، پس از آزادسازی تعدادی از محدودیت‌ها و ساختن مسئله دوگان لاگرانژ، می‌توان با طی کردن یک رویه تکراری حد پایینی (برای مسائل کمینه‌سازی) برای مسئله به‌دست آورد و با بهبود این حد پایین و داشتن حد بالا برای مسئله به جواب بهینه مسئله نزدیک شد [۵۵]. نحوه اجرای این الگوریتم بدین صورت است که در ابتدا یک حد بالا و یک حد پایین برای مسئله در نظر گرفته می‌شود و مدل دوگان لاگرانژ

$$\Gamma^{1,n} = \frac{\theta^n (UB^n - LB^n)}{\sum_j \sum_s (\sum_c \sum_e o_{ejcs} - cpd_j(1 - \varphi_{js})y_j)} \quad (36)$$

$$\Gamma^{2,n} = \frac{\theta^n (UB^n - LB^n)}{\sum_j \sum_s (\sum_c \sum_e n_{eckcs} - cpc_k(1 - \mu_{ks})z_k)} \quad (37)$$

$$\Gamma^{3,n} = \frac{\theta^n (UB^n - LB^n)}{\sum_h \sum_s \left( \sum_g \sum_q f'_{qhgs} + \sum_p f_{hps} - cpl_h \sum_a (1 - \varphi_{has}) rh_{ha} \right)} \quad (38)$$

در معادلات (۳۶) تا (۳۸)، شماره تکرار الگوریتم را نشان می‌دهد.  $UB^n$  و  $LB^n$  به ترتیب بهترین حد بالا و حد پایین به دست آمده تا مرحله  $n$  را نشان می‌دهند.  $\theta$  در اولین تکرار ۲ در نظر گرفته می‌شود و اگر پس از هر ۵ تکرار متوالی بهبودی در مقدار حد پایین حاصل نشد این مقدار نصف می‌گردد (این مقادیر با انجام آزمایش‌ها و محاسبات عددی متعدد انتخاب شده‌اند). در نهایت  $\Gamma^{1,n}$ ،  $\Gamma^{2,n}$  و  $\Gamma^{3,n}$  نیز مقادیر اندازه گام هستند. مقادیر مربوط به ضرایب لاگرانژ با استفاده از روابط (۳۹) تا (۴۱) به روز می‌شوند.

$$\psi_{js}^{1,n+1} = \max\{0, \psi_{js}^{2,n} + \sum_j \sum_s (\sum_c \sum_e o_{ejcs} - cpd_j(1 - \varphi_{js})y_j)\} \quad (39)$$

$$\max\{0, \psi_{ks}^{2,n} + \sum_k \sum_s (\sum_c \sum_e n_{eckcs} - cpc_k(1 - \mu_{ks})z_k)\} \quad (40)$$

$$\psi_{hs}^{3,n+1} = \max\left\{0, \psi_{hs}^{3,n} + \Gamma^{3,n} \left( \sum_h \sum_s \left( \sum_g \sum_q f'_{qhgs} + \sum_p f_{hps} - cpl_h \sum_a (1 - \varphi_{has}) rh_{ha} \right) \right)\right\} \quad (41)$$

الگوریتم تا پایان برقرار شدن شرط توقف ادامه می‌یابد. شرط توقف می‌تواند رسیدن به یک اندازه گام مشخص، طی شدن زمان یا تعداد تکرار از پیش تعیین شده یا حصول درصد اختلاف مطلوب بین حد بالا و پایین باشد. شبه کد الگوریتم ارائه شده در شکل (۲) نشان داده شده است.  $t$  مدت زمان صرف شده برای اجرای الگوریتم و  $t^{max}$  حداکثر زمان مجاز برای اجرای الگوریتم است.

## ۵. نتایج محاسباتی

در این بخش، محاسبات و تحلیل‌های عددی براساس نمونه‌های تولید شده و یک مطالعه موردی ارائه می‌گردند.

### ۵-۱. مطالعه موردی

صنعت مورد مطالعه در این پژوهش صنعت تولید تایر می‌باشد. بر این اساس، یک مطالعه موردی واقعی در ایران انجام شده است. در مطالعه موردی مورد نظر، ۴ تأمین‌کننده به صورت بالقوه وجود دارند و تولید ۴ نوع تایر مدنظر است. ۲ مکان به صورت بالقوه برای جمع‌آوری و بازیافت مورد توجه هستند. ۷ منطقه نیز به عنوان مراکز اصلی برای خرید تایرها و ۳ زنجیره تأمین دیگر به عنوان خریداران اصلی محصولات بازیافتی انتخاب شده‌اند. خلاصه‌ای از حدود پارامترهای مهم دیگر مطالعه موردی در جدول (۲) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} & + \sum_u \sum_k \sum_e dp_u b'_{ekus} \\ & + \sum_h \sum_p r c_h f_{hps} \\ & + \sum_q \sum_g \bar{r} c_{qh} f'_{qhgs} \\ & + \sum_c \sum_e u d_{ec} \omega_{ces} \\ & + \sum_q \sum_g \bar{u} d_{qg} \omega'_{glqs} \\ & - \left( \sum_s \pi_s \left( \sum_e \left( \sum_c \left( \sum_j o_{ejcs} \right) \right) \right) \right. \\ & \quad \left. + \left( \sum_e t_{epcs} \right) pr_e \right) \\ & \quad + \sum_g \sum_l \sum_q (v_{lqgs} dr_{glqs} pr'_{lgq} \\ & \quad \quad - \omega'_{glqs} pr'_{lgq})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + (1 - \rho) Y \\ & + \sum_j \sum_s \psi_{js}^1 \left( \sum_c \sum_e o_{ejcs} - cpd_j(1 - \varphi_{js})y_j \right) \\ & + \sum_k \sum_s \psi_{ks}^2 \left( \sum_c \sum_e n_{eckcs} - cpc_k(1 - \mu_{ks})z_k \right) \\ & + \sum_h \sum_s \psi_{hs}^3 \left( \sum_g \sum_q f'_{qhgs} \right. \\ & \quad \left. + \sum_p f_{hps} - cpl_{hq}(1 - \theta_{haqs}) rh_{ha} \right) \end{aligned}$$

s.t:

محدودیت‌های (۴) تا (۲۴) و (۳۳).

$\psi_{js}^1$ ،  $\psi_{ks}^2$  و  $\psi_{hs}^3$  ضرایب لاگرانژ و نامنفی هستند. جواب بهینه این مدل، حد پایینی برای مسئله اصلی خواهد بود.

### ۴-۲. پیدا کردن حد بالا

در هر تکرار روش آزادسازی لاگرانژ یک حد پایین محاسبه می‌شود. اگر جواب حاصل از محاسبه حد پایین مسئله، یک جواب شدنی باشد، این جواب یک حد بالا نیز برای مسئله ارائه می‌دهد، در غیر این صورت برای محاسبه حد بالا به این صورت عمل می‌شود که مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی ارائه شده در بخش ۳-۴ حل می‌شود، درحالی‌که متغیرهای  $z_k$ ،  $y_l$  و  $rh_{ha}$  برابر مقادیر حاصل از حل مدل لاگرانژ در نظر گرفته می‌شوند. با انجام این کار یک حد بالا برای مسئله محاسبه می‌گردد. بهبود حد بالا در کاهش شکاف بین این حد و حد پایین نزدیک شدن به جواب بهینه مؤثر است. همچنین این کار در برخی از مقاله‌های جدید انجام شده است (به‌طور مثال مراجع [۳۸] و [۵۳] را ببینید).

### ۴-۳. به‌روزرسانی ضرایب لاگرانژ و حدود بالا و پایین

در هر تکرار فرآیند آزادسازی لاگرانژ ضرایب لاگرانژ و حدود پایین و بالا به‌روز می‌شوند. در این مقاله از روش زیرگردیان که توسط فیشر [۵۵] ارائه گردید استفاده شده است. روابط مورد استفاده در ادامه ارائه شده‌اند:

جدول (۲): مقادیر و حدود پارامترهای اصلی مسئله در

مطالعه موردی

۶۰۰۰-۱۲۰۰۰	$f s_i$
۲۰۰۰۰۰۰۰-۸۰۰۰۰۰۰۰۰	$f p_{pa}$
۲۰۰۰۰۰-۴۰۰۰۰۰	$f c_k$ و $f d_j$
۵۰۰۰۰۰۰-۱۵۰۰۰۰۰۰	$f l_h$
۰/۰۰۴-۰/۰۰۸	نرخ حمل و نقل
۱۳-۱۷	$m c_{pe}$
۲۰-۳۰	$c e_{pe}$
۰/۰۳-۰/۰۵	$c c_k$ و $c d_j$
۳۴-۳۹	$r c_h$
۰/۰۰۱۵-۰/۰۰۰۳	$\bar{r} c_{qh}$
۱/۵-۴/۵	$p r_{igq}$
۴۰-۴۵	$c r_i$
۳۰۰۰-۱۴۰۰۰	$d_{ces}$
۴۰۰۰-۱۸۰۰۰	$d r_{glqs}$
۶۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	$c p s_i$
۱۰۰۰۰-۶۰۰۰۰	$c p h l_h$
۵۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	$c p c_k$ و $c p d_j$
۳۰۰۰-۲۰۰۰۰	$c p p_{pe}$
۶۰۰۰-۲۰۰۰	$c e p_{pe}$
۲۰۰۰۰-۴۰۰۰۰	$c d p_p$
۰/۳-۰/۹	$\alpha_{ce}$
۰/۵-۰/۹	$\gamma_e$
۰/۴-۰/۶	$\delta$
۰-۱	$\lambda_{paes}, \lambda'_{pas}, \eta_{is}, \varphi_{js}, \mu_{ks}, \zeta_{ha}$

تعداد سناریوهای در نظر گرفته شده نیز ۳ می‌باشد که در حقیقت نشان‌دهنده حالات خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه هستند. این سناریوها نشان‌دهنده وضعیت‌های مختلف از تقاضای مشتریان و ظرفیت تسهیلات با توجه به میزان اختلال‌ها می‌باشند و براساس داده‌های موجود و نظر خبرگان و کارشناسان مربوطه در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس، سناریوهای مربوط به تقاضای محصولات و میزان اختلال بر مبنای توزیع نرمال با استفاده از داده‌های تاریخی موجود و نظر خبرگان تولید شده‌اند (مشابه مقالات [۳۶] و [۵۶]).

مدل‌های ارائه شده در بخش ۴ در نرم‌افزار گمز<sup>۱</sup> نسخه ۲۴/۱/۳ کدنویسی شدند. مدل‌ها روی یک کامپیوتر با ۴ گیگابایت رم و پردازشگر با مشخصات Intel(R) Core(TM) i53320M CPU @2.6 GHz بر روی سیستم‌عامل ویندوز ۱۰ (۶۴ بیت) اجرا گردیدند. جدول (۳) مقایسه مقادیر تابع هدف را برای سناریوهای مختلف که توسط مدل تصادفی و مدل استوار تصادفی به دست آمده است نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول مشخص است، میزان تابع هدف به دست آمده در سناریوهای ۱ و ۲ توسط مدل تصادفی بهتر از نتایج مدل استوار می‌باشد. با توجه به سطر آخر جدول میزان تابع هدف

الگوریتم آزادسازی لاگرانژ

ورودی: مجموعه‌ها و پارامترهای مساله

خروجی: بهترین حد پایین و حد بالای محاسبه شده

شروع

گام ۱ (تشکیل مدل لاگرانژ و یافتن حد پایین ابتدایی)

مدل دوگان لاگرانژ را تشکیل دهد و آن را حل نماید  
مقدار تابع هدف به دست آمده را برابر  $LB^0$  قرار دهید.  
( $LB = LB^0$ )

گام ۲ (یافتن یک حد بالای ابتدایی)

اگر جواب به دست آمده حاصل از حل مدل لاگرانژ شدنی می‌باشد  
قرار دهید:  $UB = UB^0 = LB^0$

در غیر این صورت

متغیرهای  $z_k, Y_j$  و  $r h_{ha}$  را برابر مقادیر حاصل از حل مدل  
لاگرانژ قرار دهید و مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی را اجرا نمایید  
 $UB = UB^0$  را برابر مقدار تابع هدف به دست آمده را قرار دهید.

پایان

قرار دهید  $\theta = 2, n = 1$ تا زمانی که  $\frac{UB-LB}{LB} > \varepsilon$  و  $t < t^{max}$ 

مدل دوگان لاگرانژ را اجرا نمایید

اگر  $LB^n > LB$ |  $LB = LB^n$ 

پایان

اگر جواب به دست آمده حاصل از حل مدل لاگرانژ شدنی می‌باشد

| قرار دهید:  $UB = UB^n = LB^n$ 

در غیر این صورت

متغیرهای  $z_k, Y_j$  و  $r h_{ha}$  را برابر مقادیر حاصل از حل  
مدل لاگرانژ قرار دهید و مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی را  
اجرا نمایید.

$UB = UB^n$  را برابر مقدار تابع هدف به دست آمده را قرار  
دهید.

پایان

اگر  $UB^n < UB$ |  $UB = UB^n = UB^{n-1}$ 

پایان

ضرایب لاگرانژ را با استفاده از روابط (۳۹) تا (۴۱) به‌روز نمایید

| قرار دهید  $n = n + 1$ 

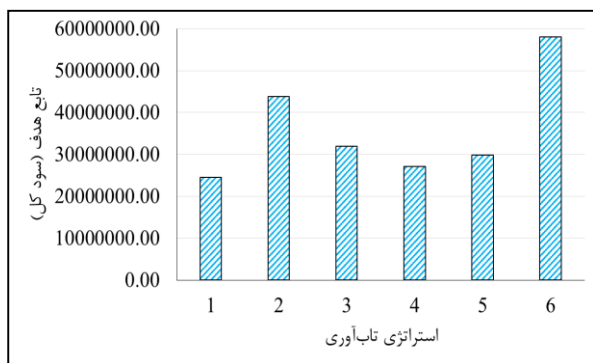
پایان

مقادیر حد بالا و حد پایین گزارش شود

شکل (۲): شبه‌کد الگوریتم آزادسازی لاگرانژ ارائه شده

پارامترهایی که جنبه مالی دارند به هزار تومان بیان شده‌اند. همچنین واحد پارامترهای ظرفیت تسهیلات و تقاضا تن می‌باشد. شکل (۳) نمایی از مکان تسهیلات موجود و مکان‌های بالقوه برای ایجاد تسهیلات جدید را نشان می‌دهد.

را بر روی افزایش تاب‌آوری شبکه دارد. این استراتژی باعث افزایش ۷۸ درصدی سودآوری زنجیره‌تأمین نسبت به حالتی می‌شود که فقط منبع‌یابی چندگانه استفاده می‌گردد. افزایش ظرفیت مراکز تولید، توزیع چندکاناله و تنظیم قیمت به‌ترتیب با ۳۰، ۲۱ و ۱۰ درصد در رتبه‌های بعد قرار می‌گیرند. استفاده از هر پنج استراتژی نیز می‌تواند باعث افزایش ۱۳۶ درصدی سود زنجیره‌تأمین گردد. در این حالت هم‌افزایی استراتژی‌ها باعث می‌گردد این افزایش سود نسبت به سایر حالات بیشتر باشد.



شکل (۵): تحلیل اثربخشی استراتژی‌های تاب‌آوری مورد استفاده روی تابع هدف

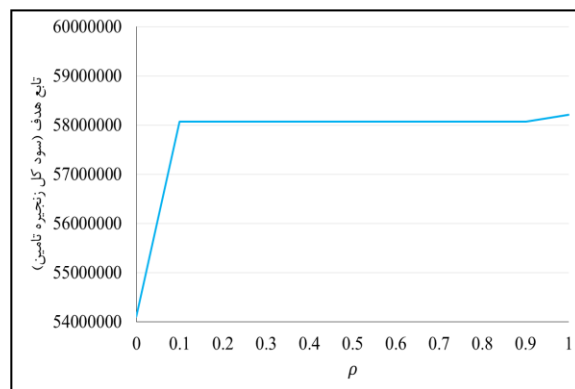
جدول (۴) میزان تابع هدف را در سه مجموعه سناریو نشان می‌دهد. از مجموعه سناریوی اول تا سوم شدت اختلالات افزایش یافته است. یعنی تسهیلات زنجیره‌تأمین در سناریوی سوم بیشترین میزان کاهش ظرفیت را خواهند داشت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مجموعه سناریوی سوم، زنجیره‌تأمین در صورت استفاده نکردن از استراتژی‌های تاب‌آوری دچار ضرر زیادی خواهد شد. این در حالی است که با استفاده از این استراتژی‌ها زنجیره‌تأمین سود قابل توجهی را کسب خواهد نمود. شکل (۶) تاثیر افزایش ظرفیت تسهیلات را بر میزان کل سود زنجیره‌تأمین نشان می‌دهد. به‌طور کلی با توجه به شکل می‌توان گفت افزایش ظرفیت تسهیلات باعث افزایش سود کل می‌شود. چراکه هزینه عدم‌تأمین تقاضای مشتریان کاهش یافته و از طرفی فروش زنجیره‌تأمین افزایش می‌یابد. دلیل دیگر نیز آن است که با افزایش ظرفیت تسهیلات، می‌توان به تسهیلاتی که هزینه کمتری دارند فعالیت‌های بیشتری را تخصیص داد و بدین ترتیب هزینه کل را کاهش داد. با توجه به شکل (۶) افزایش ظرفیت مراکز تولید بیشترین تاثیر را بر افزایش سود دارند و این نشان می‌دهد که هنگام تعیین ظرفیت باید توجه زیادی به این تسهیلات شود.

حاصل از روش تصادفی نسبت به روش استوار بهتر می‌باشد. دلیل این امر همان‌طور که قبلاً اشاره شد آن است که در مدل بهینه‌سازی استوار ارائه شده کمینه‌سازی حداکثر تأسف و یا تغییرپذیری جواب‌ها با توجه به سناریوهای مختلف در تابع هدف قرار گرفته است و این امر باعث بدتر شدن تابع هدف اصلی مسئله می‌گردد. مقدار حداکثر تأسف  $(Max_{s \in S}(F_s - F_s^*))$  نیز در جدول گزارش شده و همان‌طور که انتظار می‌رود این مقدار در روش استوار کمتر است. با توجه به خروجی‌های حاصل از اجرای مدل، تسهیلات جدید که می‌بایست باز شوند در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

جدول (۳): مقایسه مقدار تابع هدف در رویکردهای تصادفی و استوار تحت سناریوهای مختلف

سناریو	کل سود زنجیره تأمین	
	رویکرد تصادفی	رویکرد استوار
۱	۵۴۷۸۳۱۷۳/۷۸	۵۱۹۳۴۴۸۹/۰۲
۲	۶۳۷۲۹۰۵۴/۹۵	۶۰۷۹۰۳۷۶/۳۲
۳	۵۰۵۲۸۷۹۵/۷۱	۵۸۷۶۰۷۲۹/۱۲
حداکثر تأسف	۵۵۱۴۰۳۵/۱۰	۲۷۲۱۴۹۶/۱۳
مقدار تابع هدف	۵۸۲۱۵۰۱۹/۸۵	۵۸۰۶۸۸۸۰/۲۰

مقدار تابع هدف حاصل با استفاده از مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی نسبت به مقادیر مختلف  $\rho$  محاسبه شده و با استفاده از نتایج حاصل شکل (۴) رسم شده است.



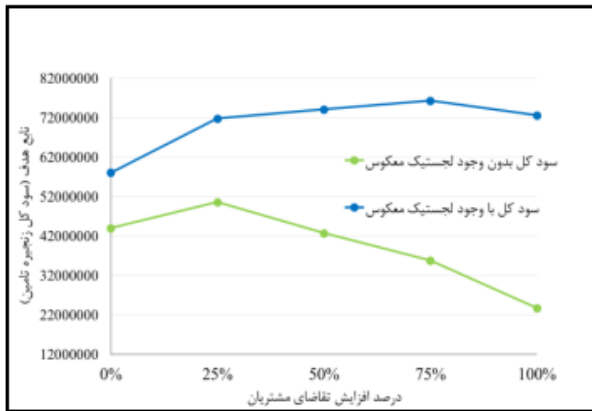
شکل (۴): میزان سود کل زنجیره‌تأمین به ازای مقادیر مختلف  $\rho$  (مدل استوار)

شکل (۵) درصد تأثیرگذاری استراتژی‌های تاب‌آوری را بر روی تابع هدف نشان می‌دهد. در حالت یک فقط استراتژی منبع‌یابی چندگانه مورد استفاده قرار گرفته است. در حالات ۲ تا ۵ نیز به‌ترتیب استراتژی‌های تقویت تسهیلات، افزایش ظرفیت مراکز تولید، تنظیم قیمت و توزیع چندکاناله در کنار استراتژی منبع‌یابی چندگانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در حالت ششم نیز همه استراتژی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استراتژی تقویت تسهیلات بیشترین تاثیر

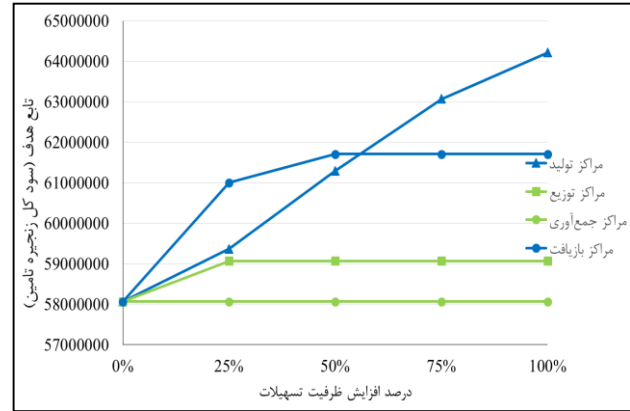


جدول (۴): مقایسه مقدار تابع هدف در حالات استفاده و عدم استفاده از استراتژی‌های تاب‌آوری براساس سناریوهای مختلف

مجموعه سناریوهای سناریو ۳		مجموعه سناریوهای سناریو ۲		مجموعه سناریوهای سناریو ۱		مجموعه‌های سناریوها
بدون استفاده از استراتژی‌ها	با استفاده از استراتژی‌ها	بدون استفاده از استراتژی‌ها	با استفاده از استراتژی‌ها	بدون استفاده از استراتژی‌ها	با استفاده از استراتژی‌ها	وضعیت زنجیره میزان سود
-۵۲۳۲۱۰۴/۴۱	۱۱۲۳۵۳۶۵/۲۴	۱۴۵۲۳۲۲۶/۰۸	۴۲۳۶۵۱۲۳/۱۳	۲۴۵۷۹۲۳۰/۱۲	۵۸۰۶۸۸۸۰/۲۰	



شکل (۷): تاثیر لجستیک معکوس بر سود کل زنجیره تأمین



شکل (۸): تاثیر تغییر ظرفیت تسهیلات بر سود کل زنجیره تأمین

## ۲-۵. عملکرد روش آزادسازی لاگرانژ و مثال‌های عددی

برای ارزیابی عملکرد روش آزادسازی لاگرانژ ارائه شده ۹ مثال عددی براساس داده‌های مطالعه موردی و بازه‌های ارائه شده در جدول (۲) تولید شده‌اند. جدول (۵) نتایج مقایسه روش آزادسازی لاگرانژ را با حل توسط نرم‌افزار گمز (حل‌کننده سیپلکس<sup>۱</sup>) نشان می‌دهد. شرط توقف برای حل توسط هر دو روش ۴۳۲۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. ستون اول جدول (۵) ابعاد مسئله مورد نظر را نشان می‌دهد. هر مسئله به صورت  $(|L|, |Q|, |G|, |E|, |U|, |H|, |K|, |C|, |I|, |P|)$  نمایش داده می‌شود. به عنوان مثال مسئله (۲، ۳، ۵، ۶، ۲، ۳، ۳، ۵) نشان‌دهنده یک مثال با ۲ مرکز تولید، ۳ تأمین‌کننده، ۵ مرکز توزیع، ۶ مشتری، ۲ مرکز جمع‌آوری، ۲ مرکز بازیافت، ۲ مرکز دفع، ۳ محصول اصلی (زنجیره تأمین روبه‌جلو)، ۳ زنجیره تأمین (برای فروش محصولات بازیافتی)، سه محصول بازیافتی و ۵ سطح قیمت می‌باشد. تعداد سطوح تقویت برای همه مثال‌های عددی ۴ و تعداد سناریوها نیز مانند بخش گذشته ۳ می‌باشد. دو ستون بعد مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده (سود زنجیره تأمین) با استفاده از روش‌های آزادسازی لاگرانژ و سیپلکس را نشان می‌دهند. ستونی که با عنوان میزان شکاف نشان داده شده است، درصد تفاوت بین میزان تابع هدف حاصل از دو روش مورد نظر را ارائه می‌نماید. دو ستون آخر زمان اجرای دو روش حل را گزارش می‌کنند. همان‌طور که از جدول (۵) مشاهده می‌شود روش آزادسازی لاگرانژ توانایی یافتن جواب‌های باکیفیت بالا در همه مثال‌ها را دارد. ملاحظه می‌شود که شکاف بین جواب پیدا شده توسط روش آزادسازی لاگرانژ و جواب حاصل از حل مسئله با نرم‌افزار گمز حداکثر ۰/۹ درصد می‌باشد که نشان از کارایی بالای روش

حال به این نکته می‌پردازیم که استفاده از لجستیک معکوس و شبکه ترکیبی حلقه‌باز و بسته چه تأثیری بر سود زنجیره تأمین دارد. شکل (۷) میزان سود کل زنجیره تأمین را در حالاتی که لجستیک معکوس وجود ندارد (یعنی یک شبکه روبه‌جلو موجود است) و حالتی که شبکه ترکیبی وجود دارد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سودآوری زنجیره تأمین در حالت وجود لجستیک معکوس نسبت به حالت دیگر بسیار بیشتر است و بهره‌برداری از لجستیک معکوس می‌تواند بین ۳۲٪ (در حالت عدم افزایش تقاضا) تا ۶۵٪ (در حالت افزایش ۱۰۰ درصدی تقاضا) سودآوری زنجیره تأمین را بهبود بخشد. این افزایش سود به دلیل استفاده از کالاهای بازگشتی برای تولید محصولات و همچنین فروش محصولات بازیافتی به زنجیره‌های تأمین دیگر است. در حالت عدم استفاده از زنجیره تأمین معکوس مشاهده می‌شود که با افزایش بیش از ۲۵ درصدی تقاضا، سود زنجیره تأمین کاهش می‌یابد، این کاهش سود به دلیل نبودن ظرفیت لازم در تسهیلات و افزایش هزینه‌های کمبود می‌باشد. لازم به ذکر است که در زنجیره تأمین مورد نظر کاهش هزینه‌ها و افزایش درآمدها به دلیل استفاده از لجستیک معکوس بر هزینه‌های لجستیک معکوس غلبه کرده است.





## مراجع

- [14] Jahani, H., Abbasi, B., Alavifard, F., Talluri, S. (2018). "Supply chain network redesign with demand and price uncertainty", *International Journal of Production Economics*, 205: 287-312.
- [15] Akçalı, E., Çetinkaya, S., Üster, H. (2009). "Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches", *Networks*, 53(3): 231-248.
- [16] Soleimani, H., Kannan, G. (2015). "A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks", *Applied Mathematical Modelling*, 39(14): 3990-4012.
- [۱۷] حسینی، علی‌اکبر، حسینی، سید محمدحسن (۱۳۹۵). "ارائه یک مدل استوار چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین برگشتی با قیمت‌گذاری پویا تحت عدم قطعیت و به‌کارگیری الگوریتم جستجوی ممتیک با پردازش موازی"، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۴(۷): ۱۷-۳۵.
- [18] Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., De Jaeger, S. (2018). *Literature review: strategic network optimization models in waste reverse supply chains*, Omega: Article in press.
- [19] Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D. (2015). "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future", *European journal of operational research*, 240(3): 603-626.
- [20] Gou, Q., Liang, L., Huang, Z., Xu, C. (2008). "A joint inventory model for an open-loop reverse supply chain", *International Journal of Production Economics*, 116(1): 28-42.
- [21] Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q. (2007). "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty", *European journal of operational research*, 179(3): 1063-1077.
- [22] Özceylan, E. (2016). "Simultaneous optimization of closed-and open-loop supply chain networks with common components", *Journal of Manufacturing Systems*, 41: 143-156.
- [23] Melo, M. T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F. (2012). "A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon", *International Journal of Production Economics*, 136(1): 218-230.
- [24] Fattahi, M., Govindan, K., Keyvanshokoo, E. (2018). "A multi-stage stochastic program for supply chain network redesign problem with price-dependent uncertain demands", *Computers & Operations Research*, 100: 314-332.
- [25] Bing, X., Bloemhof-Ruwaard, J., Chaabane, A., van der Vorst, J. (2015). "Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme", *Journal of cleaner production*, 103: 28-39.
- [26] Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F., Cespón-Castro, R. (2017). "Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: A case study", *Journal of Cleaner Production*, 151: 206-217.
- [1] Govindan, K., Fattahi, M., Keyvanshokoo, E. (2017). "Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions", *European Journal of Operational Research*, 263(1): 108-141.
- [2] Zokaei, S., Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Sadjadi, S. J. (2017). "Robust supply chain network design: an optimization model with real world application", *Annals of Operations Research*, 257(1-2): 15-44.
- [3] Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Sheu, J. B., Moghadam, H. S. (2016). "Designing a supply chain resilient to major disruptions and supply/demand interruptions", *Transportation Research Part B: Methodological*, 94: 121-149.
- [4] Tang, C. S. (2006). "Perspectives in supply chain risk management", *International journal of production economics*, 103(2): 451-488.
- [5] Singh, A. R., Mishra, P. K., Jain, R., Khurana, M. K. (2012). "Design of global supply chain network with operational risks", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1-4): 273-290.
- [6] Sheffi, Y. (2005). *The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage*, 1st Edition MIT Press.
- [7] Torabi, S. A., Namdar, J., Hatefi, S. M., Jolai, F. (2016). "An enhanced possibilistic programming approach for reliable closed-loop supply chain network design", *International Journal of Production Research*, 54(5): 1358-1387.
- [8] Sabouhi, F., Pishvaei, M. S., Jabalameli, M. S. (2018). "Resilient supply chain design under operational and disruption risks considering quantity discount: A case study of pharmaceutical supply chain", *Computers & Industrial Engineering*, 126: 657-672.
- [9] Tang, C. S. (2006). "Robust strategies for mitigating supply chain disruptions", *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 9(1): 33-45.
- [10] Diabat, A., Dehghani, E., Jabbarzadeh, A. (2017). "Incorporating location and inventory decisions into a supply chain design problem with uncertain demands and lead times", *Journal of Manufacturing Systems*, 43: 139-149.
- [11] Kristianto, Y., Gunasekaran, A., Helo, P., Hao, Y. (2014). "A model of resilient supply chain network design: A two-stage programming with fuzzy shortest path", *Expert systems with applications*, 41(1): 39-49.
- [12] Petersen, K. J., Handfield, R. B., Ragatz, G. L. (2005). "Supplier integration into new product development: coordinating product, process and supply chain design", *Journal of operations management*, 23(3-4): 371-388.
- [13] Khatami, M., Mahootchi, M., Farahani, R. Z. (2015). "Benders' decomposition for concurrent redesign of forward and closed-loop supply chain network with demand and return uncertainties", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79: 1-21.

- [۳۹] علیخانی، رضا، ترابی، سید علی. (۱۳۹۷). "بازطراحی شبکه‌های زنجیره تأمین خرده‌فروشی براساس قابلیت‌های چندگانه بازگشت‌پذیری". نشریه پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری، ۳(۴): ۷۳-۱۰۲.
- [40] Fattahi, M., Govindan, K., Maihami, R. (2020). "Stochastic optimization of disruption-driven supply chain network design with a new resilience metric", *International Journal of Production Economics: Article in press*, Vol 230: 107755. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107755>.
- [41] Haeri, A., Hosseini-Motlagh, S. M., Ghatreh Samani, M. R., Rezaei, M. (2020). "A mixed resilient-efficient approach toward blood supply chain network design", *International Transactions in Operational Research*, 27(4): 1962-2001.
- [42] Tucker, E. L., Daskin, M. S., Sweet, B. V., Hopp, W. J. (2020). "Incentivizing resilient supply chain design to prevent drug shortages: policy analysis using two-and multi-stage stochastic programs". *IIE Transactions*, 52(4): 394-412.
- [43] Masoudipour, E., Amirian, H., Sahraeian, R. (2017). "A novel closed-loop supply chain based on the quality of returned product", *Journal of cleaner production*, 151: 344-355.
- [44] Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghahi-Keshteli, M. (2018). "Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks", *Journal of cleaner production*, 196: 273-29.
- [45] Gabrel, V., Murat, C., Thiele, A. (2014). "Recent advances in robust optimization: An overview", *European journal of operational research*, 235(3): 471-483.
- [46] Gorissen, B. L., Yanikoğlu, İ., den Hertog, D. (2015). "A practical guide to robust optimization", *Omega*, 53: 124-137.
- [47] Bertsimas, D., Brown, D. B., Caramanis, C. (2011). "Theory and applications of robust optimization", *SIAM review*, 53(3): 464-501.
- [48] Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., Zenios, S. A. (1995). "Robust optimization of large-scale systems", *Operations research*, 43(2): 264-281.
- [49] Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Seuring, S. (2014). "Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: A robust model with real world application". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 70, 225-244.
- [50] Aghezzaf, E. H., Sitompul, C., Najid, N. M. (2010). "Models for robust tactical planning in multi-stage production systems with uncertain demands", *Computers & Operations Research*, 37(5): 880-889.
- [51] Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., Péton, O. (2015). "Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review", *Omega*, 54: 11-32.
- [52] Diabat, A., Richard, J. P. P. (2015). "An integrated supply chain problem: a nested lagrangian relaxation approach", *Annals of Operations Research*, 229(1): 303-323.
- [53] Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., Ghavamifar, A., Bell, M. (2017). "Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters", *International Journal of Production Economics*, 183: 700-709.
- [27] Peng, P., Snyder, L. V., Lim, A., Liu, Z. (2011). "Reliable logistics networks design with facility disruptions", *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8): 1190-1211.
- [28] Azad, N., Saharidis, G. K., Davoudpour, H., Malekly, H., Yektamaram, S. A. (2013). "Strategies for protecting supply chain networks against facility and transportation disruptions: an improved Benders decomposition approach", *Annals of Operations Research*, 210(1): 125-163.
- [29] Rezapour, S., Farahani, R. Z., Pourakbar, M. (2017). "Resilient supply chain network design under competition: a case study", *European Journal of Operational Research*, 259(3): 1017-1035.
- [30] Sadghiani, N. S., Torabi, S. A., Sahebjamnia, N. (2015). "Retail supply chain network design under operational and disruption risks", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75: 95-114.
- [31] Nooraie, S. V., Parast, M. M. (2016). "Mitigating supply chain disruptions through the assessment of trade-offs among risks, costs and investments in capabilities", *International Journal of Production Economics*, 171: 8-21.
- [32] Hasani, A., Khosrojerdi, A. (2016). "Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 87: 20-52.
- [33] Dehghani, E., Jabalameli, M. S., Jabbarzadeh, A., Pishvae, M. S. (2018). "Resilient solar photovoltaic supply chain network design under business-as-usual and hazard uncertainties", *Computers & Chemical Engineering*, 111: 288-310.
- [34] Fattahi, M., Govindan, K., Keyvanshokoo, E. (2017). "Responsive and resilient supply chain network design under operational and disruption risks with delivery lead-time sensitive customers", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 101: 176-200.
- [35] Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., Olsen, T. L., Scrimgeour, F., Zhang, A. (2017). "Robust and resilient strategies for managing supply disruptions in an agribusiness supply chain", *International Journal of Production Economics*, 191, 207-220.
- [36] Ghavamifar, A., Makui, A., Taleizadeh, A. A. (2018). "Designing a resilient competitive supply chain network under disruption risks: A real-world application", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 115: 87-109.
- [37] Bottani, E., Murino, T., Schiavo, M., Akkerman, R. (2019). "Resilient food supply chain design: Modelling framework and metaheuristic solution approach", *Computers & Industrial Engineering*, 135: 177-198.
- [38] 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.

- [54] Badri, H., Bashiri, M., Hejazi, T. H. (2013). "Integrated strategic and tactical planning in a supply chain network design with a heuristic solution method", *Computers & Operations Research*, 40(4): 1143-1154.
- [55] Fisher, M. L. (2004). "The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems", *Management science*, 50(12\_supplement): 1861-1871.
- [56] Yadollahinia, M., Teimoury, E., Paydar, M. M. (2018). "Tire forward and reverse supply chain design considering customer relationship management", *Resources, Conservation and Recycling*, 138: 215-228.



DOI: 10.22084/ier.2020.20467.1915

## Resilient Mixed Supply Chain Network Redesign Under Operational And Disruption Risks: A Case Study

M. M. Vali-Siar<sup>1</sup>, E. Roghanian<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Faculty of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 26 November 2019

Accepted 18 August 2020

#### *Keywords:*

Supply chain network design  
Resilience  
Operational and disruption  
risks  
Stochastic programming  
Mixed open and closed loop  
network

### ABSTRACT

Today, supply chains are exposed to a variety of risks. Ignoring these risks can cause irreparable damages to them. On the other hand, the subject of redesigning is essential when the supply chain loses its optimality or needs to be altered due to changing conditions. In this paper, in contrast to most researches done in the literature, the problem of resilient supply chain network redesign is investigated under operational and disruption risks. The network structure addressed in this paper is a mixture of open and closed loop schemes, which has been rarely considered in the literature. A novel stochastic robust optimization model is developed to manage the uncertainty of the problem. The problem is formulated as a linear mixed-integer programming model with the objective function of profit maximization. Due to the high complexity of the model and the challenge to solve it in large-scale dimensions, a Lagrangian relaxation algorithm is developed, and its excellent performance is shown by the relevant calculations. In order to measure the efficiency and validity of the model, a case study has been presented in the automotive tire industry. The results show that using resilience strategies is very effective in improving the profitability of the supply chain and preventing losses. In addition, the use of a mixed supply chain network increases the overall profitability of the supply chain in comparison to a forward supply chain network.

\* Corresponding author. E. Roghanian  
Tel.: 021-84063348; E-mail address: [e\\_roghanian@kntu.ac.ir](mailto:e_roghanian@kntu.ac.ir)