

# طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت شرایط اختلال و عدم قطعیت با در نظر گرفتن کیفیت محصولات و استراتژی تاب آوری

مر ترضی قمی اوبلی

دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

سیدغلامرضا جلالی نائینی

دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

رضا توکلی مقدم

استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران

آرمین جبارزاده\*

استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت

**چکیده** در سال‌های اخیر با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست محیطی، قوانین دولتی و محدودیت منابع طبیعی و تاثیر قوانین سبز، زنجیره تامین حلقه بسته توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. از آنجایی که تامین‌کننده نقش مهم و اساسی در زنجیره تامین دارد در صورت مواجه شدن با ریسک و اختلال اثرات زیان‌بار و مهمی برای زنجیره تامین به بار خواهد آورد، بنابراین مطالعه و بررسی این شرایط امری ضروری به نظر می‌رسد. از این رو در این مقاله به بررسی مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در شرایط ریسک تامین پرداخته می‌شود. در کنار در نظر گرفتن اختلال در تامین، عواملی از قبیل استفاده از موجودی اضافی و همچنین قرار داد با تامین‌کنندگان قابل اعتماد در دوره‌هایی که دچار اختلال نشده‌ایم در این مقاله به عنوان استراتژی‌های انعطاف پذیری در نظر گرفته شده است. هدف از این مسئله کمینه کردن هزینه‌های زنجیره با توجه به تصمیمات مکان یابی، میزان جریان بین سطوح و فروش از دست رفته می‌باشد. اختلال در تامین‌کنندگان به صورت سناریوهای مختلف و به صورت جزئی در نظر گرفته شده است. مسئله با استفاده برنامه ریزی عدد صحیح آمیخته مدل شده و از رویکرد دو مرحله ای احتمالی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل پیشنهادی استفاده شده است. در پایان تحلیل حساسیت بر روی مدل پیشنهادی صورت گرفته و پیشنهادهای به منظور استفاده از این مدل در دنیای واقعی ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** طراحی شبکه زنجیره تامین، زنجیره تامین حلقه بسته، اختلال، استراتژی تاب آوری

## ۱- مقدمه

حلقه بسته توجه بسیار زیادی را در بین افراد دانشگاهی و محققین به خود جلب کرده است. در طول چند سال اخیر، انواع مختلف وقایع غیر قابل پیش‌بینی شامل اعمال عمدی غیر تروریستی، اعمال تروریستی، حوادث، بلایای طبیعی و غیره رخ داده‌اند که نشان می‌دهند جهان ما به طور فزاینده‌ای غیر قطعی و آسیب‌پذیر است. علاوه بر این به نظر می‌رسد که زنجیره‌های تامین امروزه نسبت به گذشته با توجه به تعدد صنایع و فعالیت‌های کاری، تولید غیر متمرکز، افزایش برون‌سپاری، کاهش تعداد تامین‌کنندگان و تمرکز بر کاهش موجودی‌ها آسیب‌پذیرتر شده‌اند. اگرچه این صنایع مختلف و فعالیت‌های کاری هزینه‌های زنجیره تامین را کاهش داده‌اند اما زنجیره تامین را بیشتر در معرض ریسک و اختلال قرار داده‌اند و زنجیره‌های تامین را پیچیده‌تر کرده‌اند [۱].

طراحی شبکه زنجیره تامین عبارت است از تعیین مکان و تعداد تسهیلات موجود در شبکه، موجودی هر تسهیل و کمیت جریان ارسال بین آن‌ها. هدف از طراحی زنجیره تامین علاوه بر مکان‌یابی تسهیلات، حداقل کردن هزینه‌هایی مانند خرید، تولید، حمل و نقل و... نیز می‌باشد. طراحی مناسب شبکه زنجیره تامین منجر به تعیین ساختاری بهینه می‌شود که این امر مدیریت موثر و رقابتی زنجیره تامین را امکان‌پذیر می‌نماید. یکی از زمینه‌های مهم در طراحی شبکه‌های لجستیک، طراحی یکپارچه شبکه زنجیره تامین مستقیم و معکوس است. به دلیل توجه روز افزون به عوامل محیطی، قانونی، اجتماعی و اقتصادی، موضوعات لجستیک معکوس و زنجیره تامین

\* (Corresponding author) arminj@iust.ac.ir

گردد. آن‌ها جریان‌های مستقیم و معکوس را با هم در نظر گرفتند. فرمول‌بندی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط که شامل توسعه مسئله سنتی مکان‌یابی انبار می‌باشد را ارائه نمودند [۴].

سالما و همکاران سعی بر آن داشته‌اند تا با رفع ضعف‌های موجود در مقاله فیلیشمن [۴] مدلی کلی‌تر به کمک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته ارائه دهند، اما با وجود در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و محدودیت ظرفیت، همچنان تنوع ظرفیت تسهیلات و تمامی رده‌های زنجیره در نظر گرفته نشده است [۵]. اسکاپارا و همکاران مدلی را برای تعیین بهترین تسهیلات با فرض اینکه شبکه زنجیره تامین منابعی دارد که باید از وقوع اختلال در آنها جلوگیری شود، ارائه کردند [۶]. کمی بعد لیستس مدل برنامه‌ریزی احتمالی بر پایه سناریو را برای طراحی شبکه زنجیره تامین مستقیم/معکوس یکپارچه مطرح کرد. روش تجزیه برای حل مدل در نمونه‌های سایز بزرگ بر اساس رویه شاخه و برش ارائه شده است [۷]. لو و بوستل مسئله مکان‌یابی دو سطحی با سه نوع از تسهیلات که باید در شبکه تولید مجدد مکان‌یابی شوند را در نظر گرفتند. آن‌ها مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط که شامل هر دو جریان مستقیم و معکوس و تعامل آن‌ها در یک زمان می‌باشد را ارائه نمودند. برای حل مدل یک روش بر مبنای تخفیف لاگرانژین ارائه شده و نتایج آن با روش انشعاب و برش مقایسه شده است [۸]. بولات مدل بهینه سازی طراحی شبکه زنجیره تامین جهانی استواری را ارائه کرد که ریسک اختلال در آن یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی شده بوده است. آن‌ها از رویکرد ارزیابی کیفی برای ریسک اختلال نیز در مقاله خود استفاده کردند و برای حل مدل پیشنهادی خود روش ابتکاری مبتنی بر لاگرانژین را توسعه دادند [۹].

پیشوایی و همکاران [۱۰] مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه را که شامل بیشینه کردن پاسخ‌گویی شبکه و کمینه کردن هزینه‌های کل در شبکه زنجیره تامین حلقه بسته که شامل هر دو جریان مستقیم و معکوس می‌باشد ارائه نمودند. جهت حل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه ارائه شده الگوریتم ممتیک توسعه داده شده است. در مقاله پنگ و همکاران هدف اصلی طراحی شبکه‌ای قابل‌اعتماد که در حالت خرابی نیز تا حد ممکن شبیه به حالت نرمال عمل کند، می‌باشد، استفاده از مفهوم P-استواری و استفاده از این معیار برای کاهش ریسک‌های تخریبی نیز از نوآوری‌های مدل ارائه‌شده در این مقاله می‌باشد برای حل مدل ارائه‌شده از روش ژنتیک استفاده شده است [۱۱]. جبارزاده و همکاران مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته را برای تعیین تعداد و مکان تسهیلات، تخصیص بهینه مشتریان به این تسهیلات و جریان بهینه محصول در یک زنجیره تامین ارائه کردند [۱۲]. آزاد و داوود پور نیز در ادامه از رویکرد بهینه سازی استوار برای یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی با در نظر گرفتن ریسک اختلال استفاده کردند. که این مسئله سه سطح مشتریان، توزیع

خرابی‌های زنجیره تامین وقایع برنامه‌ریزی نشده و غیر قابل پیش‌بینی است که جریان نرمال کالاها و مواد را در زنجیره تامین مختل می‌کند و در نتیجه شرکت‌های درون زنجیره تامین را در معرض ریسک‌های مالی و عملیاتی قرار می‌دهد. به عنوان مثال هوای زمستانی بی رحم یک ماهه در اثر بارندگی سنگین که در وسعت زیادی از چین در ژانویه ۲۰۰۸ اتفاق افتاد باعث آشفستگی سیستم حمل و نقل و خرابی تامین‌کنندگان انرژی و غذا شد [۲]. به طور کلی اکثر خرابی‌های زنجیره تامین می‌توانند در سه دسته طبقه‌بندی شوند. ۱- مرتبط با عرضه ۲- مرتبط با تقاضا ۳- ریسک‌های متفرقه. اختلالات تامین هنگامی رخ می‌دهند که تامین‌کننده قادر به برآورده کردن سفارشات در موقع مناسب نباشد. به طور بالقوه این ریسک‌ها می‌توانند موجب مختل شدن تامین محصول و یا سرویسی که زنجیره تامین به مشتریان خود پیشنهاد می‌دهد شوند. اختلالات تقاضا ممکن است به دلیل افت و یا افزایش ناگهانی سفارشات مشتریان باشد. ریسک‌های مربوط به تقاضا می‌توانند به طور بالقوه منجر به مختل شدن عملیات خرده‌فروش شوند و در توانایی برای در دسترس ساختن محصولات برای مشتریان تاثیر بگذارد. ریسک‌های متفرقه ریسک‌هایی هستند که به طور بالقوه بر هزینه انجام کار و تجارت تاثیر می‌گذارند. مانند تغییرات ناگهانی در هزینه‌های خرید، نرخ بهره، نرخ ارز جاری، قوانین ایمنی توسط آژانس‌های دولتی. با توجه به اهمیت بحث اختلالات در تامین‌کنندگان در این مقاله فرض شده است که تامین‌کنندگان موجود در زنجیره تامین حلقه بسته دارای اختلالات جزئی می‌باشند که در صورت بروز اختلال تامین-کننده بخشی از ظرفیت خود را از دست خواهد داد و قادر به پاسخ-گویی به نیازهای مشتریان در زمان مناسب نخواهد بود که در صورت رخداد این اتفاق، کل زنجیره تامین تحت تاثیر قرار خواهد گرفت.

در این مقاله، در بخش اول مقدمه ای در حوزه زنجیره تامین حلقه بسته و ریسک‌های موجود در آن و در بخش دوم مرور ادبیات این حوزه ها بیان شده است. مدل ریاضی مسئله در بخش سوم و روش حل در بخش چهارم ارائه خواهد شد، در بخش پنجم اعتبارسنجی مدل و مثال‌های عددی مختلفی از مسئله و تحلیل حساسیت جواب‌ها بررسی شده و در بخش انتهایی نتیجه گیری و پیشنهادات آتی بیان می‌شود.

## ۲- مرور ادبیات

در این بخش ادبیات پیرامون موضوع مورد بررسی، با تمرکز بر مقالات طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته و مدل‌هایی که برای مواجهه با ریسک توسعه داده شده‌اند آورده شده است. در ارتباط با بحث اختلال در شبکه زنجیره تامین، درزنر برای نخستین بار اختلال را در بحث مکان‌یابی تسهیلات در نظر گرفت [۳]. فیلیشمن و همکاران جز اولین افرادی بودند که به طراحی شبکه‌ی لجستیک به صورت یکپارچه و همزمان پرداختند و نشان دادند که در مقایسه با رویکرد سنتی می‌تواند موجب صرفه جویی قابل توجهی در هزینه‌ها

جمع‌آوری، نقاط تقاضا و محصولات می‌باشد را بررسی نمودند و برای آن یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط که هدف آن کمینه‌نمودن هزینه‌ها است، ارائه کرده‌اند.

مظلومیان و همکاران بهینه‌سازی استوار یک کارخانه تولیدی با در نظر گرفتن رویکرد چابکی در زنجیره تامین را انجام داده‌اند [۲۲]. در این مقاله مدلی برای یک زنجیره تامین چند کالایی، چند دوره‌ای، چندلایه‌ای با توجه به تولید به هنگام سفارش در شرایط وجود عدم قطعیت ارائه شده است. در واقع یک مدل استوار برای حالت یکپارچه تدارک، تولید، توزیع برای محصولات سفارشی بر اساس استراتژی تولید به هنگام سفارش ارائه شده است. روش مقابله با عدم قطعیت در این مقاله استفاده از رویکرد سناریویی می‌باشد که در این حالت با تعیین سناریوهای مختلف و احتمال رخ دادن هر یک از سناریوها درجه‌ای از میزان آگاهی از رخ دادن هر یک از سناریوها بیان می‌شود. رضانی و همکاران [۲۳] کاربرد مجموعه فازی را برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته چند دوره‌ای و چند محصولی نشان می‌دهد. زنجیره تامین ارائه شده شامل سه تابع هدف ماکزیمم کردن سود، کمینه کردن زمان تحویل و بیشینه کردن کیفیت می‌باشد. یک تامین‌کننده ممکن است به دلایلی مختلفی قادر به برآورده کردن سفارشات نباشد، مانند شکست تجهیزات، تسهیلات آسیب دیده، مشکل در تامین مواد اولیه ضروری، جیره‌بندی کردن عرضه خود در میان مشتریان. رضانی و همکاران [۲۳] کاربرد مجموعه فازی را برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته چند دوره‌ای و چند محصولی نشان می‌دهد. زنجیره تامین ارائه شده شامل سه تابع هدف: ماکزیمم کردن سود، کمینه کردن زمان تحویل و بیشینه کردن کیفیت می‌باشد. بقلیان و همکاران عدم قطعیت در قسمت تامین و تقاضا را مورد بررسی قرار داده‌اند، عدم قطعیت در تقاضا به صورت تابع توزیع احتمالی در قسمت تامین‌کننده به صورت احتمال خرابی در هر یک از کارخانه‌ها در نظر گرفته‌شد و مدل‌سازی آن بر اساس مجموعه برش در تئوری قابلیت اطمینان طراحی گردید [۲۴].

ازسیلان و همکاران به مدل‌سازی یکپارچه طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته و توازن خط دمونتاز پرداختند. آنها به طور همزمان تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی درون شبکه زنجیره تامین حلقه بسته را با هدف کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل، خرید، نوسازی و عملیات‌های ایستگاه‌های دمونتاز در نظر گرفتند. برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته غیر خطی نیز برای مدل‌سازی این مسئله به کار گرفته شده است [۲۵]. در ادامه کیوان شکوه و همکاران علاوه بر طراحی یک شبکه زنجیره تامین مستقیم- معکوس رویکرد قیمت‌گذاری پویا را برای محصولات بازگشتی به کار بردند. مدل آن‌ها به صورت چندسطحی، چند محصولی و چند دوره‌ای بوده که در آن محصولات بازگشتی با توجه به سطح کیفیت با هدف حداقل کردن هزینه‌ها دسته‌بندی شده‌اند و برای حل مدل، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه شده است [۲۶]. کی و همکاران مسئله طراحی شبکه

کنندگان و تامین کنندگان را دربر می‌گرفت [۱۳]. پیشوایی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی دو هدفه که سازگار با عدم قطعیت‌ها می‌باشد ارائه نمودند. مدل ارائه شده تصمیمات طراحی شبکه را در هر دو شبکه‌های زنجیره تامین مستقیم و معکوس ادغام می‌کند و همچنین تصمیمات استراتژیک طراحی شبکه و تاکتیکی جریان مواد را با هم ترکیب می‌کند تا از زیر بهینه‌هایی که از طراحی جداگانه این دو بخش ایجاد می‌شود جلوگیری شود. برای حل مدل بهینه‌سازی احتمالی ارائه شده، رویکرد حل فازی با ترکیب کردن تعدادی از رویکردهای حل موثر در ادبیات توسعه داده شده است [۱۴]. هم‌چنین پیشوایی و همکاران [۱۵] مدل بهینه‌سازی استوار را برای مدیریت عدم قطعیت ذاتی در داده‌های ورودی مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارائه دادند. در ابتدا، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط در حالت قطعی برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته توسعه داده شده است. سپس حالت استوار این مدل با استفاده از توسعه‌های اخیر در تئوری بهینه‌سازی استوار ارائه شده است. چن و همکاران مدل طراحی شبکه زنجیره تامین مکان یابی- موجودی را ارائه کردند که بتواند خرابی‌هایی که با احتمالات از پیش تعیین شده رخ می‌دهند را مدیریت کند [۱۶]. اوهانلی و همکاران دو مدل برای طراحی شبکه قابل اطمینان تسهیلات در نظر گرفتند، مسئله حداکثر پوشش مورد انتظار و مسئله P-میان غیر قابل اطمینان. در هر دو مسئله فرض شده است که P تسهیل برای خدمت به یک مجموعه از نقاط مشتری باید مکان‌یابی شوند و این که شکست تسهیلات به طور مستقل با برخی احتمالات شناخته می‌شوند که به مکان وابسته است [۱۷]. وانگ مدلی ریاضی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک اختلال ارائه کرد که در آن استراتژی‌های موجودی اضافی و انعطاف‌پذیری فعالیت‌ها به کار رفته بود [۱۸].

رضانی و همکاران [۱۹] یک طراحی استوار برای مدل شبکه لجستیک حلقه بسته چند سطحی و چند محصولی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند که شامل هر دو جریان رو به جلو و معکوس می‌باشد. از آنجایی که طراحی شبکه لجستیک زمان‌بر و پرهزینه است، یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و نرخ بازگشت با در نظر گرفتن مجموعه متناهی از سناریوها ارائه شده است. برای به دست آوردن جواب بهینه، الگوریتم آزادسازی سناریو به کار رفته است. کیانگ و همکاران نیز یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته را با تصمیم گیرنده‌های متمرکز که شامل تامین‌کنندگان مواد خام، بازار خرده‌فروشان و تولیدکنندگانی که محصولات بازیافتی را مستقیماً از بازار تقاضا جمع‌آوری می‌کنند مورد تحقیق قرار داده‌اند [۲۰]. ارائه یک مدل چند هدفه برای شبکه زنجیره تامین حلقه بسته از دیگر تلاش‌های محققین این حوزه بوده است که توسط حسن‌زاده امین و همکاران [۲۱] انجام شده است. آن‌ها یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته که شامل کارخانه‌ها، مراکز

دمیرل و همکاران [۳۳] یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط چند دوره‌ای را برای یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارائه نمودند. آن‌ها در این مدل دو سیاست کلی را به دنبال داشتند؛ یکی قیمت‌گذاری بازار ثانویه و دیگری سیاست‌های تشویقی. جهت حل مدل در اندازه واقعی الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده است. در این مدل تقاضا قطعی بوده و کمبود مجاز نمی‌باشد. همچنین ظرفیت تمام تسهیلات محدود می‌باشد.

همچنین هاتفی و همکاران مدلی را برای طراحی شبکه زنجیره تامین یکپارچه ارائه دادند که در آن از مفاهیم قابلیت اطمینان جهت بررسی خرابی‌های تسهیلات استفاده شده است. در این مقاله قسمتی از تقاضا توسط ظرفیت باقی مانده و قسمتی از آن با استفاده از استراتژی اشتراک تامین می‌شود. مدل به صورت تک محصولی و چند سطحی بوده و مراکز تولید و بازیافت و مراکز توزیع و جمع‌آوری به صورت ترکیبی در نظر گرفته شده‌اند [۳۴]. حسنی و همکاران شش استراتژی تاب آوری را مطالعه کردند و از مدل غیرخطی عددصحيح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تامین جهانی استوار تحت عدم قطعیت استفاده کردند [۳۵]. اسمیت و همکاران مدلی را برای مقایسه تاثیر اختلال و عدم قطعیت بر روی عملکرد زنجیره تامینی متمرکز و دوسطحی با زنجیره ای غیرمتمرکز، ارائه کردند و نتیجه گرفتند که زنجیره متمرکز عملکرد بهتری داشته است [۳۶]. از طرفی خسروجردی و همکاران نیز از رویکرد بهینه سازی استوار برای مدل برنامه ریزی غیرخطی عددصحيح- مختلط در حالت وقوع خرابی‌های تصادفی در یک شبکه تامین، استفاده کردند [۳۷].

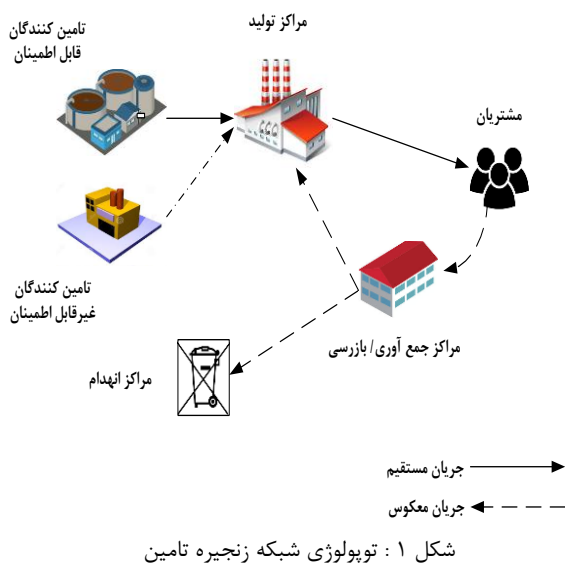
با توجه به بررسی مقالات موجود در حوزه زنجیره تامین حلقه بسته، می‌توان پی برد که بحث ریسک و اختلال تامین در زنجیره تامین حلقه بسته به ندرت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. همچنین اکثر مقالات جریان کالا را به صورت تک محصولی دیده‌اند که این محصول شامل واحدهای مجزا نمی‌باشد اما در این مقاله فرض شده است محصول از چندین واحد شامل واحدهای قابل بازیافت و غیر قابل بازیافت تشکیل شده است و زنجیره تامین حلقه بسته برای تمامی واحدها در نظر گرفته شده است. واحدهای غیر قابل بازیافت بعد از جمع‌آوری از مشتریان مستقیماً به سمت مرکز انهدام برده می‌شوند و واحدهای قابل بازیافت در صورت سالم بودن، به مرکز تولید بازمی‌گردند و در غیر این صورت به مرکز انهدام منتقل می‌شوند. علاوه بر این در تعداد معدودی از تحقیقات مرتبط با اختلال در طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته از مفهوم تاب‌آوری استفاده شده است به همین علت در این مقاله زنجیره ی تامین حلقه بسته ای در نظر گرفته شده است که برخی سطوح زنجیره در اثر بلایای طبیعی یا مخاطرات دیگر مختل می‌شوند و برای حل این مشکل از روش منبع یابی ریسک اختلال برای ارائه ی زنجیره تامینی منعطف استفاده شده است.

زنجیره تامین یکپارچه را برای تعیین مکان خرده‌فروشان و تخصیص مشتریان به آن‌ها، برای کمینه کردن هزینه‌های مکان‌یابی، حمل و نقل و موجودی مطالعه کردند که سیستم مورد نظر نویسندگان، تک دوره‌ای و تک محصولی بوده و ممکن است دچار اختلالات در تامین کننده و خرده‌فروش شود [۲۷]. هم‌چنین وحدانی و همکاران [۲۸] یک مدل برای طراحی شبکه قابل اطمینان از تسهیلات در یک زنجیره تامین حلقه بسته تحت عدم قطعیت ارائه کردند. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه توسعه داده شده است که هزینه کل و هزینه‌های حمل و نقل انتظاری بعد از شکست تسهیلات در شبکه لجستیک را کمینه می‌کند. برای حل مدل، روش حل ترکیبی معرفی شده است که شامل رویکرد بهینه‌سازی استوار و تئوری صف و برنامه‌ریزی چند هدفه فازی می‌باشد. یادگاری و همکاران [۲۹] یک مدل لجستیکی مستقیم/معکوس یکپارچه با در نظر گرفتن سه نوع حالت حمل در نظر گرفتند و از الگوریتم ممتیک برای حل مدل پیشنهادی استفاده کردند.

سیر در نظر گرفتن اختلالات در اجزای زنجیره تامین ابتدا با در نظر گرفتن خرابی تسهیلات زنجیره تامین شروع شد و تا سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ محققان بیش‌تر بر اختلالات را مؤثر بر عملکرد تسهیلات می‌دانستند ولی به‌تدریج اختلالات در مسیرهای ارتباطی و حمل‌ونقل نیز در مقالات موردبررسی واقع شد. آریانزاد و همکاران به طراحی شبکه زنجیره تامین که در آن مراکز توزیع دچار اختلال می‌شوند پرداختند. مدل به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی جهت کمینه کردن کل هزینه‌ها که شامل هزینه‌های مکان‌یابی، موجودی، حمل و نقل و فروش از دست رفته می‌شود، مدل شده است. برای حل مدل رویکرد حل کارا مبتنی بر الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده است [۳۰]. اسماعیلی‌کیا و همکاران رویکرد-های جدید برای انعطاف‌پذیری در زنجیره تامین برای مقابله با ریسک‌های عملیاتی ارائه داده‌اند. آنها با استفاده از رویکرد انعطاف-پذیری و حل مشکل برنامه‌ریزی میانی با توجه به رویکرد انعطاف-پذیری به مقابله با ریسک اختلال پرداختند. در این مقاله یک زنجیره تامین شامل تامین‌کنندگان و کارخانه‌های تولیدی، مراکز توزیع و مشتری‌های نهایی در نظر گرفته شده است و برای حل مدل ارائه شده از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده شده است [۳۱]. آزاد و همکاران در مقاله‌ای دیگر خرابی در مرکز توزیع را به‌صورت ناقص در نظر گرفته‌اند. میزان خرابی در مراکز توزیع باید توسط مراکز که دچار خرابی نشده‌اند جبران شود همچنین میزان خرابی به سرمایه-گذاری اولیه مربوط می‌باشد. در این مقاله ریسک‌های مربوط به خرابی مراکز توزیع و همچنین مسیرهای حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده به دنبال تعیین بهینه مکان مراکز توزیع همچنین بهترین برنامه برای تخصیص مشتری‌ها به هر مرکز توزیع احداث شده می‌باشد [۳۲].

به مشتریان خود سرویس‌دهی کنند که این اختلال از نوع اختلالات جزئی بوده که تامین‌کننده به طور کل از بین نمی‌رود بلکه ظرفیت آن کاهش می‌یابد.

به همین علت برای پوشش شکاف ادبیاتی و نیز حل نمودن مشکلات اشاره شده، در این مقاله با در نظر گرفتن چندین استراتژی انعطاف‌پذیری از قبیل نگه داری موجودی و همچنین افزایش ظرفیت، مفهوم تاب آوری در طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته به کار برده شده است.



پارامترها و متغیرهای مسئله نیز به صورت زیر تعریف شده اند؛

#### اندیس‌ها

$h$	اندیس تمامی تامین‌کنندگان
$i'$	اندیس تامین‌کنندگان قابل اطمینان
$i$	اندیس تامین‌کنندگان غیر قابل اطمینان
$j$	اندیس مراکز تولید
$l$	اندیس مراکز جمع‌آوری و دمونتاژ
$k$	اندیس مشتریان
$n$	اندیس واحد های غیر قابل بازیافت
$m$	اندیس واحد های قابل بازیافت
$s$	اندیس سناریوها
$t$	اندیس دوره های زمانی
$q$	اندیس کیفیت محصول نهایی

#### پارامترها

$\pi_s$	احتمال هر سناریو
$a_{ijm}$	هزینه حمل و نقل از تامین‌کننده $i$ به مرکز تولید $j$ به ازاء هر واحد قابل بازیافت نوع $m$
$\bar{a}_{ijn}$	هزینه حمل و نقل از تامین‌کننده $i$ به مرکز تولید $j$ به ازاء هر واحد غیر قابل بازیافت نوع $n$
$b_{jk}$	هزینه حمل و نقل از مرکز تولید $j$ به مشتری $k$ به ازاء هر محصول

### ۳- تعریف مسئله، مفروضات و نمادها

در این مقاله یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در نظر گرفته شده است که شامل تامین‌کنندگان، مراکز تولید، جمع‌آوری، انهدام و مشتریان می‌باشد. ساختار شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در شکل (۱) آورده شده است. در شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پیشنهادی، تعیین مکان مراکز تولید و بازرسی با توجه به مشتریان و بهترین جریان ممکن در شبکه از اهمیت بسیاری برخوردار است به قسمی که هزینه های کل موجودی، مکان یابی و حمل و نقل کمینه شده و علاوه بر این برای مقابله با اختلالات احتمالی، مفهوم استراتژی تاب آوری نیز به کار برود تا زنجیره از انعطاف بیشتری برخوردار باشد. برای ساختار ارائه شده فرض بر این است که مواد اولیه از تامین‌کننده‌گان به مراکز تولید منتقل شده و با در نظر گرفتن زمان‌های عملیات و زمان‌های راه اندازی پس از مونتاژ با یکدیگر و ساخت محصول نهایی، با توجه به تقاضای مشتریان به دست آن‌ها می‌رسند. سپس محصولات بازگشتی از مشتریان به مراکز جمع‌آوری فرستاده شده و در این مراکز، محصولات دمونتاژ شده و به واحد های قابل بازیافت و غیر قابل بازیافت مجزا می‌شوند که این عملیات نیز دارای زمان های مخصوص به خود هستند. واحدهای قابل بازیافت در صورت قابل استفاده بودن به مراکز تولید باز گردیده و مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرند و در غیر این صورت به همراه واحدهای غیر قابل بازیافت به مرکز انهدام فرستاده می‌شوند. مدل به صورت چند-دوره‌ای و تک محصولی بوده و تمامی محصولات بازگشتی از مشتریان باید به مراکز جمع‌آوری منتقل شوند.

در این مقاله با توجه به تفاوت ذاتی مواد تامینی که از زنجیره برگشت و تامین‌کنندگان و پس از بازرسی توزیع‌کنندگان وارد خط تولید می‌شوند و نیز همچنین به علت متفاوت بودن دستگاه های خطوط تولید با یکدیگر، کیفیت محصولات نهایی با یکدیگر متفاوت و بسیار با اهمیت می‌باشد. علاوه بر این، تقاضای مشتریان بر اساس کیفیت های متفاوت می‌باشد بدین معنی که سیستم تولید باید به نحوی عمل نماید که به تمامی نیازهای مشتریان برای کیفیت های مختلف پاسخ داده شود و چون برای تولید هر قطعه با کیفیت های متنوع هزینه های تولید متفاوتی برای آن در نظر گرفته شده است می‌بایست مهندسی کیفیت هنگام تولید به نحوی صورت پذیرد که حداکثر تقاضای مشتریان را با حداقل هزینه و با کیفیت مناسب برآورده نماید. در نتیجه سعی شده با در نظر گرفتن مقیاس های مناسب بهینه سازی، از مفهوم کیفیت و کاربرد آن در کارایی زنجیره به درستی در راستای بهبود کارایی زنجیره استفاده شود.

هدف این مسئله تعیین مکان مراکز تولید و جمع‌آوری و همچنین میزان جریان بین تسهیلات می‌باشد. در این مسئله فرض شده است که تامین‌کننده به دلایل بلایای طبیعی مختلف و یا حوادث ساخته دست انسان ممکن است دچار اختلال شوند و نتواند در زمان مناسب

مقدار واحد غیرقابل بازیافت نوع  $n$  حمل شده در دوره  $t$  از تامین کننده  $i$  به مرکز تولید  $j$  در سناریو  $S$

مقدار واحد قابل بازیافت نوع  $m$  حمل شده در دوره  $t$  از تامین کننده قابل اطمینان  $i$  به مرکز تولید  $j$  در سناریو  $S$

مقدار واحد غیر قابل بازیافت نوع  $n$  حمل شده در دوره  $t$  از تامین کننده قابل اطمینان  $i$  به مرکز تولید  $j$  در سناریو  $S$

مقدار محصول حمل شده نوع  $q$  از مرکز تولید  $j$  به مشتری  $k$  در سناریو  $S$  در دوره  $t$

مقدار محصول حمل شده از مشتری  $k$  به مرکز جمع آوری  $l$  در سناریو  $S$  در دوره  $t$

مقدار واحد غیر قابل بازیافت نوع  $n$  حمل شده از جمع آوری  $l$  به مرکز انهدام در سناریو  $S$  در دوره  $t$

مقدار واحد قابل بازیافت نوع  $m$  حمل شده از جمع آوری  $l$  به مرکز تولید  $j$  در سناریو  $S$  در دوره  $t$

مقدار واحد قابل بازیافت نوع  $m$  موجود در مرکز جمع آوری  $l$  در سناریو در دوره  $t$

مقدار واحد قابل بازیافت نوع  $m$  حمل شده از جمع آوری  $l$  به مرکز انهدام در سناریو  $S$  در دوره  $t$

مقدار تقاضای برآورده نشده مشتری  $k$  تحت سناریو  $S$  در دوره  $t$

موجودی واحد قابل بازیافت نوع  $m$  در مرکز تولید در سناریو  $S$  در دوره  $t$

موجودی واحد غیر قابل بازیافت نوع  $n$  در مرکز تولید  $j$  انهدام در سناریو  $S$  در دوره  $t$

موجودی در مرکز جمع آوری  $l$  در سناریو  $S$  در دوره  $t$

نهایتاً مدل به فرم زیر خواهد بود:

$$\min z = \sum_j e_j Op_j + \sum_l f_l Oc_l + \sum_s \pi_s \times$$

$$\left( \sum_i \sum_j \sum_m \sum_t a_{ijm} (x_{ijmt}^s) + \sum_i \sum_j \sum_n \sum_t \bar{a}_{ijn} \bar{x}_{ijnt}^s + \sum_{i'} \sum_t \sum_m hcon_{i'm} ctr_{i'm}^s + \sum_{i'} \sum_t \sum_n hcon_{i'nt} ctr_{i'nt}^s + \sum_{i'} \sum_j \sum_m \sum_t a_{i'jm} xr_{i'jmt}^s + \sum_{i'} \sum_j \sum_n \sum_t \bar{a}_{i'jn} \bar{x}r_{i'jnt}^s + \sum_j \sum_k \sum_i \sum_q (b_{jk} + u_j) y_{jkqt}^s \right) \quad (1)$$

هزینه حمل و نقل از مشتری  $k$  به مرکز جمع آوری  $l$  به ازاء هر محصول  $c_{kl}$

هزینه قرارداد با تامین کننده قابل اطمینان  $i'$  در دوره برای تامین واحد قابل بازیافت نوع  $m$   $hcon_{i'm}$

هزینه قرارداد با تامین کننده قابل اطمینان  $i'$  در دوره برای تامین واحد غیر قابل بازیافت نوع  $n$   $\overline{hcon}_{i'n}$

هزینه ثابت بازگشایی مرکز تولید  $j$   $e_j$

هزینه ثابت بازگشایی مرکز جمع آوری  $l$   $f_l$

هزینه دمونتاژ در مرکز دمونتاژ  $g_l$

هزینه مونتاژ در مرکز تولید  $j$  برای محصول نهایی با کیفیت  $q$   $u_{jq}$

ظرفیت مرکز تولید  $j$   $cap_j$

ظرفیت مرکز جمع آوری  $l$   $cap_l$

ظرفیت تامین کننده  $i$   $ca_i$

تقاضای مشتری  $k$  برای محصول نهایی با کیفیت  $q$   $d_{kq}$

نرخ بازگشت محصولات از مشتری  $k$   $r_k$

متوسط کسر انهدام واحد های قابل بازیافت در هر مرکز جمع آوری  $\gamma$

نرخ بازگشت سرمایه در دوره  $t$   $ROR_t$

برابر ۱ اگر تامین کننده  $i$  در سناریو  $S$  در دوره  $t$  مختل شود و در غیر این صورت صفر  $\lambda_{it}^s$

اگر برابر یک باشد اختلال کامل، اگر صفر باشد بدون اختلال و بین بازه  $[0, 1]$  اختلال جزئی  $\delta_i^s$

میزان استفاده از هر واحد قابل بازیافت نوع  $m$  در هر محصول  $\alpha_m$

میزان استفاده از هر واحد غیر قابل بازیافت نوع  $n$  در هر محصول  $\beta_n$

جریمه هر واحد تقاضای برآورده نشده برای مشتری  $k$   $\rho_k$

هزینه نگهداری کالاهای مورد نیاز برای مونتاژ در مرکز تولیدی  $j$   $ho_j$

هزینه نگهداری هر واحد قابل بازیافت در مرکز جمع آوری  $l$   $\overline{ho}_l$

**متغیرهای تصمیم**

برابر ۱ اگر در مکان  $j$  مرکز تولید استقرار یابد و در غیر این صورت صفر  $op_j$

برابر ۱ اگر در مکان  $l$  مرکز جمع آوری استقرار یابد و در غیر این صورت صفر  $oc_l$

برابر ۱ اگر حداقل تعداد قرار داد با تامین کننده قابل اطمینان  $i'$  برای تامین محصول قابل بازیافت نوع  $m$  تحت سناریو  $S$  در دوره  $t$  بسته شود و در غیر این صورت صفر  $yy_{i'mts}$

برابر ۱ اگر حداقل تعداد قرار داد با تامین کننده قابل اطمینان  $i'$  برای تامین محصول غیر قابل بازیافت نوع  $n$  تحت سناریو  $S$  در دوره  $t$  بسته شود و در غیر این صورت صفر  $\overline{yy}_{i'nmts}$

برابر ۱ اگر در دوره  $t$  در سناریو  $S$  با تامین کننده قابل اطمینان  $i'$  برای تامین واحد قابل بازیافت  $m$  قرارداد بسته شود در غیر این صورت صفر  $ctr_{i'mt}^s$

برابر ۱ اگر در دوره  $t$  در سناریو  $S$  با تامین کننده قابل اطمینان  $i'$  برای تامین واحد غیر قابل بازیافت  $n$  قرارداد بسته شود در غیر این صورت صفر  $\overline{ctr}_{i'nt}^s$

مقدار واحد قابل بازیافت نوع  $m$  حمل شده در دوره  $t$  از تامین کننده  $i$  به مرکز تولید  $j$  در سناریو  $S$   $x_{ijmt}^s$

$$\overline{In}_{jnt}^s = \overline{In}_{jnt-1}^s + \sum_{i \in I} \sum_n x_{ijnt}^s + \sum_{i' \in I} \sum_n \overline{xr}_{ijnt}^s - \beta \sum_k \sum_q y_{jkqt}^s \quad (11)$$

( $\forall j \in J, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall n \in N$ )

$$\overline{\overline{In}}_l^s = \overline{\overline{In}}_{lt-1}^s + \sum_{k \in K} w_{klt}^s - \sum_j \sum_m \overline{z}_{lmt}^s - \sum_j \sum_n \overline{z}_{lnt}^s \quad (12)$$

( $\forall l \in L, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\overline{In}_{jnt}^s + \overline{In}_{jmt}^s \leq \overline{cap_j op_j} \quad (13)$$

( $\forall j \in J, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\overline{\overline{In}}_l^s \leq \overline{cap_l Oc_l} \quad (14)$$

( $\forall l \in L, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\sum_m \sum_j x_{ijnt}^s \leq \overline{ca_{im}} (1 - \lambda_{it}^s) \quad (15)$$

( $\forall i \in I, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\sum_n \sum_j \overline{x}_{ijnt}^s \leq \overline{ca_{int}} (1 - \lambda_{it}^s) \quad (16)$$

( $\forall i \in I, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\sum_j \overline{xr}_{ijnt}^s \leq \overline{capr_{i'm} yy_{mts}} \quad (17)$$

( $\forall i' \in I, \forall m \in M, \forall t \in T, \forall s \in S$ )

$$\sum_j \overline{xr}_{i'jnt}^s \leq \overline{capr_{i'n} yy_{nts}} \quad (18)$$

( $\forall i' \in I, \forall n \in N, \forall t \in T, \forall s \in S$ )

$$yy_{mts} \leq \frac{\overline{ctr_{imt-1}^s} + \overline{ctr_{imt-2}^s} + \overline{ctr_{imt-3}^s} + \overline{ctr_{imt-4}^s}}{2} \quad (19)$$

( $\forall i' \in I, \forall m \in M, \forall t \in T, \forall s \in S$ )

$$yy_{nts} \leq \frac{\overline{ctr_{i'nt-1}^s} + \overline{ctr_{i'nt-2}^s} + \overline{ctr_{i'nt-3}^s} + \overline{ctr_{i'nt-4}^s}}{2} \quad (20)$$

( $\forall i' \in I, \forall n \in N, \forall t \in T, \forall s \in S$ )

$$Op_j, Oc_l, yy_{i'hus}, \overline{yy_{i'hus}}, \overline{ctr_{i'ht}^s}, \overline{ctr_{i'ht}^s} \in \{., 1\} \quad (21)$$

$$x_{ijnt}^s, \overline{x}_{ijnt}^s, \overline{xr}_{ijnt}^s, \overline{xr}_{ijnt}^s, y_{jkqt}^s, w_{klt}^s, z_{lnt}^s \geq 0 \quad (22)$$

$$\overline{z}_{lmt}^s, z_{lmt}^s, \overline{\overline{z}}_{lmt}^s, ls_{kt}^s, \overline{In}_{jnt}^s, \overline{In}_{jnt}^s, \overline{In}_{lt}^s \geq 0$$

( $\forall i \in I, \forall n \in N, \forall j \in J, \forall q \in Q$ )

( $\forall m \in M, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall s \in S$ )

$$\left( \begin{aligned} & \sum_k \sum_l \sum_t (c_{kl} + g_l) w_{klt}^s + \\ & \sum_l \sum_j \sum_m \sum_t o_{ljm} \overline{z}_{lmt}^s + \\ & \sum_l \sum_n \sum_m \sum_t \overline{o}_{ln} (z_{lnt}^s + \overline{\overline{z}}_{lmt}^s) + \\ & \sum_k \sum_t \rho_k ls_{kt}^s + \\ & \sum_j \sum_m \sum_n \sum_t ho_j (In_{jnt}^s + \overline{In}_{jnt}^s) + \\ & + \sum_l \sum_m \sum_t \overline{ho}_l \overline{\overline{In}}_{lt}^s \end{aligned} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_m \sum_k w_{klt}^s = z_{lmt}^s \quad (3)$$

( $\forall l \in L, \forall m \in M, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\beta_n \sum_k w_{klt}^s = z_{lnt}^s \quad (4)$$

( $\forall l \in L, \forall n \in N, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\gamma z_{lmt}^s = \overline{\overline{z}}_{lmt}^s \quad (5)$$

( $\forall l \in L, \forall m \in M, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$(1-\gamma) z_{lmt}^s = \sum_j \overline{z}_{lmt}^s \quad (6)$$

( $\forall l \in L, \forall m \in M, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\sum_j y_{jkqt}^s + ls_{kt}^s \geq d_{kt} \quad (7)$$

( $\forall k \in K, \forall q \in Q, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\sum_{l \in L} w_{klt}^s = r_k \sum_j \sum_q y_{jkqt}^s \quad (8)$$

( $\forall k \in K, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\min \left( \begin{aligned} & \frac{1}{\alpha} \left( \sum_i \sum_m x_{ijnt}^s + \sum_{i'} \sum_m \overline{xr}_{ijnt}^s + \sum_l \sum_m \overline{z}_{lmt}^s \right) \\ & , \frac{1}{\beta} \left( \sum_i \sum_n \overline{x}_{ijnt}^s + \sum_{i'} \sum_n \overline{\overline{xr}}_{ijnt}^s \right) \end{aligned} \right) = \sum_k \sum_q y_{jkqt}^s \quad (9)$$

( $\forall j \in J, \forall s \in S, \forall t \in T$ )

$$\overline{In}_{jnt}^s = \overline{In}_{jnt-1}^s + \sum_{i \in I} \sum_m x_{ijnt}^s + \sum_{i' \in I} \sum_m \overline{xr}_{ijnt}^s + \sum_l \sum_m \overline{z}_{lmt}^s - \alpha \sum_k \sum_q y_{jkqt}^s \quad (10)$$

( $\forall j \in J, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall m \in M$ )

محدودیت های (۱۹) و (۲۰) به منظور در نظر گرفتن استراتژی انعطاف پذیری می باشد که بیان می کند که در صورتی می توان از تأمین کنندگان قابل اطمینان، کالا درخواست داد که حداقل در دوره قبلی با آن ها قرارداد بسته باشیم و هزینه ای را پرداخت کرده باشیم. عدد دو در مخرج کسر بیانگر این موضوع است که حداقل باید در دو دوره قبلی با تأمین کنندگانی که در زمان اختلال می خواهیم از آن ها کالا دریافت کنیم قرار داد بسته باشیم. محدودیت های باقی مانده بیانگر علامت متغیرها و نوع آن ها می باشد.

#### ۴- نتایج محاسباتی

برای ارزیابی میزان عملکرد مدل پیشنهادی، یک مسئله محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته و مدل مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج مرتبط با آن در این بخش ارائه شده است. حل مدل ریاضی ارائه شده از روش  $24,3/CPLEX$  نرم افزار GAMS استفاده شده است. مدل به کمک داده های تصادفی حل شده و بر روی آن تحلیل حساسیت انجام شد که گزارش آن در قسمت زیر گزارش شده است.

با توجه به آزمایش های عددی برای مسئله پیشنهادی، ۵ نمونه در اندازه های مختلف تولید شده است که در جدول (۱) ارائه شده است.

ستون دوم آن مربوط به تعداد اعضا مجموعه های مقابل است  $(h, i', i, j, l, k, n, m, s, t, q)$  که در مدل نیز آورده شده است. برای مثال مقدار  $(5, 2, 3, 2, 4, 3, 2, 3, 5, 4, 3)$  بیانگر مسئله ای با ۵ تأمین کننده شامل ۲ تأمین کننده قابل اطمینان و ۳ تأمین کننده غیرقابل اطمینان، ۲ مرکز تولید، ۴ مرکز جمع آوری و ۵ دمونتاز، ۳ مشتری، ۲ واحد غیرقابل باز یافت، ۳ واحد قابل باز یافت، ۵ سناریو و ۴ دوره زمانی با ۳ نوع کیفیت محصول است. مدل به کمک داده های تصادفی حل شده و تحلیل حساسیت بر روی آن انجام شده است.

تابع (۱) و (۲) نشان دهنده کمینه کردن هزینه ها می باشد که به ترتیب نشان دهنده هزینه های ثابت بازگشایی مراکز تولید و جمع آوری و هزینه حمل و نقل واحدهای قابل باز یافت از تأمین کننده به مرکز تولید می باشد. قسمت های بعدی شامل هزینه های عقد قرارداد با تأمین کنندگان قابل اطمینان، هزینه حمل و نقل واحدهای غیر قابل باز یافت از تأمین کننده به مرکز تولید، هزینه مونتاژ در مرکز تولید و هزینه حمل محصولات از مرکز تولید به مشتریان، هزینه های بازگرداندن محصولات از مشتریان به مراکز جمع آوری و سپس به مراکز انهدام و تولید، هزینه های جریمه تقاضاها و در پایان هزینه های نگهداری موجودی در نظر گرفته شده است.

محدودیت (۳) نشان دهنده میزان محصولات قابل باز یافت موجود در مرکز جمع آوری می باشد. محدودیت (۴) نشان دهنده میزان محصولات غیر قابل باز یافت موجود در مرکز جمع آوری می باشد. محدودیت شماره (۵) نشان دهنده میزانی از محصولات بازگشتی است که غیر قابل باز یافت بوده و از مرکز جمع آوری به مرکز انهدام منتقل می شود. محدودیت شماره (۶) میزانی از محصولات بازگشتی از سمت مشتریان می باشد که قابل باز یافت بوده و از مرکز جمع آوری به مرکز تولید باز می گردند. محدودیت شماره (۷) محدودیت بر آورده شده تقاضاها می باشد. محدودیت (۸) میزان محصولات بازگشتی است. محدودیت شماره (۹) نشان دهنده محاسبه مقدار تولید در مراکز تولیدی می باشد.

محدودیت های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) بیانگر محدودیت های تعادل موجودی در مراکز تولید و توزیع برای کالاهای قابل باز یافت و غیر قابل باز یافت می باشد. محدودیت های (۱۳) و (۱۴) بیانگر ظرفیت مراکز توزیع و تولیدی می باشد. محدودیت (۱۵) نشان می دهد میزان کالای حمل شده با توجه به اختلال به وجود آمده در آن تسهیل، کمتر از میزان ظرفیت موجود می باشد. محدودیت (۱۶) بیانگر عامل اختلال در تأمین مواد اولیه توسط تأمین کنندگان می باشد. محدودیت های (۱۷) و (۱۸) بیانگر ظرفیت تأمین مواد اولیه توسط تأمین کنندگان قابل اطمینان برای محصولات قابل باز یافت و غیر قابل باز یافت می باشد.

جدول ۱: آزمایش های عددی

تعداد نمونه	اندازه نمونه	هزینه (میلیون ریال)	زمان حل (ثانیه)	مقدار بهینه متغیرهای تصمیم صفر و یک
۱	(۲, ۲, ۳, ۲, ۴, ۳, ۳, ۲, ۳, ۳, ۳)	۵۸/۸۱	۶۶۰/۷۲	$op_j = [0, 1], oc_l = [1, 0, 1]$
۲	(۵, ۵, ۳, ۵, ۴, ۳, ۵, ۳, ۵, ۴, ۳)	۶۴/۵۳۴	۱۳۸۸/۹۷	$op_j = [1, 0, 1, 0], oc_l = [0, 1, 1, 0]$
۳	(۷, ۵, ۴, ۵, ۵, ۵, ۷, ۳, ۱۰, ۷, ۳)	۹۸/۰۵۲۶۳	۱۹۹۴/۸۳	$op_j = [1, 1, 0, 1, 0], oc_l = [1, 0, 1, 0, 1]$
۴	(۹, ۶, ۷, ۵, ۷, ۵, ۹, ۳, ۱۲, ۱۰, ۳)	۱۲۵/۰۲۳۰۳	۲۵۴۲/۵۷	$op_j = [0, 1, 1, 1, 0], oc_l = [1, 0, 1, 1, 1, 0]$
۵	(۱۰, ۶, ۱۰, ۷, ۹, ۵, ۹, ۷, ۱۵, ۱۲, ۳)	۱۳۹/۵۳۲۰۰	۳۱۹۲/۴۹	$op_j = [0, 1, 0, 1, 0, 1], oc_l = [1, 0, 1, 0, 1, 1, 1]$



## ۴-۱ اعتبارسنجی مدل

$|Q| = 3$  به دست آمده است. همان طور که در جدول (۲) قابل ملاحظه است، برای آزمون میزان صحت و دقت مدل بر روی پارامتر هزینه های نگهداری تحلیل حساسیت صورت گرفت و همانطور که انتظار می رفت با افزایش هزینه نگهداری در هر انبار مقدار کل موجودی نگهداری شده در تمامی دوره ها کاهش یافته است که صحت مدل ارائه شده را نشان می دهد.

برای اعتبار سنجی و بررسی صحت عملکرد، مدل به کمک داده های تصادفی در نرم افزار GAMS/CPLEX حل شده است. نتایج زیر از طریق حل مدل به ازاء ابعاد  $|H| = 3$ ،  $|I'| = 2$ ،  $|I| = 5$ ،  $|T| = 2$ ،  $|J| = 3$ ،  $|L| = 3$ ،  $|K| = 5$ ،  $|M| = 4$ ،  $|S| = 5$  و  $|T| = 4$

جدول ۲: آزمون اعتبارسنجی بر روی پارامتر هزینه نگهداری

آزمایش	هزینه نگهداری (به ازاء هر واحد محصول)	کل موجودی نگهداری شده در هر دوره				کل موجودی نگهداری شده
		۱	۲	۳	۴	
۱	۳۰	۹۸/۷۴	۸۸/۷۸	۹۸/۷۶	۶۹/۶۴۲	۳۵۵/۹۱۷
۲	۳۳	۹۸/۵۳	۷۶/۱۷	۷۴/۳۴	۹۶/۶۱۴	۳۴۵/۶۴۴
۳	۳۶	۷۷/۶۸	۶۴/۶۱	۸۶/۲۲	۹۷/۴۳۱	۳۲۵/۹۳۸
۴	۳۹	۶۶/۶۲	۷۳/۵۴	۷۶/۶	۸۵/۷۱۱	۳۰۲/۴۶۲
۵	۴۲	۸۱/۵۴	۶۷/۲۸	۸۲/۴۷	۵۴/۳۸۶	۲۸۵/۶۷۴
۶	۴۵	۷۳/۴۷	۳۲/۱۹	۵۸/۳۹	۹۷/۲۴۱	۲۶۱/۲۸۷

## ۴-۲ تحلیل حساسیت بر استراتژی تاب آوری

در جدول (۳) هزینه های مدل و تعداد قراردادهای بسته شده با تأمین کنندگان قابل اطمینان قابل مشاهده می باشد.

همان طور که مشاهده می شود با افزایش حداقل قرارداد با توجه به استراتژی انتخابی، هزینه ها افزایش یافته ولی در عین حال تقاضای برآورده نشده کاهش می یابد و هزینه های قرار داد نیز افزایش پیدا می کند. دلیل افزایش هزینه های کلی با شیب کمتر این است که هزینه های عدم ارضای تقاضا نسبت به هزینه های عقد قرارداد با تأمین کنندگان قابل اعتماد بیشتر می باشد.

همان طور که در مدل مشاهده می شود برای استفاده از مفهوم انعطاف پذیری در محدودیت ها فرض شده است که برای آنکه بتوان مواد خام را در زمان اختلال از یک تأمین کننده مهیا کرد باید حداقل در دوره قبل با این تأمین کننده قرار داد بسته شود. حال می توان با تغییر نحوه استراتژی نحوه تأثیر آن بر روی هزینه ها را مورد تحلیل قرار داد. در صورتی که حداقل تعداد قرارداد با تأمین کنندگان برای بهره بردن در مواقع نیاز و اضطراری بیش تر شود تمایل به قرار داد با تأمین کنندگان بیشتر خواهد شد تا جایی که تأثیر عامل بر روی هزینه های کل زنجیره از بین خواهد رفت.

جدول ۳: تحلیل بر استراتژی تاب آوری

میزان تقاضای از دست رفته	کل قراردادهای	کل تعداد قرارداد در سناریوی ۴	کل تعداد قرارداد در سناریوی ۳	کل تعداد قرارداد در سناریوی ۲	کل تعداد قرارداد در سناریوی ۱	هزینه	حداقل تعداد قرار داد
۸۷	۱۶	۵	۴	۳	۴	۲۸۱۰۰۰۰۰	۲
۷۱	۲۴	۷	۶	۵	۶	۳۰۳۰۰۰۰۰	۳
۵۳	۳۱	۸	۸	۶	۹	۳۳۱۰۰۰۰۰	۴
۴۵	۳۶	۱۰	۸	۸	۱۰	۳۶۸۰۰۰۰۰	۵
۳۰	۴۰	۱۱	۸	۹	۱۲	۳۹۲۰۰۰۰۰	۶

## ۳-۴ تحلیل حساسیت بر روی تاثیر اختلال

۱۵ بار به صورت تصادفی ایجاد شده و میانگین و واریانس هزینه های مدل در صورت شدنی بودن گزارش شده است. همان طور که در جدول (۴) مشاهده می شود در تمامی حالات شدنی هزینه های مدل به صورت قابل ملاحظه ای در مقایسه با حالت عدم توجه به اختلالات افزایش داشته است که نشان از اهمیت توجه با این عامل و تأثیر فراوان آن بر روی تصمیمات عملیاتی و میانی دارد.

بدین منظور ابتدا مدل بدون در نظر گرفتن اختلالات حل می-گردد سپس بعد از تعیین تصمیمات استراتژیک مربوط به تعیین مکان های بالقوه احداث مراکز تولیدی و توزیع مشخص می-گردد و پس از تعیین این تصمیمات مدل با در نظر گرفتن اختلالات احتمالی و همچنین مکان های تعیین شده در مرحله قبل اجرا می-شود. بدین منظور پارامترهای مربوط به اختلال جزئی در ده آزمایش بار هر کدام

جدول ۴: تحلیل بر اثر اختلال

ردیف	میانگین افزایش هزینه	واریانس افزایش هزینه	میانگین میزان تقاضای از دست رفته	واریانس تقاضای از دست رفته
۱	۱۴۴۶۴۹	۱۴۸۳	۳۱۲	۶۲
۲	۱۶۰۹۲۲	۱۴۶۳	۲۶۲	۴۹
۳	۱۸۰۳۷۴	۱۵۰۶	۲۷۴	۳۹
۴	۱۴۲۲۹۰	۱۶۰۷	۳۱۸	۴۸
۵	۱۶۵۹۵۳	۱۴۷۷	۳۲۱	۶۲
۶	۱۶۳۱۱۶	۱۴۵۳	۲۷۵	۶۲
۷	۱۶۲۶۳۴	۱۸۰۲	۲۶۲	۵۲
۸	۱۷۱۵۶۳	۱۵۲۸	۳۲۵	۶۰
۹	۱۵۱۵۶۶	۱۶۷۷	۳۰۴	۴۸
۱۰	۱۶۱۷۴۱	۱۷۱۳	۳۰۱	۳۸

های مربوطه حل می-گردد. در جدول (۵) تاثیر استراتژی انعطاف پذیری بر روی هزینه ها در حالت در نظر گرفتن اختلال قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می-شود افزودن استراتژی های مربوط به انعطاف پذیری تأثیر به سزایی در کاهش هزینه ها دارد. نحوه انجام آزمایش ها مانند حالت قبل می-باشد.

## ۴-۴ تحلیل حساسیت بر روی تاثیر در نظر گرفتن استراتژی تاب آوری

در این قسمت مدل با در نظر گرفتن اختلالات بدون استراتژی انعطاف پذیری حل می-شود و سپس مدل با در نظر گرفتن اختلالات ولی با در نظر گرفتن استراتژی انعطاف پذیری و افزودن محدودیت

جدول ۵: تحلیل بر در نظر گرفتن تاب آوری

ردیف	میانگین کاهش هزینه	واریانس کاهش هزینه	میانگین میزان تقاضای از دست رفته	واریانس تقاضای از دست رفته
۱	۸۱۳۸۶	۱۳۰	۸۰	۷
۲	۸۶۹۷۱	۱۳۰	۹۳	۳
۳	۹۳۵۶۹	۱۲۹	۵۱	۷
۴	۹۱۱۹۲	۱۳۶	۷۳	۵
۵	۸۳۷۹۲	۱۲۶	۵۰	۹
۶	۸۱۹۹۹	۱۳۸	۹۸	۱۲
۷	۸۷۵۲۱	۱۲۵	۷۸	۹
۸	۹۷۵۱۶	۱۲۸	۸۰	۵
۹	۹۰۸۰۴	۱۲۹	۵۱	۳
۱۰	۸۶۱۱۸	۱۳۸	۶۱	۱۲

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

خرابی و اختلال در حال حاضر تأثیر فراوانی بر روی عملکرد زنجیره‌های تأمین دارد. این مقاله به بررسی مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در شرایط ریسک تامین پرداخته که هدف آن کمینه کردن هزینه‌های زنجیره با توجه به تصمیمات مکان‌یابی، میزان جریان بین سطوح و فروش از دست رفته بود.

در این مقاله برای اولین بار مفهوم تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در کنار مفهوم اختلال در تأمین ارائه شد و تحلیل‌هایی بر روی مدل پیشنهادی به منظور ارزیابی کارایی مدل صورت پذیرفت. از طرفی با توجه به تفاوت ذاتی مواد تأمینی که از زنجیره برگشت و تامین‌کنندگان و پس از بازرسی توزیع‌کنندگان وارد خط تولید می‌شوند و نیز همچنین به علت متفاوت بودن دستگاه‌های خطوط تولید با یکدیگر، کیفیت محصولات نهایی با یکدیگر متفاوت و بسیار با اهمیت می‌باشد که مفروضات فوق نیز در نظر گرفته شد تا با مقیاس‌های مناسب بهینه‌سازی، کارایی زنجیره مورد نظر بهبود پیدا کند.

در نهایت با تحلیل‌های صورت گرفته بر روی مدل تأثیر اختلال و هم‌چنین در نظر گرفتن استراتژی‌های انعطاف‌پذیری نشان داده شد که با استفاده از مفهوم کیفیت و استراتژی تاب‌آوری می‌توان به عملکرد و میزان پاسخ‌گویی زنجیره به مشتریان بهبود بخشید و انعطاف‌پذیری آن را در هنگام مواجهه با اختلالات افزایش داد. به منظور تحقیقات بیشتر می‌توان ارائه روش‌های حل دقیق برای حل مسأله در ابعاد بزرگ را پیشنهاد داد. همچنین می‌توان مدل پیشنهادی در این مقاله با در نظر گرفتن چندین تصمیم‌گیرنده اصلی در شبکه حلقه بسته و استفاده از مفهوم بازی توسعه داد.

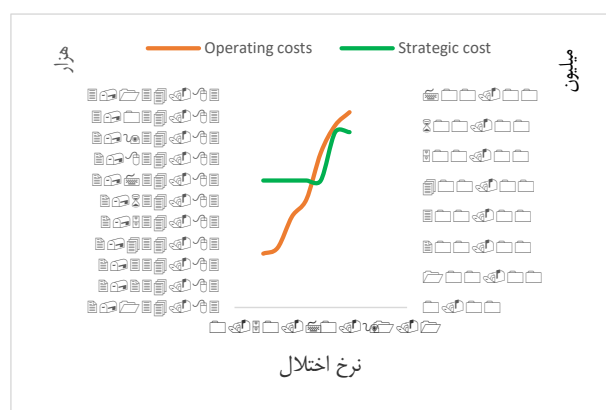
همچنین برای برخورد با عدم قطعیت موجود در زنجیره می‌توان از برنامه‌ریزی استوار استفاده کرد تا مدل پیشنهادی در برابر عدم قطعیت از قدرت بیشتر و انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار باشد.

## مراجع

- [1] Saghafi, M.M., *Optimal pricing to maximize profits and achieve market-share targets for single-product and multiproduct companies*, in *Issues in Pricing: Theory and Research*. 1988, Lexington Books Los Angeles. p. 239-253.
- [2] Li, J., S. Wang, and T.E. Cheng, *Competition and cooperation in a single-retailer two-supplier supply chain with supply disruption*. *International Journal of Production Economics*, 2010. **124**(1): p. 137-150.
- [3] Drezner, Z., *Heuristic solution methods for two location problems with unreliable facilities*. *Journal of the Operational Research Society*, 1987. **38**(6): p. 509-514.

## ۴-۵ تغییرات نرخ اختلال

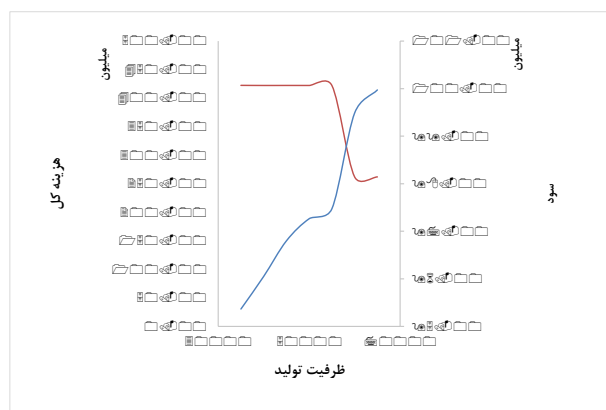
شکل (۲) نشان می‌دهد که وقتی نرخ اختلال در تامین مواد افزایش یابد، هزینه کلی افزایش خواهد یافت. هنگامی که نرخ اختلال افزایش یابد، مراکز تولید با شکست بیشتری مواجه می‌شوند و در نتیجه بخشی از تقاضای مشتریان ارضا نخواهد شد. اگر نرخ اختلال بیشتر از ۰/۸ باشد، هزینه‌های استراتژیکی به علت استقرار تسهیل جدید به طور نمایی افزایش می‌یابد، علاوه بر این وقتی نرخ اختلال افزایش یابد مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد که در شکل (۲) قابل مشاهده است.



شکل ۲: تغییرات هزینه‌های استراتژیکی و عملیاتی با افزایش نرخ اختلال

## ۴-۶ تغییرات ظرفیت تولید

با افزایش ظرفیت تولید در مراکز تولید، هزینه کل کاهش خواهد یافت. لازم به ذکر است که افزایش ظرفیت تولید نیاز به صرف هزینه دارد اما افزایش ظرفیت تولید به علت کاهش تعداد تسهیلات تولیدی موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی و استراتژیکی می‌شود. در نتیجه هزینه کمتر خواهد شد. نتایج فوق در شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل ۳: تغییرات هزینه کل با تغییر در ظرفیت تولید

- [17] O'Hanley, J.R., P. Scaparra, and S. García, *A General Linearization Technique for Modeling Reliability in Facility Location: Applications to Problems with Site-Dependent Failure Probabilities*. 2012.
- [18] Wang, H., *Increasing supply chain robustness through process flexibility and strategic inventory*. 2013, Massachusetts Institute of Technology.
- [19] Ramezani, M., M. Bashiri, and R. Tavakkoli-Moghaddam, *A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **66**(5-8): p. 825-843.
- [20] Qiang, Q., et al., *The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties*. Omega, 2013. **41**(2): p. 186-194.
- [21] Amin, S.H. and G. Zhang, *A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return*. Applied Mathematical Modelling, 2013. **37**(6): p. 4165-4176.
- [22] Lalmazloumian, M., et al., *A robust optimization model for agile and build-to-order supply chain planning under uncertainties*. Annals of Operations Research, 2013: p. 1-36.
- [23] Ramezani, M., et al., *Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment*. Knowledge-Based Systems, 2014. **59**: p. 108-120.
- [24] Baghalian, A., S. Rezapour, and R.Z. Farahani, *Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case*. European Journal of Operational Research, 2013. **227**(1): p. 199-215.
- [25] Özceylan, E., T. Paksoy, and T. Bektaş, *Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014. **61**: p. 142-164.
- [26] Keyvanshokoh, E., et al., *A dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design*. Applied Mathematical Modelling, 2013. **37**(24): p. 10182-10202.
- [27] Qi, L., Z.-J.M. Shen, and L.V. Snyder, *The effect of supply disruptions on supply chain design decisions*. Transportation Science, 2014. **48**(3): p. 274-289.
- [28] Vahdani, B., et al., *Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012. **48**(6): p. 1152-1168.
- [4] Fleischmann, M., et al., *The impact of product recovery on logistics network design*. Production and operations management, 2001. **10**(2): p. 156-173.
- [5] Salema, M.I.G., A.P. Barbosa-Povoa, and A.Q. Novais, *An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty*. European Journal of Operational Research, 2007. **179**(3): p. 1063-1077.
- [6] Church, R. and M.P. Scaparra, *Analysis of facility systems' reliability when subject to attack or a natural disaster*, in *Critical Infrastructure*. 2007, Springer. p. 221-241.
- [7] Listes, O. and R. Dekker, *A stochastic approach to a case study for product recovery network design*. European Journal of Operational Research, 2005. **160**(1): p. 268-287.
- [8] Lu, Z. and N. Bostel, *A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities*. Computers & Operations Research : (۲)۳۴ .۲۰۰۷ ,p. 299-323.
- [9] Bollat, R.C.P., *Resilient global supply chain network design optimization*. 2009, The Pennsylvania State University.
- [10] Pishvae, M.S., R.Z. Farahani, and W. Dullaert, *A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design*. Computers & operations research, 2010. **37**(6): p. 1100-1112.
- [11] Peng, P., et al., *Reliable logistics networks design with facility disruptions*. Transportation Research Part B: Methodological, 2011. **45**(8): p. 1190-1211.
- [12] Jabbarzadeh, A., et al., *Designing a supply chain network under the risk of disruptions*. Mathematical Problems in Engineering, 2012.
- [13] Azad, N. and H. Davoudpour, *Designing a stochastic distribution network model under risk*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **64**(1-4): p. 23-40.
- [14] Pishvae, M.S. and S.A. Torabi, *A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty*. Fuzzy sets and systems, 2010. **161** : (۲۰) p. 2668-2683.
- [15] Pishvae, M.S., M. Rabbani, and S.A. Torabi, *A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty*. Applied Mathematical Modelling, 2011. **35**(2): p. 637-649.
- [16] Chen, Q., X. Li, and Y. Ouyang, *Joint inventory-location problem under the risk of probabilistic facility disruptions*. Transportation Research Part B: Methodological, 2011. **45**(7): p. 991-1003.

- [34] Hatefi, S.M., et al., *A credibility-constrained programming for reliable forward–reverse logistics network design under uncertainty and facility disruptions*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2015. **28**(6): p. 664-678.
- [35] Hasani, A. and A. Khosrojerdi, *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, 2016. **87**: p. ۵۲-۲۰ .
- [36] Schmitt, A.J., et al., *Centralization versus decentralization: Risk pooling, risk diversification, and supply chain disruptions*. Omega, 2015. **52**: p. 201-212.
- [37] Khosrojerdi, A., et al., *A method for designing power supply chain networks accounting for failure scenarios and preventive maintenance*. Engineering Optimization, 2016. **48**(1): p. 154-172.
- [29] Yadegari, E., et al., *A Flexible Integrated Forward/Reverse Logistics Model with Random Path-based Memetic Algorithm*. Iranian Journal of Management Studies, 2015. **8**(2): p. 287.
- [30] Aryanezhad, M.-B., S.G. Jalali, and A. Jabbarzadeh, *An integrated supply chain design model with random disruptions consideration*. African Journal of Business Management, 2010. **4**(12): p. 2393.
- [31] Esmailikia, M., et al., *A tactical supply chain planning model with multiple flexibility options: an empirical evaluation*. Annals of Operations Research, 2014: p. 1-26.
- [32] Azad, N., et al., *Strategies for protecting supply chain networks against facility and transportation disruptions: an improved Benders decomposition approach*. Annals of Operations Research, 2013. **210**(1): p. 125-163.
- [33] Demirel, N., et al., *A genetic algorithm approach for optimising a closed-loop supply chain network with crisp and fuzzy objectives*. International Journal of Production Research, 2014. **52**(12): p. 3637-3664.