

## طراحی پایای شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت عدم قطعیت: مطالعه موردی یک تولیدکننده باتری اسیدی

محمدرضا فضلی خلف<sup>۱</sup>، سید کمال چهارسوقی<sup>۲\*</sup> و میر سامان پیشوایی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> طراحی شبکه زنجیره تامین، پایایی، زنجیره تامین حلقه بسته، برنامه‌ریزی ریاضی فازی</p>	<p>امروزه، نگرانی در مورد وقوع ناگهانی اختلالات و ضررهای بزرگ ناشی از آن، بسیاری از محققین را به طراحی پایای شبکه‌های زنجیره تامین سوق داده است. همچنین، عدم قطعیت ذاتی پارامترهای ورودی، مساله‌ای مهم است که به واسطه اثرات نامطلوب آن بر تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی، باید با دقت فراوان در طراحی شبکه‌های زنجیره تامین مد نظر قرار گیرد. بنابراین، این مقاله، یک مدل جدید برای طراحی پایای شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارائه می‌نماید که در آن یک رویکرد جدید پایایی معرفی گردیده است. مدل پیشنهادی نه تنها مجموع هزینه‌ها را کمینه می‌نماید، بلکه به صورت اثربخش، شبکه‌ای مقاوم تحت اختلالات مختلف را ایجاد می‌نماید. برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها از یک روش کارای برنامه‌ریزی امکانی بهره گرفته شده است. در نهایت، از یک مطالعه موردی صنعتی واقعی به منظور نمایش اثربخشی و کاربردی بودن مدل بهینه‌سازی فازی توسعه داده شده، استفاده شده است.</p>

می‌تواند سبب ایجاد مزیت رقابتی بلند مدت برای سازمان در بین رقبایش گردد [۳ و ۴]. در طول دهه‌های اخیر موضوعی که توجه محققین را به خود جلب نموده است، بحث پسماند محصولات، مزایا و سود ناشی از بازیافت آن‌ها می‌باشد. ذکر این نکته نیز ضروری است که در گذشته زنجیره‌های تامین متمرکز بر تولید محصولات از مواد اولیه و پاسخگویی به نیاز مشتریان بودند [۵]. در صورتی که به واسطه فشار دولت‌ها بر تولیدکنندگان برای بازیافت پسماند محصولات، آگاهی بیشتر جامعه در مورد مسائل زیست محیطی و سود ناشی از بازیافت، این مساله به یک امر مهم تبدیل گردیده است. مجموعه موارد ذکر شده، سبب تمرکز مدیران بر طراحی شبکه‌های زنجیره تامین معکوس<sup>۲</sup> و همچنین حلقه بسته<sup>۳</sup> شده است [۶ و ۷].

### ۱- مقدمه

یکی از مهم ترین اهداف زنجیره‌های تامین<sup>۱</sup> پاسخدهی به نیاز مشتریان با کمترین هزینه و بالاترین کیفیت، در زمان مورد انتظار می‌باشد. گرچه، امروزه به واسطه افزایش رقابت جهانی بین سازمان‌ها، تغییرات ناگهانی بازار و همچنین تغییرات در طراحی محصولات به واسطه نیاز مشتریان، سازمان‌ها با چالش بزرگی مواجه شده‌اند که دستیابی به اهداف ذکر شده را مشکل می‌سازد [۱ و ۲]. بنابراین، طراحی، مدیریت و پیاده‌سازی زنجیره‌های تامین یکپارچه نه تنها می‌تواند مشکل مذکور را رفع نماید، بلکه

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: skch@modares.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی،

دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت

مدرس

۳. استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۱</sup> Supply chain

<sup>۲</sup> Reverse

<sup>۳</sup> Closed-loop

اختلالات طبیعی از طبیعت ناشی می‌گردند مانند سیل، زلزله، آتش‌سوزی و ... . اختلالات انسانی دارای منشا انسانی می‌باشد مثل حملات تروریستی، خطاهای انسانی و ... . در صورتی که در شرایط واقعی، وقوع اختلالات ذکر شده زنجیره‌های تامین را تهدید می‌کنند که البته روش‌های پیش‌گیرانه‌ای نیز برای مقابله با آن‌ها ایجاد شده است [۱۸]. در واقع اختلالات که تعلق به دسته دوم عدم قطعیت‌ها دارند، می‌توانند سبب از بین رفتن تسهیلات، افزایش هزینه حمل‌ونقل و از دست رفتن سهم بازار سازمان‌ها گردند. از این رو، توجه به مساله اختلالات<sup>۵</sup> در طراحی شبکه‌ها، نه تنها می‌تواند سبب اتخاذ تصمیمات قابل اطمینان‌تری گردد، بلکه از ضررهای احتمالی نیز جلوگیری خواهد نمود [۱۹].

با توجه به موارد ذکر شده، طراحی پایای<sup>۶</sup> شبکه‌های زنجیره تامین، که تحت شرایط وقوع اختلالات نیز به صورت کارا فعالیت می‌نمایند، توسط محققین مدنظر قرار گرفته است. نکته‌ای جالب توجه این است که برخلاف اهمیت این مبحث، مواردی وجود دارد که در ادبیات در نظر گرفته نشده‌اند. در صورتی که توجه به آن‌ها می‌تواند مدل و نتایج آن را قابل اطمینان‌تر و به واقعیت نزدیک نماید. این موارد عبارتند از: (۱) فرض مختل شدن تمام ظرفیت تسهیلات به واسطه اختلالات، توسط محققین (برای مثال [۵، ۱۸، ۲۰ و ۲۱])، یک فرض محدودکننده است، در صورتی که در شرایط واقعی اختلالات می‌توانند بخشی از یک تسهیل را نیز از بین ببرند. علاوه بر این، در دنیای امروز، محصولات به‌طور پیوسته در جریان بین سطوح متوالی زنجیره تامین هستند و در حقیقت، اختلالات می‌توانند بخشی و یا کل محصولات موجود در یک تسهیل را از بین ببرند. این موضوع مهم، در ادبیات موجود مدنظر قرار نگرفته است. (۲) در اکثر مدل‌های پیشنهاد شده، تسهیلات دارای ظرفیت نامحدود هستند (برای مثال [۵، ۱۱، ۱۲ و ۲۰]). در صورتی که بحث ظرفیت تسهیلات، امری غیرقابل انکار، علی‌الخصوص در شرایط وقوع اختلالات می‌باشد. (۳) در تمامی مطالعات صورت گرفته در این حوزه، به طراحی مدل‌های چند دوره‌ای توجهی نشده است (برای مثال [۱۸، ۲۰ و ۲۲])، در صورتی که توجه به بحث اختلالات در مدل‌های چند

با توجه به آنچه تشریح گردید، زنجیره‌های تامین به دو دسته مستقیم و معکوس قابل تقسیم‌بندی هستند. زنجیره‌های تامین مستقیم شامل سطوحی متوالی هستند که با افزودن ارزش به مواد اولیه و تبدیل آن به محصول نهایی، نیازهای مشتریان را برطرف می‌نمایند. شبکه‌های معکوس نیز در جمع‌آوری محصولات که عمرشان پایان یافته و بازیافت آن‌ها، به‌منظور دستیابی به مواد اولیه، قطعات و محصولات برای شبکه مستقیم و همچنین کاهش اثرات زیست محیطی پسماندها، سهیم هستند [۸ و ۹]. طراحی هر دو شبکه فوق‌الذکر، شامل تصمیماتی برای تعیین محل، تعداد، سطوح ظرفیت و جریان بین سطوح مختلف زنجیره تامین می‌باشد [۱۰].

از آنجایی که دو شبکه ذکر شده در بعضی از سطوح به یکدیگر وابسته‌اند (برای مثال استفاده مجدد از مواد اولیه بازیافتی در زنجیره مستقیم)، این دو شبکه به شدت روی عملکرد یکدیگر تاثیرگذارند. در نتیجه، بسیاری از محققین به طراحی یک پارچه شبکه‌های مستقیم و معکوس و به عبارتی شبکه‌های حلقه بسته روی آورده‌اند (برای مثال [۵ و ۱۰-۱۳]). این رویکرد، طراحی شبکه‌های مستقیم و معکوس را به‌طور هم‌زمان بهینه می‌نماید و از زیربهبندی<sup>۴</sup> ناشی از طراحی مجزای شبکه‌ها، جلوگیری می‌نماید [۱۴ و ۱۵].

زنجیره‌های تامین به واسطه طبیعت پیچیده‌شان، با حد بالایی از عدم قطعیت رو به رو هستند که می‌تواند کیفیت عملکرد آن‌ها را به‌طور نامطلوبی تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به اهمیت این امر، عدم قطعیت در طراحی زنجیره‌های تامین که افق بلند مدت تصمیم‌گیری نیز سبب تشدید آن می‌گردد، به دو دسته قابل تقسیم می‌باشد. دسته اول، عدم قطعیت مربوط به پارامترها می‌باشد که خود به دو دسته سیستمی و محیطی قابل تقسیم‌بندی است. دسته دوم نیز مربوط به حوادث مخرب غیرمترقبه‌ای می‌باشد که می‌تواند زنجیره‌های تامین را با ضررهای بزرگی مواجه سازد [۱۶ و ۱۷].

بررسی مقالات ارائه شده در حوزه زنجیره تامین نیز نشان می‌دهد که تعداد زیادی از محققین (برای مثال [۵، ۱۳ و ۱۴] را ببینید)، آسیب‌پذیری تسهیلات نسبت به اختلالات طبیعی و ناشی از فعالیت‌های انسانی را نادیده می‌گیرند.

<sup>۵</sup> Disruption

<sup>۶</sup> Reliable

<sup>۴</sup> Sub-optimality

ذکر شده، در کنار یکدیگر، این مقاله را از سایر مقالات موجود در ادبیات متمایز می‌کنند.

ادامه مقاله به صورت زیر ارائه گردیده است. تعریف جامع و مدل سازی مساله بر اساس مطالعه موردی انجام گرفته، به ترتیب در بخش‌های دوم و سوم ارائه شده است. روش برنامه ریزی امکانی در بخش چهارم ارائه گردیده است. در بخش پنجم نیز، مدل پیشنهادی بر اساس داده‌های مستخرج از مطالعه موردی صنعتی، پیاده سازی گردیده و نتایج محاسباتی گزارش شده است. جمع بندی و پیشنهادهای برای مطالعات آینده، در بخش ششم بیان گردیده است.

## ۲- تعریف مساله

مدل ارائه شده در مقاله، مبتنی بر یک مطالعه موردی واقعی صنعتی، در کشور ایران است، لیکن مدل‌های موجود در مقالات پیشوایی و ترابی [۱۳] و وحدانی و همکاران [۱۲] به عنوان مدل‌های مشابه در ادبیات مورد توجه بوده‌اند. این سازمان، تولیدکننده باتری‌های اسیدی برای خودروها می‌باشد. کاربرد این محصول در استارت زدن، روشن کردن و احتراق در خودروها می‌باشد. در حال حاضر، این تولیدکننده بخشی از تقاضای بازار داخلی را توسط تنها کارخانه تولیدی خود، با ظرفیتی در حدود یک میلیون و نهصد هزار باتری در سال، پاسخ می‌دهد. این شرکت دارای یک مرکز بازیافت سرب نیز می‌باشد که دارای ظرفیتی در حدود نهصد هزار باتری در سال است. باتری‌های اسیدی متشکل از آند، کاتد، شبکه‌های فلزی، الکترولیت، پروپیلن و مواد دیگری هستند [۲۳]. بر طبق قرارداد بیسل<sup>۸</sup> که در سال ۱۹۹۲ منعقد شده است، باتری‌هایی که طول عمرشان پایان یافته است به عنوان زباله سمی شناخته می‌شوند. چراکه فلزات سنگین و مواد سمی به کار رفته در تولید این محصول، دارای خاصیت خوردگی، واکنشی و سمی هستند. در نتیجه باتری‌ها می‌توانند برای سلامت انسان و محیط طبیعی مضر باشند [۲۴ و ۲۵]. لازم به ذکر است که سرب مصرفی در تولید باتری‌های اسیدی، از طریق دو منبع تامین می‌گردد. اولین منبع، مربوط به سرب بازیافتی از باتری خودروها و منبع دوم نیز سرب استخراج شده از منابع طبیعی می‌باشد [۲۶]. منبع اول در صنعت باتری مرجح است،

دوره‌ای، سبب اتخاذ تصمیمات استراتژیک کارتری می‌گردد. (۴) استفاده موازی از تسهیلات پایا و غیرپایا، مشارکت با سایر اعضای سازمان و برون سپاری<sup>۷</sup>، بعضی از رویکردهایی هستند که اکثرا برای مقابله با اثرات سوء اختلالات به کار گرفته شده‌اند (برای مثال [۲۰ و ۲۲]) که علاوه بر افزایش هزینه‌ها، وابستگی به رقبا را نیز شدت می‌بخشند. برای مواجهه با مشکل مذکور می‌توان در تسهیلاتی که در معرض اختلالات هستند از مقدار مناسبی از ذخیره اطمینان بهره‌گیری نمود.

با توجه به موارد ذکر شده، هدف این مقاله، ارائه مدلی کارا برای طراحی پایای یک شبکه زنجیره تامین یک پارچه چند دوره‌ای حلقه بسته، تحت عدم قطعیت می‌باشد که یک پارچه سازی افقی (طراحی هم‌زمان شبکه‌های مستقیم و معکوس) و عمودی (اتخاذ هم‌زمان تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی) را به طور هم‌زمان اعمال می‌نماید. عدم قطعیت پارامترها، شامل عدم قطعیت‌های محیطی و سیستمی و همچنین عدم قطعیت ناشی از اختلالات، به طور هم‌زمان در مدل در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس، پارامترهایی از مدل پیشنهادی مانند هزینه‌های حمل و نقل و عملیاتی، ظرفیت تسهیلات، مقدار محصولات بازگشتی از مراکز مشتریان و همچنین درصد خرابی ناشی از اختلالات در دوره‌های مختلف، غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. به منظور کاربردی تر نمودن نتایج مدل ارائه شده، یک روش جدید پایایی، با به کارگیری ذخیره اطمینان چند سطحی به عنوان گزینه‌ای استراتژیک، معرفی شده است. این روش می‌تواند سبب کاهش هزینه‌ها، نیاز به برون سپاری و همچنین وابستگی به رقبا گردد. توجه به اختلال کامل و جزئی محصولات موجود در تسهیلات نیز به عنوان یک فرض مبتنی بر واقعیت و جدید، مدل ارائه شده را به یک ابزار تصمیم‌گیری عملی و قابل اطمینان برای مدیران تبدیل نموده است. برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها نیز، از یک روش برنامه ریزی امکانی کارا استفاده شده است. لازم به ذکر است که بر خلاف این امر که مدل پیشنهادی، براساس یک مطالعه موردی صنعتی ارائه شده است، می‌توان آن را به عنوان یک مدل کلی در صنایع دیگر، مانند صنعت تولید قطعات الکترونیکی و کاغذ به کار گرفت. در پایان لازم به ذکر است که مجموعه ویژگی‌های

<sup>۸</sup> Basel convention

<sup>۷</sup> Outsourcing

چرا که بازیافت باتری برای دستیابی به سرب، نیاز به صرف انرژی و هزینه کمتری نسبت به روش دیگر دارد و باعث کاهش خطرات زیست محیطی و حفظ منابع طبیعی برای نسل‌های آینده می‌گردد [۲۵]. با توجه به موارد ذکر شده، طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته برای صنعت باتری‌های اسیدی می‌تواند به‌عنوان یک امر مهم و حیاتی پیشنهاد گردد، چرا که فواید زیادی را دارا می‌باشد.

شبکه حلقه بسته ارائه شده براساس زنجیره تامین باتری اسیدی، چندسطحی، چند دوره‌ای و تک محصولی می‌باشد که در شکل ۱ نمایش داده شده است. در زنجیره مستقیم<sup>۹</sup>، مواد خام مورد نیاز برای تولید باتری، از تامین‌کنندگان<sup>۱۰</sup> تامین می‌گردند. سپس، باتری‌های تولیدی در مراکز تولید<sup>۱۱</sup>، به مناطق مشتریان از طریق مراکز توزیع<sup>۱۲</sup> ارسال می‌گردند. جریان محصولات در زنجیره مستقیم براساس مکانیزم کششی می‌باشد. در زنجیره معکوس نیز، باتری‌هایی که طول عمرشان پایان یافته، از طریق مراکز جمع‌آوری، از مشتری‌ها جمع‌آوری می‌گردند و سپس به مراکز بازیافت ارسال می‌گردند. سرب بازیافتی در این مراکز برای پاسخگویی به بخشی از نیاز به سرب برای تولید باتری، به مراکز تولید عرضه می‌گردد. لازم به ذکر است که بخشی از سرب بازیافتی دارای کیفیت لازم جهت استفاده در مراکز تولید خواهد بود. از آنجایی که بخشی از سرب بازیافتی و سایر مواد اولیه بازیافت شده، دارای کیفیت لازم جهت استفاده دوباره در تولید باتری نیستند، به مشتری‌های مواد اولیه عرضه می‌گردند. در هر دوره، درصدی از باتری‌های عرضه شده در دوره قبل، عودت داده می‌شود. مراکز جمع‌آوری می‌توانند به‌طور کامل و یا بخشی از آن‌ها را جمع‌آوری نمایند، اما بر اساس قوانین دولتی، شرکت برای باتری‌هایی که طول عمرشان پایان یافته ولی جمع‌آوری نشده‌اند، باید جریمه پرداخت نماید. در شبکه ارائه شده، مکان و تعداد تامین‌کنندگان و مشتریان مشخص می‌باشد.

در شرایط واقعی، قطعات و محصولات به‌طور همزمان از سطوح بالادستی به سطوح پایین دستی زنجیره‌های تامین در جریان هستند. حال، فرض شده است که مراکز توزیع

در معرض اختلالات هستند و در این صورت، وقوع اختلالات می‌تواند تمام یا بخشی از محصولات موجود در مراکز توزیع از بین ببرد. از این رو، یک روش جدید برای کاهش اثرات نامطلوب اختلالات و پاسخگویی به نیاز مشتریان به‌کار گرفته شده است. بدین منظور، به جای قبول جریمه خرید تمام محصولات نابود شده از رقبا، از ذخیره اطمینان<sup>۱۳</sup> چند سطحی به‌عنوان یک گزینه استراتژیک در مراکز توزیع بهره گرفته شده است. مقدار مناسب ذخیره اطمینان بر اساس توازن بین جریمه خرید، هزینه ایجاد زیرساخت‌های نگهداری ذخیره اطمینان و هزینه‌های عملیاتی انتخاب خواهد گردید. در این روش، اگر مقدار محصولات مورد نیاز در اثر اختلالات بیش از مقدار ذخیره اطمینان باشد، مقدار کمبود با قبول جریمه، برون‌سپاری می‌گردد و در غیر این صورت، ذخیره اطمینان باقی‌مانده در انتهای دوره، مشمول هزینه نگهداری خواهد شد. همچنین، در ابتدای هر دوره، مقدار ذخیره اطمینان استفاده شده در دوره قبل، باید از مراکز تولید تامین گردد. نکته مهم این است که ذخیره اطمینان در اتاق امن نگهداری می‌گردد و آسیب‌پذیر به واسطه اختلالات نمی‌باشد. این استراتژی، نه تنها از افزایش هزینه‌ها تا حد زیادی جلوگیری می‌کند، بلکه وابستگی به رقبا و برون‌سپاری را نیز کاهش می‌دهد که به‌عنوان یک مزیت رقابتی بلند مدت برای سازمان محسوب می‌گردد.

به‌واسطه عدم وجود داده کافی در چنین صناعی، عدم قطعیت پارامترها امری غیرقابل اجتناب است. به‌کارگیری برنامه‌ریزی احتمالی<sup>۱۴</sup> و توابع احتمال می‌تواند به‌عنوان روشی برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها مطرح گردد (برای مثال [۱۰ و ۲۷-۲۹] را ببینید). گرچه به خاطر نیاز به داده‌های دقیق برای تخمین تابع احتمال پارامترها و همچنین به‌واسطه طبیعت پویای زندگی امروزی، استفاده از تابع احتمال در شرایط واقعی امکان‌پذیر نیست [۳۰]. بنابراین، برای رفع مشکل مذکور می‌توان از توابع امکانی<sup>۱۵</sup> برای تخمین پارامترهای غیرقطعی استفاده نمود (برای مثال [۱۱، ۱۳ و ۱۴] را ببینید).

<sup>۱۳</sup> Safety stock

<sup>۱۴</sup> Stochastic programming

<sup>۱۵</sup> Possibilistic programming

<sup>۹</sup> Forward

<sup>۱۰</sup> Supplier

<sup>۱۱</sup> Plant

<sup>۱۲</sup> Distribution center

$l$  اندیس مکان‌های بالقوه برای مراکز جمع‌آوری  
 $m$  اندیس مکان‌های بالقوه برای مراکز بازیافت  
 $k$  اندیس مکان قرارگیری مراکز مشتریان  
 $b$  اندیس مکان قرارگیری مشتریان مواد بازیافتی  
 $o$  اندیس سطوح ظرفیت بالقوه مراکز توزیع  
 $r$  اندیس سطوح ظرفیت بالقوه مراکز بازیافت  
 $e$  اندیس سطوح ظرفیت بالقوه مراکز جمع‌آوری  
 $p$  اندیس سطوح ظرفیت بالقوه برای ذخیره اطمینان هر مرکز توزیع

$a$  اندیس مواد اولیه متفاوت

$t$  اندیس دوره‌های زمانی

پارامترها

$d\tilde{e}_{kt}$  تقاضای مشتری ناحیه  $k$  در دوره  $t$   
 $\tilde{\psi}_{abt}$  تقاضای مشتری مواد اولیه بازیافتی  $b$  برای ماده  $a$  در دوره  $t$   
 $\tilde{\lambda}_{jt}$  متوسط درصد محصول مختل شده در مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t$  به واسطه اختلالات  
 $r\tilde{d}_{kt}$  مقدار محصول بازگشتی در مرکز مشتریان  $k$  در دوره  $t$   
 $\eta$  درصد سرب قابل بازیافت از هر باتری  
 $p\tilde{i}_i$  حداکثر ظرفیت مرکز تولید  $i$   
 $p\tilde{j}_{jo}$  حداکثر ظرفیت مرکز توزیع  $j$  با سطح ظرفیت  $o$   
 $p\tilde{m}_{mr}$  حداکثر ظرفیت مرکز بازیافت  $m$  با سطح ظرفیت  $r$   
 $p\tilde{l}_{le}$  حداکثر ظرفیت مرکز جمع‌آوری  $l$  با سطح ظرفیت  $e$   
 $pp_{jp}$  مقدار ذخیره اطمینان در مرکز توزیع  $j$  با سطح ظرفیت  $p$   
 $f\tilde{j}_{jo}$  هزینه ثابت باز کردن مرکز توزیع  $j$  با سطح ظرفیت  $o$   
 $f\tilde{m}_{mr}$  هزینه ثابت باز کردن مرکز بازیافت  $m$  با سطح ظرفیت  $r$   
 $f\tilde{i}_i$  هزینه ثابت باز کردن مرکز تولید  $i$   
 $f\tilde{p}_{jp}$  هزینه ثابت باز کردن سطح  $p$  از ذخیره اطمینان برای مرکز توزیع  $j$   
 $c\tilde{u}_{ani}$  هزینه حمل و نقل هر واحد ماده اولیه  $a$  از تامین‌کننده  $n$  به مرکز تولید  $i$   
 $c\tilde{v}_{ij}$  هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از مرکز

موارد اصلی مطرح در مدل پایای شبکه حلقه بسته شامل تعیین تعداد و مکان قرارگیری مراکز تولید، جمع‌آوری، بازیافت و توزیع و سطح ظرفیت مراکز توزیع، جمع‌آوری و بازیافت و همچنین سطح ظرفیت ذخیره اطمینان برای مراکز توزیع می‌باشد. در کنار این موارد، جریان محصولات بین سطوح متوالی زنجیره، باید تعیین گردد. در طراحی شبکه مذکور، کمینه کردن هزینه‌ها به‌عنوان تابع هدف مدنظر قرار داده شده است. لازم به‌ذکر است که فرضیات مدل پیشنهادی در جدول (۱) ارائه گردیده است.

جدول ۱ فرضیات مدل پیشنهادی

فرضیات مدل پیشنهادی
زنجیره تامین مستقیم به‌صورت کششی و زنجیره تامین معکوس به‌صورت فشاری فعالیت می‌کند.
تعداد و محل قرارگیری مشتریان محصولات و مشتریان مواد اولیه بازیافتی و تامین‌کنندگان مشخص می‌باشد.
مراکز توزیع، جمع‌آوری و بازیافت بالقوه، دارای چند ظرفیت بالقوه می‌باشند که برای هر مرکز باز شده یک سطح ظرفیت تخصیص داده خواهد شد.
مراکز تولید بالقوه تک ظرفیتی می‌باشند.
هر یک از مراکز توزیع دارای چند ظرفیت بالقوه برای انتخاب سطح ظرفیت ذخیره اطمینان می‌باشد که برای هر مرکز باز شده یک سطح ظرفیت ذخیره اطمینان تخصیص داده خواهد شد.
تقاضای مشتریان مشخص است و باید به‌طور کامل پاسخ داده شود.
درصد مشخصی از تقاضای هر دوره، در دوره بعد از مرکز مشتریان به مراکز جمع‌آوری عودت داده می‌شود. مقدار کالای عودت داده شده‌ای که جمع‌آوری نگردد مشمول جریمه خواهد بود.
تقاضای مشتریان مواد اولیه بازیافتی مشخص می‌باشد و تقاضای آن‌ها باید به‌طور کامل پاسخ داده شود.
در صورت وقوع اختلال در هر مرکز توزیع ابتدا کالای مورد نیاز از ذخیره اطمینان تامین می‌گردد و در صورت وجود کمبود، مقدار کالای مورد نیاز برون‌سپاری می‌گردد.

### ۳- مدل‌سازی مساله

برای رابطه‌سازی شبکه تشریح شده، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها در ادامه تعریف گردیده‌اند. بر روی پارامترهای غیرقطعی مدل نماد تیلدا قرار داده شده است. اندیس‌ها

$n$  اندیس مربوط به تامین‌کنندگان

$i$  اندیس مکان‌های بالقوه برای مراکز تولید

$j$  اندیس مکان‌های بالقوه برای مراکز توزیع

تولید $i$ به مرکز توزیع $j$	$c\tilde{d}_{jk}$
هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از مرکز توزیع $j$ به مرکز مشتری $k$	$c\tilde{q}_{kl}$
هزینه حمل و نقل هر واحد محصول بازگشتی از مرکز مشتری $k$ به مرکز جمع آوری $l$	$c\tilde{g}_{lm}$
هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از مرکز جمع آوری $l$ به مرکز بازیافت $m$	$c\tilde{m}_{mi}$
هزینه حمل و نقل هر واحد سرب بازیافتی از مرکز بازیافت $m$ به مرکز تولید $i$	$c\tilde{b}_{amb}$
هزینه حمل و نقل هر واحد ماده اولیه $a$ از مرکز بازیافت $m$ به مرکز مشتری مواد $b$	$\tilde{\beta}_{an}$
هزینه خرید هر واحد ماده اولیه $a$ از تامین کننده $n$	$\tilde{\theta}_i$
هزینه عملیاتی تولید هر واحد محصول در مرکز تولید $i$	$\gamma_l$
هزینه عملیاتی جمع آوری هر واحد محصول در مرکز جمع آوری $l$	$\tilde{z}_m$
هزینه عملیاتی بازیافت سرب هر واحد محصول در مرکز بازیافت $m$	$\tilde{\phi}_{am}$
هزینه عملیاتی بازیافت ماده اولیه $a$ هر واحد محصول در مرکز بازیافت $m$	$\tilde{\pi}_{jt}$
مجموع جریمه و هزینه خرید هر واحد محصول از رقبا (برون سپاری) در مرکز توزیع $j$ در دوره $t$	$\tilde{h}_{kt}$
جریمه عدم جمع آوری هر واحد محصول عودت داده شده از مرکز مشتری $k$ در دوره $t$	$\tilde{\varphi}_{jt}$
هزینه نگهداری هر واحد محصول باقیمانده در انتهای دوره $t$ در مرکز توزیع $j$	$r\tilde{o}_{kt}$
نرخ عودت کالاهای بازگشتی در دوره $t$ از مرکز مشتری $k$	متغیرهای تصمیم
مقدار ماده اولیه $a$ حمل شده از تامین کننده $n$ به مرکز تولید $i$ در دوره $t$	$u_{anit}$
مقدار محصول حمل شده از مرکز تولید $i$ به مرکز توزیع $j$ در دوره $t$	$v_{ijt}$
مقدار محصول حمل شده از مرکز توزیع $j$ به مرکز مشتری $k$ در دوره $t$	$d_{jkt}$
مقدار محصول حمل شده از مرکز مشتری $k$ به مرکز بازیافت $m$ در دوره $t$	$q_{klt}$
مرکز جمع آوری $l$ در دوره $t$	$g_{lmt}$
مقدار محصول حمل شده از مرکز جمع آوری $l$ به مرکز بازیافت $m$ در دوره $t$	$\gamma_{mit}$
مقدار سرب بازیافتی حمل شده از مرکز بازیافت $m$ به مرکز تولید $i$ در دوره $t$	$s_{ambt}$
مقدار ماده اولیه بازیافتی $a$ حمل شده از مرکز بازیافت $m$ به مرکز مشتری $b$ در دوره $t$	$\epsilon_{jt}$
مقدار محصول برون سپاری شده در مرکز توزیع $j$ در دوره $t$ به واسطه اختلالات	$\delta_{jt}$
مقدار ذخیره اطمینان باقیمانده در مرکز توزیع $j$ در انتهای دوره $t$	$\mu_{jt}$
متغیر کمکی مجموع مقدار کالای از بین رفته در مرکز توزیع $j$ در دوره $t$ به واسطه اختلالات	$xj_{jo}$
1 اگر مرکز توزیع $j$ با سطح ظرفیت $o$ باز شود 0 در غیر این صورت	$xi_i$
1 اگر مرکز تولید $i$ باز شود 0 در غیر این صورت	$xl_{le}$
1 اگر مرکز تجمیع $l$ با سطح ظرفیت $e$ باز شود 0 در غیر این صورت	$xm_{mr}$
1 اگر مرکز بازیافت $m$ با سطح ظرفیت $r$ باز شود 0 در غیر این صورت	$xp_{jp}$
1 اگر سطح ظرفیت $p$ از ذخیره اطمینان به مرکز توزیع باز شده $j$ تخصیص یابد 0 در غیر این صورت	

با توجه به نمادهای ارائه شده، مدل ریاضی زنجیره تامین پایای حلقه بسته به صورت زیر قابل ارائه است:

$$\begin{aligned} \text{MinE} = & \sum_j \sum_p f p_{jp} x p_{jp} + \sum_j \sum_o \tilde{f} j_{jo} x j_{jo} \\ & + \sum_l \sum_e \tilde{f} l_{le} x l_{le} + \sum_i \tilde{f} i_i x i_i + \sum_m \sum_r \tilde{f} m_{mr} x m_{mr} \\ & + \sum_t \sum_k \sum_l c \tilde{q}_{kl} q_{klt} + \sum_t \sum_a \sum_n \sum_i (c \tilde{u}_{ani} + \tilde{\beta}_{an}) u_{anit} \\ & + \sum_t \sum_i \sum_j (c \tilde{v}_{ij} + \tilde{\theta}_i) v_{ijt} + \sum_t \sum_m \sum_i (c \tilde{m}_{mi} + \tilde{z}_m) \gamma_{mit} \\ & + \sum_t \sum_j \sum_k c \tilde{d}_{jk} d_{jkt} + \sum_t \sum_a \sum_m \sum_b (c \tilde{b}_{amb} + \tilde{\phi}_{am}) s_{ambt} \\ & + \sum_t \sum_l \sum_m (c g_{lm} + \gamma_l) + \sum_t \sum_j \tilde{\pi}_{jt} \epsilon_{jt} + \sum_t \sum_j \tilde{\varphi}_{jt} \delta_{jt} \end{aligned}$$

هزینه متغیر فعالیت‌ها را کمینه می‌کند. عبارت اول تا پنجم تابع هدف مربوط به هزینه باز کردن سطوح ذخیره اطمینان برای مراکز توزیع و همچنین هزینه باز کردن مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت می‌باشد. هزینه عملیاتی و حمل‌ونقل محصولات بین سطوح مختلف زنجیره تامین، از طریق عبارت ششم تا دوازدهم، در تابع هدف منظور شده است. عبارت سیزدهم نیز جریمه خرید و برون‌سپاری محصولات، ناشی از کمبود کالا در مراکز توزیع در اثر وقوع اختلالات را در تابع هدف اعمال می‌نماید. هزینه نگهداری ذخیره اطمینان باقیمانده در انتهای هر دوره، در مراکز توزیع، از طریق عبارت چهاردهم محاسبه می‌گردد. جریمه عدم جمع‌آوری محصولات عودت داده شده از مراکز مشتریان، در انتهای هر دوره، توسط دو عبارت باقیمانده در تابع هدف منظور شده است. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که تقاضای مشتریان در هر دوره باید به‌طور کامل برآورده گردد. محدودیت (۳) نیز تضمین می‌کند که درصدی از محصولات بازگشتی و یا همه آن‌ها از مراکز مشتریان، جمع‌آوری خواهد شد. پاسخگویی کامل به تقاضای مشتریان مواد اولیه بازیافتی، توسط محدودیت (۴) و (۵) تضمین شده است. محدودیت‌های (۶) و (۷) مضمن بالانس جریان در مراکز تولید می‌باشند. لازم به‌ذکر است که غیر از سرب که از مراکز بازیافت نیز تهیه می‌گردد، سایر مواد اولیه فقط توسط تامین‌کنندگان، عرضه می‌گردند. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که در هر مرکز توزیع، در اثر اختلالات، یا کمبود اتفاق می‌افتد و یا در انتهای دوره ذخیره اطمینان باقیمانده خواهیم داشت و مقدار هر یک را مشخص می‌نماید. کمبود در صورتی اتفاق می‌افتد که مقدار محصول از بین رفته در اثر اختلالات، از ذخیره اطمینان بیشتر باشد. در این صورت مقدار کسری محصولات از رقبا تهیه می‌گردد. محدودیت (۹) بالانس جریان مواد در مراکز توزیع را، در دوره اول تضمین می‌کند. در اولین دوره، علاوه بر تقاضای مشتریان از هر مرکز توزیع، ذخیره اطمینان مورد نیاز در آن مرکز نیز باید به‌طور کامل از مراکز تولید تامین گردد. محدودیت (۱۰) نیز تضمین‌گر بالانس جریان مواد در دوره دوم و بعد از آن، در مراکز توزیع می‌باشد. چنانچه مقدار کالای از بین رفته به واسطه اختلال، بیش از مقدار ذخیره اطمینان باشد، در ابتدای دوره بعد، علاوه بر تقاضای مشتریان، باید کل ظرفیت

$$+\sum_t \sum_k r\tilde{d}_{kt} \tilde{h}_{kt} - \sum_t \sum_k \sum_l \tilde{h}_{kt} q_{klt} \quad (1)$$

$$\sum_j d_{jkt} \geq d\tilde{e}_{kt} \quad \forall k, t \quad (2)$$

$$\sum_l q_{klt} \leq r\tilde{d}_{kt} = d\tilde{e}_{kt-1} r\tilde{o}_{kt} \quad \forall k, t > 1 \quad (3)$$

$$\sum_m (1-\eta) s_{ambt} \geq \tilde{\psi}_{abt} \quad \forall a = 1, b, t \quad (4)$$

$$\sum_m s_{ambt} \geq \tilde{\psi}_{abt} \quad \forall a > 1, b, t \quad (5)$$

$$\sum_n u_{anit} + \eta \sum_m \gamma_{mit} = \sum_j v_{ijt} \quad \forall a = 1, i, t \quad (6)$$

$$\sum_n u_{anit} = \sum_j v_{ijt} \quad \forall a > 1, i, t \quad (7)$$

$$\mu_{jt} - \sum_p pp_{jp} xp_{jp} = \varepsilon_{jt} - \delta_{jt} \quad \forall j, t \quad (8)$$

$$\sum_k d_{jkt} + \sum_p pp_{jp} xp_{jp} = \sum_i v_{ijt} \quad \forall j, t = 1 \quad (9)$$

$$\sum_k d_{jkt} + \mu_{jt-1} - \varepsilon_{jt-1} = \sum_i v_{ijt} \quad \forall j, t > 1 \quad (10)$$

$$\sum_k q_{klt} = \sum_m g_{lmt} \quad \forall l, t \quad (11)$$

$$\sum_l g_{lmt} = \sum_i \gamma_{mit} \quad \forall m, t \quad (12)$$

$$\sum_l g_{lmt} \geq \sum_b s_{ambt} \quad \forall a, m, t \quad (13)$$

$$\sum_j v_{ijt} \leq \tilde{p}_i x_i \quad \forall i, t \quad (14)$$

$$\sum_k q_{klt} \leq \sum_e \tilde{p}_{le} x_{le} \quad \forall l, t \quad (15)$$

$$\sum_l g_{lmt} \leq \sum_r \tilde{p}_{mr} x_{mr} \quad \forall m, t \quad (16)$$

$$\sum_k d_{jkt} + \sum_p pp_{jp} xp_{jp} \leq \sum_o \tilde{p}_{jo} x_{jo} \quad \forall j, t \quad (17)$$

$$\sum_o x_{jo} \leq 1 \quad \forall j \quad (18)$$

$$\sum_e x_{le} \leq 1 \quad \forall l \quad (19)$$

$$\sum_r x_{mr} \leq 1 \quad \forall m \quad (20)$$

$$\sum_o x_{jo} = \sum_p xp_{jp} \quad \forall j \quad (21)$$

$$\sum_k \tilde{\lambda}_{jt} d_{jkt} \leq \mu_{jt} \quad \forall j, t \quad (22)$$

$$u_{anit}, v_{ijt}, d_{jkt}, q_{klt}, g_{lmt}, \gamma_{mit}, s_{ambt}, \varepsilon_{jt}, \delta_{jt} \geq 0 \quad \forall a, b, i, j, k, l, m, n, t \quad (23)$$

$$x_{jo}, x_i, xp_{jp}, x_{le}, x_{mr} \in \{0, 1\} \quad \forall e, i, j, l, m, o, p, r \quad (24)$$

تابع هدف (۱) مجموع هزینه ثابت باز کردن تسهیلات و

توسط پیشوایی و ترابی [۱۳]، برای ارائه مدل معادل قطعی<sup>۱۶</sup>، بهره گرفته شده است.

این روش بر اساس "مقدار مورد انتظار" و "فاصله مورد انتظار" عدد فازی ایجاد گردیده است [۳۵]. همچنین، ویژگی این روش این است که تصمیم‌گیرنده می‌تواند به صورت بر هم کنشی<sup>۱۷</sup> مقدار سطح اطمینان را تغییر دهد و اثر آن را بر روی مجموع هزینه‌ها مشاهده نماید و بهترین مقدار را برای سطح اطمینان مقابله با عدم قطعیت‌ها انتخاب نماید. برای تشریح روش مذکور از تابع عضویت عدد فازی ذوزنقه‌ای  $\tilde{r}$  که به صورت  $\tilde{r} = (r_1, r_2, r_3, r_4)$  در نظر گرفته می‌شود، استفاده شده است. تابع مذکور در ادامه ارائه شده است.

$$\mu_{\tilde{r}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq r_1 \\ \frac{x - r_1}{r_2 - r_1}, & \text{if } r_1 \leq x \leq r_2 \\ \frac{r_4 - x}{r_4 - r_3}, & \text{if } r_2 \leq x \leq r_3 \\ 1, & \text{if } r_3 \leq x \leq r_4 \end{cases} \quad (25)$$

با توجه به تابع عضویت ارائه شده، مقدار مورد انتظار و فاصله مورد انتظار عدد فازی  $\tilde{r}$  در رابطه‌های (۲۶) و (۲۷) ارائه گردیده است [۳۶].

$$EI(\tilde{r}) = [E_1^r, E_2^r] = \left[ \left( \frac{r_1 + r_2}{2} \right), \left( \frac{r_3 + r_4}{2} \right) \right] \quad (26)$$

$$EV(\tilde{r}) = \frac{E_1^r + E_2^r}{2} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \quad (27)$$

در صورتی که نقاط  $r_2$  و  $r_3$  عدد فازی  $\tilde{r}$  با یکدیگر برابر باشند، عدد فازی ذوزنقه‌ای به عدد فازی مثلثی تبدیل می‌گردد و تمامی روابطی که در بالا اشاره شد، با اعمال تغییر مطرح شده، کاربردی هستند.

همچنین، با توجه به روش رتبه‌بندی خیمنز و همکاران [۳۷]، برای هر زوج از اعداد فازی مانند  $\tilde{a}$  و  $\tilde{b}$ ، درجه بزرگی عدد  $\tilde{a}$  نسبت به عدد  $\tilde{b}$  که به صورت  $\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b})$  نمایش داده می‌شود، از رابطه (۲۸) محاسبه می‌گردد.

$$\begin{cases} 0, & \text{if } E_2^a - E_1^b < 0 \\ \frac{E_2^a - E_1^b}{E_2^a - E_1^b - (E_1^a - E_2^b)}, & \text{if } 0 \in [E_1^a - E_2^b, E_2^a - E_1^b] \\ 1, & \text{if } E_1^a - E_2^b > 0 \end{cases} \quad (28)$$

عبارت  $\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \geq \alpha$  معادل عبارت  $\tilde{a} \geq_{\alpha} \tilde{b}$  می‌باشد و بدین معناست که عدد فازی  $\tilde{a}$  بزرگتر مساوی عدد فازی  $\tilde{b}$  با حداقل درجه  $\alpha$  می‌باشد. حال، مدل ریاضی زیر را در نظر بگیرید.

ذخیره اطمینان از مراکز تولید تامین گردد. در غیر این صورت، فقط مقدار ظرفیت استفاده شده از ذخیره اطمینان بازپرسی می‌گردد. بالانس جریان محصولات بازگشتی در مراکز جمع‌آوری و بازیافت توسط محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۳) تضمین شده است. محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۷) نیز تضمین می‌کنند که مجموع جریان عبوری از مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت باز شده، در هر دوره، حداکثر به اندازه ظرفیتشان خواهد بود. همچنین، از تخصیص جریان به تسهیلات باز نشده جلوگیری می‌کنند. محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۰) مضمن این امر هستند که حداکثر یک سطح ظرفیت به هر مرکز توزیع، جمع‌آوری و بازیافت تخصیص خواهد یافت. محدودیت (۲۱) تضمین می‌کند که به هر مرکز توزیع باز شده، باید دقیقاً یک سطح ظرفیت ذخیره اطمینان تخصیص یابد. محدودیت کمکی (۲۲) مقدار کالای از بین رفته در هر مرکز توزیع به واسطه اختلالات را محاسبه می‌نماید. محدودیت مربوط به متغیرهای نامنفی و صفر و یک، توسط محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) اعمال شده است.

#### ۴- روش برنامه‌ریزی امکانی پیشنهادی

به‌طور کلی عدم قطعیت‌ها به دو دسته قابل تقسیم‌بندی هستند. اولین دسته مرتبط با تغییرات مقدار مورد انتظار اهداف و محدودیت‌ها می‌باشد [۳۱]. برای مقابله با این نوع عدم قطعیت، برنامه‌ریزی ریاضی منعطف که از مجموعه‌های فازی مبتنی بر ترجیحات بهره می‌گیرد، استفاده می‌شود (برای مثال [۱۴ و ۳۲]). دسته دوم مرتبط با فقدان داده و یا دانش کافی در مورد مقدار دقیق پارامترهای ورودی می‌باشد [۳۳]. رویکردهای برنامه‌ریزی امکانی برای مقابله با این نوع عدم قطعیت استفاده می‌گردد. در این روش، پارامترهای غیرقطعی توسط توابع امکانی (مانند توابع ذوزنقه‌ای یا مثلثی) با توجه به داده‌های ناکافی موجود و دانش و تجربه تصمیم‌گیرندگان، مدل می‌گردند [۳۴]. با توجه به اینکه در طراحی پایای شبکه حلقه بسته، با پارامترهای غیرقطعی سروکار داریم، مدل ارائه شده به دسته برنامه‌ریزی امکانی تعلق دارد. بنابراین از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی توسعه داده شده

<sup>۱۱</sup> Equivalent crisp model

<sup>۱۷</sup> Interactive



شده، از داده‌های واقعی مستخرج از زنجیره تامین یک تولیدکننده باتری‌های اسیدی استفاده شده است. این سازمان در هر دوره باید تقاضای دوازده ناحیه از مشتریان را توسط کالاهای تولیدی در مراکز تولید، پاسخ دهد. توزیع محصولات بین مشتریان باید از طریق مراکز توزیع انجام گیرد. هشت مکان بالقوه برای باز کردن مراکز توزیع در نظر گرفته شده است. همچنین، دو سطح ظرفیت و دو سطح ذخیره اطمینان بالقوه برای باز کردن در هر مرکز توزیع موجود است. برای تولید محصولات مورد نیاز در هر دوره، افزون بر یک کارخانه موجود، پنج مکان بالقوه برای باز کردن مراکز تولید در نظر گرفته شده است. در شبکه معکوس نیز، باتری‌هایی که طول عمرشان پایان یافته و عودت داده شده‌اند، از طریق مراکز جمع‌آوری دریافت و برای مراکز بازیافت ارسال می‌گردند. هشت مکان بالقوه و دو سطح ظرفیت بالقوه برای باز کردن مراکز جمع‌آوری و همچنین شش مکان بالقوه و دو سطح ظرفیت نیز برای باز کردن مراکز بازیافت توسط مدیران سازمان تعیین گشته است. همچنین، یک مرکز بازیافت نیز در حال حاضر فعال می‌باشد که هزینه مربوط به احداث آن، صفر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که تمام سرب بازیافتی دارای قابلیت مصرف مجدد در تولید باتری‌های اسیدی نمی‌باشد. در نتیجه، سرب بازیافتی با کیفیت بالا برای مراکز تولید ارسال می‌گردد. علاوه بر این، بخشی از سرب بازیافتی که دارای کیفیت پایین‌تر می‌باشد، به‌همراه سایر مواد اولیه بازیافتی، برای پاسخگویی به نیاز چهار مرکز مشتری مواد اولیه، به آن‌ها ارسال خواهد شد. فرموله کردن شبکه تشریح شده، شامل تعداد زیادی پارامتر قطعی و غیرقطعی می‌باشد. بنابراین، نمایش تمامی پارامترها به واسطه محدودیت فضا در مقاله امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این رو، به واسطه اهمیت پارامترهای غیرقطعی، تعدادی از آن‌ها مانند هزینه ثابت باز کردن مراکز تولید و ظرفیت تولید هر یک، در جدول ۲ نمایش داده شده است. سایر پارامترها نیز در صورت درخواست خوانندگان علاقمند، قابل ارائه می‌باشند. پارامترهای غیرقطعی به‌صورت اعداد فازی ذوزنقه‌ای ارائه شده‌اند و به منظور تخمین نقاط تابع امکانی پارامترهای غیرقطعی، از نظر یک تیم خبره از مدیران سازمان و همچنین داده‌های موجود در سازمان بهره گرفته شده است.

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \tilde{c}^t x \\ \text{s.t.} \quad & \tilde{a}_j x \geq \tilde{b}_j, \quad j = 1, \dots, n \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (29)$$

تمامی پارامترهای ارائه شده در مدل غیرقطعی می‌باشند و فرض شده است که دارای تابع ذوزنقه‌ای هستند.

خیمنز و همکاران [۳۵] بیان می‌کنند که درجه شدنی بودن بردار تصمیم  $x \in R^n$  در مدل (۲۹)، مساوی با  $\alpha$  می‌باشد اگر  $\min_{j=1, \dots, n} \{\mu_M(\tilde{a}_j x, \tilde{b}_j)\} = \alpha$  بنابراین، با توجه به تساوی (۲۸)، عبارت  $\tilde{a}_j x \geq \tilde{b}_j$  بدین صورت ارائه می‌گردد:

$$\frac{E_2^{a_j x} - E_1^{b_j}}{E_2^{a_j x} - E_1^{a_j x} + E_2^{b_j} - E_1^{b_j}} \geq \alpha, \quad j = 1, \dots, n \quad (30)$$

فرم ساده شده تساوی (۳۰) نیز اینگونه بازنویسی گردیده است:

$$\begin{aligned} \left[ (1-\alpha) E_2^{a_j} + \alpha E_1^{a_j} \right] x &\geq \alpha E_2^{b_j} + (1-\alpha) E_1^{b_j}, \\ j &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (31)$$

همچنین، خیمنز و همکاران [۳۵] بیان نموده‌اند که هر جواب شدنی مانند  $x^0$  که شدنی بودن آن اثبات شده است، یک جواب قابل قبول با حداقل درجه  $\alpha$  برای مدل (۲۹) می‌باشد اگر و فقط اگر عبارت (۳۲) همواره با توجه به عبارت  $\tilde{a}_j x \geq \tilde{b}_j$  برقرار باشد.  $x$  یک بردار متغیر تصمیم شدنی است.

$$\tilde{c}^t x \geq_{1/2} \tilde{c}^t x^0 \quad (32)$$

بنابراین، در بین بردارهای شدنی تصمیم،  $x^0$  گزینه بهتری محسوب می‌شود اگر شرایط زیر برقرار باشد.

$$\frac{E_1^{\tilde{c}^t x} + E_2^{\tilde{c}^t x}}{2} \geq \frac{E_1^{\tilde{c}^t x^0} + E_2^{\tilde{c}^t x^0}}{2} \quad (33)$$

با توجه به موارد ذکر شده، فرم  $\alpha$ -پارامتریک مدل (۲۹) به‌صورت زیر قابل تعریف می‌باشد:

$$\begin{aligned} \min \quad & EV(\tilde{c})x \\ \text{s.t.} \quad & \left[ (1-\alpha) E_2^{a_j} + \alpha E_1^{a_j} \right] x \geq \alpha E_2^{b_j} + (1-\alpha) E_1^{b_j}, \\ & j = 1, \dots, n \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (34)$$

لازم به ذکر است که مدل برنامه‌ریزی امکانی مدل توسعه داده شده، در بخش ضمائم ارائه گردیده است.

#### ۵- پیاده‌سازی و ارزیابی

در این بخش به منظور نمایش کاربردی بودن مدل پیشنهادی و ارزیابی کارایی مدل برنامه‌ریزی امکانی ارائه

اطمینان ۰/۶۵، با سطح اول از ذخیره اطمینان باز شده‌اند و سایر مراکز با سطح دوم از ذخیره اطمینان باز شده‌اند. نتایج حاصله مصدق این امر می‌باشد که افزایش جریمه برون‌سپاری سبب می‌گردد که میزان ذخیره اطمینان بیشتری نگهداری شده و متحمل شدن هزینه نگهداری نسبت به جریمه برون‌سپاری به صرفه‌تر باشد. موارد توضیح داده شده نیز نمایش‌گر انتخاب مناسب و تصمیم‌گیری دقیق مدل می‌باشند.

به‌منظور بررسی مطلوبیت و پایایی نتایج به‌دست آمده از مدل پیشنهادی، نسبت به مدل قطعی ارائه شده در بخش ۳، این نتایج تحت هفت سری داده که به‌صورت تصادفی برای پارامترهای غیرقطعی تولید شده‌اند، مورد تحلیل قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مدل قطعی ذکر شده، تحت داده‌های اسمی که از میانگین اعداد فازی به‌دست آمده است، حل شده است. برای شبیه‌سازی شرایط واقعی نیز فرض کنید که  $\tilde{r} = (r_1, r_2, r_3, r_4)$  یک پارامتر غیرقطعی با تابع امکانی دوزنقه‌ای باشد، از این رو، برای واقعی‌سازی، یک عدد تصادفی به‌صورت یکنواخت بین حد بالا و پایین تابع تولید می‌گردد ( $r_{real} = [r_1, r_4]$ ). سپس متغیرهای تصمیم حاصله از حل مدل پیشنهادی و همچنین حل مدل قطعی، به‌طور جداگانه، تحت هر سری از داده‌های تصادفی، در مدلی خطی برای تحلیل قرار داده می‌شوند. در این مدل، برای محدودیت‌هایی از مدل پیشنهادی که شامل پارامتر غیرقطعی بوده‌اند، متغیری تعریف می‌گردد که مقدار تجاوز شده از حد محدودیت را مشخص می‌کند. چرا که امکان نقض محدودیت‌ها به واسطه تجاوز از حدودشان به خاطر عدم قطعیت پارامترها وجود دارد. همچنین برای این متغیر، در تابع هدف جریمه‌ای در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در مدل خطی ارائه شده، تنها متغیرهای تصمیم، متغیرهای مشخص‌کننده مقدار تجاوز محدودیت‌های شامل پارامترهای غیرقطعی می‌باشند. در نهایت، میانگین و انحراف استاندارد مقادیر توابع هدف مدل‌ها، تحت داده‌های تصادفی، برای مقایسه نتایج مدل‌ها استفاده می‌گردد. مقدار تابع هدف مدل خطی تحت هفت سری داده‌های تصادفی تولید شده در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل نمایش داده شده است، همواره مدل قطعی نسبت به مدل پیشنهادی، تحت داده‌های تصادفی، هزینه کلی بیشتری داشته است و

به‌منظور بررسی عملکرد مدل پایای زنجیره تامین و مدل برنامه‌ریزی امکانی پیشنهادی، مدل در نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز، کد و حل شده است. برای تست نمودن عملکرد مدل، مقادیر متفاوتی از سطح اطمینان (۰/۶۵، ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸، ۰/۸۵ و ۰/۹) استفاده شده است. مقادیر تابع هدف تحت سطوح مختلف اطمینان، در شکل ۲ نمایش داده شده است. خروجی‌ها نشان می‌دهند که افزایش سطح اطمینان در مقابله با عدم قطعیت‌ها، توسط تصمیم‌گیرندگان، سبب افزایش هزینه‌ها گردیده است. علت این پدیده، این است که برای پاسخگویی به نیاز مشتریان و همچنین جمع‌آوری کالاهای بازگشتی، در سطوح اطمینان بالاتر، نیاز به منابع بیشتری (مانند مواد اولیه، محصولات، سطوح ظرفیت بالاتر تسهیلات و حجم حمل‌ونقل) خواهیم داشت. برای مثال در سطح اطمینان ۰/۶۵، مراکز توزیع دو و سه با دومین سطح ظرفیت و مرکز شش با سطح ظرفیت اول، باز گردیده است. افزایش سطح اطمینان به ۰/۷، سبب می‌گردد که علاوه بر مراکز ذکر شده، مرکز توزیع هشت نیز با سطح ظرفیت اول تعیین شده، باز گردد. این امر مصدق عملکرد صحیح مدل و انتخاب ظرفیت بیشتر برای پاسخگویی به تقاضای بیشتر مشتریان به واسطه افزایش سطح اطمینان می‌باشد. مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل نیز که در شکل ۳، تحت سطوح مختلف اطمینان نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که افزایش سطوح اطمینان، سبب افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌گردد که این امر نیز شاهدهی بر عملکرد صحیح مدل می‌باشد. همچنین، به‌منظور بررسی تاثیر افزایش جریمه برون‌سپاری محصولات، بر مقدار ذخیره اطمینان، این هزینه‌ها هر بار ۳۰ درصد افزایش داده شده‌اند و نتایج حاصل از تغییر اعمال شده، در جدول ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحت داده‌های اسمی (ستون یک)، مدل در تمامی سطوح اطمینان، سطح اول ذخیره اطمینان را برای مراکز توزیع انتخاب نموده است. با افزایش ۳۰ درصدی جریمه‌ها، که نتایج آن در ستون ۲ نمایش داده شده است، سطح دوم ذخیره اطمینان برای مرکز توزیع باز شده ۳ تحت سطوح اطمینان ۰/۷۵، ۰/۸۵ و ۰/۹۵، انتخاب شده است. همچنین با افزایش ۶۰ درصدی جریمه‌ها که نتایج آن در ستون ۳ جدول ارائه شده است، فقط مرکز دو، در تمامی سطوح اطمینان و همچنین مراکز شش و هشت، در سطح

طراحی شبکه‌های زنجیره تامین و مدیریت ریسک مرتبط با آن‌ها کمک نمایند.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در طول دهه‌های اخیر، وقوع اختلالات غیرمترقبه و مساله مقابله با آن‌ها، به یک چالش بزرگ برای مدیران سازمان‌ها تبدیل شده است. بر این اساس، توجه به این مساله در طراحی شبکه‌های زنجیره تامین می‌تواند منجر به نتایج مثبت بلند مدت و اتخاذ تصمیماتی با کیفیت بالاتر، برای سازمان گردد. به‌منظور مواجهه با مشکل مذکور، یک مدل بهینه‌سازی جدید در این مقاله معرفی گردیده است. برخلاف تحقیقات گذشته، مدل پیشنهادی، طراحی شبکه‌های مستقیم و معکوس را به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی می‌نماید. این مدل، به‌صورت کارا، شبکه‌ای با پاسخگویی بالا و اثربخش از نظر هزینه را، تحت اختلالات جزئی و غیرجزئی ایجاد می‌کند. به واسطه عدم قطعیت ذاتی پارامترهای ورودی در چنین مساله‌ای، از یک مدل برنامه‌ریزی امکانی کارا برای مقابله با عدم قطعیت‌ها بهره گرفته شده است. همچنین، یک مطالعه موردی مرتبط با صنعت تولید باتری‌های اسیدی به‌کار گرفته شده است تا اثربخشی مدل ارائه شده و کیفیت بالای مدل برنامه‌ریزی امکانی پیشنهاد شده، نمایش داده شود.

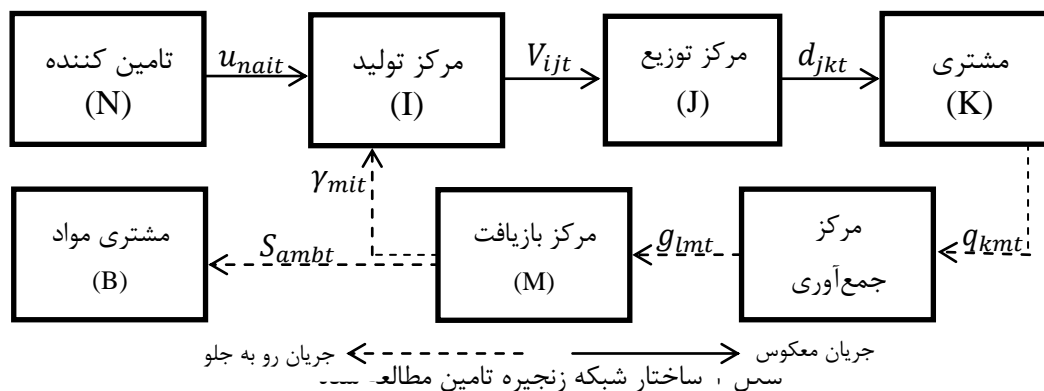
در اکثر تحقیقات انجام شده در حوزه طراحی شبکه‌های پایا، هدف کمینه کردن مجموع هزینه کلی زنجیره تامین و هزینه‌های اضافی ناشی از اختلالات بوده است. در صورتی که توجه به اهداف دیگر مانند پاسخگویی و مسؤلیت اجتماعی در کنار تابع هزینه می‌تواند منجر به خروجی‌های ارزشمند و کاربردی گردد. بنابراین، توسعه مدل‌هایی با قابلیت‌های مذکور، می‌تواند به‌عنوان یک خط مشی جذاب برای تحقیقات آینده در نظر گرفته شود.

عملکرد کلی مدل پیشنهادی بهتر بوده است. همچنین نتایج مدل پیشنهادی تحت سطح اطمینان ۰/۹۵، در داده‌های یک، چهار، شش و هفت، هزینه‌های بیشتری را نسبت به سطوح اطمینان ۰/۸۵ و ۰/۷۵ ایجاد نموده است. علت این امر این است که بالا بودن سطح اطمینان، سبب ریسک‌گریز بودن نتایج مدل، تجاوز کم محدودیت‌ها و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی زیاد می‌گردد. البته در بعضی از سری داده‌ها مانند سری دو، چهار و پنج، هزینه کلی شبکه در یک یا هر دو سطح اطمینان ۰/۷۵ و ۰/۸۵، از هزینه کلی، تحت سطح اطمینان ۰/۹۵ بیشتر شده است. علت این موضوع، تجاوز زیاد محدودیت‌ها تحت شبیه‌سازی تصادفی انجام شده می‌باشد که سبب بالا رفتن هزینه‌ها می‌گردد. به‌طور کلی میانگین هزینه‌های مدل قطعی ۲۰۶۸۸۳ می‌باشد و میانگین هزینه‌های مدل پیشنهادی در سطوح اطمینان ۰/۹۵، ۰/۸۵ و ۰/۷۵ به‌ترتیب مقدار ۱۸۵۲۴۲، ۱۸۳۵۱۲ و ۱۷۶۶۳۰ می‌باشد که مصدق میانگین هزینه‌ای بهتر و عملکرد مناسب مدل پیشنهادی نسبت به مدل قطعی می‌باشد (میانگین‌ها باید در  $10^7$  ضرب گردند). همچنین انحراف استاندارد هزینه‌های مدل قطعی، تحت داده‌های تصادفی ۳۲۲۹۸۱ می‌باشد. انحراف استاندارد هزینه‌های مدل پیشنهادی، در سطوح اطمینان ۰/۹۵، ۰/۸۵ و ۰/۷۵، به‌ترتیب مقدار ۳۰۶۳۴۹، ۲۵۸۴۱۷ و ۳۰۶۲۱۷ می‌باشد (انحراف استاندارد‌ها باید در  $10^6$  ضرب گردند). انحراف استاندارد‌ها نیز در کنار معیار میانگین، عملکرد مطلوب مدل پیشنهادی را ارائه می‌کنند.

در نهایت با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته و بر اساس نظر مدیران سازمان، این امر قابل جمع‌بندی است که مدل پایای توسعه داده شده و مدل برنامه‌ریزی امکانی به‌کار گرفته شده، به‌صورت کارا، می‌تواند به مدیران در

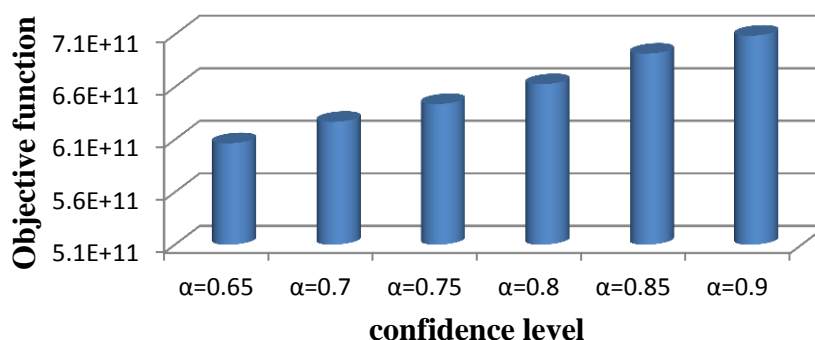
جدول ۲ هزینه ثابت و ظرفیت بالقوه مراکز تولید

مکان	هزینه ثابت	ظرفیت
(۱)	(۰ و ۰ و ۰)	(۴۲۵۰۰۰ و ۸۵۰۰۰۰ و ۹۰۰۰۰۰ و ۱۳۵۰۰۰)
(۲)	(۱۳۹۰۰۰۰۰ و ۱۴۰۰۰۰۰۰ و ۱۴۳۰۰۰۰۰ و ۱۴۴۰۰۰۰۰)	(۳۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰ و ۹۷۵۰۰۰)
(۳)	(۱۳۹۰۰۰۰۰ و ۱۴۰۰۰۰۰۰ و ۱۴۲۰۰۰۰۰ و ۱۴۵۰۰۰۰۰)	(۳۹۰۰۰۰ و ۷۸۰۰۰۰ و ۸۰۰۰۰۰ و ۱۲۰۰۰۰)
(۴)	(۱۵۴۰۰۰۰۰ و ۱۵۵۰۰۰۰۰ و ۱۵۶۰۰۰۰۰ و ۱۵۸۰۰۰۰۰)	(۴۰۰۰۰۰ و ۸۰۰۰۰۰ و ۸۲۰۰۰۰ و ۱۲۳۰۰۰۰)
(۵)	(۱۳۴۰۰۰۰۰ و ۱۳۶۰۰۰۰۰ و ۱۳۷۰۰۰۰۰ و ۱۳۸۵۰۰۰۰)	(۳۴۰۰۰۰ و ۶۸۰۰۰۰ و ۷۰۰۰۰۰ و ۱۰۵۰۰۰۰)
(۶)	(۱۳۸۰۰۰۰۰ و ۱۳۸۵۰۰۰۰ و ۱۳۹۰۰۰۰۰ و ۱۴۱۰۰۰۰۰)	(۳۷۰۰۰۰ و ۷۴۰۰۰۰ و ۷۶۰۰۰۰ و ۱۱۴۰۰۰۰)

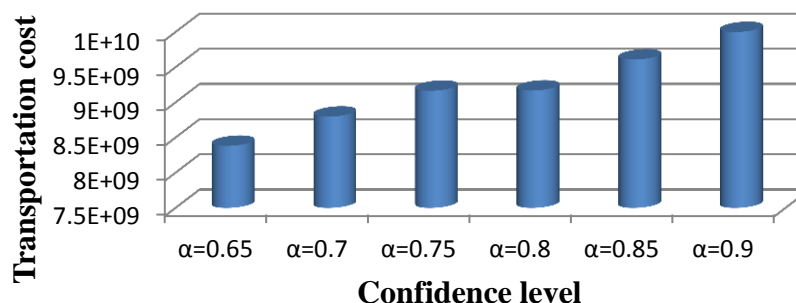


جدول ۳ تحلیل تغییر جریمه برون سپاری

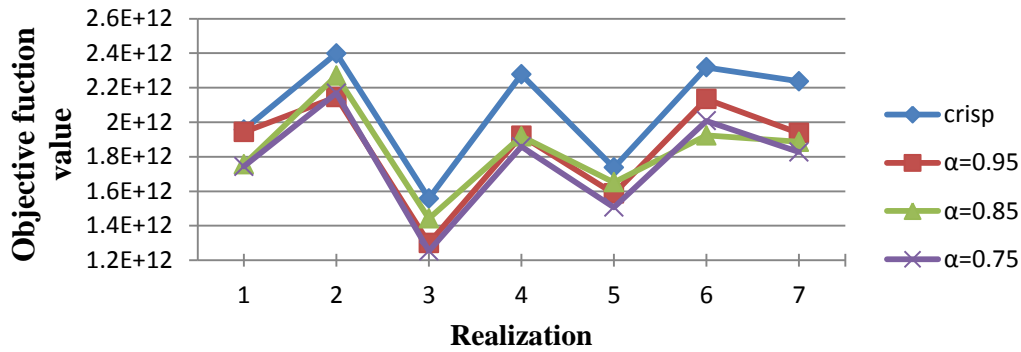
		۱			۲			۳				
		۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۵	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۵
۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)	۲/۲(۱)
۳/۲(۱)	۳/۲(۱)	۳/۲(۱)	۳/۲(۱)	۳/۲(۱)	۳/۲(۲)	۳/۲(۲)	۳/۲(۲)	۳/۲(۲)	۳/۲(۲)	۳/۲(۲)	۳/۲(۲)	۳/۲(۲)
۶/۱(۱)	۶/۱(۱)	۶/۱(۱)	۶/۱(۱)	۶/۱(۱)	۶/۱(۱)	۶/۱(۱)	۶/۱(۱)	۶/۱(۱)	۶/۱(۲)	۶/۱(۲)	۶/۱(۲)	۶/۱(۲)
۸/۱(۱)	۸/۱(۱)	۸/۱(۱)	۸/۱(۱)	۸/۱(۱)	۸/۱(۱)	۸/۱(۱)	۸/۱(۱)	۸/۱(۱)	۸/۱(۲)	۸/۱(۲)	۸/۱(۲)	۸/۱(۲)



شکل ۲ نمایش گرافیکی مجموع کل هزینه‌ها تحت سطوح اطمینان مختلف



شکل ۳ نمایش گرافیکی مجموع هزینه‌های حمل و نقل تحت سطوح اطمینان مختلف



شکل ۴ نمایش گرافیکی هزینه‌های کلی مدل‌ها تحت داده‌های تصادفی

ضمانت: مدل معادل زنجیره تامین حلقه بسته پایا بر اساس روش برنامه ریزی امکانی خیمنز و همکاران [۳۵] مدل برنامه‌ریزی امکانی توسعه داده شده با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش چهارم، در ادامه ارائه شده است. در این مدل پارامتر سطح اطمینان مقابل با عدم قطعیت‌ها می‌باشد که توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌گردد. مقدار این پارامتر در محدوده  $0.5 < \alpha \leq 1$  تعیین خواهد شد.

$$\begin{aligned}
 \text{MinE} = & \sum_i \left( \frac{f_i^{(1)} + f_i^{(2)} + f_i^{(3)} + f_i^{(4)}}{4} \right) x_i + \sum_j \sum_o \left( \frac{f_{jo}^{(1)} + f_{jo}^{(2)} + f_{jo}^{(3)} + f_{jo}^{(4)}}{4} \right) x_{j_o} \\
 & + \sum_m \sum_r \left( \frac{f_{mr}^{(1)} + f_{mr}^{(2)} + f_{mr}^{(3)} + f_{mr}^{(4)}}{4} \right) x_{m_r} + \sum_l \sum_e \left( \frac{f_{le}^{(1)} + f_{le}^{(2)} + f_{le}^{(3)} + f_{le}^{(4)}}{4} \right) \\
 & + \sum_j \sum_p f_{jp} x_{p_j} + \sum_t \sum_a \sum_n \sum_i \left( \frac{c_{ani}^{(1)} + c_{ani}^{(2)} + c_{ani}^{(3)} + c_{ani}^{(4)} + \beta_{an}^{(1)} + \beta_{an}^{(2)} + \beta_{an}^{(3)} + \beta_{an}^{(4)}}{4} \right) u_{anit} \\
 & + \sum_t \sum_i \sum_j \left( \frac{c_{ij}^{(1)} + c_{ij}^{(2)} + c_{ij}^{(3)} + c_{ij}^{(4)} + \theta_i^{(1)} + \theta_i^{(2)} + \theta_i^{(3)} + \theta_i^{(4)}}{4} \right) v_{ijt} \\
 & + \sum_t \sum_m \sum_i \left( \frac{c_{mi}^{(1)} + c_{mi}^{(2)} + c_{mi}^{(3)} + c_{mi}^{(4)} + z_m^{(1)} + z_m^{(2)} + z_m^{(3)} + z_m^{(4)}}{4} \right) \gamma_{mit} \\
 & + \sum_t \sum_j \sum_k \left( \frac{c_{jk}^{(1)} + c_{jk}^{(2)} + c_{jk}^{(3)} + c_{jk}^{(4)}}{4} \right) d_{jkt} + \sum_t \sum_j \left( \frac{\pi_{jt}^{(1)} + \pi_{jt}^{(2)} + \pi_{jt}^{(3)} + \pi_{jt}^{(4)}}{4} \right) \varepsilon_{jt} \\
 & + \sum_t \sum_j \left( \frac{\varphi_{jt}^{(1)} + \varphi_{jt}^{(2)} + \varphi_{jt}^{(3)} + \varphi_{jt}^{(4)}}{4} \right) \delta_{jt} + \sum_t \sum_k \left( \frac{rd_{kt}^{(1)} h_{kt}^{(1)} + rd_{kt}^{(2)} h_{kt}^{(2)} + rd_{kt}^{(3)} h_{kt}^{(3)} + rd_{kt}^{(4)} h_{kt}^{(4)}}{4} \right) \\
 & + \sum_t \sum_a \sum_m \sum_b \left( \frac{c_{amb}^{(1)} + c_{amb}^{(2)} + c_{amb}^{(3)} + c_{amb}^{(4)} + \phi_{am}^{(1)} + \phi_{am}^{(2)} + \phi_{am}^{(3)} + \phi_{am}^{(4)}}{4} \right) s_{ambt} \\
 & + \sum_t \sum_l \sum_m \left( \frac{c_{lm}^{(1)} + c_{lm}^{(2)} + c_{lm}^{(3)} + c_{lm}^{(4)} + \gamma_l^{(1)} + \gamma_l^{(2)} + \gamma_l^{(3)} + \gamma_l^{(4)}}{4} \right) \\
 \sum_j d_{jkt} \geq & \alpha \left( \frac{de_{kt}^{(3)} + de_{kt}^{(4)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{de_{kt}^{(3)} + de_{kt}^{(4)}}{2} \right) \quad \forall k, t \\
 \sum_l q_{klt} \leq & \alpha \left( \frac{rd_{kt}^{(1)} + rd_{kt}^{(2)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{rd_{kt}^{(3)} + rd_{kt}^{(4)}}{2} \right) \quad \forall k, t > 1 \\
 \sum_m (1-\eta) s_{ambt} \geq & \alpha \left( \frac{\psi_{abt}^{(3)} + \psi_{abt}^{(4)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{\psi_{abt}^{(1)} + \psi_{abt}^{(2)}}{2} \right) \quad \forall a = 1, b, t \\
 \sum_m s_{ambt} \geq & \alpha \left( \frac{\psi_{abt}^{(3)} + \psi_{abt}^{(4)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{\psi_{abt}^{(1)} + \psi_{abt}^{(2)}}{2} \right) \quad \forall a > 1, b, t \\
 \sum_n u_{anit} + \eta \sum_m \sum_j \gamma_{mit} = & \sum_j v_{ijt} \quad \forall a = 1, i, t
 \end{aligned}$$

$$\sum_n u_{anit} = \sum_j v_{ijt} \quad \forall a > 1, i, t$$

$$\mu_{jt} - \sum_p pp_{jp} xp_{jp} = \varepsilon_{jt} - \delta_{jt} \quad \forall j, t$$

$$\sum_k d_{jkt} + \sum_p pp_{jp} xp_{jp} = \sum_i v_{ijt} \quad \forall j, t = 1$$

$$\sum_k d_{jkt} + \mu_{jt-1} - \varepsilon_{jt-1} = \sum_i v_{ijt} \quad \forall j, t > 1$$

$$\sum_k q_{klt} = \sum_m g_{lmt} \quad \forall l, t$$

$$\sum_l g_{lmt} = \sum_i \gamma_{mit} \quad \forall m, t$$

$$\sum_l g_{lmt} \geq \sum_b s_{ambt} \quad \forall a, m, t$$

$$\sum_j v_{ijt} \leq \left[ \alpha \left( \frac{pi_i^{(1)} + pi_i^{(2)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{pi_i^{(3)} + pi_i^{(4)}}{2} \right) \right] xi_i \quad \forall i, t$$

$$\sum_k q_{klt} \leq \sum_e \left[ \alpha \left( \frac{pl_e^{(1)} + pl_e^{(2)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{pl_e^{(3)} + pl_e^{(4)}}{2} \right) \right] xl_e \quad \forall l, t$$

$$\sum_l g_{lmt} \leq \sum_r \left[ \alpha \left( \frac{pm_{mr}^{(1)} + pm_{mr}^{(2)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{pm_{mr}^{(3)} + pm_{mr}^{(4)}}{2} \right) \right] xm_{mr} \quad m, t$$

$$\sum_k d_{jkt} + \sum_p pp_{jp} xp_{jp} \leq \sum_o \left[ \alpha \left( \frac{pj_{jo}^{(1)} + pj_{jo}^{(2)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{pj_{jo}^{(3)} + pj_{jo}^{(4)}}{2} \right) \right] xj_{jo} \quad \forall j, t$$

$$\sum_o xj_{jo} \leq 1 \quad \forall j$$

$$\sum_e xl_e \leq 1 \quad \forall l$$

$$\sum_r xm_{mr} \leq 1 \quad \forall m$$

$$\sum_o xj_{jo} = \sum_p xp_{jp} \quad \forall j$$

$$\sum_k \left[ \alpha \left( \frac{\lambda_{jt}^{(3)} + \lambda_{jt}^{(4)}}{2} \right) + (1-\alpha) \left( \frac{\lambda_{jt}^{(1)} + \lambda_{jt}^{(2)}}{2} \right) \right] d_{jkt} \leq \mu_{jt} \quad \forall j, t$$

$$u_{anit}, v_{ijt}, d_{jkt}, q_{klt}, g_{lmt}, \gamma_{mit}, s_{ambt}, \varepsilon_{jt}, \delta_{jt} \geq 0 \quad \forall a, b, i, j, k, l, m, n, t$$

$$xj_{jo}, xi_i, xp_{jp}, xl_e, xm_{mr} \in \{0, 1\} \quad \forall e, i, j, l, m, o, p, r$$

مراجع

[1] Lee, H.L. (2005). "Aligning supply chain strategies with product uncertainties". California management review, 44(3), 105-119.

[2] Amaro, A.C.S., Barbosa-Póvoa, A.P.F. (2009). "The effect of uncertainty on the optimal closed-loop supply chain planning under different partnerships structure". Computers & Chemical Engineering, 33(12), 2144-2158.

[3] Meixell, M.J., Gargeya, V.B. (2005). "Global supply chain design: A literature review and critique". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 41(6), 531-550.

[4] Dullaert, W., Bräysy, O., Goetschalckx, M., Raa, B., Center, A. (2007). "Supply chain (re) design: Support for managerial and policy decisions". European Journal of Transport and Infrastructure Research, 7(2), 73-92.

[5] Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jolai, F., Baboli, A. (2013). "Reliable design of a closed loop supply chain network under uncertainty: An interval fuzzy possibilistic chance-constrained model". Engineering Optimization, 45(6), 745-765.

[6] Meade, L., Sarkis, J., Presley, A. (2007). "The theory and practice of reverse logistics". International Journal of Logistics Systems and Management, 3(1), 56-84.

[7] Cruz-Rivera, R., Ertel, J. (2009). "Reverse logistics network design for the collection of end-of-life vehicles in Mexico". European Journal of Operational Research, 196(3), 930-939.

- [8] Baumgarten, H., Butz, C., Fritsch, A., Sommer-Dittrich, T. (2003). "Supply chain management and reverse logistics-integration of reverse logistics processes into supply chain management approaches". In *Electronics and the Environment, 2003. IEEE International Symposium on* (pp. 79-83). IEEE.
- [9] Schultmann, F., Zumkeller, M., Rentz, O. (2006). "Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry". *European journal of operational research*, 171(3), 1033-1050.
- [10] Ramezani, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). "A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level". *Applied Mathematical Modelling*, 37(1), 328-344.
- [11] Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jolai, F. (2013). "Reliable design of a logistics network under uncertainty: A fuzzy possibilistic-queueing model". *Applied Mathematical Modelling*, 37(5), 3254-3268.
- [12] Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., Baboli, A. (2012). "Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queueing model". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(6), 1152-1168.
- [13] Pishvae, M.S., Torabi, S.A. (2010). "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty". *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
- [14] Pishvae, M.S., Razmi, J. (2012). "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming". *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433-3446.
- [15] Fleischmann, M., Beullens, P., BLOEMHOF-RUWAARD, J.M., Wassenhove, L.N. (2001). "The impact of product recovery on logistics network design". *Production and operations management*, 10(2), 156-173.
- [16] Klibi, W., Martel, A., Guitouni, A. (2010). "The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review". *European Journal of Operational Research*, 203(2), 283-293.
- [17] HO, C.J. (1989). "Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness". *The International Journal of Production Research*, 27(7), 1115-1135.
- [18] 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.
- [19] Clark, D., Takahashi, Y. (2011). "Quake disrupts key supply chains". *The Wall Street Journal Asia*, March, 12.
- [20] Snyder, L.V., Daskin, M.S. (2005). "Reliability models for facility location: the expected failure cost case". *Transportation Science*, 39(3), 400-416.
- [21] Lim, M., Daskin, M.S., Bassamboo, A., Chopra, S. (2010). "A facility reliability problem: formulation, properties, and algorithm". *Naval Research Logistics (NRL)*, 57(1), 58-70.
- [22] 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.
- [23] Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K. (2010). "A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling". *Applied Mathematical Modelling*, 34(3), 655-670.
- [24] UNEP and the Secretariat of the Basel Convention, *Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Waste Lead-acid Batteries*, Basel Convention series, SBC No. 2003/9.
- [25] Tsoufias, G. T., Pappis, C. P., Minner, S. (2002). "An environmental analysis of the reverse supply chain of SLI batteries". *Resources, Conservation and Recycling*, 36(2), 135-154.
- [26] Daniel, S.E., Pappis, C.P., Voutsinas, T.G. (2003). "Applying life cycle inventory to reverse supply chains: a case study of lead recovery from batteries". *Resources, Conservation and Recycling*, 37(4), 251-281.

- [27] 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.
- [28] Leung, S.C., Tsang, S.O., Ng, W.L., Wu, Y. (2007). "A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment". *European Journal of Operational Research*, 181(1), 224-238.
- [29] El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A. (2010). "A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk". *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 423-431.
- [30] Liu, L., Huang, G.H., Liu, Y., Fuller, G.A., Zeng, G.M. (2003). "A fuzzy-stochastic robust programming model for regional air quality management under uncertainty". *Engineering Optimization*, 35(2), 177-199.
- [31] Bellman, R.E., Zadeh, L.A. (1970). "Decision-making in a fuzzy environment". *Management science*, 17(4), B-141.
- [32] Inuiguchi, M., Ramík, J. (2000). "Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem". *Fuzzy sets and systems*, 111(1), 3-28.
- [33] Dubois, D., Fargier, H., Fortemps, P. (2003). "Fuzzy scheduling: Modelling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge". *European Journal of Operational Research*, 147(2), 231-252.
- [34] Pishvaei, M.S., Razmi, J., Torabi, S.A. (2012). "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach". *Fuzzy sets and systems*, 206, 1-20.
- [35] Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., Rodri, M.V. (2007). "Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution". *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1599-1609.
- [36] Heilpern, S. (1992). "The expected value of a fuzzy number". *Fuzzy sets and Systems*, 47(1), 81-86.
- [37] JIMÉNEZ, M. (1996). "Ranking fuzzy numbers through the comparison of its expected intervals". *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 4(04), 379-388.