

## توسعه یک رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته

مجتبی فرخ\*، عادل آذر\*\*، غلامرضا جندقی\*\*\*

### چکیده

طی یک دهه گذشته با توجه به افزایش اهمیت رقابت‌پذیری اقتصادی و نگرانی‌های زیست‌محیطی در زمینه محصولات فرسوده، موضوع زنجیره تأمین حلقه‌بسته مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. پژوهش حاضر درصدد توسعه یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی فازی استوار با استفاده از مفاهیم برنامه‌ریزی با محدودیت‌های اعتبار و میانگین انحراف مطلق برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت شرایط عدم قطعیت ترکیبی است. در مدل پیشنهادی فرض می‌شود که هزینه ثابت احداث مراکز تولیدی به صورت غیرخطی و تابعی از سطح ظرفیت است. این مدل با استفاده از یک تکنیک خطی‌سازی به یک مدل خطی معادل تبدیل می‌شود. در این مدل دو منبع عدم قطعیت برای برخی پارامترها وجود دارد. نخستین منبع از تصادفی‌بودن پارامترها ناشی می‌شود که با سناریوهای آتی بیان می‌شود. دومین منبع از عدم قطعیت شناختی در پارامترهای هر سناریو ناشی می‌شود؛ به طوری که می‌توان آن‌ها را با یک توزیع امکانی مشخص کرد. عملکرد مدل پیشنهادی برحسب انحراف استاندارد و هزینه با مدل‌های استوار دیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است با صرف یک هزینه پایین استواری مدل را بهبود بخشد.

**کلیدواژه‌ها:** برنامه‌ریزی تصادفی فازی؛ بهینه‌سازی استوار؛ مدل غیرخطی؛ زنجیره تأمین حلقه‌بسته.

---

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۲/۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۶/۲.

\* دانشجوی دکتری، پردیس فارابی دانشگاه تهران.

\*\* استاد، دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول).

E-mail: Azara@modares.ac.ir

\*\*\* استاد، پردیس فارابی دانشگاه تهران.

## ۱. مقدمه

در دهه اخیر، اهمیت رو به رشد منافع اقتصادی و تأثیرات محیطی استفاده از محصولات قراضه، بیشتر شرکت‌ها را به تمرکز بر طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته<sup>۱</sup> تشویق کرده است [۲۷، ۳۷، ۴۲]؛ در واقع آن‌ها علاقه‌مند به انجام فعالیت‌های زنجیره تأمین حلقه‌بسته مانند استفاده مجدد، بازیافت، تولید مجدد و انهدام هستند [۹]. یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سیستم یکپارچه‌ای است که همزمان شامل هر دو نوع زنجیره تأمین مستقیم و معکوس است. طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته یکی از موضوع‌های زیرساختاری است که شامل تصمیم‌گیری در خصوص تعداد، مکان، ظرفیت و هماهنگی تسهیلات، جریان‌ات درون شبکه، مقادیر خرید و فروش و نگهداری موجودی برای بهینه‌سازی کل عملیات زنجیره تأمین است [۳]. از آنجاکه طراحی یکپارچه زنجیره تأمین مستقیم و معکوس عامل کلیدی در کاهش هزینه‌ها، بهبود سطح خدمت و توجه به مسائل محیطی است، اخیراً بیشتر پژوهشگران بر طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته تمرکز کرده‌اند [۹، ۱۴، ۴۳، ۵۱، ۵۷]. در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت شرایط عدم قطعیت پیشنهاد می‌شود. در پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، هزینه احداث مراکز تولیدی معمولاً یا به صورت ثابت (مدل‌های تک‌ظرفیتی) و یا در مدل‌های چندظرفیتی هزینه‌ای متناظر با سطوح مختلف ظرفیت در نظر گرفته می‌شود؛ در واقع در این مدل‌ها به تعیین سطح بهینه ظرفیت پرداخته نمی‌شود (مدل‌های تک‌ظرفیتی) [۱۰، ۴۲] و یا تنها به صورت گسسته به انتخاب یک سطح بهینه از میان سطوح مختلف ظرفیت پرداخته می‌شود (مدل‌های چندظرفیتی) [۱۴، ۳۱، ۴۷]. در پژوهش حاضر با تعیین یک سطح حداقل و حداکثر سطح ظرفیت مجاز، سطوح بهینه ظرفیت به صورت پیوسته تعیین خواهد شد. این شیوه مدل‌سازی این مزیت را دارد که می‌توان سطح ظرفیت را به صورت پیوسته در یک بازه مجاز در نظر گرفت و سپس سطح بهینه را تعیین کرد؛ با این حال، در مدل پیشنهادی هزینه ثابت احداث مراکز تولیدی به صورت غیرخطی و تابعی از سطح ظرفیت است. این مدل با استفاده از یک روش کارا به یک مدل خطی عدد صحیح معادل تبدیل می‌شود.

در محیط‌های کسب‌وکار کنونی، مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته در معرض بسیاری از انواع عدم قطعیت‌ها در کنار عدم قطعیت تصادفی و عدم قطعیت شناختی (فازی) قرار دارد [۳، ۳۶، ۴۷، ۳۳]. هنگام جست‌وجوی جواب برای یک مسئله بهینه‌سازی باید این نوع عدم قطعیت‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، مدل‌های برنامه‌ریزی تحت عدم قطعیت از مدل‌های تصادفی [۱، ۴۲]، فازی [۱۵، ۳۵، ۴۵، ۴۹] و استوار [۱۴، ۳۶، ۴۱] تا

---

1. Closed-loop supply chain (CLSC)

مدل‌های امکانی استوار [۳۸] و تصادفی استوار [۲۶، ۲۹، ۵۲] توسعه داده شده‌اند. در مدل‌های تصادفی از داده‌های تاریخی برای تقریب توابع احتمال پارامترهای عدم قطعیت یا احتمال سناریوها استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی فازی (امکانی) نیز پارامترهای مدل ریاضی با توزیع‌های فازی (امکانی) و با استفاده از دانش و تجربه ذهنی تصمیم‌گیرندگان مشخص می‌شوند [۳۵، ۴۲]. در مدل‌های استوار پارامترها به صورت سناریوهای گسسته و یا در یک دامنه پیوسته تعریف می‌شوند. هدف این نظریه به دست آوردن جواب بهینه‌ای است که نسبت به تقریباً تمام پارامترهای عدم قطعیت حساسیت نداشته باشد. در مدل‌های امکانی استوار یا تصادفی استوار به ترتیب از توزیع‌های امکانی و توزیع‌های احتمال برای مدل‌سازی پارامترها و از عبارات استواری بهینگی و استواری شدنی در تابع هدف در کنار مقدار میانگین هزینه‌ها برای کنترل تغییرپذیری تابع هدف (ریسک) استفاده می‌شود [۲۶، ۳۶، ۳۸]. این عبارات در ادامه تشریح خواهند شد.

در رویکردهای برنامه‌ریزی تحت عدم قطعیت، تابع هدف می‌تواند به روش‌های مختلفی مدل‌سازی شود که شامل حداقل‌سازی هزینه موردانتظار، حداقل‌سازی انحراف‌های موردانتظار هزینه و حداقل‌سازی حداکثر هزینه است. یکی از معایب عمده روش‌های برنامه‌ریزی امکانی مبتنی بر مقدار میانگین [۵] یا مقدار موردانتظار [۱۷] این است که این روش‌ها تنها مقادیر میانگین یا موردانتظار تابع هدف را در توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی در نظر می‌گیرند. به رغم پژوهش‌های گسترده در زمینه مسئله ریسک در حوزه‌های مختلف، پژوهش‌ها در زمینه کنترل ریسک و انحرافات (تغییرپذیری) تابع هدف تحت شرایط عدم قطعیت فازی نادر هستند [۳۸، ۵۴]. بر اساس مبانی نظری روش‌های برنامه‌ریزی استوار، استواری عمدتاً به استواری بهینگی و استواری شدنی بودن گروه‌بندی می‌شود. یک جواب به صورت استواری بهینگی تعریف می‌شود اگر تقریباً برای تمامی مجموعه داده‌های عدم قطعیت نزدیک به بهینه باقی بماند. در مبانی نظری برنامه‌ریزی استوار، برای بررسی این نوع استواری، تغییرپذیری تابع هدف به صورت معیاری از استواری بهینگی در کنار مقدار میانگین هزینه‌ها در کنار تابع هدف می‌تواند به کار برده شود. شاخص‌های مختلفی برای تغییرپذیری تابع هدف مانند واریانس، انحراف استاندارد، انحراف مطلق و نیم‌انحراف از مقدار آرمانی به کار گرفته شده است [۲۹، ۳۸، ۵۴]. در پژوهش حاضر، با توجه به فازی بودن تابع هدف، از مفهوم تغییرپذیری امکانی تابع هدف برای کنترل استواری بهینگی آن استفاده می‌شود؛ از سوی دیگر، یک جواب به صورت استوار شدنی بودن تعریف می‌شود؛ اگر تقریباً برای تمامی مجموعه داده‌های عدم قطعیت موجه باقی بماند. در مبانی نظری پژوهش، استفاده از جریمه نشدنی در تابع هدف برای دادن جریمه به تخطی از محدودیت‌های عدم قطعیت، یک روش معمول برای در نظر گرفتن استواری شدنی بودن مدل است [۲۹، ۳۸، ۵۲].

در یک فرایند تصمیم‌گیری واقعی، اغلب یک عدم‌قطعیت ترکیبی وجود دارد. در شرایطی استفاده از عدم‌قطعیت ترکیبی نیاز است که پارامترها به‌طور همزمان دارای دو نوع عدم‌قطعیت تصادفی و شناختی (فازی) باشند. برای مثال، تقاضای مشتریان تحت سناریوهای اقتصادی مختلف می‌تواند دارای یک عدم‌قطعیت شناختی نیز باشد. این نوع عدم‌قطعیت به این دلیل به‌وجود می‌آید که در تخمین مقدار دقیق پارامترهای تصادفی تحت سناریوهای مختلف یک عدم‌قطعیت شناختی نیز وجود دارد. معمولاً به دلیل تکرارناپذیری و ویژگی‌های خاص دیگر هر سناریو، در تخمین پارامترهای هر سناریو داده‌های کافی در اختیار نیست تا بتوان توزیع احتمال هر پارامتر عدم‌قطعیت را پیدا کرد؛ به همین دلیل برای تعریف پارامترها تحت هر سناریو از مقادیر مبهم در شکل اعداد فازی استفاده می‌شود [۱۴، ۲۴، ۲۵، ۵۸]. این به مسائل بهینه‌سازی تصادفی فازی گسترش پیدا می‌کند که توسعه آن در یک چارچوب استوار موضوع اصلی این پژوهش است. تعداد مقاله‌هایی که به مدل‌های استوار با عدم‌قطعیت ترکیبی در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین مربوط می‌شوند، نادر است [۴۷]؛ باوجوداین هنوز در هیچ پژوهشی، یک رویکرد استوار که بتواند هر دو وجه استواری بهینگی و استواری شدنی بودن را تحت شرایط عدم‌قطعیت ترکیبی بررسی کند، ارائه نشده است. در قسمت ۲ به بررسی مبانی نظری و پیشینه پژوهش و در قسمت ۳ به تشریح مسئله و مدل‌سازی آن، خطی‌سازی مدل و رویکرد پیشنهادی ارائه خواهد شد. درنهایت در قسمت ۴ با ارائه یک مثال عددی، عملکرد و اعتبار رویکرد پیشنهادی بررسی می‌شود.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در زمینه مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته، آستر و همکاران (۲۰۰۷)، یک مدل چند محصولی ارائه کردند که مسئله تولید و تولید مجدد را به‌طور جداگانه بررسی می‌کرد [۴۸]. کو و ایوانز (۲۰۰۷)، یک شبکه حلقه بسته یکپارچه پویا پیشنهاد کردند که به‌صورت لجستیک‌های سه‌بخشی عمل می‌کرد [۱۸]. چوینارد و همکاران (۲۰۰۸)، یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی برای طراحی یک شبکه لجستیک معکوس ارائه کردند. در مدل آن‌ها امکان استفاده مجدد و بازیافت محصولات بررسی شد [۶]. مین و کو (۲۰۰۸)، یک طراحی پویا از یک شبکه لجستیک حلقه‌بسته پیشنهاد دادند و برای حل مسئله خود که شامل مکان‌یابی و تخصیص لجستیک سه سطحی بود از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند [۳۰].

کروز-ریورا و ارتل (۲۰۰۹)، یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته برای جمع‌آوری وسایل نقلیه فرسوده پیشنهاد کردند. این شبکه مقدار وسایل نقلیه فرسوده جمع‌آوری شده را بیشینه می‌کرد که در چارچوب یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات چندظرفیتی مدیریت می‌شد [۷]. لی و دانگ

(۲۰۰۹)، یک مدل مکان‌یابی و تخصیص پویا تحت عدم قطعیت تقاضا با تسهیلات پردازش ترکیبی پیشنهاد کردند. تصمیم‌های این مدل به مکان‌یابی و حمل‌ونقل در هر دوره زمانی مربوط می‌شد [۲۸]. سالما و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل چندمحصولی و چنددوره‌ای برای یک لجستیک حلقه‌بسته معرفی کردند [۴۳]. ال سید و همکاران (۲۰۱۰)، یک طراحی شبکه لجستیک حلقه‌بسته با سه سطح در جهت مستقیم (تأمین‌کننده، کارخانه و مراکز توزیع‌کننده) با هدف حداکثرسازی سود زنجیره تأمین پیشنهاد کردند [۱۰]. وانگ و هسو (۲۰۱۰) نیز یک مدل طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته توسعه دادند. در مدل آن‌ها جریان‌های مستقیم و معکوس از مراکز توزیع به صورت تسهیلات پردازش ترکیبی استفاده می‌شد [۵۰]. رضانی و همکاران (۲۰۱۳)، یک مدل احتمالی چندهدفه برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین معکوس و مستقیم تحت عدم قطعیت معرفی کردند. عملکرد زنجیره از طریق سه شاخص سود، پاسخگویی مشتری و کیفیت تأمین‌کنندگان ارزیابی شد [۴۲]. میراخورلی (۲۰۱۴) برای مسئله طراحی شبکه لجستیک حلقه‌بسته از یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه فازی استفاده کرد و برای حل آن یک الگوریتم ژنتیک معرفی کرد [۳۱]. حسنی و حسینی (۱۳۹۳)، یک مدل ریاضی چندهدفه استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی تحت عدم قطعیت توسعه دادند و با الگوریتم ممتیک آن را حل کردند [۱۳].

اخیراً بررسی هر دو نوع عدم قطعیت تصادفی و شناختی در مدل‌سازی زنجیره تأمین یکپارچه توسط کلیبی و مارتل (۲۰۱۲) و کیوانشکوه و همکاران (۲۰۱۶) مورد تأکید قرار گرفته است [۲۰]. ریعه و همکاران (۱۳۹۰) برای کاهش عدم قطعیت موجود در زنجیره تأمین، از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای منبع‌یابی قطعات محصولات ایران خودرو استفاده کردند [۴۰]. محمدی و همکاران (۲۰۱۴) با ترکیب دو رویکرد برنامه‌ریزی تحت عدم قطعیت یعنی برنامه‌ریزی امکانی با محدودیت‌های شانسی و رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه فازی، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی-امکانی چندهدفه برای تشکیل هم‌تای قطعی مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه تصادفی-فازی پیشنهاد کردند [۳۲]. ترابی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو یک رویکرد جدید برای بررسی همزمان عدم قطعیت ترکیبی استفاده کردند. آن‌ها برای مدل‌سازی این مسئله از رویکرد محافظه‌کارانه  $p$ -استوار<sup>۱</sup> استفاده کردند [۴۷]. ژالچیان و همکاران (۲۰۱۶) با طراحی یک مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار، یک رویکرد دومرحله‌ای شامل برنامه‌ریزی امکانی-تصادفی و تئوری بازی اصلاح‌شده را برای مواجهه با عدم قطعیت مدل خود به کار بردند [۵۸]. کیوانشکوه و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدید برای طراحی شبکه زنجیره تأمین

1. p-Robust

حلقه‌بسته پیشنهاد کردند. نوآوری اصلی آن‌ها توسعه یک رویکرد برنامه‌ریزی استوار - تصادفی برای مدل‌سازی همزمان دو نوع مختلف عدم قطعیت شامل سناریوهای تصادفی برای هزینه‌های حمل‌ونقل و مجموعه‌های عدم قطعیت چندوجهی برای تقاضا و برگشت محصولات بود [۲۱]. گویندان و فتاحی (۲۰۱۵) به بررسی انواع اندازه‌های ریسک و استواری برای طراحی زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت تصادفی تقاضا پرداختند [۱۱].

برای در نظر گرفتن مسئله ریسک در برنامه‌ریزی تصادفی، مولوی و همکاران (۱۹۹۵)، یک روش بهینه‌سازی استوار برای مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو پیشنهاد کردند [۲۹]. این رویکرد به‌طور گسترده‌ای در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین به‌کار گرفته شده است [۳، ۳۴] و بعداً توسط یو و لی (۲۰۰۰) و لئون و همکاران (۲۰۰۷) توسعه داده شده است [۲۶، ۵۲]. در حوزه برنامه‌ریزی امکانی، پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)، نظریه برنامه‌ریزی استوار را در چارچوب برنامه‌ریزی امکانی توسعه دادند که منتج به یک رویکرد جدید موسوم به برنامه‌ریزی امکانی استوار شد [۳۸]. پیشوایی و خلف (۲۰۱۶) انواع مدل‌های برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر-امکانی ترکیبی استوار را پیشنهاد کردند [۳۹]. ژانگ و همکاران (۲۰۰۷، ۲۰۰۹)، مدل‌های انتخاب سبد سهام مبتنی بر میانگین‌های امکانی فوقانی و تحتانی و واریانس‌های امکانی اعداد فازی را معرفی کردند [۵۴، ۵۵]. در مدل ژانگ و ژانگ (۲۰۱۴)، انحراف مطلق به‌صورت یک محدودیت تعریف می‌شود و حد فوقانی آن توسط ترجیحات تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود. در این فرمول‌بندی ریسک تابع هدف برای بهینه‌سازی در تابع هدف آورده نمی‌شود [۵۶]. بابازاده و همکاران (۲۰۱۶)، یک فرمول‌بندی جدید برای روش برنامه‌ریزی امکانی پیشنهاد کردند که قادر است تحت عدم قطعیت امکانی مقادیر انحرافات را در کنار میانگین کل تابع هدف حداقل سازد؛ با این حال این مدل تنها استواری بهینگی مدل را مورد بررسی قرار می‌دهد [۴].

با بازنگری پیشینه پژوهش و جدول ۱ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در سال‌های اخیر طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین با مدل‌های امکانی و تصادفی استوار توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود معطوف کرده است. با وجود این، برخلاف مدل‌های تصادفی، در مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت ترکیبی به مدل‌سازی استوار با در نظر گرفتن هر دو وجه استواری بهینگی و استواری شدنی پرداخته نشده است؛ بنابراین در این پژوهش، یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی فازی استوار برای طراحی یک مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت عدم قطعیت ترکیبی پیشنهاد می‌شود؛ علاوه بر این، در مدل‌سازی مسئله زنجیره تأمین مورد بررسی، ظرفیت تسهیلات برخلاف سایر پژوهش‌ها به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. مبانی نظری طراحی شبکه زنجیره تأمین بسته با رویکرد استواری

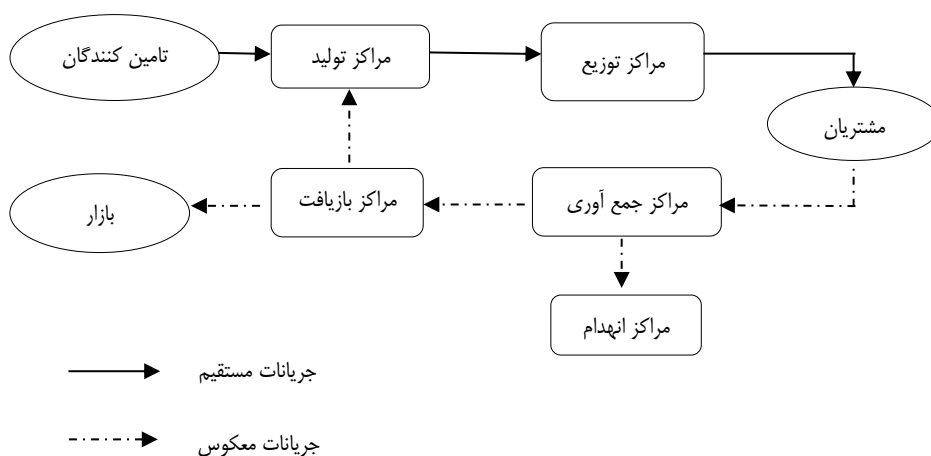
| مقاله                       | حلقه بسته | ظرفیت تسهیلات |            | رویکرد برنامه‌ریزی |        | شاخص استواری         | استواری بهبودی | استواری شدنی |
|-----------------------------|-----------|---------------|------------|--------------------|--------|----------------------|----------------|--------------|
|                             |           | تک‌ظرفیتی     | چند ظرفیتی | تصادفی             | امکانی |                      |                |              |
| (Pan & Nagi, 2010)          | *         | *             |            | *                  |        | انحراف مطلق          | *              | *            |
| (Pishvae et al., 2012)      | *         | *             |            | *                  |        | دامنه تغییرات امکانی | *              | *            |
| (Baghalian et al., 2013)    | *         | *             |            | *                  |        | انحراف مطلق          | *              | *            |
| (Klibi & Martel, 2013)      | *         | *             |            | *                  |        | نیم انحراف           | *              | *            |
| (Ramezani et al., 2013)     | *         | *             | *          | *                  |        |                      |                | *            |
| (Zhang & Zhang, 2014)       | *         | *             |            | *                  |        | انحراف مطلق امکانی   | *              | *            |
| (Govindan & Fattahi, 2015)  | *         | *             | *          | *                  |        | نیم انحراف           | *              | *            |
| (Keyvanshokoh et al., 2016) | *         | *             | *          | *                  |        |                      |                | *            |
| تحقیق حاضر                  | *         | *             | *          | *                  | *      | انحراف مطلق امکانی   | *              | *            |

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

روش‌شناسی پژوهش حاضر بدین صورت است که ابتدا به مدلسازی زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی پرداخته می‌شود؛ سپس روش خطی سازی مدل زنجیره تأمین برای مسئله حاضر ارائه می‌گردد و در نهایت به رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار پیشنهادی مبتنی بر مفاهیم میانگین امکانی و انحراف مطلق امکانی پرداخته می‌شود.

**تشریح مسئله و مدل‌سازی.** در زنجیره تأمین حلقه‌بسته مورد بررسی که در شکل ۱ نشان داده شده است، محصولات از طریق جریان‌های مستقیم باید در کارخانه‌های مختلفی تولید شوند.

برای استقرار این کارخانه‌ها، به‌عنوان مراکز تولیدی جدید، مکان آن‌ها از میان مکان‌های پیشنهادی مورد ارزیابی و انتخاب قرار می‌گیرد؛ سپس محصولات نهایی از طریق تولیدکنندگان به توزیع‌کنندگان و سپس به مشتریان ارسال می‌شود. این توزیع‌کنندگان دارای مکان‌های پیشنهادی هستند که باید برای استقرار ارزیابی شوند؛ سپس محصولات قراضه که در مراکز جمع‌آوری اولیه جمع‌آوری می‌شوند باید سریعاً به مراکز بازگشت متمرکز منتقل شوند. در این مراکز محصولات قراضه برای بازیافت و انهدام بازرسی و از یکدیگر جدا می‌شوند. بعد از جداسازی، محصولات غیرقابل استفاده به مراکز انهدام و محصولات قابل استفاده به کارخانه‌های بازیافت منتقل و در آنجا شکسته و عناصر آن‌ها از یکدیگر جدا می‌شوند؛ در نهایت مواد بازیافتی به کارخانه‌های تولیدی یا برای فروش به اشخاص ثالث در بازار ارسال می‌شوند.



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته

شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته مورد بررسی دارای یک ساختار عمومی بوده و مطابق بسیاری از فرایندهای بازیافت است؛ به‌طوری‌که می‌توان از آن در صنایع مختلف مانند صنعت مبلمان، باتری و لاستیک استفاده کرد. مفروضات عمده به‌صورت زیر هستند:

- هزینه حمل هر واحد محصول از تأمین‌کننده به کارخانه‌های تولیدی در هزینه خرید مواد خام لحاظ می‌شود؛
- مکان‌های تأمین‌کنندگان و مشتریان ثابت هستند؛
- مقدار تقاضا و برخی مقادیر هزینه شامل هزینه‌های خرید مواد، تولید، توزیع، جمع‌آوری، بازیافت و حمل‌ونقل به‌صورت متغیرهای مبتنی بر سناریوهای فازی هستند؛
- هزینه ثابت استقرار و ظرفیت تسهیلات نادقیق است و با توزیع‌های فازی بیان می‌شود؛



- هزینه بازرسی هر واحد محصول برگشتی در هزینه جمع‌آوری لحاظ می‌شود؛
- برخی از مواد اولیه تنها از طریق بازیافت زنجیره تأمین باید تأمین شود؛
- مراکز انهدام در هر مکان موجود بوده و دارای ظرفیت نامحدودی هستند.

### اندیس‌ها

- $i$  : تأمین‌کنندگان بالقوه
- $C$  : مجموعه مواد
- $j$  : مکان‌های بالقوه برای کارخانه‌ها
- $k$  : مکان‌های بالقوه برای مراکز توزیع
- $l$  : مکان‌های ثابت مشتریان
- $h$  : مکان‌های بالقوه برای مراکز جمع‌آوری
- $r$  : مکان‌های بالقوه برای مراکز بازیافت
- $t$  : فناوری‌های تولید موجود برای مراکز بازیافت
- $S$  : سناریوها

### پارامترها

- $\tilde{d}_{ls}$ : مقدار تقاضای مشتری  $l$  در سناریو  $S$
- $ca_c$ : مقدار مواد موردنیاز  $C$  برای تولید یک واحد محصول (کیلوگرم)
- $f\tilde{c}m_j$ : هزینه ثابت احداث کارخانه  $j$
- $f\tilde{c}d_k$ : هزینه ثابت احداث مرکز توزیع  $k$
- $f\tilde{c}h$ : هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری  $h$
- $f\tilde{c}r_t$ : هزینه ثابت احداث کارخانه بازیافت  $r$  با فناوری  $t$
- $\tilde{t}_{jks}$ : هزینه حمل هر واحد محصول از کارخانه  $j$  به مرکز توزیع  $k$  تحت سناریو  $S$
- $\tilde{t}_{kls}$ : هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز توزیع  $k$  به مشتری  $l$  تحت سناریو  $S$
- $\tilde{t}_{hrs}$ : هزینه حمل هر واحد محصول قراضه از مرکز جمع‌آوری  $h$  به مرکز بازیافت  $r$  تحت سناریو  $S$
- $\tilde{t}_{rjs}$ : هزینه حمل هر کیلوگرم مواد از مرکز بازیافت  $r$  به کارخانه  $j$  تحت سناریو  $S$
- $p\tilde{p}_{cis}$ : هزینه خرید مواد  $C$  از تأمین‌کننده  $i$  تحت سناریو  $S$  (کیلوگرم)
- $p\tilde{o}_{ls}$ : هزینه خرید هر واحد محصول قراضه از مشتری  $l$  تحت سناریو  $S$
- $m\tilde{c}_{js}$ : هزینه تولید هر واحد محصول در کارخانه  $j$  تحت سناریو  $S$
- $\tilde{c}\tilde{c}_{lhs}$ : هزینه جمع‌آوری هر واحد محصول قراضه از مشتری  $l$  در مرکز جمع‌آوری  $h$  تحت سناریو  $S$
- $r\tilde{c}_{rts}$ : هزینه بازیافت ماده  $C$  در مرکز بازیافت  $r$  با فناوری  $t$  تحت سناریو  $S$

- $c\tilde{a}s_{ci}$  : حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده  $i$  برای مواد  $c$
- $c\tilde{a}m_j^{low}$  : حداقل ظرفیت کارخانه  $j$
- $c\tilde{a}m_j^{up}$  : حداکثر ظرفیت کارخانه  $j$
- $c\tilde{a}d_k$  : حداکثر ظرفیت توزیع‌کننده  $k$
- $c\tilde{a}c_h$  : حداکثر ظرفیت مرکز جمع‌آوری  $h$
- $c\tilde{a}r_{ct}$  : حداکثر ظرفیت مرکز بازیافت  $t$  با فناوری  $c$  برای بازیافت مواد  $c$
- $\tau_l$  : نسبت کالای برگشتی از مشتری  $l$
- $W_c$  : مقدار مواد بازیافتی  $c$  از هر واحد محصول قراضه
- $\pi_l$  : هزینه جریمه هر واحد محصول ارضاء نشده برای مشتری  $l$
- $p_s$  : احتمال سناریو  $s$

از میان پارامترهای بالا، میزان مصرف مواد  $(ca_c)$ ، نسبت کالای برگشتی  $(\tau_l)$  و مقدار مواد قابل‌بازیافت  $(W_c)$  به صورت قطعی بوده است. برخی پارامترها شامل هزینه ثابت احداث تسهیلات و ظرفیت تسهیلات از نوع فازی و سایر پارامترها نیز از نوع ترکیبی (تصادفی فازی) هستند که جزو مفروضات مسئله است. در پارامترهای ترکیبی علامت  $s$  نشان‌دهنده وجه تصادفی و علامت  $md$  نشان‌دهنده وجه فازی است.

### متغیرها

- $X_{cij}$  : مقدار مواد اولیه  $c$  خریداری‌شده از تأمین‌کننده  $i$  توسط کارخانه  $j$  تحت سناریو  $s$
- $Xa_{jks}$  : مقدار ارسال محصول تولیدشده در کارخانه  $j$  به مرکز توزیع  $k$  تحت سناریو  $s$
- $Xb_{kls}$  : مقدار محصول ارسال‌شده از مرکز توزیع  $k$  به مشتری  $l$  تحت سناریو  $s$
- $Y_{lhs}$  : مقدار ارسال محصول قراضه از مرکز مشتری  $l$  به مرکز جمع‌آوری  $h$  تحت سناریو  $s$
- $Ya_{hrs}$  : مقدار ارسال محصول قراضه از مرکز توزیع  $h$  به مرکز بازیافت  $r$  تحت سناریو  $s$
- $U_{crjts}$  : مقدار ارسال مواد بازیافت شده  $c$  از مرکز بازیافت  $h$  با فناوری  $t$  به کارخانه  $j$  تحت سناریو  $s$
- $S_j$  : ظرفیت مرکز تولیدی  $j$
- $M_j$  : در صورت بازشدن کارخانه  $j$  یک و در غیر این صورت صفر
- $D_k$  : در صورت بازشدن مرکز توزیع  $k$  یک و در غیر این صورت صفر
- $C_h$  : در صورت بازشدن مرکز جمع‌آوری  $h$  یک و در غیر این صورت صفر
- $R_{rt}$  : در صورت بازشدن مرکز بازیافت  $r$  با فناوری نوع  $t$  یک و در غیر این صورت صفر

**مدلسازی مسئله.** تابع هدف در مدلسازی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته حداقل‌سازی کل هزینه‌ها است. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات (FC)، هزینه‌های تولید و بازیافت (MRC)، هزینه‌های خرید مواد اولیه و محصولات قراضه (PC)، هزینه‌های جمع‌آوری محصولات قراضه (CC) و هزینه‌های حمل‌ونقل (TC) است. این هزینه‌ها در زیر به تفکیک آورده شده‌اند:

$$\begin{aligned}
 FC &= \sum_j \tilde{f} \tilde{c} m_j (S_j) M_j + \sum_k \tilde{f} \tilde{c} d_k D_k + \sum_h \tilde{f} \tilde{c} c_h C_h + \sum_r \sum_t \tilde{f} \tilde{c} r_n R_n \\
 MRC_s &= \sum_j \sum_k \tilde{m} \tilde{c}_{js} X a_{jks} + \sum_c \sum_r \sum_j \sum_t \tilde{r} \tilde{c}_{crts} U_{crjts} \quad \forall s \\
 PC_s &= \sum_c \sum_i \sum_j \tilde{p} \tilde{p}_{cis} X_{cijs} + \sum_l \sum_h \tilde{p} \tilde{o}_{ls} Y_{lhs} \quad \forall s \\
 CC_s &= \sum_l \sum_h \tilde{c} \tilde{c}_{lhs} Y_{lhs} \quad \forall s \\
 TC_s &= \sum_j \sum_k \tilde{f}_{jks} X a_{jks} + \sum_k \sum_l \tilde{f}_{kls} X b_{kls} + \sum_h \sum_r \tilde{f}_{hrs} Y a_{hrs} + \sum_c \sum_r \sum_j \sum_t \tilde{f}_{rjs} U_{crjts} \quad \forall s
 \end{aligned}$$

در عبارت هزینه ثابت احداث (FC)، مقدار هزینه ثابت احداث مراکز تولیدی وابسته به سطح ظرفیت آن‌ها ( $S_j$ ) در نظر گرفته شده است؛ نوع این رابطه به صورت خطی تکه‌ای<sup>۱</sup> و رابطه بالا غیرخطی است. در قسمت بعد به نحوه خطی‌سازی این عبارت پرداخته خواهد شد. با استفاده از نمادهای بیان‌شده، مسئله زنجیره تأمین حلقه‌بسته به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\min FC + \sum_s p_s (MRC_s + PC_s + CC_s + TC_s) \quad (۱)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k c a_c X a_{jks} = \sum_i X_{cijs} + \sum_r \sum_t U_{crjts} \quad \forall c, j, s \quad (۲)$$

$$\sum_j X a_{jks} = \sum_l X b_{kls}, \quad \forall k, s \quad (۳)$$

$$\sum_k X b_{kls} \geq \tilde{d}_{ls}, \quad \forall l, s \quad (۴)$$

$$\sum_h Y_{lhs} \leq \tau_l \tilde{d}_{ls}, \quad \forall l, s \quad (۵)$$

$$\sum_r Y a_{hrs} = \sum_l Y_{lhs}, \forall h, s \quad (۶)$$

$$\sum_h W_c Y a_{hrs} = \sum_j \sum_t U_{cjts}, \forall c, r, s \quad (۷)$$

$$S_j \geq \tilde{c}am_j^{low} M_j, \forall j \quad (۸)$$

$$S_j \leq \tilde{c}am_j^{up} M_j, \forall j \quad (۹)$$

$$\sum_j X_{cjs} \leq \tilde{c}as_{ci} \quad \forall i, c, s \quad (۱۰)$$

$$\sum_k X_{jks} \leq S_j, \forall j, s \quad (۱۱)$$

$$\sum_l X_{kls} \leq \tilde{c}ad_k D_k, \forall k, s \quad (۱۲)$$

$$\sum_l Y_{lhs} \leq \tilde{c}ac_h C_h \quad \forall h, s \quad (۱۳)$$

$$\sum_j U_{cjts} \leq \tilde{c}ar_{ct} R_t, \forall c, r, t, s \quad (۱۴)$$

$$\sum_t R_t \leq 1, \forall r \quad (۱۵)$$

$$X_{jks}, X_{kls}, Y_{lhs}, Y_{hrs}, S_j \geq 0, \text{integer} \quad \forall j, k, l, h, r, s \quad (۱۶)$$

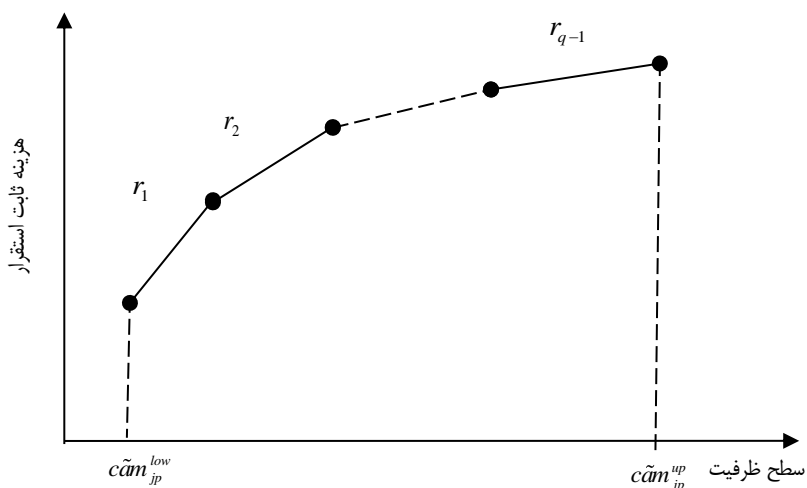
$$X_{ijs}, U_{cjts} \geq 0, \quad \forall c, i, j, r, t, s \quad (۱۷)$$

$$M_j, D_k, C_h, R_t \in \{0, 1\}, \quad \forall j, k, h, r, t \quad (۱۸)$$

محدودیت‌های (۲) و (۳) به ترتیب توازن جریان مواد کارخانه‌ها و توازن جریان محصولات مراکز توزیع را تضمین می‌کند. محدودیت (۴) اطمینان می‌دهد که تقاضای هر مشتری برآورده می‌شود. محدودیت (۵) مقدار محصولات قراضه ارسالی از مناطق مشتری به مراکز جمع‌آوری را تضمین می‌کند. محدودیت‌های (۶) و (۷) به ترتیب توازن جریان محصولات قراضه در مراکز جمع‌آوری و مراکز بازیافت را تضمین می‌کند. محدودیت (۸) و (۹) تضمین می‌کند که مقدار ظرفیت مراکز تولیدی از مقدار حداقل و حداکثر ظرفیت آن‌ها تخطی نکند. محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۴) به ترتیب محدودیت ظرفیت مراکز عرضه، تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۵) اطمینان می‌دهد که برای هر مرکز بازیافت تنها باید یک نوع فناوری

مورد استفاده قرار گیرد. محدودیت‌های (۱۶) تا (۱۸)، محدودیت‌های عدد صحیح، غیرمنفی و صفر و یک متغیرهای تصمیم متناظر با آن‌ها را نشان می‌دهد. در این پژوهش برای مدل‌سازی فقدان دانش مربوط به این پارامترهای ناشناخته، رویکردهای برنامه‌ریزی فازی و تصادفی به کار می‌رود و یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی فازی استوار جدید پیشنهاد می‌شود که در بخش بعدی جزئیات آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**خطی‌سازی عبارات غیرخطی تابع هدف.** در رابطه هزینه ثابت استقرار تسهیلات (FC)، مقدار هزینه ثابت احداث مراکز تولید ( $f\tilde{c}m_j$ ) وابسته به سطح ظرفیت آن‌ها ( $S_j$ ) در نظر گرفته شده است. برای حل این مشکل در این پژوهش با کمک یک روش خطی‌سازی مقدار هزینه‌های ثابت محاسبه می‌شود. برای محاسبه هزینه ثابت استقرار تسهیلات، متغیر هزینه ثابت بر حسب سطح ظرفیت به صورت یک تابع خطی تکه‌ای در نظر گرفته شد که در شکل ۲، نشان داده شده است.



شکل ۲. تابع خطی تکه‌ای هزینه ثابت احداث مراکز تولیدی

رابطه زیر تابع خطی تکه‌ای شکل ۲ را نشان می‌دهد:

$$f\tilde{m}_j(S_j) = \begin{cases} f\tilde{m}_j^{low} + r_1(S_j - S_{j1}) & \text{if } S_{j1} \leq S_j \leq S_{j2} \\ f\tilde{m}_{j1} + r_2(S_j - S_{j2}) & \text{if } S_{j2} \leq S_j \leq S_{j3} \\ \vdots \\ f\tilde{m}_{j(q-1)} + r_{(q-1)}(S_j - S_{j(q-1)}) & \text{if } S_{j(q-1)} \leq S_j \leq S_{jq} \end{cases} \quad (19)$$

$r_i$  شیب تابع هزینه ثابت در بازه  $S_{ji}$  تا  $S_{j(i+1)}$  است.  $q$  نشان می‌دهد که تابع خطی تکه‌ای هزینه ثابت استقرار به  $q-1$  بخش تقسیم شده است. مشکل اصلی در استفاده از تابع بالا برای محاسبه هزینه ثابت استقرار، مربوط به پیدا کردن مقدار بهینه سطح ظرفیت است. برای محاسبه مقدار بهینه تابع خطی تکه‌ای هزینه ثابت از روش مجموعه مرتب‌شده خاص<sup>۱</sup> که توسط بیل و تاملین (۱۹۷۰)، پیشنهاد شده است، استفاده می‌شود [۲]. مجموعه‌های مرتب‌شده خاص ابزارهای کارایی هستند که در مدل‌سازی توابع غیرمحدب و بسیاری از مسائل بهینه‌سازی گسسته استفاده شده‌اند. مجموعه‌های مرتب‌شده خاص به صورت مجموعه‌ای از متغیرها تعریف می‌شوند که در آن حداکثر دو متغیر در این مجموعه‌ها می‌تواند غیرصفر باشد و در صورت غیرصفر بودن دو متغیر باید این دو متغیر متوالی باشند. در رابطه بالا با توجه به اینکه مقدار بهینه سطح ظرفیت بین دو سطح متوالی  $S_{ji}$  و  $S_{j(i+1)}$  رخ خواهد داد، می‌توان از این روش استفاده کرد. رویه خطی‌سازی به صورت زیر است:

متغیر  $S_j$  بین  $S_{j1}$  و  $S_{jq}$  محدود می‌شود. روابط (۲۰) تا (۲۲) ترکیب محدب  $S_{ji}$  را به وسیله همه نقاط موجود در مجموعه  $\{S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jq}\}$  نشان می‌دهد.

$$S_j = v_{j1}S_{j1} + v_{j2}S_{j2} + \dots + v_{jq}S_{jq} = \sum_{i=1}^q v_{ji}S_{ji}, \quad \forall j \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^q v_{ji} = 1, \quad \forall j \quad (21)$$

$$v_{jgi} \geq 0, \quad \forall j, i \quad (22)$$

در روابط بالا، متغیرهای پیوسته غیرصفر هستند که برای تشکیل ترکیب محدب استفاده شده‌اند. برای انتخاب دو سطح ظرفیت متوالی  $S_{ji}$  و  $S_{j(i+1)}$  در رابطه بالا و محاسبه مقدار پیوسته  $S_j$  باید محدودیت‌های زیر اضافه شوند.

1. Special ordered set (SOS)

$$U_{j1} \leq \varphi_{j1} \quad (23)$$

$$U_{j2} \leq \varphi_{j1} + \varphi_{j2} \quad (24)$$

⋮

$$U_{j(q-1)} \leq \varphi_{j(q-2)} + \varphi_{j(q-1)} \quad (25)$$

$$U_{jq} \leq \varphi_{j(q-1)} \quad (26)$$

$$\varphi_{ji} \in \{0,1\}, \quad \forall i = 1, \dots, (q-1); \forall j \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^{q-1} \varphi_{ji} = 1, \quad \forall j \quad (28)$$

محدودیت‌های بالا دو نقطه پایانی مجاور از رابطه (۲۰) را انتخاب می‌کند. در نهایت با پیدا کردن مقدار بهینه دو متغیر  $U_{ji}$  و  $U_{j(i+1)}$  متوالی، هزینه ثابت با رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود. این رابطه یک ترکیب محدب از نقاط پایانی هزینه ثابت و یک فرم خطی معادل رابطه غیرخطی است.

$$f\tilde{m}_j(S_j).M_j = \sum_{i=1}^q U_{ji} f\tilde{m}_j(S_j), \quad \forall j \quad (29)$$

**رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی فازی استوار پیشنهادی.** پارامترهای نادقیق مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته از نوع فازی و یا از نوع تصادفی فازی هستند. برای مواجهه با این دو نوع پارامترها و بررسی تابع هدف و محدودیت‌های این مسئله از مفاهیمی استفاده می‌شود که در ادامه خواهد آمد.

در رویکرد پیشنهادی، هزینه‌ها و ریسک به ترتیب به وسیله مقدار میانگین امکانی و انحراف مطلق امکانی مربوط به هزینه‌های فازی اندازه‌گیری می‌شود؛ همچنین برای قطعی‌سازی محدودیت‌های امکانی، از میان رویکردهای برنامه‌ریزی امکانی رایج، رویکرد برنامه‌ریزی با اندازه‌های اعتبار<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینجا تعریف‌های مختلفی از متوسط عدد فازی برای ارزیابی هزینه موردانتظار یک زنجیره تأمین می‌تواند استفاده شود. کارلسون و فولر (۲۰۰۱)، مقدار میانگین امکانی تحتانی و فوقانی یک عدد فازی را معرفی کردند که به صورت توزیع‌های امکانی است [۵]؛ این تعریف با اصل گسترش لطفی‌زاده (۱۹۷۸) سازگار بوده و مبتنی بر

1. Credibility Constraint Programming (CCP)

مجموعه برش است [۵۳]. در ادامه برخی از تعریف‌ها و نتایج موردنیاز به صورت مختصر یادآوری می‌شود.

تعریف ۱: عدد فازی  $\tilde{A}$  یک عدد فازی از نوع LR،  $\tilde{A} = (\underline{a}, \bar{a}, \alpha, \beta)_{LR}$ ، بوده که دارای تابع عضویت زیر است [۸]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{\underline{a}-x}{\alpha}\right) & \underline{a}-\alpha \leq x \leq \underline{a} \\ 1 & \underline{a} \leq x \leq \bar{a} \\ R\left(\frac{\bar{a}-x}{\beta}\right) & \bar{a} \leq x \leq \bar{a}+\beta \end{cases}$$

تابع ارجاع  $L: [0,1] \rightarrow [0,+\infty]$  و  $R: [0 \rightarrow 1] + c$  بر روی مجموعه حامی  $(\tilde{A}) = \{x : \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\}$ ، کاهنده و نیمه‌پیوسته فوقانی هستند؛ به طوری که  $L(0) = R(0) = 1$  و  $L(x) = L(-x), R(x) = R(-x)$

از جمع اعداد فازی LR هنگامی که توابع ارجاع آن‌ها خطی یا همگی دارای شکل مشابهی برای L و R هستند، به طور گسترده‌ای استفاده شده است [۱۶]. در مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته فرض می‌شود، اعداد فازی LR دارای توابع ارجاع مشابهی هستند؛ بنابراین با استفاده از اصل گسترش قواعد مقدمه (۱) را می‌توان برای جمع و تفریق دو عدد فازی یا ضرب یک عدد فازی با یک عدد حقیقی در نظر گرفت.

مقدمه ۱: اگر  $\tilde{A} = (\underline{a}, \bar{a}, \alpha, \beta)_{LR}$  و  $\tilde{B} = (\underline{b}, \bar{b}, \delta, \Gamma)_{LR}$  دو عدد فازی LR و  $\lambda \in R$  نیز به صورت یک عدد حقیقی در نظر گرفته شود؛ بنابراین:

$$(1) \quad \tilde{A} + \tilde{B} = (\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}, \alpha + \delta, \beta + \Gamma)_{LR}$$

$$(2) \quad \tilde{A} - \tilde{B} = (\underline{a} - \underline{b}, \bar{a} - \bar{b}, \alpha + \delta, \beta + \Gamma)_{LR}$$

$$(3) \quad \lambda \tilde{A} = \begin{cases} (\lambda \underline{a}, \lambda \bar{a}, \lambda \alpha, \lambda \beta)_{LR} & \lambda > 0 \\ (\lambda \bar{a}, \lambda \underline{a}, |\lambda| \alpha, |\lambda| \beta)_{LR} & \lambda < 0 \end{cases}$$

تعریف ۲: مقادیر میانگین امکانی تحتانی و فوقانی عدد فازی  $\tilde{A}$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]:



$$M_*(\tilde{A}) = 2 \int_0^1 \rho(\inf \tilde{A}_\rho) d\rho$$

$$M^*(\tilde{A}) = 2 \int_0^1 \rho(\sup \tilde{A}_\rho) d\rho$$

جایی که  $\inf \tilde{A}_\rho$  و  $\sup \tilde{A}_\rho$  به ترتیب نقاط انتهایی چپ و راست برش سطح  $\rho$  را برای  $\rho \in [0,1]$  نشان می‌دهند.

با این تعریف، میانگین‌های امکانی تحتانی و فوقانی به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} M_*(A) &= \underline{a} - \alpha/3, \\ M^*(A) &= \bar{a} + \beta/3, \end{aligned} \quad (30)$$

میانگین امکانی با ارزش بازه‌ای به صورت فاصله زیر بیان می‌شود [۵]:

$$M(\tilde{A}) = [M_*(\tilde{A}), M^*(\tilde{A})] \quad (31)$$

تعریف ۳:  $\tilde{A}$  یک عدد فازی در نظر گرفته می‌شود؛ سپس میانگین امکانی قطعی به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]:

$$\bar{M}(A) = (M^*(A) + M_*(A)) / 2 = \int_0^1 \rho(\inf \tilde{A}_\rho + \sup \tilde{A}_\rho) d\rho \quad (32)$$

با این تعریف، مقدار میانگین امکانی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{M}(A) = \frac{\underline{a} + \bar{a}}{2} + \frac{\beta - \alpha}{6} \quad (33)$$

تعریف ۴: برای دو عدد حقیقی  $\tilde{A}$  و  $\tilde{B}$ ، انحراف مطلق امکانی بین آن‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{1}{2} (|\bar{M}(\tilde{A} + \tilde{B}) - \bar{M}(\tilde{A}) - \bar{M}(\tilde{B})|) \quad (34)$$

انحراف مطلق امکانی می‌تواند برای عدد دوزنقه‌ای معین  $\tilde{A}$  به صورت زیر تعریف شود [۵۶]:

$$v(\tilde{A}) = \bar{a} - \underline{a} + \frac{\alpha + \beta}{3} \quad (35)$$

برنامه‌ریزی با محدودیت‌های شانسی مبتنی بر اعتبار<sup>۱</sup> یک رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی امکانی با کارایی محاسباتی بالا است که بر مفاهیم ریاضی قوی استوار است و می‌تواند از انواع مختلفی از اعداد فازی پشتیبانی کند. در تعریف زیر به طور مختصر اندازه اعتبار رابطه بین یک عدد فازی و یک متغیر بررسی می‌شود:

تعریف ۵:  $\tilde{A}$  یک عدد فازی LR با تابع عضویت  $\mu(x)$  و  $r$  یک عدد حقیقی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین اندازه اعتبار به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$Cr\{\tilde{A} * r\} = \frac{1}{2} (Pos\{\tilde{A} * r\} + Nec\{\tilde{A} * r\}) \quad (36)$$

\* می‌تواند هر یک از روابط  $\leq, \geq$  باشد. اندازه اعتبار به صورت روابط زیر خواهد بود:

$$Cr(\tilde{A} \leq r) = \begin{cases} 0 & -\infty \leq r \leq \underline{a} - \alpha \\ \frac{r - \underline{a} + \alpha}{2\alpha} & \underline{a} - \alpha \leq r \leq \underline{a} \\ \frac{1}{2} & \underline{a} \leq r \leq \bar{a} \\ \frac{r - \bar{a} + \beta}{2\beta} & \bar{a} \leq r \leq \bar{a} + \beta \\ 1 & \bar{a} + \beta \leq r \leq +\infty \end{cases} \quad (36) \quad Cr(\tilde{A} \geq r) = \begin{cases} 1 & -\infty \leq r \leq \underline{a} - \alpha \\ \frac{\underline{a} + \alpha - r}{2\alpha} & \underline{a} - \alpha \leq r \leq \underline{a} \\ \frac{1}{2} & \underline{a} \leq r \leq \bar{a} \\ \frac{\bar{a} + \beta - r}{2\beta} & \bar{a} \leq r \leq \bar{a} + \beta \\ 0 & \bar{a} + \beta \leq r \leq +\infty \end{cases} \quad (37)$$

بر اساس روابط (۳۶) و (۳۷)، برای مقادیر بحرانی ( $\rho$ ) بزرگ‌تر از ۰/۵، جایگزین‌های زیر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد:

$$\begin{aligned} Cr\{\tilde{A} \leq r\} \geq \rho &\Leftrightarrow r \geq (2-2\rho)\bar{a} + (2\rho-1)(\bar{a} + \beta) \\ Cr\{\tilde{A} \geq r\} \geq \rho &\Leftrightarrow r \leq (2\rho-1)(\underline{a} - \alpha) + (2-2\rho)\underline{a} \end{aligned} \quad (38)$$

از دو رابطه بالا می‌توان مستقیماً برای تبدیل محدودیت‌های شانس فازی به محدودیت‌های معادل قطعی استفاده کرد [۲۴].

**فرمول‌بندی میانگین هزینه فازی.** برای اینکه بتوان راحت‌تر کار کرد، فرم فشرده مدل زنجیره تأمین حلقه‌بسته می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \tilde{f}x + \tilde{c}_s y_s \\ \text{s.t. } & Ay_s \geq \tilde{d}_s \\ & Bx = 0 \\ & Dy_s \leq \tilde{E}x \\ & x \in \{0,1\}, y_s \geq 0 \end{aligned} \quad (39)$$

در این پژوهش دو متغیر  $x$  و  $y$  به ترتیب متغیرهای صفر و یک و سایر متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند؛ همچنین  $A, B, D, E$  ماتریس پارامترها هستند؛ درحالی‌که  $f, c, d$  بردار پارامترها هستند.  $A, B, D$  به صورت قطعی مشخص هستند؛ درحالی‌که  $f$  و  $E$  به ترتیب متغیرهای فازی مرتبط با هزینه احداث تسهیلات و ظرفیت هر یک از این تسهیلات هستند؛ همچنین  $c$  و  $d$  متغیرهای مبتنی بر سناریوهای فازی به ترتیب مرتبط با سایر هزینه‌ها و تقاضای مشتریان هستند. یک وقوع خاص برای یک پارامتر مبتنی بر سناریو فازی یک سناریو نامیده می‌شود که با  $s$  و احتمال متناظر با آن با  $p_s$  نشان داده می‌شود ( $\sum_s p_s = 1$ ).  $S$  مجموعه

سناریوها را نشان می‌دهد. ضرایب فازی  $f$  و  $E$  می‌توانند به صورت  $\tilde{f}$  و  $\tilde{E}$  و متغیرهای مبتنی بر سناریو فازی  $c$  و  $d$  نیز می‌توانند به صورت  $\tilde{c}_s$  و  $\tilde{d}_s$  برای هر سناریو نادقیق نشان داده شوند؛ همچنین متغیر  $y$  که در زمان وقوع یک سناریو در معرض تعدیل قرار می‌گیرد، می‌تواند به صورت  $y_s$  برای سناریو  $s$  نشان داده شود.

برای تشکیل مدل برنامه‌ریزی امکانی با محدودیت‌های شانس اولیه از عملگرهای مقدار میانگین امکانی مبتنی بر میانگین کارلسون و فولر (۲۰۰۱) برای فرموله بندی تابع هدف و از شاخص اعتبار ليو و ایوامورا (۱۹۹۸) برای کنترل محدودیت‌های شانس دارای پارامترهای نادقیق

استفاده شده است [۵، ۲۲]. بر اساس توضیحاتی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، مدل برنامه‌ریزی تصادفی فازی اولیه<sup>۱</sup> (OFSP) به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \bar{M}[f]x + \sum_s p_s (\bar{M}[\tilde{c}_s]y_s) \\ \text{s.t. } & Cr(\tilde{A}y_s \geq \tilde{d}_s) \geq \rho_s \quad \forall s \\ & Bx = 0 \\ & Cr(Dy_s \leq \tilde{E}x) \geq \varphi_s \quad \forall s \\ & x \in \{0,1\}, y_s \geq 0 \end{aligned} \quad (40)$$

یک هزینه فازی برای جواب  $(x, y_s)$  تحت سناریو S است.  $\tilde{F}_s(x, y_s) = \tilde{f}x + \tilde{c}_s y_s$  فرض می‌شود که هزینه‌های مسئله شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته،  $\tilde{f}_i = (\underline{f}_i, \bar{f}_i, \alpha_i, \beta_i)_{LR}$  و  $\tilde{c}_{js} = (\underline{c}_{js}, \bar{c}_{js}, \alpha_{js}, \beta_{js})_{LR}$  با اعداد فازی ذوزنقه‌ای مشخص می‌شوند؛ همچنین فرض می‌شود که توابع ارجاع چپ و راست همگی دارای شکل‌های مشابهی هستند. اگر همه هزینه‌ها به صورت فواصل فازی ذوزنقه‌ای باشند، ترکیب خطی زیر نشان‌دهنده کل هزینه فازی یک سناریو است و به صورت  $\tilde{F}_s(x, y_s)$  نشان داده می‌شود. بعد از این تسهیل کار،  $\tilde{F}_s(x, y_s)$  به صورت  $\tilde{F}_s$  نشان داده می‌شود. با به کارگیری مقدمه (۱) رابطه ۴۱ به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \tilde{F} &= \left( \sum_i \underline{f}_i x_i + \sum_j \sum_s p_s \underline{c}_{js} y_{js}, \sum_i \bar{f}_i x_i + \sum_j \sum_s p_s \bar{c}_{js} y_{js}, \right. \\ & \left. \sum_i \alpha_i x_i + \sum_j \sum_s p_s \alpha_{js} y_{js}, \sum_i \beta_i x_i + \sum_j \sum_s p_s \beta_{js} y_{js} \right)_{LR} \\ &= (\underline{F}, \bar{F}, M, N)_{LR} \end{aligned} \quad (41)$$

بنابراین  $\tilde{F}$  یک فاصله فازی ذوزنقه‌ای است. بر اساس تعریف (۳)، مقدار میانگین موزون تابع هدف تحت همه سناریوها ( $F$ ) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} F = \bar{M}(\tilde{F}) &= \sum_i \bar{M}(\tilde{f}_i)x_i + \sum_j \sum_s p_s \bar{M}(\tilde{c}_{js})y_{js} \\ &= \sum_i \left( \frac{\underline{f}_i + \bar{f}_i}{2} + \frac{\beta_i - \alpha_i}{6} \right) x_i + \sum_j \sum_s p_s \left( \frac{\underline{c}_{js} + \bar{c}_{js}}{2} + \frac{\beta_{js} - \alpha_{js}}{6} \right) y_{js} \end{aligned} \quad (42)$$

بر اساس توضیحاتی که در بالا بیان شد و با فرض  $\tilde{d}_s = (d_s, \bar{d}_s, \alpha_s, \beta_s)_{LR}$  و  $\tilde{E} = (E, \bar{E}, \alpha, \beta)_{LR}$  مدل برنامه‌ریزی تصادفی فازی قطعی اولیه را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد:

$$\text{Min } F \quad (43)$$

$$\text{s.t. } Ay_s \geq (2-2\rho_s)\bar{d}_s + (2\rho_s - 1)(\bar{d}_s + \beta_s) \quad (44)$$

$$Bx = 0 \quad (45)$$

$$Dy_s \leq [(2\varphi_s - 1)(E - \alpha) + (2 - 2\varphi_s)E]x \quad (46)$$

$$x \in \{0,1\}, y_s \geq 0 \quad (47)$$

جایی که  $\rho_s$  و  $\varphi_s$  حداقل سطح اطمینان تصمیم‌گیرندگان برای اقلان محدودیت‌های شانس امکانی را نشان می‌دهند.

در فرمول‌بندی بالا، منطقی است که محدودیت‌ها با سطح اطمینان بزرگ‌تر از  $0.5$  اقلان شوند، یعنی  $\rho_s, \varphi_s > 0.5$  باشند. در این رویکرد، تصمیم‌گیرندگان باید حداقل سطح اطمینان محدودیت‌های شانس را تعیین کنند. در این رویکرد مقدار نهایی به صورت ذهنی انتخاب می‌شود و تشخیص اینکه آیا مقدار انتخاب شده برای سطح اطمینان بهترین انتخاب ممکن است، امکان پذیر نیست.

**فرمول‌بندی استوار.** در این قسمت، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی تصادفی فازی استوار<sup>۱</sup> جدید (RFSP) برای حذف مشکلات مرتبط با تعیین حداقل سطح اطمینان و در نظر گرفتن استواری مدل تحت عدم قطعیت ترکیبی فرمول‌بندی می‌شود. بر اساس تعریف‌ها و اصولی که در قسمت‌های قبلی به آن‌ها اشاره شد، مدل پیشنهادی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\text{Min } F + \lambda v(\tilde{F}) + \omega \sum_s p_s \pi_t [(\bar{d}_s + \beta_s) - (2 - 2\rho_s)\bar{d}_s - (2\rho_s - 1)(\bar{d}_s + \beta_s)] + \phi \sum_s p_s [(2\varphi_s - 1)(E - \alpha) + (2 - 2\varphi_s)E - (E - \alpha)]x \quad (48)$$

$$\text{s.t. } \text{Constraints (44-47)}$$

در تابع هدف مدل بالا، عبارت اول مقدار میانگین تابع هدف<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد. عبارت دوم استواری بهینگی را نشان می‌دهد. واریانس بالا برای تابع هدف به معنای این است که جواب موردنظر جوابی با ریسک بالا است [۴، ۵۶]؛ به عبارت دیگر یک تغییر کوچک در مقادیر پارامترهای نادقیق می‌تواند تغییرپذیری بزرگی را در مقدار تابع هدف ایجاد کند. این عبارت به صورت تغییرپذیری امکانی<sup>۲</sup> تابع هدف تعریف می‌شود. کاهش مقدار تغییرپذیری که با افزایش ضرایب آن‌ها صورت می‌گیرد، می‌تواند استواری بهینگی را افزایش دهد. در اینجا،  $\lambda$  به صورت ضریب اهمیت (وزن) تغییرپذیری امکانی تعریف می‌شود؛ بنابراین، لازم است مدل پیشنهادی با  $\lambda$  های مختلف بر روی یک مسئله طراحی شبکه واقعی بررسی شود.

عبارات سوم و چهارم جریمه تخطی ممکن هر محدودیتی (یعنی تقاضای ارضانشده و کمبود ظرفیت) را در تابع هدف نشان می‌دهند. این عبارت‌ها با مقادیر  $\omega$  و  $\phi$  می‌توانند تعدیل شوند. بر اساس مباحث بالا، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی درصدد رسیدن به یک بدهیستان منطقی بین این سه قسمت در تابع هدف است: ۱. متوسط هزینه‌ها (عبارت اول)؛ ۲. استواری بهینگی (عبارات دوم) و ۳. استواری شدنی بودن (عبارات سوم و چهارم). تصمیم‌گیرندگان می‌توانند تصمیم بگیرند که با توجه به اهمیتی که هزینه و ریسک برای آن‌ها دارد، کدام مقدار برای این چهار ضریب برای مسئله آن‌ها مناسب‌تر است. در زیر عبارت‌های دوم تا چهارم با جزئیات بیشتر بررسی می‌شوند.

عبارت دوم تابع هدف جمع انحرافات مطلق موزون امکانی برای  $\bar{F}$  را نشان می‌دهد؛ بنابراین با عبارت دوم می‌توان انحرافات مقدار میانگین تابع هدف  $\bar{F}$  را حداقل ساخت. ضریب  $\lambda$  در تابع هدف اهمیت این عبارت را در برابر عبارات دیگر نشان می‌دهد. بر اساس تعریف (۴)، انحراف مطلق موزون امکانی تابع هدف ( $\bar{F}$ ) مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$v(\bar{F}) = (\bar{M} | \bar{F} - \bar{M}(\bar{F}) |) = \bar{F} - \underline{F} + \frac{M + N}{3} \quad (49)$$

$$= \sum_i \left( \bar{f}_i - \underline{f}_i + \frac{\alpha_i + \beta_i}{3} \right) x_i + \sum_j \sum_s p_s \left( \bar{c}_{js} - \underline{c}_{js} + \frac{\alpha_{js} + \beta_{js}}{3} \right) y_{js}$$

این عبارت می‌تواند استواری بهینگی را تحت عدم قطعیت ترکیبی کنترل کنند. عبارت‌های سوم و چهارم سطح اطمینان هر یک از محدودیت‌های شانس را تعیین می‌کنند که در آن  $\omega$  و  $\phi$  واحد جریمه تخطی از هر یک از محدودیت‌های شامل پارامترهای نادقیق

1. Mean Cost  
2. Possibilistic Variability

هستند. در این عبارات‌ها، عبارات درون براکت‌ها تفاوت بین بدترین مورد پارامتر نادقیق و مقداری که در محدودیت‌های شانس مورد استفاده قرار می‌گیرد را نشان می‌دهند. این عبارات‌ها استواری شدنی بودن بردار جواب را کنترل می‌کنند.

در صورتی که ماتریس ضرایب فنی  $E$  دارای عدم قطعیت فازی باشد، مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی خواهد بود؛ با این حال این عبارت غیرخطی را می‌توان با تعریف یک متغیر جدید و افزودن چند محدودیت به این مدل به عبارت خطی تبدیل کرد. برای گریز از پیچیدگی مدل غیرخطی،  $u_s$  یک متغیر جدید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_s = \varphi_s x \quad (50)$$

سپس، مدل غیرخطی بالا به صورت زیر به یک مدل معادله خطی تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{Min } F + \lambda v(\tilde{F}) + \omega \sum_s p_s \pi_1 [(\bar{d}_s + \beta_s) - (2 - 2\rho)\bar{d}_s - (2\rho - 1)(\bar{d}_s + \beta_s)] \\ & + \phi \sum_s p_s [(2u_s - x)(\underline{E} - \alpha) + (2x - 2u_s)\underline{E} - (\underline{E} - \alpha)x] \\ \text{s.t. } & Ay_s \geq (2 - 2\rho_s)\bar{d}_s + (2\rho_s - 1)(\bar{d}_s + \beta_s) \\ & Bx = 0 \\ & Dy_s \leq (2u_s - x)(\underline{E} - \alpha) + (2x - 2u_s)\underline{E} \\ & u_s \leq Mx \\ & u_s \geq M(x - 1) + \varphi_s \\ & u_s \leq \varphi_s \\ & x \in \{0, 1\}, y_s, u_s \geq 0, 0.5 \leq \rho_s, \varphi_s \leq 1 \end{aligned} \quad (51)$$

$M$  یک عدد بزرگ است؛ همچنین سه محدودیت اضافه شده اطمینان می‌دهند که متغیر جدید برابر با صفر است؛ اگر  $x = 0$ ؛ و برابر با  $\varphi_s$  است؛ اگر  $x = 1$ .

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

برای نشان دادن عملکرد و کاربرد مدل پیشنهادی، یک نمونه آزمایشی برای یک مسئله زنجیره تأمین حلقه‌بسته بررسی و نتایج آن در این بخش ارائه می‌شود. در این مطالعه، مسئله زنجیره تأمین دارای هفت مکان برای استقرار کارخانه‌های جدید است که به‌عنوان مراکز پیشنهادی انتخاب شده‌اند. هشت مکان بالقوه برای مراکز توزیع، هفت مکان بالقوه برای مراکز جمع‌آوری و

شش مکان برای تسهیلات بازیافت وجود دارد. یک محصول و یک نوع مواد با ۱۴ مرکز مشتری که هر یک دارای تقاضای با توزیع یکنواخت هستند مورد بررسی قرار می‌گیرد. سناریوهایی برای چهار وضعیت اقتصادی ممکن، یعنی شرایط شکوفا، خوب، متوسط و ضعیف انتخاب می‌شوند که هر یک دارای احتمال نابرابر هستند؛ سپس برای هر سناریو مجموعه‌های عدم قطعیت فازی پارامترها تولید می‌شوند. برای این منظور، اعداد فازی LR برای نمونه عددی در نظر گرفته می‌شود. برای تولید پارامترهای فازی، چهار مقدار یعنی مقادیر محتمل تحتانی و فوقانی  $\underline{a}$  و  $\bar{a}$  و مقادیر بازه سمت راست و چپ  $\alpha$  و  $\beta$  برای هر پارامتر نادقیق از طریق یک توزیع احتمال مناسب تخمین زده می‌شود؛ برای این منظور یکی از محتمل‌ترین مقادیر هر پارامتر (در اینجا  $\underline{a}$ ) ابتدا به صورت تصادفی با استفاده از توزیع احتمال یکنواخت تولید می‌شود که در جدول ۲ مشخص شده‌اند ( $\underline{a} = Uniform(a, b)$ )؛ سپس سه عدد تصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت بین صفر و  $0/4$  برای  $r_1$ ، صفر و  $0/2$  برای  $r_2$  و صفر و  $0/2$  برای  $r_3$  تولید می‌شود. در نهایت مقادیر محتمل فوقانی و بازه سمت راست و چپ به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} \bar{a} &= (1 + r_1)\underline{a} \\ \alpha &= r_2\underline{a} \\ \beta &= r_3\underline{a} \end{aligned} \quad (52)$$

جدول ۲. تولید پارامترهای تصادفی فازی در نمونه آزمایشی

| مقادیر محتمل تحتانی ( $\underline{a}$ ) |            |            |            |            |
|---|------------|------------|------------|------------|
| سناریوها (S)                            | ضعیف       | متوسط      | خوب        | شکوفا      |
| احتمال سناریو                           | $0/3$      | $0/25$     | $0/2$      | $0/15$     |
| $\tilde{t}_{jks}$                       | U(۹-۱۱)    | U(۸-۱۰)    | U(۷-۹)     | U(۶-۸)     |
| $\tilde{t}_{kls}$                       | U(۸-۱۰)    | U(۷-۹)     | U(۶-۸)     | U(۵-۷)     |
| $\tilde{t}_{hrs}$                       | U(۷-۹)     | U(۶-۸)     | U(۵-۷)     | U(۴-۶)     |
| $\tilde{t}_{ijs}$                       | U(۵-۶)     | U(۴-۵)     | U(۳-۴)     | U(۲-۳)     |
| $\tilde{m}\tilde{c}_{js}$               | U(۶۰-۶۵)   | U(۵۵-۶۰)   | U(۵۰-۵۵)   | U(۴۵-۵۰)   |
| $\tilde{c}\tilde{c}_{ths}$              | U(۱۶-۲۱)   | U(۱۴-۱۹)   | U(۱۲-۱۷)   | U(۱۰-۱۵)   |
| $\tilde{r}\tilde{c}_{cts}$              | U(۳۹-۴۴)   | U(۳۶-۴۱)   | U(۳۳-۳۸)   | U(۳۰-۳۵)   |
| $\tilde{p}\tilde{p}_{cis}$              | U(۷۱-۷۸)   | U(۶۶-۷۲)   | U(۶۰-۶۶)   | U(۵۵-۶۰)   |
| $\tilde{p}\tilde{o}_{ls}$               | U(۲۶-۳۰)   | U(۲۴-۲۸)   | U(۲۲-۲۶)   | U(۲۰-۲۴)   |
| $\tilde{d}_{ls}$                        | U(۴۸۰-۵۰۰) | U(۴۴۵-۴۶۵) | U(۴۰۵-۴۲۵) | U(۳۷۰-۳۸۵) |

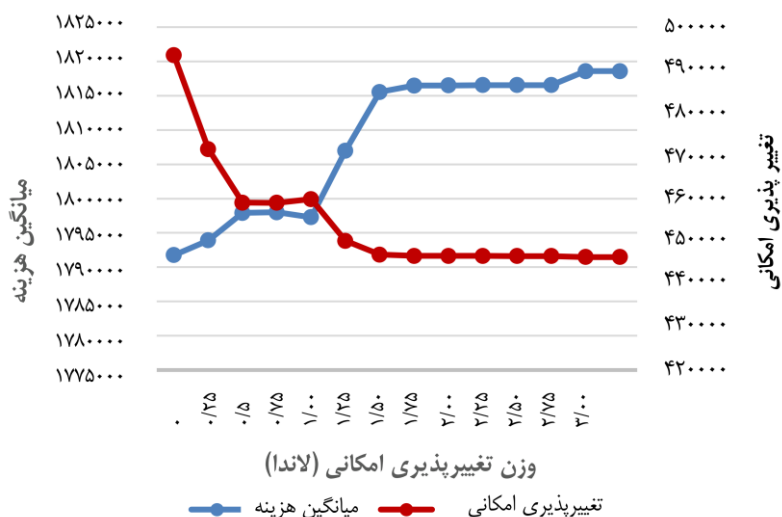


به همین ترتیب سایر پارامترها به صورت تصادفی بر اساس توزیع یکنواخت که در جدول ۳ مشخص شده‌اند، تولید می‌شوند. مسئله با استفاده از نرم‌افزار GAMS 23.5/CPLEX 12.2 روی یک رایانه dual-core 2.10 GHz با 3 GB RAM حل می‌شود.

جدول ۳. تولید پارامترهای فازی در نمونه آزمایشی

| پارامترها             | مقادیر محتمل تحتانی ( $\underline{a}$ ) | پارامترها       | مقادیر محتمل تحتانی ( $\underline{a}$ ) |
|-----------------------|---|-----------------|---|
| $f\tilde{c}m_j$       | U(۲۲۵۰۰۰-۲۴۰۰۰۰)                        | $c\tilde{a}d_k$ | U(۱۱۰۰-۱۱۵۰)                            |
| $f\tilde{c}d_k$       | U(۱۲۰۰۰-۱۳۰۰۰)                          | $c\tilde{a}c_h$ | U(۱۵۰۰-۱۷۰۰)                            |
| $f\tilde{c}c_h$       | U(۱۰۰۰۰-۱۲۰۰۰)                          | $c\tilde{a}r_n$ | U(۲۰۰۰-۲۳۰۰)                            |
| $f\tilde{c}r_n$       | U(۱۰۰۰۰۰-۱۲۰۰۰۰)                        | $\pi_l$         | ۱۰                                      |
| $c\tilde{a}s_{ci}$    | U(۲۵۰۰-۲۷۰۰)                            | $\tau_l$        | U(۰/۸-۲/۱)                              |
| $c\tilde{a}m_j^{low}$ | U(۱۷۰۰-۱۸۰۰)                            | $W_c$           | U(۲-۲/۳)                                |
| $c\tilde{a}m_j^{up}$  | U(۲۴۰۰-۲۵۰۰)                            | $ca_c$          | ۱/۸                                     |

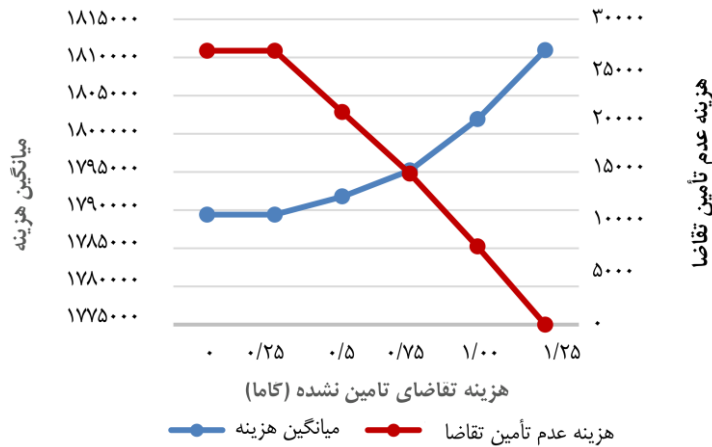
**تحلیل استواری.** در این مرحله، تحلیل حساسیت روی هر دو استواری بهینگی (تغییرپذیری امکانی) و استواری شدنی بودن صورت می‌گیرد. برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، این مدل به صورت جداگانه برای مقادیر مختلف ضرایب استواری بهینگی و استواری شدنی بودن (یعنی  $\lambda$ ،  $\omega$  و  $\phi$ ) حل می‌شود. شکل ۳، نتایج را در یک منحنی برای میانگین هزینه و تغییرپذیری امکانی تابع هدف نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که افزایش مقدار  $\lambda$  (عامل ریسک) در تابع هدف به افزایش میانگین هزینه و کاهش مقدار تغییرپذیری امکانی منجر می‌شود.



شکل ۳. مقدار میانگین امکانی هزینه و تغییر پذیری امکانی برای مقادیر مختلف  $\lambda$

با تعیین مقدار این ضریب ( $\lambda$ )، می‌توان به‌طور مناسبی استواری بهینگی را بر اساس ترجیحات تصمیم‌گیرندگان کنترل کرد. شکل ۳، نشان می‌دهند که با استفاده از رویکرد میانگین ( $\lambda=0$ )، با توجه به بالا بودن تغییر پذیری امکانی، ریسک تصمیم‌گیری خیلی بالا است. تصمیم‌گیرندگان می‌توانند مقدار  $\lambda$  را متناسب با اهمیت ریسک و هزینه تعیین کنند که به یک بده‌وبستان بین میانگین هزینه‌ها و استواری بهینگی منجر می‌شود.

شکل ۴، نشان می‌دهد که با افزایش  $\omega$ ، هزینه عدم‌ارضای تقاضا کاهش می‌یابد و در نهایت به صفر می‌رسد. برای یک مقدار معین  $\lambda$ ، یک مقدار بزرگ برای  $\omega$  به یک مقدار بزرگ برای میانگین هزینه و یک استواری شدنی بودن بالا منجر می‌شود. عملکرد ظرفیت که با ضریب  $\phi$  تعدیل می‌شود، مشابه عملکرد هزینه عدم‌ارضای تقاضا است. درحقیقت با افزایش  $\omega$  و  $\phi$  استواری شدنی بودن، افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۴. مقدار میانگین امکانی و هزینه عدم‌ارضای تقاضای مشتریان برای مقادیر مختلف  $\alpha$

**ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی.** برای ارزیابی عملکرد و استواری جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل پیشنهادی تحت داده‌های اسمی، پارامترهای مدل ۱۰ بار به‌طور تصادفی تولید می‌شوند؛ سپس عملکرد جواب‌های به‌دست‌آمده تحت هر بار تولید پارامترها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای مثال، اگر  $\tilde{A} = (\underline{a}, \bar{a}, \alpha, \beta)_{LR}$  یک پارامتر نادقیق با تابع توزیع امکانی دوزنقه‌ای باشد، در هر بار اعداد تصادفی با تولید یک عدد تصادفی به‌صورت یکنواخت بین دو نقطه انتهایی تابع توزیع امکانی متناظر  $(a^{real} \in [\underline{a} - \alpha, \bar{a} + \beta])$  تولید می‌شود؛ سپس جواب‌های به‌دست‌آمده مدل پیشنهادی  $(x^*, y_s^*)$  در یک مدل برنامه‌ریزی خطی جایگذاری می‌شود که فرم فشرده آن به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f^{real} x^* + c_s^{real} y_s^* + \omega \pi_1 S_s^{dem} + \phi S_s^{cap} \\
 & \text{s.t. } Ay_s^* + S_s^{dem} \geq d_s^{real} \\
 & Bx^* = 0 \\
 & Dy_s^* - S_s^{cap} \leq E_s^{real} x^* \\
 & S_s^{dem}, S_s^{cap} \geq 0
 \end{aligned} \tag{53}$$

در مدل برنامه‌ریزی (۵۳)،  $S_s^{dem}$  و  $S_s^{cap}$  تنها متغیرهای تصمیمی هستند که به‌ترتیب تخطی از محدودیت‌های شانس تقاضا و ظرفیت را تحت تولید تصادفی نشان می‌دهند. برای ارزیابی استواری بهینگی مدل پیشنهادی، نتایج این مدل با نتایج مدل اولیه (OFSP) مقایسه می‌شود. با توجه به اینکه مدل اولیه قادر به تعیین حداقل سطح اطمینان محدودیت‌های شانس نیست، نتایج

این مدل تحت سه سطح اطمینان مختلف (۰/۵، ۰/۷۵ و ۱) به‌دست آورده می‌شوند. برای نشان‌دادن اینکه کاهش تغییرپذیری امکانی می‌تواند تغییرپذیری تابع هدف را کاهش دهد، از جوابی که از طریق مدل پیشنهادی تحت سه مقدار مختلف برای  $\lambda$  (۰/۱، ۰/۵ و ۳) به‌دست آمده است در مدل (۵۳) استفاده می‌شود تا مقدار تابع هدف تحت ۱۰ بار تولید اعداد تصادفی به‌دست آورده شود؛ سپس مقدار متوسط و انحراف استاندارد مقادیر تابع هدف تحت این ۱۰ بار محاسبه می‌شوند تا عملکرد مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. عملکرد مدل RFSP در برابر مدل OFSP تحت ۱۰ بار آزمایش

| OFSP<br>$\rho_s, \varphi_s = 1$ | OFSP<br>$\rho_s, \varphi_s = 0.75$ | OFSP<br>$\rho_s, \varphi_s = 0.5$ | RFSP<br>$\lambda = 3$ | RFSP<br>$\lambda = 0.5$ | RFSP<br>$\lambda = 0.1$ | آزمایش شماره     |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| ۱۷۵۸۲۶۵                         | ۱۸۱۵۲۶۸                            | ۱۸۸۱۸۱۰                           | ۱۸۳۸۶۶۱               | ۱۷۸۱۹۳۲                 | ۱۷۶۳۴۴۲                 | ۱                |
| ۱۸۱۷۹۵۶۷                        | ۱۸۶۴۹۸۸                            | ۱۸۰۹۰۹۹                           | ۱۸۲۶۳۸۶               | ۱۸۲۶۷۵۵                 | ۱۷۶۰۹۴۴                 | ۲                |
| ۱۷۹۶۳۲۳                         | ۱۷۸۲۹۴۵                            | ۱۷۵۷۸۹۸                           | ۱۸۵۶۹۹۵               | ۱۸۶۳۷۶۲                 | ۱۸۳۴۰۶۲                 | ۳                |
| ۱۷۶۶۸۶۵                         | ۱۷۳۵۵۳۸                            | ۱۷۷۲۵۵۵                           | ۱۸۱۸۷۳۸               | ۱۸۱۶۴۴۷                 | ۱۷۴۳۹۵۲                 | ۴                |
| ۱۸۳۰۹۸۸                         | ۱۷۹۴۴۵۶                            | ۱۸۳۷۵۶۸                           | ۱۷۹۰۷۴۵               | ۱۸۳۳۸۷۳                 | ۱۷۸۸۴۳۴                 | ۵                |
| ۱۷۸۲۱۹۶                         | ۱۸۴۴۹۱۵                            | ۱۷۹۳۷۱۶                           | ۱۸۵۷۲۴۷               | ۱۷۹۲۱۷۲                 | ۱۸۰۲۸۱۲                 | ۶                |
| ۱۸۴۱۱۵۲                         | ۱۷۵۰۵۱۸                            | ۱۷۱۸۸۹۹                           | ۱۷۶۹۲۲۵               | ۱۸۵۱۲۶۲                 | ۱۸۳۱۸۴۰                 | ۷                |
| ۱۷۶۷۵۲۲                         | ۱۷۹۵۵۴۷                            | ۱۷۹۳۵۴۱                           | ۱۸۵۶۸۵۲               | ۱۷۷۱۷۸۸                 | ۱۷۲۹۳۵۳                 | ۸                |
| ۱۷۸۶۲۴۸                         | ۱۷۵۰۸۰۷                            | ۱۷۵۱۵۴۶                           | ۱۸۳۷۸۸۰               | ۱۷۶۷۹۵۴                 | ۱۷۹۲۵۰۰                 | ۹                |
| ۱۸۳۶۷۲۵                         | ۱۸۳۳۱۱۵                            | ۱۷۷۸۶۲۰                           | ۱۸۱۱۸۷۲               | ۱۸۰۵۲۵۵                 | ۱۷۵۸۶۱۶                 | ۱۰               |
| ۱۸۰۴۵۸۵                         | ۱۷۹۴۴۸۹                            | ۱۷۸۸۵۲۵                           | ۱۸۲۶۴۶۰               | ۱۸۱۱۱۲۰                 | ۱۷۸۰۵۹۵                 | متوسط هزینه      |
| ۳۸۱۲۸                           | ۴۲۴۵۰                              | ۴۲۶۷۱                             | ۲۸۱۱۹                 | ۳۱۳۵۱                   | ۳۳۶۳۵                   | انحراف استاندارد |

طبق جدول ۴، مدل پیشنهادی با  $\lambda = 3$  دارای حداقل انحرافات استاندارد و همزمان دارای یک عملکرد میانگین هزینه قابل قبول در مقایسه با سایر مدل‌های است. اگر تنها از مقدار میانگین هزینه‌های نادقیق در تابع هدف استفاده شود (یعنی  $\lambda = 0$ )، هزینه کل در مقایسه با مدل پیشنهادی پایین‌تر خواهد بود؛ با وجود این تغییرات هزینه کل با ۱۰ بار آزمایش افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر استواری بهینگی جواب با در نظر گرفتن تنها مقادیر میانگین پارامترهای نادقیق در تابع هدف، تحت کنترل قرار نمی‌گیرد. بیشتر مدیران تمایل دارند میانگین هزینه‌ها را برای طولانی‌مدت حداقل سازند؛ در حالی که تغییرپذیری هزینه‌های فازی را برای کاهش

ریسک‌های کوتاه‌مدت تحت کنترل داشته باشند. با توجه به دو ردیف آخر جدول ۴، مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی با  $\lambda$  های مختلف دارای یک هزینه متوسط پایین و یک انحراف استاندارد مناسب‌تری نسبت به مدل اولیه است؛ از این رو مدل پیشنهادی یک مدل ریسک‌گریز است و انتظار می‌رود که متوسط عملکرد آن در مقایسه با مدل اولیه دارای کیفیت پایین‌تری باشد.

در ادامه نتایج مدل توسعه‌داده‌شده با مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) نیز مقایسه می‌شود. تابع هدف مدل امکانی استوار<sup>۱</sup> (RPP) پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) به صورت زیر است [۳۸]:

$$\begin{aligned} \text{Min } F + \lambda(F_{\max} - F) + \omega \sum_s p_s \pi_l [(\bar{d}_s + \beta_s) - (2 - 2\rho_s)\bar{d}_s - (2\rho_s - 1)(\bar{d}_s + \beta_s)] + \\ \phi \sum_s p_s [(2\varphi_s - 1)(\underline{E} - \alpha) + (2 - 2\varphi_s)\underline{E} - (\underline{E} - \alpha)]x \end{aligned}$$

محدودیت‌های مدل پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)، مشابه محدودیت‌های مدل توسعه‌داده‌شده در نظر گرفته می‌شود. در تابع هدف بالا،  $F_{\max}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{\max} = \sum_i (\bar{f}_i + \beta_i)x_i + \sum_j \sum_s p_s (\bar{c}_{js} + \beta_{js})y_{js}$$

نتایج برای ۱۰ بار آزمایش در جدول ۵ نشان داده شده است:

جدول ۵. عملکرد مدل RFSP در برابر مدل RPP تحت ۱۰ بار آزمایش

| شماره<br>آزمایش     | $\lambda = 0/1$ |         | $\lambda = 0/5$ |         | $\lambda = 3$ |         |
|---------------------|-----------------|---------|-----------------|---------|---------------|---------|
|                     | RFP             | RFP     | RFP             | RFP     | RFP           | RFP     |
| ۱                   | ۱۷۲۹۳۵۳         | ۱۹۱۲۶۵۳ | ۱۸۵۱۲۶۲         | ۱۸۷۱۶۶۶ | ۱۷۹۰۷۳۲       | ۱۸۲۸۲۴۵ |
| ۲                   | ۱۷۹۲۵۰۰         | ۱۷۶۹۰۶۱ | ۱۷۷۱۷۸۸         | ۱۹۰۱۷۲۲ | ۱۸۵۷۲۲۵       | ۱۸۸۷۵۲۲ |
| ۳                   | ۱۷۵۸۶۱۶         | ۱۷۷۵۴۶۴ | ۱۷۶۷۹۵۴         | ۱۸۴۶۷۲۸ | ۱۷۶۹۲۲۶       | ۱۸۳۶۳۰۱ |
| ۴                   | ۱۸۰۲۸۱۲         | ۱۸۱۰۴۵۷ | ۱۸۰۵۲۵۵         | ۱۸۹۹۷۴۶ | ۱۸۵۶۸۵۲       | ۱۸۴۶۲۲۶ |
| ۵                   | ۱۸۳۱۸۴۰         | ۱۸۲۹۹۱۵ | ۱۷۸۱۹۱۰         | ۱۸۲۸۷۸۱ | ۱۸۱۸۷۱۵       | ۱۸۶۹۵۴۹ |
| ۶                   | ۱۷۶۳۴۲۱         | ۱۸۱۱۴۷۶ | ۱۸۲۶۷۳۱         | ۱۸۷۹۹۷۷ | ۱۸۱۱۸۷۲       | ۱۹۲۶۸۴۳ |
| ۷                   | ۱۷۶۰۹۲۰         | ۱۷۹۶۴۰۶ | ۱۸۶۳۷۴۰         | ۱۷۹۴۷۰۶ | ۱۸۳۸۶۴۰       | ۱۸۶۰۹۶۹ |
| ۸                   | ۱۷۴۳۹۳۰         | ۱۸۲۷۱۷۴ | ۱۸۱۶۴۲۶         | ۱۸۵۱۵۵۳ | ۱۸۲۶۳۵۶       | ۱۸۸۶۷۲۵ |
| ۹                   | ۱۷۸۸۴۱۴         | ۱۸۴۵۷۹۸ | ۱۸۳۳۸۵۲         | ۱۸۷۲۲۵۷ | ۱۸۵۶۹۹۵       | ۱۸۴۱۱۵۲ |
| ۱۰                  | ۱۸۳۴۰۴۲         | ۱۸۱۶۸۸۸ | ۱۷۹۲۱۷۲         | ۱۸۲۶۶۲۳ | ۱۸۳۷۱۱۰       | ۱۸۹۲۱۹۶ |
| متوسط هزینه         | ۱۷۸۰۵۸۴         | ۱۸۱۹۵۲۹ | ۱۸۱۱۱۰۹         | ۱۸۵۳۷۶۶ | ۱۸۲۶۳۷۱       | ۱۸۶۷۵۷۲ |
| انحراف<br>استاندارد | ۳۳۶۳۷           | ۳۸۳۴۸   | ۳۱۳۴۶           | ۳۲۴۶۰   | ۲۸۰۸۹         | ۲۹۳۴۲   |

طبق دو ردیف آخر جدول ۵، نتایج حاکی از برتری مدل پیشنهادی بر مدل پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) بر حسب متوسط هزینه و انحراف استاندارد است؛ به عبارت دیگر مدل پیشنهادی با  $\lambda$  های مختلف دارای هزینه متوسط پایین و انحراف استاندارد مناسب‌تری نسبت به مدل پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) است. این مدل قادر است با صرف هزینه‌های کمتر، استواری بهینگی جواب‌ها را بهبود دهد.

تصمیم‌گیرندگان می‌توانند مقدار این سه ضریب را با توجه به درجه ریسک‌گریزی و اهمیتی که به هزینه‌ها می‌دهند، تعیین کنند. با توجه به متفاوت بودن ترجیحات تصمیم‌گیرندگان و درجه موردنیاز محافظه‌کاری باید این نکته به‌عنوان یک عامل مهم برای تعیین مناسب‌ترین مقدار برای این ضرایب در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شود.

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برای استفاده از منافع بازیافت محصولات مستعمل در زنجیره‌های تأمین رقابتی کنونی، پژوهش حاضر مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت شرایط عدم قطعیت ترکیبی را موردبررسی قرار داده است؛ بدین منظور یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط برای طراحی مسئله زنجیره تأمین توسعه داده شده است که تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص را

تعیین می‌کند. برای مواجهه با عدم قطعیت ترکیبی، یک رویکرد برنامه‌ریزی جدید موسوم به «برنامه‌ریزی تصادفی فازی استوار» پیشنهاد می‌شود. فرمول‌بندی استوار پیشنهادی دارای سه قسمت در تابع هدف است که شامل مقدار میانگین، تغییرپذیری امکانی و جریمه نشدنی بودن محدودیت‌ها است. طراحی چنین شبکه زنجیره تأمین استواری که ریسک‌های عملیاتی را کنترل می‌کند، دارای مزیت‌های زیادی برای مدیران است. برای تشریح رفتار مدل پیشنهادی، نتایج این مدل تحت ضرایب ریسک مختلف با مدل میانگین تصادفی فازی و مدل پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است استواری بهینگی را با هزینه پایین بهبود دهد.

در پژوهش‌های آینده می‌توان مدل برنامه‌ریزی استوار پیشنهادی را در توسعه مدل‌های زنجیره تأمین حلقه‌بسته برای کنترل استواری بهینگی و استواری شدنی بودن تحت شرایط عدم قطعیت ترکیبی به‌کار برد؛ همچنین تعریف عبارت‌های استواری بهینگی و استواری شدنی بودن در توابع هدف مختلف و سپس استفاده از رویکرد فازی برای بررسی تعامل بین آن‌ها می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد؛ در نهایت می‌توان از روش‌های حل فراابتکاری برای حل مسائل با اندازه بزرگ استفاده کرد.

## منابع

1. Azaron, A., Brown, K. N., Tarim, S. A., & Modarres, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 129-138.
2. Beale, E. M. L., & Tomlin, J. A. (1970). Special facilities in a general mathematical programming system for non-convex problems using ordered sets of variables in Lawrence, J (ed.) Proceedings of the Fifth International Conference on Operations Research 447454.
3. Baghalian, A., Rezapour, S., & Farahani, R. Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European Journal of Operational Research*, 227(1), 199-215.
4. Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvaei, M. S., & Rabbani, M. (2016). A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. *Omega*.
5. Carlsson, C., & Fullér, R. (2001). On possibilistic mean value and variance of fuzzy numbers. *Fuzzy sets and systems*, 122(2), 315-326.
6. Chouinard, M., D'Amours, S., & Aït-Kadi, D. (2008). A stochastic programming approach for designing supply loops. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 657-677.
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. Dubois, D., & Prade, H. (1980). Systems of linear fuzzy constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, 3(1), 37-48.
9. Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594-615.
10. 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.
11. Govindan, K., & Fattahi, M. (2015). Investigating risk and robustness measures for supply chain network design under demand uncertainty: A case study of glass supply chain. *International Journal of Production Economics*.
12. Hwang, C. M. (2000). A theorem of renewal process for fuzzy random variables and its application. *Fuzzy Sets and Systems*, 116(2), 237-244.
13. Hasani, A., & Hosseini, S.M.H., (2014). A Comprehensive Robust Bi-objective Model and a Memetic Solution Algorithm for Designing Reverse Supply. *Journal of Industrial Management Perspective*, 16, 31-54 (In Persian).
14. Hatefi, S. M., & Jolai, F. (2014). Robust and reliable forward-reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9), 2630-2647.
15. Horri, M.S., & Anjomshoa, A. (2016). Multi-objective mathematical model for supplier selection and order allocation under multi-Item condition. *Journal of Industrial Management Perspective*, 6(21), 41-51 (In Persian).
16. Inuiguchi, M., Ichihashi, H., & Tanaka, H. (1990). Fuzzy programming: a survey of recent developments. In *Stochastic versus fuzzy approaches to*



*multiobjective mathematical programming under uncertainty* (pp. 45-68). Springer Netherlands.

17. Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodrı, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1599-1609.

18. Ko, H. J., & Evans, G. W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers & Operations Research*, 34(2), 346-366.

19. Kasperski, A., & Kulej, M. (2009). Choosing robust solutions in discrete optimization problems with fuzzy costs. *Fuzzy Sets and Systems*, 160(5), 667-682.

20. Klibi, W., & Martel, A. (2012). Scenario-based supply chain network risk modeling. *European Journal of Operational Research*, 223(3), 644-658.

21. Keyvanshokoo, E., Ryan, S. M., & Kabir, E. (2016). Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 76-92.

22. Liu, B., & Iwamura, K. (1998). Chance constrained programming with fuzzy parameters. *Fuzzy sets and systems*, 94(2), 227-237.

23. Liu, B., & Liu, Y. K. (2002). Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 10(4), 445-450.

24. Liu, B. *Uncertainty Theory: An Introduction to its Axiomatic Foundations*. 2004.

25. Luhandjula, M. K. (2004). Optimisation under hybrid uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 146(2), 187-203.

26. 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.

27. Linton, J. D., Klassen, R., & Jayaraman, V. (2007). Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of operations management*, 25(6), 1075-1082.

28. Lee, D. H., & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 61-71.

29. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.

30. Min, H., & Ko, H. J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113(1), 176-192.

31. Mirakhorli, A. (2014). Fuzzy multi-objective optimization for closed loop logistics network design in bread-producing industries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1-4), 349-362.

32. Mohammadi, M., Torabi, S. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). Sustainable hub location under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 89-115.

33. Peidro, D., Mula, J., Poler, R., & Verdegay, J. L. (2009). Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties. *Fuzzy Sets and Systems*, 160(18), 2640-2657.

34. Pan, F., & Nagi, R. (2010). Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. *Computers & Operations Research*, 37(4), 668-683.

35. 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.
36. Pishvae, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 637-649.
37. Pishvae, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433-3446.
38. Pishvae, 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.
39. Pishvae, M. S., & Khalaf, M. F. (2016). Novel robust fuzzy mathematical programming methods. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 407-418.
40. Rabieh, M., Azar, A., Modarres, M., & Fetanat, M., (2011). Mathematical Modeling for Multi Objective Robust Sourcing Problem: An Approach in Reduction of Supply Chain Risk (Case study: IKCO Supply Chain). *Journal of Industrial Management Perspective*, 1, 57-77. (In Persian)
41. Rabieh, M., & Fadaei, A., (2015). Fuzzy Robust Mathematical Model for Project Portfolio Selection and its Solving through Multi Objective Differential Evolutionary Algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 19, 65-90 (In Persian).
42. Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8), 825-843.
43. Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: a generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336-349.
44. Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 451-488.
45. Torabi, S. A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2), 193-214.
46. Tabrizi, B. H., & Razmi, J. (2013). Introducing a mixed-integer non-linear fuzzy model for risk management in designing supply chain networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(2), 295-307.
47. Torabi, S. A., Namdar, J., Hatefi, S. M., & Jolai, F. (2015). An enhanced possibilistic programming approach for reliable closed-loop supply chain network design. *International Journal of Production Research*, 1-30.
48. Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E., & Cetinkaya, S. (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54(8), 890-907.
49. Wang, R. C., & Liang, T. F. (2005). Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning. *International Journal of Production Economics*, 98(3), 328-341.
50. Wang, H. F., & Hsu, H. W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & operations research*, 37(2), 376-389.

51. Winkler, H. (2011). Closed-loop production systems—A sustainable supply chain approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(3), 243-246.
52. Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64(1), 385-397.
53. Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 1(1), 3-28.
54. Zhang, W. G., Wang, Y. L., Chen, Z. P., & Nie, Z. K. (2007). Possibilistic mean–variance models and efficient frontiers for portfolio selection problem. *Information Sciences*, 177(13), 2787-2801.
55. Zhang, W. G., & Xiao, W. L. (2009). On weighted lower and upper possibilistic means and variances of fuzzy numbers and its application in decision. *Knowledge and information systems*, 18(3), 311-330.
56. Zhang, P., & Zhang, W. G. (2014). Multiperiod mean absolute deviation fuzzy portfolio selection model with risk control and cardinality constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, 255, 74-91.
57. Zeballos, L. J., Méndez, C. A., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2014). Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 151-164.
58. Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 182-214.