

Stone Paper Closed-Loop Supply Chain Network Design using Robust Stochastic, Possibilistic and Flexible Chance-constrained Programming

Seyyed Jalaladdin Hosseini Dehshiri*, **Maghsoud Amiri****,
Laya Olfat***, **Mir Saman Pishvae******

Abstract

Considering the cognitive, random, uncertain, and flexible constraints, a robust, stochastic, possibilistic, and flexible chance-constrained model was developed based on credibility measurement. The ultimate aim was closed-loop supply chain network design. Different attitudes of decision-makers were answered by more flexible measurements of optimistic and pessimistic parameters in the form of credibility measurement. The model has been able to reduce the possible deviation, stochastic deviations, non-fulfillment of demand and capacity constraints, and violation of flexible constraints, which simultaneously include cognitive and random uncertainties and flexibility of constraints in the model. To apply the model, a case study was conducted to design the closed-loop supply chain network of multi-product and multi-period stone paper. The results of implementing the model showed that in different situations and according to the importance of decision makers' opinions, using the range of optimism and pessimism, the number, location of facilities, optimal flow of products and materials between centers in the stone paper supply chain network can be determined. The proposed model was evaluated using robustness and sensitivity analysis, and its performance was evaluated using nominal data in the realization model, which results showed the appropriate performance of the model.

Keywords: Closed-Loop Supply Chain Network Design; Stochastic Programming; Possibilistic Programming; Flexible Programming; Robust Optimization.

Received: Agu. 13, 2021; Accepted: Nov. 25, 2021.

* Ph.D. Student, Allameh Tabataba'i University.

** Professor, Allameh Tabataba'i University (Corresponding Author).

Email: amiri@atu.ac.ir

*** Professor, Allameh Tabataba'i University.

**** Associate Professor, Iran University of Science and Technology.

طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کاغذسنگی با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار

سید جلال‌الدین حسینی دهشیری*، مقصود امیری**، لیا الفت***،
میرسامان پیشوایی****

چکیده

به دلیل عدم قطعیت‌های شناختی، تصادفی و محدودیت‌های انعطاف‌پذیر، در این پژوهش مدل جدیدی از برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر، امکانی، تصادفی استوار مختلط بر مبنای نظریه اعتبار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته توسعه داده شده است. نگرش‌های متفاوت تصمیم‌گیرندگان با اندازه‌گیری انعطاف‌پذیرتر پارامترهای خوش‌بینانه و بدبینانه در قالب معیار اعتبار پاسخ داده شد. مدل قادر به کاهش انحرافات امکانی، انحرافات تصادفی، عدم تحقق محدودیت‌های مربوط به تقاضا و ظرفیت و نقض محدودیت‌های انعطاف‌پذیر بوده که به طور هم‌زمان عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی و انعطاف‌پذیری محدودیت‌ها در مدل لحاظ شده است. برای کاربرد مدل، مطالعه‌ای موردی به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کاغذسنگی چندمحصولی و چنددوره‌ای صورت گرفت. نتایج اجرای مدل در مورد مطالعاتی نشان داد که در شرایط مختلف و با توجه به اهمیت نظرهای تصمیم‌گیرندگان، با استفاده از محدوده خوش‌بینانه و بدبینانه می‌توان تعداد، محل تسهیلات، جریان بهینه محصولات و مواد را بین مراکز در شبکه زنجیره تأمین کاغذسنگی تعیین کرد. مدل پیشنهادی با استفاده از تحلیل استواری و تحلیل حساسیت بررسی شد و عملکرد آن با استفاده از داده‌های اسمی در مدل پژوهش ارزیابی شد که نتایج بررسی‌ها، کارایی مناسب مدل را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته؛ برنامه‌ریزی تصادفی؛ برنامه‌ریزی امکانی؛
برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر؛ بهینه‌سازی استوار.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴.

* دانشجوی دکتری، دانشگاه علامه طباطبایی.

** استاد، دانشگاه علامه طباطبایی (نویسنده مسئول).

Email: amiri@atu.ac.ir

*** استاد، دانشگاه علامه طباطبایی.

**** دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۱. مقدمه

زنجیره تأمین، عامل مهمی در کسب مزیت رقابتی در بازار پرتلاطم امروزی است [۲۱]. در ابتدا توجه به مسائل اقتصادی و کاهش هزینه در زنجیره تأمین مورد تأکید واقع می‌شد [۱۶]. اخیراً اهمیت رقابت‌پذیری اقتصادی و نگرانی‌های زیست‌محیطی پیرامون محصولات فرسوده، باعث توجه به لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه‌بسته شده است [۱، ۴۲]. آگاهی از مسائل زیست‌محیطی، شرکت‌ها را به سمت لجستیک معکوس و طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته هدایت کرده است [۴۱]. طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته می‌تواند به میزان زیادی تأثیرات زیست‌محیطی و هزینه را بهبود بخشد [۱۲]؛ از این رو طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته و تصمیمی استراتژیک با آثار بلندمدت است [۴۶]. ریسک تصمیمات استراتژیک و بلندمدت، به دلیل آثار طولانی مدت آن، نسبت به تصمیمات عملیاتی بالاتر است [۱۷]. امروزه به دلیل ماهیت پیچیده، زنجیره‌های تأمین با انواع مختلفی از عدم قطعیت مواجه هستند که این امر موجب افزایش ریسک زنجیره تأمین شده است [۲۲]. عدم قطعیت تقاضا و همچنین عدم قطعیت در ظرفیت، نوع و کمیت محصولات برگشتی، عوامل مهمی هستند که باید در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین معکوس و حلقه‌بسته مورد توجه قرار گیرند [۳۴]. عدم قطعیت در تأمین، فرآیندهای توزیع و تولید، برآورد تقاضا و مقدار محصولات برگشتی تنها بخشی از مسائل موجود در طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته هستند [۱۰]. انواع مختلف عدم قطعیت شامل عدم قطعیت تصادفی و شناختی توسط پژوهشگران بررسی شده است [۳، ۳۰، ۳۳، ۳۶]. با توجه به مطالعات انجام‌شده، از روش برنامه‌ریزی تصادفی برای مقابله با عدم قطعیت تصادفی و از روش برنامه‌ریزی امکانی برای مقابله با عدم قطعیت شناختی استفاده شده است [۸، ۲۶، ۳۲]. در برنامه‌ریزی امکانی، انحرافات تابع هدف در شرایط فازی نادیده گرفته شده و همه تصمیمات در شرایط متوسط پارامترهای مبهم گرفته می‌شود [۴۸]؛ از این رو برای رفع ضعف مربوط به برنامه‌ریزی امکانی، برنامه‌ریزی استوار توسعه داده شد [۲۹]. هدف رویکرد بهینه‌سازی استوار، به دست آوردن راه‌حل غیرحساس نسبت به پارامترهای غیرقطعی است [۳۵]؛ بنابراین استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مقابله با عدم قطعیت ضروری است. از طرفی، در زمینه برنامه‌ریزی فازی، مسئله انعطاف‌پذیری یا ابهام در محدودیت‌ها در مطالعات مختلفی بررسی شده است [۸، ۳۲]. برخی از محدودیت‌های تحقق تقاضا و ظرفیت از لحاظ زبانی به عنوان محدودیت‌های انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند [۴]؛ بنابراین استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر با محدودیت‌های نرم برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت عدم قطعیت حیاتی است [۳۱].

در پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه برنامه‌ریزی امکانی، به دلیل در نظر گرفتن متوسط مقادیر پارامترهای غیرقطعی، مدل ارائه‌شده دارای استواری لازم برای کنترل انحراف تابع هدف نبود؛ همچنین در مدل‌های برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر تنها به انعطاف‌پذیری محدودیت‌ها توجه شده و

تعیین سطح رضایت محدودیت‌ها از طریق بررسی‌های تکراری ذهنی توسط تصمیم‌گیرندگان انجام شده است و در این مدل‌ها مقدار سطح رضایت محدودیت‌ها به صورت بهینه تعیین نمی‌شود. در مدل‌های تصادفی، به دلیل در نظر گرفتن سناریوهای مجزا و عدم کنترل انحرافات تصادفی تابع هدف دارای ضعف است. از طرفی در بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی استوار تنها به حالت بدبینانه در قالب «نظریه الزام» یا حالت خوش‌بینانه در قالب «نظریه امکان» توجه شده است که مدل‌سازی دوقطبی می‌شود و قادر به ارائه طیفی از پارامترهای بدبینانه و خوش‌بینانه نیست. در مدل پایه برنامه‌ریزی امکانی برای کنترل انحراف امکانی تنها از مقادیر حداکثر و حداقل تابع هدف برای کنترل انحراف امکانی استفاده شده و این در حالی است که اندازه‌گیری انحراف مطلق امکانی تابع هدف به کنترل دقیق‌تر انحرافات تابع هدف منجر می‌شود. تعداد پژوهش‌های انجام شده در حوزه مدل‌های برنامه‌ریزی استوار با عدم قطعیت ترکیبی و محدودیت‌های انعطاف‌پذیر محدود بوده و در مبنای نظری پژوهش به‌طور هم‌زمان این مسائل در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین در راستای رفع کمبودهای موجود، در این پژوهش، مدل جدیدی از برنامه‌ریزی محدودیت‌های شانس انعطاف‌پذیر، امکانی، تصادفی استوار مختلط بر مبنای نظریه اعتبار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته ارائه می‌شود. مدل ارائه شده قادر به کاهش انحرافات امکانی و تصادفی، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت و نقض محدودیت‌های انعطاف‌پذیر است و به‌طور هم‌زمان استواری و عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی و انعطاف‌پذیری محدودیت‌ها در مدل لحاظ می‌شود؛ همچنین مطالعه‌ای موردی به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین کاغذسنگی صورت می‌گیرد که از نظر مورد مطالعاتی نیز پژوهش حاضر دارای نوآوری است.

ادامه ساختار پژوهش بدین شکل سازمان‌دهی شده است که در بخش دوم، پیشینه پژوهش در زمینه زنجیره تأمین حلقه‌بسته می‌شود. در بخش سوم مدل چنددوره‌ای و چندمحصولی به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین کاغذسنگی ارائه خواهد شد؛ همچنین در این بخش مدل جدید برنامه‌ریزی محدودیت‌های شانس انعطاف‌پذیر، امکانی، تصادفی استوار ارائه می‌شود. بخش چهارم به تحلیل نتایج و ارزیابی مدل پیشنهادی اختصاص دارد. در بخش پنجم نتیجه‌گیری، کاربردهای مدیریتی و پیشنهادهای علمی و اجرایی ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین حلقه‌بسته به‌منظور حداقل‌سازی کل هزینه‌ها و حداکثرسازی سود در طول چرخه عمر محصول ایجاد شده است [۶، ۱۳]. عدم قطعیت ویژگی ذاتی و اجتناب‌ناپذیر زنجیره تأمین حلقه‌بسته است که این عوامل باعث افزایش پیچیدگی مدیریت زنجیره تأمین حلقه‌بسته می‌شوند [۲۳]. در مبانی نظری در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته، در نظر گرفتن عوامل عدم قطعیت، مورد تأکید قرار گرفته است [۸].

پیشوایی و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل چنددوره‌ای دوهدفه فازی برای مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته طراحی کردند که در آن تقاضا، نرخ برگشت محصول فرسوده، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های حمل‌ونقل و زمان تحویل غیرقطعی بود [۳۳]. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱)، یک مدل بهینه‌سازی استوار تحت عدم قطعیت در زنجیره تأمین حلقه‌بسته را پیشنهاد کردند و در این مطالعه مدل تحت نظریه بهینه‌سازی استوار ارائه شد [۳۴]. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)، به طراحی شبکه زنجیره تأمین مسئولیت اجتماعی تحت عدم قطعیت پرداختند. در این پژوهش برای مواجهه با پارامترهای غیرقطعی، رویکرد جدید برنامه‌ریزی امکانی استوار توسعه داده شد و یک مطالعه موردی صنعتی واقعی برای نشان دادن عملکرد و کاربرد مدل‌های پیشنهادی صورت گرفت [۳۵]. هاتفی و جولای (۲۰۱۴)، یک مدل استوار برای طراحی زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس یک‌سطحی و تک‌محصولی ارائه دادند [۱۵]. طلایی و همکاران (۲۰۱۶)، از روش برنامه‌ریزی امکانی استوار بر مبنای معیار الزام برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته استفاده کردند. هدف این پژوهش حداقل‌سازی هزینه کل و میزان انتشار کربن بود [۳۷]. ترابی و همکاران (۲۰۱۶)، یک رویکرد برنامه‌ریزی امکانی^۱ استوار برای مقابله با عدم قطعیت پیشنهاد کردند. در این پژوهش از برنامه‌ریزی محدودیت اعتبار^۲ برای مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مدل استفاده شد [۳۸]. پیشوایی و خلف (۲۰۱۶)، رویکرد جدیدی شامل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار جدید با عنوان «مدل برنامه‌ریزی امکانی - انعطاف‌پذیر استوار» با هدف حداقل‌سازی هزینه کل ارائه کردند [۳۱]. جبارزاده و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل بهینه‌سازی استوار تصادفی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تاب‌آور ارائه دادند. هدف این پژوهش، مکان‌یابی تسهیلات و میزان حمل‌ونقل جانبی با هدف حداقل‌سازی هزینه کل زنجیره تأمین در سناریوهای مختلف اختلال بود [۲۰]. فرخ و همکاران (۲۰۱۸)، مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت عدم قطعیت ترکیبی را در نظر گرفتند. آن‌ها از نظریه اعتبار به‌عنوان راه‌حل در این مسئله استفاده کردند و یک رویکرد جدید برنامه‌ریزی تصادفی فازی استوار ارائه دادند [۸]. دهقان و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل چندمحصولی و چنددوره‌ای در زنجیره تأمین روغن خوراکی را توسعه دادند. در این پژوهش، رویکرد برنامه‌ریزی

1. Possibilistic

2. Credibility

امکانی تصادفی استوار جدیدی برای مقابله با پارامترهای غیرقطعی بر مبنای اندازه‌گیری Me پیشنهاد شد [۷]. فاضلی خلف و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل جدید ریاضی سه‌هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون در شرایط اضطراری ارائه دادند. در این پژوهش از مدل‌های برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر امکانی استوار^۱ و مدل محدودیت شانس انعطاف‌پذیر امکانی استفاده شد [۹]. قهرمانی نهر و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته، چنددوره‌ای، چندمحصولی و چندسطحی ارائه دادند. مدل با استفاده از برنامه‌ریزی فازی استوار با استفاده از «نظریه الزام» برای بررسی اثرات پارامترهای غیرقطعی ارائه شد [۱۰]. حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)، به طراحی شبکه زنجیره تأمین خون پرداختند. آن‌ها برای مقابله با عدم قطعیت ترکیبی، رویکرد جدیدی از برنامه‌ریزی استوار انعطاف‌پذیر امکانی - تصادفی استوار معرفی کردند [۱۸]. اتابکی و همکاران (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ای به طراحی مجدد شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته محصولات بادوام پرداختند. در این پژوهش، مدل جدید بهینه‌سازی استوار با روش‌های برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو ارائه شد [۲]. برونوس^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چندهدفه جدید به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه‌بسته توسعه دادند. در این بررسی یک رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر - امکانی استوار بر مبنای «نظریه الزام» ارائه شد [۴]. لیو^۳ و همکاران (۲۰۲۱)، یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته فازی استوار به‌منظور بهینه‌سازی بدترین عملکرد شبکه با در نظر گرفتن بده‌بستان بین ریسک و هزینه موردانتظار توسعه دادند. آن‌ها از نظریه اعتبار برای مقابله با عدم قطعیت‌های مدل استفاده کردند [۲۵]. گیلانی و صاحبی (۲۰۲۱)، به طراحی زنجیره تأمین مغز پسته و محصولات جانبی آن در ایران پرداختند. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار بر مبنای «نظریه الزام» برای مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود ارائه شد [۱۱].

مطالعات انجام‌شده در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت در جدول ۱، با هم مقایسه شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Robust possibilistic flexible chance constraint programming
2. Bronoos
3. Liu

جدول ۱. مقایسه مطالعات انجام‌شده در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت

معیار اندازه‌گیری	رویکرد مدل‌سازی							پژوهش‌های انجام‌شده		
	پارامترهای غیرقطعی									
	دیگر عوامل	هزینه، قیمت	ظرفیت	محصولات بازگشتی	تقاضا	برنامه‌ریزی فازی	بهبودسازی استوار	برنامه‌ریزی امکانی	برنامه‌ریزی تصادفی	برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر
-	✓			✓	✓	✓	✓			پیشوایی و همکاران [۳۴]
-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			پیشواییو همکاران [۳۳]
الزام	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		پیشوایی و همکاران [۳۵]
-		✓	✓	✓	✓	✓	✓			هاتفی و جولای [۱۵]
الزام		✓	✓		✓	✓	✓	✓		طلایی و همکاران [۳۷]
اعتبار	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	ترابی و همکاران [۳۸]
-		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	پیشوایی و خلف [۳۱]
-						✓	✓		✓	جبارزاده و همکاران [۲۰]
Me	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	دهقان و همکاران [۷]
اعتبار	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	فرخ و همکاران [۸]
-	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	فاضلی خلف و همکاران [۹]
الزام	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		قهرمانی نهر و همکاران [۱۰]
-	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	حسینی مطلق و همکاران [۱۸]
-	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	اتابکی و همکاران [۲]
الزام	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	برنوس و همکاران [۴]
اعتبار	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		لیو و همکاران [۲۵]
الزام	✓	✓			✓	✓	✓	✓		گیلانی و صاحبی [۱۱]
اعتبار	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	پژوهش حاضر

در پژوهش حاضر مدل جدیدی از برنامه‌ریزی محدودیت‌شانس انعطاف‌پذیر، امکانی و تصادفی استوار بر مبنای «نظریه اعتبار» برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ارائه می‌شود. با توجه به جدول ۱، تاکنون معیار اعتبار در برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار توسعه داده نشده که از نظر توسعه مدل برنامه‌ریزی تحت عدم قطعیت دارای نوآوری است؛ همچنین مطالعه‌ای موردی به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کاغذسنگی در کشور ایران انجام می‌شود که تاکنون پژوهشی در این زمینه در زنجیره تأمین کاغذسنگی صورت نگرفته و از این جنبه نیز مطالعه حاضر دارای نوآوری است.

۳. روشی شناسایی پژوهش

بیان مسئله و مدل سازی. در این بخش مدلی جدید و یکپارچه چندمحصولی و چنددوره‌ای تحت شرایط عدم قطعیت برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کاغذسنگی ارائه می‌شود. این مدل چندسطحی بوده و شامل زنجیره‌های تأمین مستقیم و معکوس است. زنجیره تأمین مستقیم شامل تولید محصولات کاغذسنگی از مراکز تولید و انتقال به مراکز توزیع و محل مشتریان نهایی است. زنجیره تأمین معکوس شامل جریان محصولات از مراکز مشتری به مراکز جمع‌آوری، مراکز بازیابی و مراکز بازیافت است. در این مرحله، محصولات از مراکز مشتریان به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شود. در مراکز جمع‌آوری محصولات بررسی شده و به مراکز بازیابی و بازیافت ارسال می‌شوند. در مراکز بازیابی، محصولات بازیابی شده برای استفاده مجدد به مراکز توزیع ارسال می‌شود. محصولاتی که امکان بازیابی برای آن‌ها وجود ندارد، به مراکز بازیافت منتقل می‌شوند و پس از بازیافت این محصولات به محل مشتریان مواد ارسال می‌شود. مفروضات اصلی مدل پیشنهادی عبارت‌اند از:

- مراکز مشتریان ثابت فرض می‌شود و تقاضای مراکز مشتریان باید برآورده شود؛
 - ظرفیت تسهیلات مختلف محدود است؛
 - درصد مشخصی از محصولات بازگشتی، امکان بازیابی دارند؛
 - محصولات بازیابی شده برای استفاده مجدد در زنجیره تأمین به مراکز توزیع ارسال می‌شوند؛
 - محصولات بازیافت شده در مراکز بازیافت به محل مشتریان مواد ارسال می‌شود؛
 - محل مشتریان مواد ثابت فرض شده است؛
- با توجه به مدل پیشنهادی و مفروضات بیان شده، شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله برای مدل سازی شبکه زنجیره تأمین سته کاغذسنگی به صورت زیر است:

شاخص‌ها

- i : شاخص مرتبط با مراکز تولید در نظر گرفته شده $i=1, 2, \dots, I$
- j : شاخص مرتبط با مراکز توزیع در نظر گرفته شده $j=1, 2, \dots, J$
- k : شاخص مرتبط با مراکز مشتریان محصولات $k=1, 2, \dots, K$
- l : شاخص مرتبط با مراکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده $l=1, 2, \dots, L$
- m : شاخص مرتبط با مراکز بازیابی در نظر گرفته شده $m=1, 2, \dots, M$
- n : شاخص مرتبط با مراکز بازیافت در نظر گرفته شده $n=1, 2, \dots, N$
- p : شاخص مرتبط با نوع محصول $p=1, 2, \dots, P$
- e : شاخص مرتبط با محل مشتریان مواد بازیافتی $e=1, 2, \dots, E$
- r : شاخص مرتبط با مواد بازیافت شده $r=1, 2, \dots, R$

t : شاخص مرتبط با دوره‌های زمانی در نظر گرفته شده $t=1,2, \dots, T$
 s : شاخص مرتبط با سناریوهای تصادفی $s=1,2, \dots, S$

پارامترها

\bar{a}_{pkts} : تقاضای محصول p توسط مشتریان مرکز k ام در دوره t و سناریوی s
 \bar{w}_{pk} : درصد محصول برگشتی نوع p توسط مشتریان مرکز k ام
 \bar{r}_{pkts} : میزان محصول برگشتی نوع p توسط مشتریان مرکز k ام در دوره t و سناریوی s
 \bar{a}_{rets} : تقاضای مواد بازیافتی r توسط مشتری مواد مرکز e ام در دوره t و سناریوی s
 $\bar{\omega}_{pt}$: میانگین خرابی محصول نوع p در دوره t ام
 \bar{m}_i : هزینه ثابت بهره‌برداری مرکز تولید i ام
 \bar{f}_j : هزینه ثابت بهره‌برداری مرکز توزیع j ام
 \bar{g}_l : هزینه ثابت بهره‌برداری مرکز جمع‌آوری l ام
 \bar{b}_m : هزینه ثابت بهره‌برداری مرکز بازیابی m ام
 \bar{a}_n : هزینه ثابت بهره‌برداری مرکز بازیافت n ام
 $\bar{c}_{\bar{O}_{pijts}}$: هزینه حمل هر واحد محصول نوع p از مرکز تولید i ام به مرکز توزیع j ام در دوره t و سناریوی s
 $\bar{c}_{\bar{U}_{pjks}}$: هزینه حمل هر واحد محصول نوع p از مرکز توزیع j ام به مرکز مشتری k ام در دوره t و سناریوی s
 $\bar{c}_{\bar{Q}_{pklt}}$: هزینه حمل هر واحد محصول نوع p از مرکز مشتری k ام به مرکز جمع‌آوری l ام در دوره t و سناریوی s
 $\bar{c}_{\bar{P}_{plmts}}$: هزینه حمل هر واحد محصول نوع p از مرکز جمع‌آوری l ام به مرکز بازیابی m ام در دوره t و سناریوی s
 $\bar{c}_{\bar{S}_{plnts}}$: هزینه حمل هر واحد محصول نوع p از مرکز جمع‌آوری l ام به مرکز بازیافت n ام در دوره t و سناریوی s
 $\bar{c}_{\bar{H}_{pmjts}}$: هزینه حمل هر واحد محصول نوع p از مرکز بازیابی m ام به مرکز توزیع j ام در دوره t و سناریوی s
 $\bar{c}_{\bar{V}_{rnets}}$: هزینه حمل هر واحد مواد بازیافتی r از مرکز بازیافت n ام به مرکز مشتری مواد e ام در دوره t و سناریوی s
 \bar{p}_{pits} : هزینه تولید هر واحد محصول نوع p در مرکز تولید i ام در دوره t و سناریوی s
 $\bar{\pi}_{pjts}$: هزینه پردازش هر واحد محصول نوع p در مرکز توزیع j ام در دوره t و سناریوی s
 \bar{d}_{plts} : هزینه پردازش هر واحد محصول نوع p در مرکز جمع‌آوری l ام در دوره t و سناریوی s

\bar{t}_{pmts} : هزینه بازیابی هر واحد محصول نوع p در مرکز بازیابی m در دوره t و سناریوی s
 \bar{t}_{rnts} : هزینه بازیافت هر واحد مواد بازیافتی r در مرکز بازیافت n در دوره t و سناریوی s
 $\bar{p}p_i$: ظرفیت حداکثر مرکز تولید m در هر دوره
 $\bar{p}x_j$: ظرفیت حداکثر مرکز توزیع زام در هر دوره
 $\bar{p}y_l$: ظرفیت حداکثر مرکز جمع‌آوری l در هر دوره
 $\bar{p}z_m$: ظرفیت حداکثر مرکز بازیابی m در هر دوره
 $\bar{p}w_n$: ظرفیت حداکثر مرکز بازیافت n در هر دوره
 P_s : وقوع احتمالی سناریوی s

متغیرها

o_{pijts} : مقدار محصول نوع p منتقل شده از مرکز تولید m به مرکز توزیع زام در دوره t و سناریوی s
 u_{pjkt} : مقدار محصول نوع p منتقل شده از مرکز توزیع زام به مرکز مشتری k در دوره t و سناریوی s
 q_{pklt} : مقدار محصول نوع p منتقل شده از مرکز مشتری k به مرکز جمع‌آوری l در دوره t و سناریوی s
 p_{plmts} : مقدار محصول نوع p منتقل شده از مرکز جمع‌آوری l به مرکز بازیابی m در دوره t و سناریوی s
 s_{pnt} : مقدار محصول نوع p منتقل شده از مرکز جمع‌آوری l به مرکز بازیافت n در دوره t و سناریوی s
 h_{pmjt} : مقدار محصول نوع p منتقل شده از مرکز بازیابی m به مرکز توزیع زام در دوره t و سناریوی s
 v_{rnts} : مقدار مواد بازیافتی r منتقل شده از مرکز بازیافت n به مرکز مشتری مواد e در دوره t و سناریوی s
 mc_i : در شرایطی که مرکز تولید m مورد بهره‌برداری قرار گیرد، یک؛ در غیر این صورت صفر
 x_j : در شرایطی که مرکز توزیع زام مورد بهره‌برداری قرار گیرد، یک؛ در غیر این صورت صفر
 y_l : در شرایطی که مرکز جمع‌آوری l مورد بهره‌برداری قرار گیرد، یک؛ در غیر این صورت صفر
 z_m : در شرایطی که مرکز بازیابی m مورد بهره‌برداری قرار گیرد، یک؛ در غیر این صورت صفر
 w_n : در شرایطی که مرکز بازیافت n مورد بهره‌برداری قرار گیرد، یک؛ در غیر این صورت صفر
 با توجه به فرضیه‌های ارائه شده، مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کاغذسنگی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned}
\text{Min } Z = & \sum_i \tilde{m}_i \cdot mc_i + \sum_j \tilde{f}_j \cdot x_j + \sum_l \tilde{g}_l \cdot y_l + \sum_m \tilde{b}_m \cdot z_m \\
& + \sum_n \tilde{a}_n \cdot w_n \\
& + \sum_s P_s \left[\sum_p \sum_i \sum_j \sum_t (\tilde{c}\tilde{o}_{pijts} + \tilde{\rho}_{pits}) \cdot o_{pijts} \right. \\
& + \sum_p \sum_j \sum_k \sum_t (\tilde{c}\tilde{u}_{pj kts} + \tilde{\pi}_{pjts}) \cdot u_{pj kts} \\
& + \sum_p \sum_k \sum_l \sum_t \tilde{c}\tilde{q}_{pk lts} \cdot q_{pk lts} \\
& + \sum_p \sum_l \sum_m \sum_t (\tilde{c}\tilde{p}_{plmts} + \tilde{\delta}_{plts}) \cdot p_{plmts} \\
& + \sum_p \sum_l \sum_n \sum_t (\tilde{c}s_{plnts} + \tilde{\delta}_{plts}) \cdot s_{plnts} \\
& + \sum_p \sum_m \sum_j \sum_t (\tilde{c}\tilde{h}_{pmjts} + \tilde{\tau}_{pmts}) \cdot h_{pmjts} \\
& \left. + \sum_r \sum_n \sum_e \sum_t (\tilde{c}\tilde{v}_{rnets} + \tilde{\theta}_{rnts}) \cdot v_{rnets} \right] \\
& \sum_j u_{pj kts} \geq \tilde{d}_{pkts} \quad \forall p, k, t, s \quad (1)
\end{aligned}$$

$$\sum_n v_{rnets} \geq \tilde{d}_{rets} \quad \forall r, e, t, s \quad (2)$$

$$\sum_l q_{pk lts} \geq \tilde{r}_{pkts} \quad \forall p, k, t, s \quad (3)$$

$$\tilde{r}_{pkts} = \tilde{w}_{pk} \cdot \tilde{d}_{pkts} \quad \forall p, k, t, s \quad (4)$$

$$\sum_i o_{pijts} + \sum_m h_{pmjts} \geq \sum_k u_{pj kts} \quad \forall p, j, t, s \quad (5)$$

$$\tilde{\omega}_{pt} \cdot \sum_k q_{pk lts} = \sum_n s_{plnts} \quad \forall p, l, t, s \quad (6)$$

$$(1 - \tilde{\omega}_{pt}) \cdot \sum_k q_{pk lts} = \sum_m p_{plmts} \quad \forall p, l, t, s \quad (7)$$

$$\sum_j h_{pmjts} = \sum_l p_{plmts} \quad \forall p, m, t, s \quad (8)$$

$$\sum_r \sum_e v_{rnets} \leq \sum_p \sum_l s_{plnts} \quad \forall n, t, s \quad (9)$$

$$\sum_p \sum_j o_{pijts} \leq mc_i \cdot \bar{p}p_i \quad \forall i, t, s \quad (11)$$

$$\sum_p \sum_k u_{pjks} \leq x_j \cdot \bar{p}x_j \quad \forall j, t, s \quad (12)$$

$$\sum_p \sum_k q_{pkls} \leq y_l \cdot \bar{p}y_l \quad \forall l, t, s \quad (13)$$

$$\sum_p \sum_l p_{plmts} \leq z_m \cdot \bar{p}z_m \quad \forall m, t, s \quad (14)$$

$$\sum_p \sum_l s_{plnts} \leq w_n \cdot \bar{p}w_n \quad \forall n, t, s \quad (15)$$

$$mc_i, x_j, y_l, z_m, w_n \in \{0,1\} \quad \forall i, j, l, m, n \quad (16)$$

$$o_{pijts}, u_{pjks}, q_{pkls}, p_{plmts}, s_{plnts}, h_{pmjts}, v_{rnets} \geq 0 \quad \forall p, i, j, l, m, n, e, t, s \quad (17)$$

تابع هدف به حداقل‌سازی کل هزینه‌های زنجیره تأمین شامل هزینه‌های ثابت بهره‌برداری تسهیلات، هزینه‌های متغیر پردازش و هزینه‌های حمل‌ونقل بین تسهیلات زنجیره تأمین می‌پردازد و در رابطه ۱، ارائه شده است. برآورده شدن تقاضای مراکز مشتری و مشتریان مواد به ترتیب در محدودیت‌های ۲ و ۳، آمده است. محدودیت ۴، نشان می‌دهد که همه محصولات برگشتی از مراکز مشتری باید جمع‌آوری شود. محدودیت ۵، میزان محصولات برگشتی از مراکز مشتری را نشان می‌دهد. محدودیت ۶، به جریان محصولات از مراکز تولید و مراکز بازیابی به مراکز توزیع اشاره دارد. محدودیت تعادلی ۷، جریان محصولات از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت را نشان می‌دهد. محدودیت تعادلی ۸، به جریان محصولات از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیابی اشاره دارد. محدودیت تعادلی ۹، تعادل میزان محصولات ورودی از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیابی با میزان محصولات منتقل شده از مراکز بازیابی به مراکز توزیع را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۰، رابطه بین محصولات ارسال شده از مراکز جمع‌آوری به بازیافت و مواد بازیافت شده ارسالی از مراکز بازیافت به مشتریان مواد را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۱، تضمین می‌کند که حداکثر میزان محصولات ارسالی از هر مرکز تولید به مراکز توزیع از حداکثر ظرفیت مرکز تولید تجاوز نکند. محدودیت ۱۲، نشان می‌دهد که حداکثر میزان محصولات ارسالی از هر مرکز توزیع از ظرفیت آن تجاوز نکند. محدودیت ۱۳، تضمین می‌کند که حداکثر میزان محصولات ارسالی از مراکز مشتری به هر مرکز جمع‌آوری از ظرفیت مرکز جمع‌آوری تجاوز نکند. محدودیت ۱۴، نشان می‌دهد که حداکثر میزان محصولات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به هر مرکز بازیافت از ظرفیت مرکز بازیابی تجاوز نکند. محدودیت ۱۵، تضمین می‌کند که حداکثر میزان محصولات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به هر مرکز

بازیافت از ظرفیت مرکز بازیافت تجاوز نکند. محدودیت ۱۶، متغیرهای صفر و یک مدل را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۷، به متغیرهای غیرمنفی تعریف شده در مدل اشاره دارد.

روش حل مدل پیشنهادی. در این بخش، ابتدا مدل‌های برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، امکانی و تصادفی با رویکرد بهینه‌سازی استوار تشریح می‌شود و مدل جدیدی از برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر امکانی و تصادفی استوار بر مبنای «نظریه اعتبار» توسعه داده می‌شود.

مدل پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیری^۱. در مدل پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر فرض می‌شود که محدودیت‌های اول و سوم انعطاف‌پذیر هستند. بردارهای f و c به ترتیب مربوط به هزینه‌های ثابت بهره‌برداری تسهیلات و هزینه‌های متغیر هستند. ماتریس‌های A, B, S, T و N ضرایب محدودیت‌ها را نشان می‌دهند که N نشانگر ظرفیت تسهیلات است. بردار d نمایانگر تقاضای مشتری است. بردار x و y به ترتیب متغیرهای پیوسته و باینری هستند. نمادهای \leq و \geq به ترتیب به عنوان نسخه فازی \leq و \geq در نظر گرفته می‌شود. مدل پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر به شرح زیر فرموله می‌شود [۹، ۱۸، ۳۱].

$$\begin{aligned} \text{Min } E &= cx + fy, \\ \text{s.t.} \\ Ax &\geq d, \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

برای نشان دادن انحراف محدودیت‌های نرم از دو عدد فازی \tilde{t} و \tilde{r} استفاده می‌شود. بر این اساس مدل ۱۸ را می‌توان به شرح زیر بازنویسی کرد [۱۸، ۲۸، ۳۱].

$$\begin{aligned} \text{Min } E &= cx + fy, \\ \text{s.t.} \\ Ax &\geq d - \tilde{t}(1 - \alpha'), \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny + [\tilde{r}(1 - \beta')]y, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

پارامترهای α' و β' شاخص حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر هستند. حال چنانچه $\tilde{t} = (t_1, t_2, t_3, t_4)$ و $\tilde{r} = (r_1, r_2, r_3, r_4)$ باشند.

بر اساس روش رتبه‌بندی فازی پیشنهادشده توسط یاگر^۱ (۱۹۸۱)، می‌توان آن‌ها را به صورت زیر تعریف کرد [۳۱، ۲۸، ۱۸]:

$$\tilde{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \quad (20)$$

$$\tilde{r} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \quad (21)$$

با توجه به روابط ۲۰ و ۲۱، مدل ۱۸، بر اساس اعداد فازی ذوزنقه‌ای به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min } E &= cx + fy, \\ \text{s. t. } Ax &\geq d - \left(\frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}\right)(1 - \alpha'), \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny + \left[\left(\frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4}\right)(1 - \beta')\right]y, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

بهینه‌بودن مقدار نهایی سطح رضایت محدودیت‌ها در این روش اطمینان ندارد و به‌طور ذهنی توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. افزایش محدودیت‌های انعطاف‌پذیر به افزایش تکرارهای لازم برای یافتن مقدار مناسب برای سطح رضایت محدودیت‌ها منجر می‌شود؛ بنابراین برای رفع این کاستی‌ها، مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار توسعه یافته است.

مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار. بر اساس مدل پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر می‌توان مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار را به صورت زیر فرموله کرد [۳۱]:

$$\begin{aligned} \text{Min } E &= cx + fy + \varphi \left[\left(\frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}\right)(1 - \alpha')\right] \\ &\quad + \Delta \left[\left(\frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4}\right)(1 - \beta')\right]y, \\ \text{s. t. } Ax &\geq d - \left(\frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}\right)(1 - \alpha'), \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny + \left[\left(\frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4}\right)(1 - \beta')\right]y, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, \quad x \geq 0, \quad 0 \leq \alpha', \beta' \leq 1, \end{aligned} \quad (23)$$

دو عبارت اول در تابع هدف مربوط به هزینه ثابت کل بهره‌برداری تسهیلات و هزینه‌های متغیر پردازش است و عبارت سوم و چهارم جریمه انحراف محدودیت‌های نرم را محاسبه می‌کنند

[۱۸، ۲۸، ۳۱]: همچنین جریمه برای هر واحد انحراف محدودیت‌های نرم از طریق پارامترهای φ و Δ توسط تصمیم‌گیرندگان در مدل در نظر گرفته شده است [۳۱]. ضرب متغیرها در عبارت چهارم تابع هدف و محدودیت سوم به غیرخطی بودن مدل پیشنهادی منجر می‌شود. مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را می‌توان با تعریف متغیر غیرمنفی $\varepsilon' = \beta'y$ و با اضافه کردن محدودیت‌های زیر به مدل برنامه‌ریزی خطی معادل تبدیل کرد [۱۸، ۳۱]:

$$\begin{aligned} \varepsilon' &\leq My \\ \varepsilon' &\geq M(y - 1) + \beta' \\ \varepsilon' &\leq \beta' \\ \varepsilon' &\geq 0 \end{aligned} \quad (24)$$

محدودیت‌های اول و چهارم اضافه شده نشان می‌دهند که متغیر کمکی ε' اگر $y = 0$ باشد، برابر صفر می‌شود؛ همچنین محدودیت‌های دوم و سوم اضافه شده تضمین می‌کنند که متغیر کمکی ε' اگر $y = 1$ باشد، برابر β' می‌شود؛ همچنین M یک عدد بزرگ در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار را می‌توان به صورت زیر به مدل خطی تبدیل کرد [۲۸، ۳۱، ۳۹، ۴۵].

$$\begin{aligned} \text{Min } E &= cx + fy + \varphi \left[\left(\frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \right) (1 - \alpha') \right] \\ &+ \Delta \left[\left(\frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \right) (y - \varepsilon') \right], \\ \text{s.t.} \\ Ax &\geq d - \left(\frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \right) (1 - \alpha'), \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny + \left[\left(\frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \right) (y - \varepsilon') \right], \\ \varepsilon' &\leq My, \\ \varepsilon' &\geq M(y - 1) + \beta', \\ \varepsilon' &\leq \beta', \\ \varepsilon' &\geq 0, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, \quad x, \varepsilon' \geq 0, \quad 0 \leq \alpha', \beta' \leq 1, \end{aligned} \quad (25)$$

در رابطه ۲۵، مقادیر φ و Δ که ضرایب انحراف محدودیت‌های انعطاف‌پذیر هستند، بر اساس نظرات تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود. حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر از طریق حل مدل بهینه می‌شود که نیاز به بررسی‌های تکراری و زمان‌بر را از بین می‌برد. یکی دیگر از مزایای این مدل در مقایسه با مدل پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، توانایی آن در کنترل استواری شدنی در تابع هدف است که نتایج مدل را قابل اعتمادتر و استوار می‌کند [۲۸، ۴۵].

برنامه‌ریزی امکانی. یکی از مهم‌ترین روش‌های برنامه‌ریزی امکانی «برنامه‌ریزی محدودیت شانس امکانی»^۱ است که دارای دو نوع استاندارد امکانی^۲ و استاندارد الزام^۳ است [۳۵]. «نظریه امکان» به حالت خوش‌بینانه و «نظریه الزام» به حالت بدبینانه در رخداد پارامترهای غیرقطعی اشاره دارد [۱۹، ۲۷، ۲۸]. با فرض اینکه عدد فازی دوزنقه‌ای به شکل $\xi_1 < \xi_2 < \xi_3 < \xi_4$ ، $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4)$ ، تعریف شود، تابع عضویت مطابق با رابطه ۲۶ است. بر اساس مبانی نظری این حوزه، در سطح $\alpha > 0.5$ ، مدل قطعی امکان و الزام به صورت روابط ۲۷ تا ۳۰، تعریف می‌شود [۷، ۲۸، ۴۰].

$$\mu_{\xi}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \xi_1 \text{ or } x \geq \xi_4 \\ \frac{x - \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} & \xi_1 \leq x \leq \xi_2 \\ 1 & \xi_2 \leq x \leq \xi_3 \\ \frac{\xi_4 - x}{\xi_4 - \xi_3} & \xi_3 \leq x \leq \xi_4 \end{cases} \quad (26)$$

$$Pos\{\xi \leq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{x - \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (1 - \alpha)\xi_1 + \alpha \cdot \xi_2 \quad (27)$$

$$Pos\{\xi \geq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{\xi_4 - x}{\xi_4 - \xi_3} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (1 - \alpha)\xi_4 + \alpha \cdot \xi_3 \quad (28)$$

$$Nec\{\xi \leq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{x - \xi_3}{\xi_4 - \xi_3} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (1 - \alpha)\xi_3 + \alpha \cdot \xi_4 \quad (29)$$

$$Nec\{\xi \geq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{\xi_2 - x}{\xi_2 - \xi_1} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (1 - \alpha)\xi_2 + \alpha \cdot \xi_1 \quad (30)$$

مطابق با مبانی نظری حوزه برنامه‌ریزی امکانی، معیار اعتبار^۴ برای رفع نقایض نظریه امکان و الزام توسط لیو و لیو^۵ (۲۰۰۲)، ارائه شد [۲۴]. معیار اعتبار میانگین معیار امکان و الزام است. بر اساس نظر تصمیم‌گیرندگان برای $\alpha > 0.5$ خواهیم داشت [۷، ۸]:

$$Cr\{A\} = \frac{1}{2}(Pos\{A\} + Nec\{A\}) \quad (31)$$

$$Cr\{\xi \leq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{x - 2\xi_3 + \xi_4}{2(\xi_4 - \xi_3)} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (2 - 2\alpha)\xi_3 + (2\alpha - 1)\xi_4 \quad (32)$$

$$Cr\{\xi \geq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{2\xi_2 - \xi_1 - x}{2(\xi_2 - \xi_1)} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (2\alpha - 1)\xi_1 + (2 - 2\alpha)\xi_2 \quad (33)$$

1. Possibilistic Chance-Constrained Programming
 2. Possibility (Pos)
 3. Necessity (Nec)
 4. Credibility
 5. Liu and Liu

مجموعه سطح α از عدد فازی ذوزنقه‌ای $\tilde{\xi}$ ، با در نظر گرفتن R به عنوان مجموعه جهانی، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\xi^\alpha = \{x \in \mathbb{R} \mid \mu_{\tilde{\xi}}(x) \geq \alpha\} \quad \forall \alpha \in [0,1] \quad (34)$$

باید توجه داشت که تابع $\mu_{\tilde{\xi}}$ پیوسته بوده، سطح α بسته و محدود است؛ بنابراین $[\xi]^\alpha$ را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۵، ۱۴، ۴۷]:

$$\xi^\alpha = [f_{\tilde{\xi}}^{-1}(\alpha), g_{\tilde{\xi}}^{-1}(\alpha)] = [\xi_1 + \alpha(\xi_2 - \xi_1), \xi_4 + \alpha(\xi_3 - \xi_4)] \quad (35)$$

به منظور مدل‌سازی پارامترهای فازی در تابع هدف از میانگین امکانی قطعی و انحراف مطلق امکانی تابع هدف استفاده می‌شود. $E(\tilde{\xi})$ میانگین امکانی قطعی عدد فازی $\tilde{\xi}$ و $E_*(\tilde{\xi})$ و $E^*(\tilde{\xi})$ به ترتیب حد پایین و حد بالای مقدار میانگین امکانی است. $E(\tilde{\xi})$ ، $E_*(\tilde{\xi})$ و $E^*(\tilde{\xi})$ به شرح زیر محاسبه می‌شود [۵، ۸، ۱۴، ۴۷]:

$$\begin{aligned} E_*(\tilde{\xi}) &= 2 \int_0^1 \alpha (\inf \xi_\alpha) d\alpha = 2 \int_0^1 \alpha f_{\tilde{\xi}}^{-1}(\alpha) d\alpha = \frac{2}{3} \xi_2 + \frac{1}{3} \xi_1 \\ E^*(\tilde{\xi}) &= 2 \int_0^1 \alpha (\sup \xi_\alpha) d\alpha = 2 \int_0^1 \alpha g_{\tilde{\xi}}^{-1}(\alpha) d\alpha = \frac{2}{3} \xi_3 + \frac{1}{3} \xi_4 \\ E(\tilde{\xi}) &= \frac{E_*(\tilde{\xi}) + E^*(\tilde{\xi})}{2} = \frac{\xi_1 + 2\xi_2 + 2\xi_3 + \xi_4}{6} \end{aligned} \quad (36)$$

برای هر عدد فازی ذوزنقه‌ای $\tilde{\xi}$ ، انحراف مطلق امکانی به شرح زیر محاسبه می‌شود [۴۷، ۱۴]:

$$\sigma(\tilde{\xi}) = \frac{2}{3} (\xi_3 - \xi_2) + \frac{1}{3} (\xi_4 - \xi_1) \quad (37)$$

برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر - امکانی و تصادفی استوار مختلط جدید. در این بخش برنامه‌ریزی جدیدی با عنوان «مدل برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر، امکانی و تصادفی استوار مختلط» (MRSPFP) ارائه می‌شود. فرم کلی مدل برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر، امکانی و تصادفی بر مبنای معیار اعتبار به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } E[z] &= E[\tilde{f}]y + E[\tilde{c}_s]x_s \\
 \text{s. t.} \\
 Cr\{Ax_s \gtrsim \tilde{d}_s\} &\geq \alpha_s, \\
 Bx &= 0, \\
 Cr\{Sx_s \lesssim \tilde{N}y\} &\geq \beta_s, \\
 Ty &\leq 1, \\
 0.5 < \alpha_s, \beta_s &\leq 1 \\
 y \in \{0,1\}, x &\geq 0.
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

عبارت اول میانگین تابع هدف برای پارامترهای فازی است و از عملگر امید ریاضی برای تبدیل به حالت قطعی استفاده می‌شود؛ اما عبارت دوم از جنس تصادفی است و باید امکان رخداد پارامتر تصادفی در مدل اعمال شود که مدل ۳۸، به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } E[z] &= E[\tilde{f}]y + \sum_s P_s [\tilde{c}_s]x_s \\
 \text{s. t.} \\
 Cr\{Ax_s \gtrsim \tilde{d}_s\} &\geq \alpha_s \\
 Bx &= 0, \\
 Cr\{Sx_s \lesssim \tilde{N}y\} &\geq \beta_s, \\
 Ty &\leq 1, \\
 0.5 < \alpha_s, \beta_s &\leq 1, \\
 y \in \{0,1\}, x &\geq 0.
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

حال مدل فازی برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر امکانی - تصادفی ارائه شده به مدل قطعی تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } E[z] &= \left(\frac{f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4}{6} \right) y + \sum_s P_s \left(\frac{c_{1s} + 2c_{2s} + 2c_{3s} + c_{4s}}{6} \right) x_s \\
 \text{s. t.} \\
 Ax_s &\gtrsim (2 - 2\alpha_s)d_{3s} + (2\alpha_s - 1)d_{4s}, \\
 Bx &= 0, \\
 Sx_s &\lesssim [(2\beta_s - 1)N_1 + (2 - 2\beta_s)N_2] y, \\
 Ty &\leq 1,
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

$$0.5 < \alpha_s, \beta_s \leq 1, \\ y \in \{0,1\}, x \geq 0.$$

در این مدل برای در نظر گرفتن انحراف تابع هدف از میانگین آن از انحراف مطلق امکانی استفاده می‌شود. با فرض اینکه تابع هدف Z عدد فازی به صورت $Z_1 < Z_2 < Z_3 < Z_4$ ، $\bar{z} (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)$ باشد، مقدار $\sigma_{\bar{z}}$ طبق رابطه ۴۱، محاسبه می‌شود [۸، ۱۴، ۴۷]:

$$\sigma_{\bar{z}} = \frac{2}{3}(z_3 - z_2) + \frac{1}{3}(z_4 - z_1) \quad (41)$$

برای در نظر گرفتن انحراف مقدار تابع هدف اصلی از مقدار تابع هدف تحت هر سناریو از رابطه $\sum_s P_s |E(z) - E(z_s)|$ استفاده می‌شود که z_s تابع هدف مربوط به سناریوی s ام است [۸، ۷]: بنابراین با توجه به روابط ارائه شده مدل برنامه‌ریزی استوار با پارامترهای تصادفی و امکانی جدید به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min } E[z] + \gamma \sigma_{\bar{z}} + \Phi \sum_s P_s |E(z) - E(z_s)| + \\ \delta_1 \sum_s P_s [d_{4s} - (2 - 2\alpha_s)d_{3s} - (2\alpha_s - 1)d_{4s}] \\ + \delta_2 \sum_s P_s [(2\beta_s - 1)N_1 + (2 - 2\beta_s)N_2 - N_1]y \\ \text{s.t.} \\ Ax_s \geq (2 - 2\alpha_s)d_{3s} + (2\alpha_s - 1)d_{4s}, \\ Bx = 0, \\ Sx_s \leq [(2\beta_s - 1)N_1 + (2 - 2\beta_s)N_2]y, \\ Ty \leq 1, \\ 0.5 < \alpha_s, \beta_s \leq 1, \\ y \in \{0,1\}, x \geq 0, \end{aligned} \quad (42)$$

از آنجا که مدل ۴۲، غیرخطی است می‌توان با تعریف متغیر کمکی غیرمنفی $\varepsilon = \beta_s y$ و با اضافه کردن محدودیت‌های زیر، مدل را به برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط معادل تبدیل کرد.

$$\begin{aligned} \varepsilon \leq My \\ \varepsilon \geq M(y - 1) + \beta_s \\ \varepsilon \leq \beta_s \\ \varepsilon \geq 0 \end{aligned} \quad (43)$$

همچنین قدر مطلق عبارت سوم در تابع هدف در رابطه ۴۲، با توجه به رویکرد ارائه‌شده توسط یو و لی (۲۰۰۰)، به مدل خطی تبدیل می‌شود [۴۴، ۲۷، ۴]. بنابراین مدل خطی برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر J امکانی و تصادفی استوار مختلط جدید به صورت زیر توسعه داده می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } E[z] + \gamma \cdot \sigma_{z_1} + \Phi \cdot \sum_s P_s \cdot ((E(z) - E(z_s)) + 2\theta_s) \\ + \delta_1 \sum_s P_s [d_{4s} - (2 - 2\alpha_s)d_{3s} - (2\alpha_s - 1)d_{4s}] \\ + \delta_2 \sum_s P_s [(2\varepsilon - y)N_1 + (2y - 2\varepsilon)N_2 - N_1 \cdot y] \\ + \varphi \left[\left(\frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \right) (1 - \alpha') \right] \\ + \Delta \left[\left(\frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \right) (y - \varepsilon') \right] \end{aligned}$$

s.t.

$$\begin{aligned} E(z) - E(z_s) + \theta_s \geq 0, \quad \forall s \\ Ax_s \geq (2 - 2\alpha_s)d_{3s} + (2\alpha_s - 1)d_{4s} - \left(\frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \right) (1 - \alpha'), \quad (44) \\ Bx = 0, \\ Sx_s \leq (2\varepsilon - y)N_1 + (2y - 2\varepsilon)N_2 + \left[\left(\frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \right) (y - \varepsilon') \right], \\ \varepsilon \leq My, \\ \varepsilon \geq M(y - 1) + \beta_s, \\ \varepsilon \leq \beta_s, \\ \varepsilon \geq 0, \\ \varepsilon' \leq My, \\ \varepsilon' \geq M(y - 1) + \beta', \\ \varepsilon' \leq \beta', \\ \varepsilon' \geq 0, \\ Ty \leq 1, \\ 0 \leq \alpha', \beta' \leq 1, \\ 0.5 < \alpha_s, \beta_s \leq 1, \\ y \in \{0,1\}, x, \varepsilon, \varepsilon' \geq 0, \theta_s \geq 0 \end{aligned}$$

در مدل MRSPFP ارائه‌شده، در تابع هدف عبارت اول مقدار میانگین تابع هدف و عبارت دوم انحراف مطلق امکانی تابع هدف را حداقل می‌کند. عبارت سوم انحراف سناریویی را حداقل می‌کند. عبارت چهارم و پنجم تحقق استواری شدنی را تضمین می‌کنند.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

کاربرد و ارزیابی مدل پیشنهادی. برای بررسی کاربرد مدل ارائه‌شده، مطالعه‌ای موردی به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین تولید کاغذسنگی انجام می‌گیرد. مراکز تولیدی در شهرهای یزد و کرمان واقع شده‌اند و سه نوع محصول کاغذسنگی شامل بسته‌بندی‌های مواد غذایی، کاغذ مناسب برای چاپ و مقوا تولید می‌کنند. محصولات تولیدشده به مراکز توزیع ارسال می‌شود. مراکز توزیع شامل ۸ مرکز است و در شهرهای کاشان، یاسوج، بوشهر، بیرجند، اردبیل، سمنان، اراک و ارومیه برای پوشش‌دادن مراکز مشتری واقع شده‌اند. مراکز مشتریان نهایی در ۱۱ شهر ایران شامل شهرهای تهران، مشهد، اصفهان، شیراز، تبریز، رشت، اهواز، ساری، قم، کرمانشاه و بندرعباس قرار دارند که محصولات به‌صورت عمده و هم برای مشتریان نهایی به‌صورت جزئی عرضه می‌شود. محصولات برگشتی از مراکز مشتریان به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شوند. مراکز جمع‌آوری محصولات در ۵ مرکز در شهرهای کاشان، یاسوج، بوشهر، بیرجند و اردبیل برای جمع‌آوری و تفکیک محصولات قابل بازیابی و بازیافت قرار دارند. محصولاتی که قابل بازیابی باشند از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیابی ارسال می‌شوند. مراکز بازیابی شامل ۲ مرکز در شهرهای یزد و کرمان هستند. محصولات بازیابی‌شده به مراکز توزیع ارسال می‌شوند تا مجدد به مراکز مشتری فرستاده شوند. محصولاتی که امکان بازیابی برای آن‌ها میسر نباشد، به مراکز بازیافت که شامل دو مرکز در شهرهای یزد و کرمان است، فرستاده می‌شود. مراکز مشتریان مواد در ۲ شهر شهرکرد و ایلام قرار دارند و مواد بازیافتی را خریداری می‌کنند. با توجه به افق برنامه‌ریزی زنجیره تأمین و تغییرات تقاضا در ایام مختلف، دو دوره شش‌ماهه برای ارزیابی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین مدل چندمحصولی و چنددوره‌ای در زنجیره تأمین حلقه‌بسته توسعه ارائه می‌شود. از طرفی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تصادفی و برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریوی فازی در این پژوهش چهار سناریوی مختلف بد، نرمال، خوب و عالی با توزیع احتمال $0/2$ ، $0/25$ ، $0/25$ و $0/3$ در نظر گرفته می‌شود. برای هر پارامتر غیرقطعی از نوع تصادفی، اعداد فازی ذوزنقه‌ای برای هر سناریو تعریف می‌شود که دارای توزیع یکنواخت هستند. مقادیر داده‌های سناریوی فازی برای پارامترهای مسئله پژوهش در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر داده‌های سناریوی فازی برای پارامترهای مسئله پژوهش با توزیع یکنواخت

پارامتر	واحد	سناریو فازی		
		عالی	خوب	نرمال
		۰/۳	۰/۲۵	۰/۲
\tilde{d}_{pkts} $P = 1$	تن	(۲۴۰-۳۴۰)	(۲۱۰-۳۱۰)	(۱۸۰-۲۸۰)
\tilde{d}_{pkts} $P = 2$	تن	(۳۲۰-۴۷۰)	(۲۸۰-۴۳۰)	(۲۴۰-۳۹۰)

سناریو فازی				واحد	پارامتر
بد	نرمال	خوب	عالی		
۰/۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳		
(۲۵۰-۴۰۰)	(۲۸۰-۴۳۰)	(۳۱۰-۴۶۰)	(۳۴۰-۴۹۰)	تن	$\tilde{d}_{pkts} P = 3$
(۱۰۰۰-۵۵۰۰)	(۱۱۰۰-۶۰۵۰)	(۱۲۱۰-۶۶۵۵)	(۱۳۳۱-۷۳۲۱)	ریال ۱۰۰۰ ×	\tilde{c}_{0pjets}
(۱۲۰۰-۷۲۰۰)	(۱۳۲۰-۷۹۲۰)	(۱۴۵۲-۸۷۱۲)	(۱۵۹۷-۹۵۸۳)	ریال ۱۰۰۰ ×	\tilde{c}_{upjkts}
(۱۲۰۰-۷۲۰۰)	(۱۳۲۰-۷۹۲۰)	(۱۴۵۲-۸۷۱۲)	(۱۵۹۷-۹۵۸۳)	ریال ۱۰۰۰ ×	\tilde{c}_{qpkts}
(۱۰۰۰-۵۵۰۰)	(۱۱۰۰-۶۰۵۰)	(۱۲۱۰-۶۶۵۵)	(۱۳۳۱-۷۳۲۱)	ریال ۱۰۰۰ ×	\tilde{c}_{pplmts}
(۱۰۰۰-۵۵۰۰)	(۱۱۰۰-۶۰۵۰)	(۱۲۱۰-۶۶۵۵)	(۱۳۳۱-۷۳۲۱)	ریال ۱۰۰۰ ×	\tilde{c}_{splmts}
(۱۰۰۰-۵۵۰۰)	(۱۱۰۰-۶۰۵۰)	(۱۲۱۰-۶۶۵۵)	(۱۳۳۱-۷۳۲۱)	ریال ۱۰۰۰ ×	\tilde{c}_{hpmjts}
(۱۰۰۰-۶۰۰۰)	(۱۱۰۰-۶۶۰۰)	(۱۲۱۰-۷۲۶۰)	(۱۳۳۱-۷۹۸۶)	ریال ۱۰۰۰ ×	\tilde{c}_{vrnets}
(۲۰۰۰-۶۰۰۰)	(۲۲۰۰-۶۶۰۰)	(۲۴۲۰-۷۲۶۰)	(۲۶۶۲-۷۹۸۶)	ریال ۱۰۰۰ ×	\tilde{p}_{pits}
(۱۵۰۰-۲۵۰۰)	(۱۷۰۰-۲۷۰۰)	(۱۹۰۰-۲۹۰۰)	(۲۱۰۰-۳۱۰۰)	ریال ۱۰۰۰ ×	$\tilde{\pi}_{pjts}$
(۱۵۰۰-۲۵۰۰)	(۱۷۰۰-۲۷۰۰)	(۱۹۰۰-۲۹۰۰)	(۲۱۰۰-۳۱۰۰)	ریال ۱۰۰۰ ×	$\tilde{\delta}_{plts}$
(۲۰۰۰-۴۰۰۰)	(۲۴۰۰-۴۴۰۰)	(۲۸۰۰-۴۸۰۰)	(۳۲۰۰-۵۲۰۰)	ریال ۱۰۰۰ ×	$\tilde{\tau}_{pmts}$
(۲۰۰۰-۴۰۰۰)	(۲۴۰۰-۴۴۰۰)	(۲۸۰۰-۴۸۰۰)	(۳۲۰۰-۵۲۰۰)	ریال ۱۰۰۰ ×	$\tilde{\theta}_{rnts}$

مقادیر داده‌های فازی پارامترهای مسئله تحقیق در جدول ۳، ارائه شده است که دارای توزیع یکنواخت هستند.

جدول ۳. مقادیر داده‌های فازی برای پارامترهای مسئله پژوهش با توزیع یکنواخت

پارامتر	واحد	محدوده توزیع یکنواخت پارامترها	پارامتر	واحد	محدوده توزیع یکنواخت پارامترها
\tilde{d}_{rets}	تن	(۱۰۰-۲۰۰)	$\tilde{p}p_i$	تن	(۱۸۰۰۰-۲۶۰۰۰)
\tilde{m}_i	ریال ۱۰۰۰ ×	(۱۸۰۰۰۰۰۰-۲۴۰۰۰۰۰۰)	$\tilde{p}x_j$	تن	(۱۲۰۰۰-۱۸۰۰۰)
\tilde{f}_j	ریال ۱۰۰۰ ×	(۹۰۰۰۰۰۰-۱۲۰۰۰۰۰۰)	$\tilde{p}y_l$	تن	(۱۱۰۰۰-۱۷۰۰۰)
\tilde{g}_l	ریال ۱۰۰۰ ×	(۸۰۰۰۰۰۰-۱۱۰۰۰۰۰۰)	$\tilde{p}z_m$	تن	(۱۲۰۰۰-۱۸۰۰۰)
\tilde{b}_m	ریال ۱۰۰۰ ×	(۱۰۰۰۰۰۰۰-۱۴۰۰۰۰۰۰)	$\tilde{p}w_n$	تن	(۱۰۰۰۰-۱۸۰۰۰)
\tilde{a}_n	ریال ۱۰۰۰ ×	(۱۱۰۰۰۰۰۰-۱۷۰۰۰۰۰۰)	$\tilde{\omega}_{pt}$	درصد	(۱۵-۲۵)
\tilde{w}_{pk}	درصد	(۲۵-۳۵)			

مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS 24.8 با حل‌کننده CPLEX حل شد. در ادامه تحلیل استواری، تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج مدل پیشنهادی بررسی می‌شود.

تحلیل استواری. در این بخش به تحلیل استواری ضرایب انحرافات مکانی، سناریویی، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت و انحراف محدودیت‌های نرم با تغییر در متغیرهای γ ، Φ ، δ_1 ، δ_2 و φ پرداخته می‌شود.

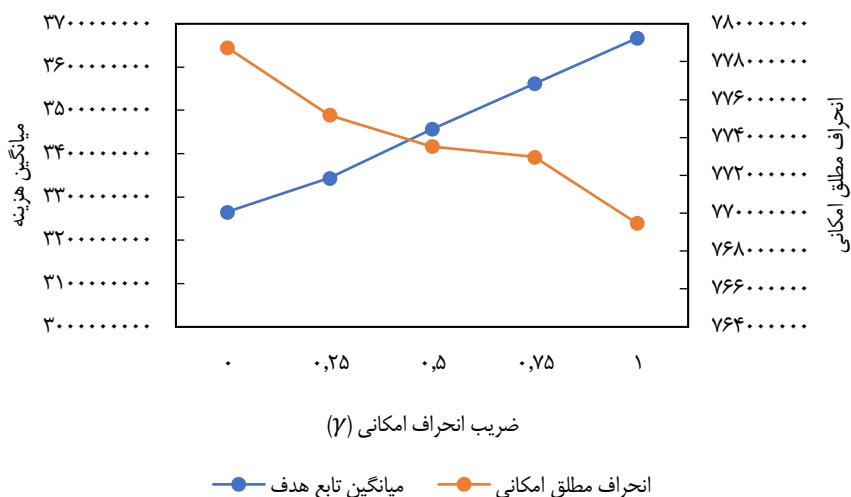
تحلیل استواری انحراف مکانی. به‌منظور ارزیابی تحلیل استواری مدل پیشنهادی در این بخش تحلیل استواری بر روی ضریب انحراف مکانی انجام شد. نتایج عددی تحلیل استواری انحراف مکانی در جدول ۴، ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج عددی تحلیل استواری انحراف مکانی

انحراف مطلق مکانی	میانگین تابع هدف	ضریب انحراف مکانی
۷۷۸۷۴۹۰۰۰	۳۲۶۵۵۶۸۰۰۰	۰
۷۷۵۱۸۸۳۰۰	۳۳۴۳۹۶۷۰۰۰	-۰/۲۵
۷۷۳۵۳۱۹۰۰	۳۴۵۶۵۸۶۰۰۰	-۰/۵
۷۷۲۹۶۲۴۰۰	۳۵۶۱۴۴۷۰۰۰	-۰/۷۵
۷۶۹۴۶۷۰۰۰	۳۶۶۶۷۴۶۰۰۰	۱

اثر تغییر ضریب انحراف مکانی بر میانگین توابع هدف و میزان انحراف مطلق مکانی نیز در شکل ۱، ارائه شده است.

با توجه به تحلیل استواری انجام شده، بیشترین انحراف مطلق مکانی مربوط به حالتی است که ضریب امکان انحرافی صفر باشد و در این حالت میانگین تابع هدف دارای کمترین مقدار است؛ بنابراین با افزایش ضریب γ ، میزان انحراف مطلق مکانی کاهش و میانگین تابع هدف به دلیل استواری بهینگی افزایش می‌یابد.



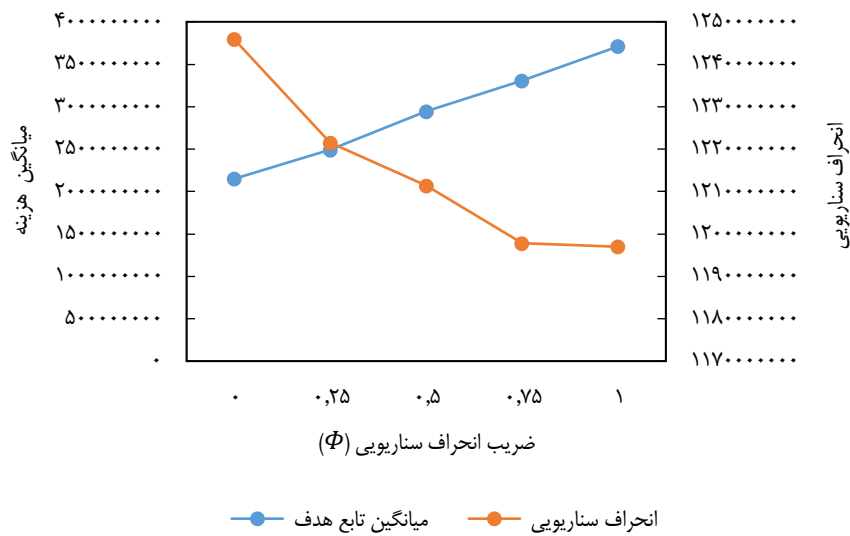
شکل ۱. تحلیل استواری بر روی ضرایب انحراف امکانی و تأثیر آن بر میانگین تابع هدف و انحراف مطلق امکانی

تحلیل استواری انحراف سناریویی. در این بخش به تحلیل اثرات تغییر در ضریب انحراف سناریویی در میانگین تابع هدف پرداخته می‌شود. نتایج عددی تحلیل استواری انحراف سناریویی در جدول ۵، ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج عددی تحلیل استواری انحراف سناریویی

ضریب انحراف سناریویی	میانگین تابع هدف	انحراف سناریویی
۰	۲۱۵۰۳۶۵۰۰۰	۱۲۴۵۸۱۳۰۰۰
۰/۲۵	۲۴۹۲۳۸۹۰۰۰	۱۲۲۱۴۸۶۰۰۰
۰/۵	۲۹۴۳۹۶۱۰۰۰	۱۲۱۱۳۸۶۰۰۰
۰/۷۵	۳۳۰۷۳۵۴۰۰۰	۱۱۹۷۷۴۱۰۰۰
۱	۳۷۰۸۷۹۲۰۰۰	۱۱۹۶۹۷۴۰۰۰

اثر تغییر ضریب انحراف سناریویی بر میانگین توابع هدف و میزان انحراف سناریویی در شکل ۲، نشان داده شده است.



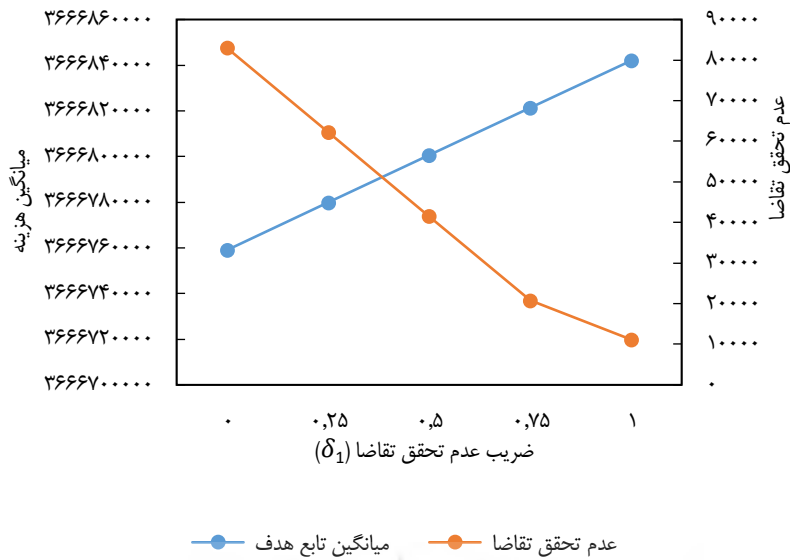
شکل ۲. تحلیل استواری بر روی ضریب اهمیت انحراف سناریویی و تأثیر آن بر میانگین تابع هدف و انحراف سناریویی

بیشترین انحراف سناریویی مربوط به حالتی است که ضریب انحراف سناریویی صفر باشد که در این حالت میانگین تابع هدف دارای کمترین مقدار است. با افزایش ضریب انحراف سناریویی، میزان انحراف سناریویی کاهش و میانگین تابع هدف، به دلیل استواری بهینگی، افزایش می‌یابد. **تحلیل استواری عدم تحقق تقاضا و ظرفیت.** در این قسمت اثرات تغییر در ضرایب δ_1 و δ_2 در میانگین تابع هدف تحلیل می‌شود که نتایج عددی این تحلیل در جدول ۶ ارائه شده است.

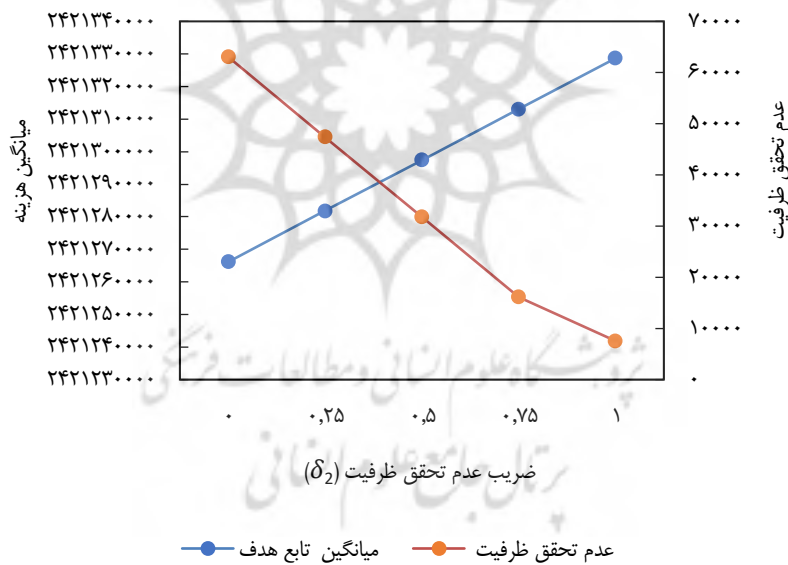
جدول ۶. نتایج عددی تحلیل استواری عدم تحقق تقاضا و ظرفیت

ضریب عدم تحقق تقاضا	میانگین تابع هدف	عدم تحقق تقاضا
0	۳۶۶۶۷۵۹۰۴۹	۸۲۹۵۱
0/۲۵	۳۶۶۶۷۷۹۷۸۴	۶۲۲۱۷
0/۵	۳۶۶۶۸۰۰۵۱۸	۴۱۴۸۳
0/۷۵	۳۶۶۶۸۲۱۲۵۲	۲۰۷۴۹
۱	۳۶۶۶۸۴۱۹۸۶	۱۱۱۵۴
ضریب عدم تحقق ظرفیت	میانگین تابع هدف	عدم تحقق ظرفیت
0	۲۴۲۱۲۶۶۱۳۴	۶۳۰۴۶
0/۲۵	۲۴۲۱۲۸۱۷۶۲	۴۷۴۱۸
0/۵	۲۴۲۱۲۹۷۳۹۱	۳۱۷۸۹
0/۷۵	۲۴۲۱۳۱۳۰۱۹	۱۶۱۶۱
۱	۲۴۲۱۳۲۸۶۴۸	۷۵۶۳

نتایج تحلیل استواری عدم‌تحقق تقاضا و ظرفیت در شکل‌های ۳ و ۴، ارائه شده است.



شکل ۳. تحلیل استواری بر روی ضریب عدم‌تحقق تقاضا و تأثیر آن بر میانگین تابع هدف و میزان عدم‌تحقق تقاضا



شکل ۴. تحلیل استواری بر روی ضریب عدم‌تحقق ظرفیت و تأثیر آن بر میانگین تابع هدف و میزان عدم‌تحقق ظرفیت

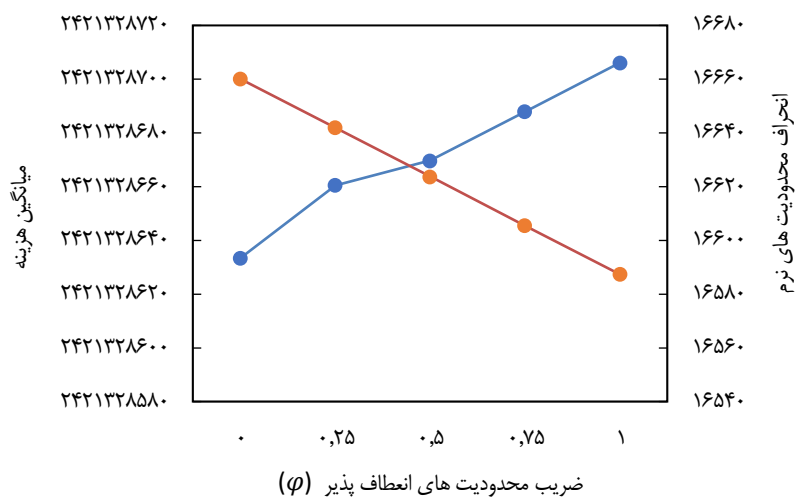
در حالتی که ضرایب جریمه δ_1 و δ_2 برابر با صفر است، ریسک تصمیم‌گیری در بالاترین حد قرار دارد و عدم تحقق تقاضا و ظرفیت در بالاترین مقدار است. با تغییر ضریب جریمه عدم تحقق تقاضا و ظرفیت می‌توان با توجه به ریسک تصمیم‌گیرندگان، توازن بین استواری شدنی و میانگین هزینه ایجاد کرد.

تحلیل استواری محدودیت‌های انعطاف‌پذیر. در این بخش به تحلیل استواری ضرایب انحراف محدودیت‌های انعطاف‌پذیر با تغییر در پارامترهای φ و Δ پرداخته می‌شود که نتایج عددی تحلیل استواری محدودیت‌های انعطاف‌پذیر در جدول ۷، ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج عددی تحلیل استواری محدودیت‌های انعطاف‌پذیر

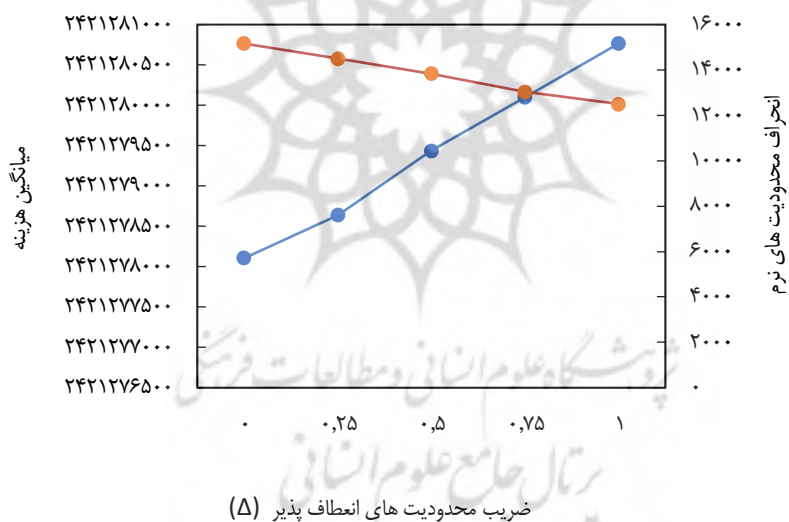
انحراف محدودیت‌های انعطاف‌پذیر	میانگین تابع هدف	ضریب محدودیت‌های انعطاف‌پذیر (φ)
۱۶۶۶۰	۲۴۲۱۳۲۸۶۳۳	۰
۱۶۶۴۲	۲۴۲۱۳۲۸۶۶۱	۰/۲۵
۱۶۶۲۴	۲۴۲۱۳۲۸۶۷۰	۰/۵
۱۶۶۰۶	۲۴۲۱۳۲۸۶۸۸	۰/۷۵
۱۶۵۸۷	۲۴۲۱۳۲۸۷۰۶	۱
انحراف محدودیت‌های انعطاف‌پذیر	میانگین تابع هدف	ضریب محدودیت‌های انعطاف‌پذیر (Δ)
۱۵۱۶۳	۲۴۲۱۳۲۷۸۱۰۵	۰
۱۴۴۹۸	۲۴۲۱۳۲۷۸۶۳۷	۰/۲۵
۱۳۸۳۳	۲۴۲۱۳۲۷۹۴۳۵	۰/۵
۱۳۰۳۵	۲۴۲۱۳۲۸۰۱۰۰	۰/۷۵
۱۲۵۰۳	۲۴۲۱۳۲۸۰۷۶۵	۱

تأثیر تغییرات اعمال شده در ضرایب φ و Δ در میانگین تابع هدف و میزان انحراف امکانی محدودیت‌های انعطاف‌پذیر به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶، ارائه شده است.



انحراف محدودیت های انعطاف پذیر — میانگین تابع هدف

شکل ۵. تحلیل استواری بر روی ضریب φ و تأثیر آن بر میانگین تابع هدف و میزان انحراف امکانی محدودیت های نرم



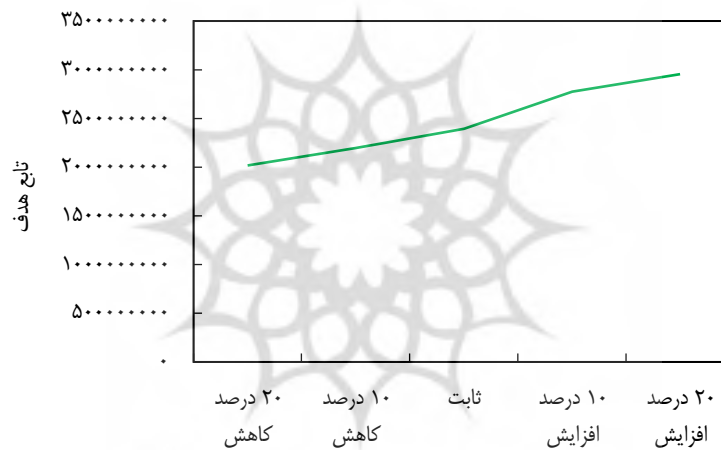
انحراف محدودیت های انعطاف پذیر — میانگین تابع هدف

شکل ۶. تحلیل استواری بر روی ضریب Δ و تأثیر آن بر میانگین تابع هدف و میزان انحراف امکانی محدودیت های نرم

با افزایش ضرایب φ و Δ ، استواری شدنی مدل افزایش و میزان انحراف محدودیت‌های نرم کاهش می‌یابد؛ بنابراین با تغییر ضریب جریمه انحراف محدودیت‌های انعطاف‌پذیر می‌توان با توجه به ریسک تصمیم‌گیرندگان، توازن بین استواری شدنی و میانگین هزینه ایجاد کرد.

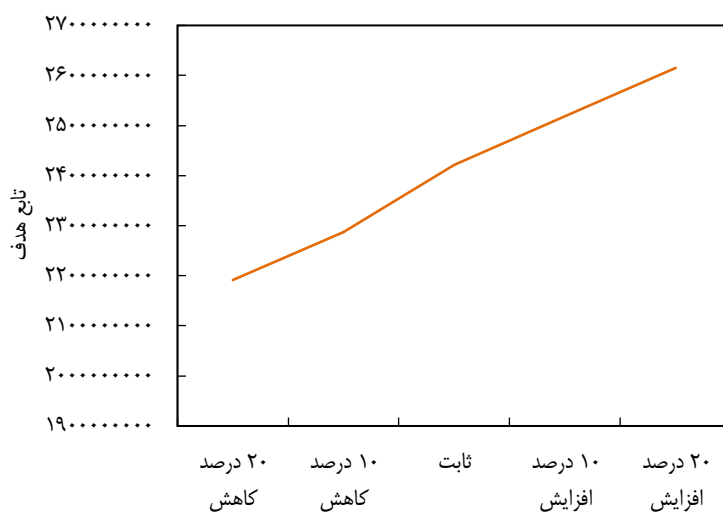
تحلیل حساسیت. در این بخش به تحلیل حساسیت تقاضای محصولات، هزینه ثابت بهره‌برداری تسهیلات پرداخته می‌شود و اثر تغییر پارامترها در نتایج مدل تحلیل می‌شود.

تحلیل حساسیت تقاضای محصولات. بدیهی است که برای سطوح پایین تقاضا، تسهیلات کمتری در مدل فعال شده و زمانی که تقاضا افزایش می‌یابد نیاز به گشایش مراکز بیشتری است. افزایش تقاضا به بهره‌برداری تسهیلات بیشتر و در نتیجه باعث افزایش هزینه ثابت و هزینه‌های پردازش منجر می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت تقاضا در شکل ۷، آمده است.



شکل ۷. تحلیل حساسیت تقاضای محصولات بر مقادیر تابع هدف

تحلیل حساسیت هزینه‌های بهره‌برداری تسهیلات. افزایش یا کاهش هزینه‌های بهره‌برداری تسهیلات در زنجیره تأمین بر تعداد تسهیلات مورد استفاده و در نتیجه هزینه‌های زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارد. در این قسمت هزینه‌های بهره‌برداری تسهیلات در محدوده ۲۰ درصد کاهش تا ۲۰ درصد افزایش بررسی می‌شود و تأثیر آن بر تابع هدف، مورد تحلیل قرار می‌گیرد. این تحلیل برای مدل توسعه‌یافته در شکل ۸، ارائه شده است.



هزینه ثابت بهره برداری تسهیلات

شکل ۱. تحلیل حساسیت هزینه بهره برداری تسهیلات بر مقادیر تابع هدف

هزینه بهره برداری تسهیلات ارتباط مستقیمی با مقدار تابع هدف دارد؛ به طوری که با افزایش هزینه بهره برداری تسهیلات، مقدار تابع هدف افزایش می یابد.

شبیه سازی نتایج و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی. در این بخش عملکرد مدل توسعه یافته پیشنهاد شده (MRSPFP) با مدل برنامه ریزی امکانی استوار پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)، (مدل RPP-I) مقایسه می شود [۳۵]. این مدل بر اساس «نظریه الزام» به مدل سازی تحت عدم قطعیت شناختی می پردازد و از برنامه ریزی امکانی استوار برای مدل سازی استفاده شده است. مدل RPP-I در رابطه ۴۵، ارائه شده است:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } E[z] + \gamma(z_{\max} - z_{\min}) + \delta[d_4 - (1 - \alpha)d_3 - \alpha d_4] \\
 & \quad + \pi[\varepsilon N_1 + (y - \varepsilon)N_2 - N_1 y] \\
 & s.t \\
 & Ax \geq (1 - \alpha)d_3 + \alpha d_4 \\
 & Bx = 0 \\
 & Sx \leq \varepsilon N_1 + (y - \varepsilon)N_2 \\
 & \varepsilon \leq My \\
 & \varepsilon \geq M(y - 1) + \beta \\
 & \varepsilon \leq \beta \\
 & Tx \leq 1 \\
 & y \in \{0,1\}, \quad x, \varepsilon \geq 0, \quad 0.5 < \alpha, \beta \leq 1
 \end{aligned} \tag{45}$$

در مدل RPP-I، عبارت اول مقدار میانگین تابع هدف و عبارت دوم اختلاف میان حد بالا و پایین تابع هدف را حداقل می‌کند. عبارت سوم و چهارم نیز استواری شدنی مسئله را محقق می‌کنند. ضرایب δ و π به ترتیب جریمه‌های تخطی از مقادیر سمت راست محدودیت‌های شانس مسئله را نشان می‌دهند. برای مقایسه و ارزیابی مدل‌ها، به شبیه‌سازی نتایج از طریق تولید داده‌های اسمی پرداخته می‌شود. به این ترتیب داده‌های تصادفی با توزیع احتمال یکنواخت و به ازای هر پارامتر غیرقطعی در مدل تولید می‌شود. با فرض اینکه عدد فازی ذوزنقه‌ای به صورت $\tilde{D} = (D_1, D_2, D_3, D_4)$ ، یک پارامتر غیرقطعی باشد، به ازای هر مرتبه اجرای مدل، یک عدد به صورت تصادفی در بازه (D_1, D_4) تولید می‌شود. در این مرحله، جواب‌های به دست آمده از مدل MRSFPF و مدل RPP-I تحت داده‌های اسمی (x^*, y^*) در مدل تحقق^۱ جایگزین می‌شود که فرم فشرده آن به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \min Z &= f^{\text{real}} \cdot Y^* + c_s^{\text{real}} \cdot x_s^* + \psi_1 S_1 + \psi_2 S_2 \\ \text{s. t.} \\ S \cdot X_s^* &\leq N^{\text{real}} \cdot Y^* + S_1 \\ A \cdot X_s^* + S_2 &\geq d^{\text{real}} \\ B \cdot X_s^* &= 0 \\ S_1, S_2 &\geq 0 \end{aligned} \quad (46)$$

دو متغیر S_1 و S_2 ، میزان تخطی از محدودیت‌های شانس تقاضای مشتریان و محدودیت شانس ظرفیت را نشان می‌دهند. ضرایب ψ_1 و ψ_2 جریمه نقض محدودیت‌های شانس^۲ مدل تحقق است. میانگین و انحراف معیار تابع هدف مدل تحقق برای مدل MRSFPF و مدل RPP-I، محاسبه و با داده‌های اسمی و سطوح مختلف جریمه با یکدیگر مقایسه می‌شوند که نتایج در جدول ۸، ارائه شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Realization model
2. The penalty costs of chance constraint violations

جدول ۸. نتایج ارزیابی مدل تحقق

ضرایب Ψ_1 و ψ_1	۱۰		۳۰		۵۰		۷۰		۹۰	
	MRSPFP	RPP-I	MRSPFP	RPP-I	MRSPFP	RPP-I	MRSPFP	RPP-I	MRSPFP	RPP-I
شماره										
۱	۳۳۰۱	۱۰۸۸ ۲	۹۳۶ ۰	۱۷۱۲ ۳	۱۵۹۹ ۲	۲۵۵۹ ۳	۲۳۳۹ ۰	۴۶۸۶ ۹	۳۵۱۷ ۵	۶۰۲۷ ۲
۲	۳۳۹۷	۱۰۸۱ ۶	۹۵۰ ۰	۱۷۸۵ ۷	۱۶۰۸ ۳	۲۳۸۲ ۰	۲۳۷۸ ۹	۴۶۶۴ ۳	۳۶۴۹ ۸	۶۰۶۰ ۱
۳	۳۵۳۵	۱۰۷۹ ۵	۹۴۱ ۵	۱۷۰۶ ۸	۱۵۸۴ ۹	۲۳۷۱ ۷	۲۴۶۰ ۴	۴۵۰۸ ۱	۳۴۷۸ ۳	۶۱۱۴ ۲
۴	۳۳۳۴	۱۰۱۲ ۱	۹۵۱ ۸	۱۷۹۴ ۹	۱۶۳۷ ۰	۲۳۴۲ ۹	۲۳۹۴ ۱	۴۵۱۴ ۵	۳۴۷۶ ۷	۶۲۹۱ ۲
۵	۳۳۴۹	۱۰۴۲ ۵	۹۵۱ ۰	۱۸۰۰ ۳	۱۶۶۷ ۴	۲۳۵۸ ۱	۲۳۶۷ ۴	۴۴۷۶ ۲	۳۴۸۰ ۱	۵۸۹۵ ۰
۶	۳۳۸۷	۱۰۷۶ ۷	۹۴۵ ۲	۱۷۹۵ ۵	۱۶۳۴ ۲	۲۳۸۷ ۸	۲۴۰۲ ۱	۴۵۰۷ ۶	۳۶۳۵ ۹	۶۱۸۹ ۱
۷	۳۳۰۹	۱۰۹۹ ۱	۹۵۲ ۲	۱۷۸۹ ۱	۱۵۸۳ ۱	۲۳۶۴ ۰	۲۳۹۲ ۵	۴۴۵۱ ۸	۳۵۵۱ ۰	۶۰۴۸ ۷
۸	۳۳۹۶	۱۰۶۰ ۶	۹۴۰ ۷	۱۷۹۶ ۰	۱۶۰۱ ۹	۲۳۳۹ ۸	۲۳۲۵ ۸	۴۴۳۸ ۴	۳۴۳۷ ۵	۶۲۶۸ ۵
۹	۳۳۴۸	۱۰۱۱ ۵	۹۰۰ ۲	۱۷۶۰ ۴	۱۵۹۰ ۵	۲۳۷۶ ۰	۲۳۵۹ ۵	۴۴۳۷ ۸	۳۵۶۳ ۶	۶۲۶۱ ۲
۱۰	۳۳۱۲	۱۰۱۸ ۱	۹۲۵ ۱	۱۷۵۰ ۱	۱۶۵۵ ۳	۲۳۶۴ ۹	۲۳۳۰ ۰	۴۴۲۳ ۶	۳۵۰۱ ۲	۶۰۰۴ ۵
میانگی	۳۳۴۷	۱۰۵۷	۹۳۹	۱۷۶۹	۱۶۱۶	۲۳۸۴	۲۳۷۵	۴۵۰۹	۳۵۲۹	۶۱۱۶
ن		۰	۴	۱	۲	۷	۰	۹	۲	۰
انحراف معیار	۸۶	۳۱۷	۱۵۴	۳۳۶	۲۸۶	۶۰۰	۳۸۴	۸۸۹	۶۶۸	۱۲۵۴

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل MRSPFP در مقایسه با مدل RPP-I دارای میانگین و انحراف معیار کمتری در سطوح مختلف ضرایب Ψ_1 و ψ_1 در ۱۰ مرتبه تولید تصادفی داده‌ها بود.

بحث. در مدل RPP-I از «نظریه الزام» برای مدل‌سازی عدم قطعیت استفاده شده است؛ در حالی که در مدل MRSPFP از «نظریه اعتبار» برای رفع کمبودهای «نظریه الزام» که تنها حالت بدبینانه

را در نظر می‌گرفت، استفاده شده است. در مدل برنامه‌ریزی RPP-I برای اندازه‌گیری انحراف امکانی، اختلاف حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف را کنترل می‌کند؛ اما در مدل MRSPFP از انحراف مطلق امکانی برای کنترل انحراف امکانی استفاده می‌شود. اندازه‌گیری انحراف مطلق امکانی تابع هدف به کنترل بیشتر انحرافات تابع هدف و استواری بهینگی منجر می‌شود [۱۴]. در مدل برنامه‌ریزی RPP-I، عدم قطعیت شناختی بررسی شده است؛ این در حالی است که در بسیاری از مسائل دنیای واقعی عدم قطعیت ترکیبی شامل عدم قطعیت شناختی و تصادفی باید در مدل‌سازی اعمال شود. در مدل MRSPFP از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار استفاده می‌شود که به‌طور هم‌زمان عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی و انعطاف‌پذیری محدودیت‌ها و بهینه‌سازی استوار در مدل‌سازی لحاظ شده است و انحراف امکانی تابع هدف (از طریق اندازه‌گیری انحراف مطلق امکانی)، انحراف تصادفی تابع هدف، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت و انحراف محدودیت‌های نرم به‌عنوان پارامترهای استواری در مدل کنترل می‌شود که نتایج از استواری بالاتری نسبت به در مدل RPP-I برخوردار است؛ همچنین نتایج تحلیل استواری نشان داد در حالتی که ضریب انحراف استواری صفر باشد، میانگین تابع هدف دارای کمترین مقدار بوده و ریسک تصمیم‌گیری در بالاترین مقدار است و با افزایش ضریب انحراف استواری، مقدار انحراف کاهش یافته و میانگین تابع هدف افزایش می‌یابد؛ همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش تقاضا و هزینه‌های بهره‌برداری تسهیلات به افزایش هزینه کل تابع هدف منجر می‌شود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مدل MRSPFP در مقایسه با مدل RPP-I دارای میانگین و انحراف معیار کمتری بود.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مدل جدیدی از برنامه‌ریزی محدودیت‌شانس انعطاف‌پذیر، امکانی و تصادفی استوار مختلط بر مبنای نظریه اعتبار برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ارائه شد. حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر با حل مدل بهینه شد و به بررسی‌های تکراری برای یافتن مقدار مناسب سطح رضایت محدودیت‌ها توسط تصمیم‌گیرندگان نیاز نیست. یکی دیگر از مزایای مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های پیشین، توانایی آن در کنترل انحرافات امکانی، انحرافات تصادفی، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت و نقض محدودیت‌های نرم در مدل است که نتایج مدل را قابل اعتمادتر و استوار می‌کند؛ همچنین تاکنون معیار اعتبار در برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی استوار توسعه داده نشده است که این مورد از دیگر نوآوری‌های مدل پیشنهادی است. در پژوهش حاضر به حداقل‌سازی هزینه در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کاغذسنگی پرداخته شد که تاکنون پژوهشی با هدف طراحی شبکه زنجیره تأمین کاغذسنگی انجام نشده است.

با استفاده از مدل پیشنهادی نه‌تنها می‌توان با عدم قطعیت ترکیبی پارامترها (پارامترهای مبتنی بر سناریو و فازی) مواجه شد، بلکه به خاصیت خود دوگانگی نظریه امکان و الزام، در قالب «نظریه

اعتبار» نیز توجه شده و مدل‌سازی مسئله از انعطاف بالایی برخوردار است. این مدل می‌تواند راه‌حل‌های انعطاف‌پذیرتری را بر اساس شرایط مختلف و مطابق با ترجیحات تصمیم‌گیرندگان ارائه دهد. در تصمیم‌گیری‌های بلندمدت به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین کاغذسنگی که به هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالایی نیاز است، استفاده از راه‌حل‌های با واریانس کم، به استواری بیشتر نتایج منجر می‌شود و در مدل پیشنهادی از انحراف مطلق امکانی برای کنترل انحراف تابع هدف استفاده شده است؛ همچنین با توجه به نتایج تحلیل استواری می‌توان با تغییر ضرایب استواری در تابع هدف بر اساس نظرهای تصمیم‌گیرندگان، بین ریسک تصمیم‌گیری و میزان هزینه در شبکه زنجیره تأمین، توازن و بده‌بستان ایجاد کرد. طراحی و توسعه زنجیره تأمین کاغذسنگی برای کشور ایران که دارای ذخایر مناسب سنگ‌آهک است و در تولید آن به مصرف آب و قطع درختان نیازی ندارد، ضروری است؛ چراکه ضمن توسعه صنعتی، اشتغال و رفع نیازهای داخل کشور، به افزایش صادرات و رشد اقتصادی کشور منجر می‌شود.

در پژوهش حاضر، رویکردی واقع‌بینانه برای حل مسائل خطی مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین ارائه شده است؛ اما در برخی از مسائل امکان خطی‌سازی مدل فراهم نیست؛ از این‌رو نیاز است تا در پژوهش‌های آینده به این مسئله توجه شود و راه‌حل‌های فراابتکاری به‌منظور حل مدل‌های غیرخطی در ابعاد بزرگ ارائه شود. در این پژوهش تنها بعد اقتصادی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است که می‌توان سایر ابعاد پایداری همچون جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی را در مدل‌سازی پژوهش‌های آتی لحاظ کرد؛ همچنین در پژوهش‌های آینده می‌توان سیاست‌های مالیات بر میزان کربن انتشار یافته و میزان اشتغال در اثر بهره‌برداری تسهیلات در هر منطقه را در مدل‌سازی لحاظ کرد.

منابع

1. Amiri, M., Hosseini Dehshiri, S. J., & Yousefi Hanoomarvar, A. (2018). Determining the Optimal Combination of Large Supply Chain Strategies Using SWOT Analysis, Multi-criteria Decision-making Techniques and Game Theory. *Industrial Management Journal*, 10(2), 221-246. (In Persian)
2. Atabaki, M. S., Mohammadi, M., & Naderi, B. (2020). New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy. *Computers & Industrial Engineering*, 146, 106520.
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. Boronoos, M., Mousazadeh, M., & Torabi, S. A. (2020). A robust mixed flexible-possibilistic programming approach for multi-objective closed-loop green supply chain network design. *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), 3368-3395. doi:10.1007/s10668-020-00723-z
5. Carlsson, C., & Fullér, R. (2001). On possibilistic mean value and variance of fuzzy numbers. *Fuzzy sets and systems*, 122(2), 315-326.
6. Dahooie, J. H., Dehshiri, S. J. H., Banaitis, A., & Binkytė-Vėlienė, A. (2020). Identifying and prioritizing cost reduction solutions in the supply chain by integrating value engineering and gray multi-criteria decision-making. *Technological and Economic Development of Economy*, 26(6), 1311-1338.
7. Dehghan, E., Nikabadi, M. S., Amiri, M., & Jabbarzadeh, A. (2018). Hybrid robust, stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 123, 220-231.
8. Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G., & Ahmadi, E. (2018). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 341, 69-91.
9. Fazli-Khalaf, M., Khalilpourazari, S., & Mohammadi, M. (2019). Mixed robust possibilistic flexible chance constraint optimization model for emergency blood supply chain network design. *Annals of operations research*, 283(1), 1079-1109.
10. Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., & Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert systems with applications*, 116, 454-471.
11. Gilani, H., & Sahebi, H. (2021). Optimal Design and Operation of the green pistachio supply network: A robust possibilistic programming model. *Journal of Cleaner Production*, 282, 125212.
12. Govindan, K., & Soleimani, H. (2017). A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus. *Journal of Cleaner Production*, 142, 371-384.
13. Guide Jr, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations research*, 57(1), 10-18.
14. Günay, E. E., Kremer, G. E. O., & Zarindast, A. (2020). A multi-objective robust possibilistic programming approach to sustainable public transportation network design. *Fuzzy sets and systems*.

15. Hatefi, S. M., & Jolai, F. (2014). Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9-10), 2630-2647.
16. Heidary Dahooie, J., Hosseini Dehshiri, S. (2019). Identify and prioritize Strategies to Reduce Plant Power Equipments Supply Chain Costs Through Value Engineering. *Industrial Management Studies*, 17(52), 125-152. (In Persian)
17. Hosseini Dehshiri, S., Heydari Dehooei, Zohrabi, J. (2019). Using Gray Numbers Theory in Multi-Attribute Decision Making Methods for the Evaluation the Risk of Outsourcing of Information Technology Projects. *IT Management Studies*, 7(28), 167-198. (In Persian)
18. Hosseini-Motlagh, S.-M., Samani, M. R. G., & Cheraghi, S. (2020). Robust and stable flexible blood supply chain network design under motivational initiatives. *Socio-economic planning sciences*, 70, 100725.
19. 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.
20. Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178-191.
21. Jafarnejad, A., Mohseni, M., Abdollahi, A. (2014). Proposing a Hybrid Fuzzy PROMETHEE - AHP Approach to Performance Evaluation of Service Supply Chain (Case Study: Hotel industry). *Journal of Industrial Management Perspective*, 4(Issue 2), 69-92. (In Persian)
22. Kouchaki Tajani, T., Mohtashami, A., Amiri, M., Ehtesham Rasi, R. (2021). Presenting a Robust Optimization Model to Design a Comprehensive Blood Supply Chain under Supply and Demand Uncertainties. *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(Issue 1), 81-116. (In Persian)
23. Liao, H., Deng, Q., Wang, Y., Guo, S., & Ren, Q. (2018). An environmental benefits and costs assessment model for remanufacturing process under quality uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 178, 45-58.
24. Liu, B., & Liu, Y.-K. (2002). Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models. *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, 10(4), 445-450.
25. Liu, Y., Ma, L., & Liu, Y. (2021). A novel robust fuzzy mean-UPM model for green closed-loop supply chain network design under distribution ambiguity. *Applied Mathematical Modelling*, 92, 99-135.
26. Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Pishvae, M. S. (2014). Green and reverse logistics management under fuzziness. In *Supply chain management under fuzziness* (pp. 607-637): Springer.
27. Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (2015). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers & Chemical Engineering*, 82, 115-128.
28. Mousazadeh, M., Torabi, S. A., Pishvae, M., & Abolhassani, F. (2018). Accessible, stable, and equitable health service network redesign: A robust mixed possibilistic-flexible approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111, 113-129.
29. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.

30. Pedro, 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.
31. Pishvae, M. S., & Khalaf, M. F. (2016). Novel robust fuzzy mathematical programming methods. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 407-418.
32. 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.
33. Pishvae, M. S., Farahani, R. Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, 37(6), 1100-1112.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (2016). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 113, 662-673.
38. Torabi, S., Namdar, J., Hatefi, S., & Jolai, F. (2016). An enhanced possibilistic programming approach for reliable closed-loop supply chain network design. *International Journal of Production Research*, 54(5), 1358-1387.
39. Tsao, Y.-C., & Thanh, V.-V. (2019). A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 124, 13-39.
40. Xu, J., & Zhou, X. (2013). Approximation based fuzzy multi-objective models with expected objectives and chance constraints: Application to earth-rock work allocation. *Information Sciences*, 238, 75-95.
41. Yadegari, E., Alem-Tabriz, A., & Zandieh, M. (2019). A memetic algorithm with a novel neighborhood search and modified solution representation for closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 418-436.
42. Yaghin, R. G., Sarlak, P., & Ghareaghaji, A. (2020). Robust master planning of a socially responsible supply chain under fuzzy-stochastic uncertainty (A case study of clothing industry). *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 94, 103715.
43. Yavari, M., & Geraeli, M. (2019). Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. *Journal of Cleaner Production*, 226, 282-305.
44. Yu, C.-S., & Li, H.-L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 385-397.
45. Yu, L., & Li, Y. (2019). A flexible-possibilistic stochastic programming method for planning municipal-scale energy system through introducing renewable energies and electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 207, 772-787.

46. Zarrinpoor, N., & Omidvari, Z. (2020). A Robust Optimization Model for the Strategic and Operational Design of the Oil Supply Chain. *Journal of Industrial Management Perspective*, 10(Issue 4), 155-191. (In Persian)
47. 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.
48. 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.

