Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. 16, No. 1 (2026) 39–62.

Paper Type: Original Article

Optimization of a Closed-Loop Viable Supply Chain Network under Hybrid Uncertainty

Fariborz Kalashi[1], Iraj Mahdavi[1,*], Ali Tajdin[1], Javad Rezaeian[1]

[1] Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran; f62iust@gmail.com; Irajustmb@gmail.com; Ali_tajdin@yahoo.com; javadjf@gmail.com.

Citation:

Received: 07 September 2025 *Revised: 18 January 2026* *Accepted: 15 February 2026*	Kalashi, F., Mahdavi, I., Tajdin, A., & Rezaeian, J. (2026). Optimization of a closed-loop viable supply chain network under hybrid uncertainty. *Journal of Quality Engineering and Management*, *16*(1), 39-62.

Abstract

Purpose: This study aims to develop a durable closed-loop supply chain network capable of simultaneously addressing sustainability, resilience, agility, and digitalization while incorporating fuzzy–stochastic uncertainties. The significance of this research lies in the limitations of traditional supply chains, which often fail to perform effectively under severe environmental fluctuations, operational disruptions, and demand variability, thereby highlighting the need for intelligent and multidimensional decision-making frameworks.

Methodology: To achieve the research objectives, a structured three-phase framework was designed. In the first phase, demand subject to considerable uncertainty was forecast using the SARIMA time-series model to capture market volatility and seasonal patterns. In the second phase, supplier evaluation criteria were identified through a systematic literature review and expert judgment, and subsequently weighted via the Stochastic–Fuzzy Best–Worst Method (SFBWM). Supplier ranking was then performed using the Stochastic–Fuzzy TOPSIS (SFTOPSIS) technique. In the final phase, a multi-objective fuzzy–stochastic mathematical model was developed to design and optimize the supply chain network, while fuzzy–stochastic robust optimization was employed to address data uncertainty. The multi-objective problem was solved using a modified version of the Lexicographic–Chebyshev Multi-Choice Goal Programming Method (LCRMCGP).

Findings: A case study conducted in "Ebtakar Tajhiz Teb Yekta," a company operating in the medical equipment industry, demonstrated that the proposed model effectively supports key strategic decisions, including the selection of primary and backup suppliers, the optimal location of collection and recycling centers, excess capacity allocation, and the choice of information-exchange technologies (traditional systems vs. blockchain-based platforms). The integration of IoT and blockchain technologies increased product return rates, reduced recycling costs, and enhanced transparency and sustainability across the network. Overall, the results confirm that the proposed framework can successfully balance economic, environmental, and social objectives while improving flexibility and resilience under uncertainty.

Originality/Value: The novelty of the present study lies in developing an integrated framework for designing a viable closed-loop supply chain under hybrid fuzzy–stochastic uncertainty. Unlike previous studies that mainly focused on isolated dimensions of supply chain management, this research simultaneously incorporates sustainability, resilience, agility, and digitalization within a multi-objective optimization model. Furthermore, the integration of SARIMA, SFBWM, SFTOPSIS, and LCRMCGP methods provides a more accurate and comprehensive decision-making process. Comparative results also demonstrate that the proposed model outperforms conventional approaches in reducing deviations, improving decision consistency, and enhancing overall network sustainability.

Keywords: Supply chain management, Viable supply chain, Closed-loop supply chain, Uncertainty.

Corresponding Author: Irajustmb@gmail.com

10.48313/jqem.2026.564808.1595

Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مهندسی و مدیریت کیفیت

www.pqprc.ir

دوره ۱۶، شماره ۱، (۱۴۰۵)، ۶۲-۳۹

نوع مقاله: پژوهشی

بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته بادوام تحت عدم قطعیت ترکیبی

فریبرز کالاشی[۱]، ایرج مهدوی[۱،*]، علی تاجدین[۱]، جواد رضائیان[۱]

[۱] گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، مازندران، ایران.

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف توسعه یک شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته بادوام انجام شده است؛ شبکه‌ای که بتواند به‌طور هم‌زمان ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی را با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های فازی-تصادفی پوشش دهد. اهمیت این مطالعه ازآن‌جهت است که اغلب زنجیره‌های‌تامین سنتی در مواجهه با نوسانات شدید محیطی، اختلالات عملیاتی و تغییرات تقاضا فاقد کارایی لازم هستند و نیاز به رویکردهای تصمیم‌گیری هوشمند و چندبعدی دارند.

روش‌شناسی پژوهش: برای تحقق اهداف پژوهش، یک چارچوب منسجم سه مرحله‌ای طراحی گردید. در گام نخست، به‌منظور لحاظ کردن نوسانات بازار و الگوهای فصلی در ورودی‌های مدل، تقاضا با استفاده از مدل سری‌های زمانی *SARIMA*[۱] پیش‌بینی شد. در مرحله دوم، معیارهای ارزیابی تامین‌کنندگان بر اساس مرور نظام‌مند ادبیات و نظرات متخصصان شناسایی و سپس با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی[۲] وزن‌دهی گردید؛ پس‌از آن، رتبه‌بندی تامین‌کنندگان با بهره‌گیری از تکنیک تاپسیس فازی-تصادفی[۳] انجام پذیرفت. درنهایت، برای طراحی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تامین، یک مدل ریاضی چندهدفه با ماهیت فازی-تصادفی توسعه داده شد و به‌منظور مدیریت عدم قطعیت داده‌ها، رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی-تصادفی در فرآیند حل به کار گرفته شد. حل مساله چندهدفه نیز با استفاده از نسخه اصلاح‌شده روش برنامه‌ریزی آرمانی لکسیکوگراف-چی‌شف چندگزینه‌ای[۴] صورت گرفت.

یافته‌ها: مطالعه موردی انجام‌شده در شرکت "ابتکار تجهیز طب یکتا" در صنعت تجهیزات پزشکی نشان داد که مدل ارایه‌شده قادر است تصمیمات استراتژیک کلیدی ازجمله انتخاب تامین‌کنندگان اصلی و پشتیبان، تعیین مکان مراکز جمع‌آوری و بازیافت، تخصیص ظرفیت مازاد و انتخاب فناوری تبادل اطلاعات (سنتی یا مبتنی بر بلاک‌چین) را به‌صورت بهینه اتخاذ کند. بهره‌گیری از فناوری‌های اینترنت اشیا و بلاک‌چین منجر به افزایش نرخ بازگشت محصول، کاهش هزینه‌های بازیافت و بهبود شفافیت و پایداری شبکه شد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند تعادل موثری بین اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی برقرار کند و درعین‌حال، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری شبکه را در شرایط عدم قطعیت تقویت نماید.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: نوآوری پژوهش حاضر در توسعه یک چارچوب یکپارچه برای طراحی زنجیره‌تامین حلقه بسته بادوام تحت عدم قطعیت ترکیبی فازی-تصادفی است. برخلاف مطالعات پیشین که هر یک تنها بر بخشی از ابعاد زنجیره‌تامین تمرکز داشته‌اند، این پژوهش ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی را به‌صورت هم‌زمان در قالب یک مدل چندهدفه یکپارچه‌سازی می‌کند. همچنین، تلفیق روش‌های *SARIMA*، *SFBWM*، *SFTOPSIS* و *LCRMCGP* امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر را فراهم ساخته است. نتایج مقایسه‌ای نیز نشان می‌دهد مدل پیشنهادی در کاهش انحرافات، بهبود انسجام تصمیم‌گیری و افزایش پایداری شبکه عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مرجع دارد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت زنجیره‌تامین، زنجیره‌تامین بادوام، زنجیره‌تامین حلقه بسته، عدم قطعیت.

۱- مقدمه

برای در فضای رقابتی و پرچالش کنونی، مدیریت زنجیره‌تامین به یکی از ارکان اساسی بهبود عملکرد و ایجاد مزیت رقابتی سازمان‌ها بدل شده است. زنجیره‌تامین، مجموعه‌ای یکپارچه از فعالیت‌های مرتبط با تامین، تولید و رساندن محصول به مشتری نهایی است و کارایی آن به مدیریت موثر جریان مواد، اطلاعات و منابع در سراسر شبکه وابسته است [1]، [2]. طی سال‌های اخیر، تحولاتی همچون الزامات زیست‌محیطی، رقابت جهانی،

[1] Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average (SARIMA)

[2] Stochastic–Fuzzy Best–Worst Method (SFBWM)

[3] Stochastic Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (SFTOPSIS)

[4] Lexicographic Chebyshev Revised Multi-Choice Goal Programming (LCRMCGP)

پیشرفت فناوری و بروز اختلالات پیش‌بینی‌ناپذیر موجب شده‌اند شاخص‌هایی نظیر پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی به‌عنوان معیارهای کلیدی در تحلیل و طراحی زنجیره‌های‌تامین موردتوجه قرار گیرند [3]، [4].

در این میان، نگرانی‌های محیط‌زیستی و فشارهای بازار، توجه ویژه‌ای را به الگوهای پایدار و کارآمد جلب کرده است. زنجیره‌تامین حلقه بسته که جریان روبه‌جلو و معکوس را در قالب فعالیت‌هایی مانند بازیافت، بازسازی و استفاده مجدد تلفیق می‌کند، یکی از رویکردهای مهم در پاسخ به این نیازهاست و می‌تواند موجب کاهش ضایعات، افزایش بهره‌وری و تقویت مزیت رقابتی شود [5]. تجربه همه‌گیری کووید-۱۹ نیز اهمیت ارتقای تاب‌آوری و توان بقا در شبکه‌های تامین را برجسته ساخت. اختلالات شدید ناشی از محدودیت‌های نقل‌وانتقال و کمبود مواد اولیه، ضعف بسیاری از زنجیره‌های جهانی را آشکار کرد و ضرورت توجه به مفهوم "زنجیره‌تامین بادوام" را افزایش داد؛ مفهومی که ترکیبی از پایداری، مقاوم‌سازی، چابکی و دیجیتال‌سازی در طراحی شبکه را دنبال می‌کند [6–8]. صنعت تجهیزات پزشکی، به دلیل حساسیت و نقش حیاتی در نظام سلامت، بیش از دیگر صنایع از این اختلالات آسیب دید و ناگزیر به بازنگری فرآیندهای تامین و توسعه استراتژی‌های جدید شد [9]، [10]. بر همین اساس، این پژوهش با تمرکز بر بهینه‌سازی یک شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته در این صنعت، به‌دنبال ارایه چارچوبی برای افزایش کارایی و دوام شبکه در شرایط عدم قطعیت است. برای دستیابی به این هدف، یک چارچوب تصمیم‌گیری سه‌مرحله‌ای تدوین شد. در مرحله نخست، تقاضا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت با استفاده از مدل سری‌های زمانی *SARIMA* پیش‌بینی شد. در مرحله دوم، معیارهای ارزیابی تامین‌کنندگان از طریق مرور ادبیات و نظرات خبرگان تعیین و با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی وزن‌دهی شد؛ سپس رتبه‌بندی تامین‌کنندگان با رویکرد تاپسیس فازی-تصادفی انجام گرفت. در مرحله سوم، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای طراحی و بهینه‌سازی شبکه توسعه یافت و برای مقابله با نوسانات داده‌ها، از بهینه‌سازی استوار فازی-تصادفی استفاده شد. درنهایت، نسخه بهبودیافته روش برنامه‌ریزی آرمانی لکسیکوگراف-چبی‌شف چندگزینه‌ای برای حل مدل چندهدفه به کار گرفته شد. براین اساس، نوآوری اصلی پژوهش حاضر را می‌توان در چند محور کلیدی خلاصه کرد:

۱. توسعه یک چارچوب یکپارچه برای طراحی زنجیره‌تامین حلقه بسته بادوام با درنظرگرفتن هم‌زمان ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی
۲. مدل‌سازی عدم قطعیت ترکیبی فازی-تصادفی به‌منظور بازتاب واقع‌بینانه شرایط محیطی و نوسانات تقاضا
۳. ترکیب هم‌زمان روش‌های پیش‌بینی *SARIMA*، وزن‌دهی *SFBWM*، رتبه‌بندی روش تاپسیس فازی-تصادفی و مدل‌سازی چندهدفه *LCRMCGP* در قالب یک فرآیند تصمیم‌گیری منسجم
۴. ارایه یک مطالعه موردی کاربردی در صنعت تجهیزات پزشکی با تمرکز بر ارتقای کیفیت عملکرد و دوام شبکه زنجیره‌تامین

این ویژگی‌ها موجب می‌شود پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین، چارچوبی جامع‌تر، کاربردی‌تر و سازگارتر با شرایط واقعی محیط‌های پر ریسک و متغیر ارایه دهد.

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در حوزه مدیریت زنجیره‌تامین انجام‌شده که هر یک از منظرهای مختلف به ارتقای کارایی، پایداری و انعطاف‌پذیری شبکه‌های تامین پرداخته‌اند. همان‌گونه که در بخش مقدمه اشاره شد، هدف اصلی مطالعه حاضر، بهینه‌سازی زنجیره‌تامین حلقه بسته با توجه به ابعاد بادوام بودن و شرایط عدم قطعیت است. بر این اساس، ابتدا مروری نظام‌مند بر مطالعات شاخص مرتبط با موضوع انجام‌شده و سپس شکاف‌های پژوهشی موجود استخراج می‌شود تا جایگاه و نوآوری مطالعه حاضر روشن گردد.

۲-۱- زنجیره‌تامین بادوام

افزایش شدت رقابت در بازار، نوسانات شدید تقاضا و اختلالات گسترده‌ای نظیر همه‌گیری کووید-۱۹، ضرورت بازنگری در الگوهای سنتی مدیریت زنجیره‌تامین را برجسته کرده است. تجربه دوران کرونا نشان داد که برخی صنایع از جهش تقاضا (مانند تجهیزات پزشکی) و برخی دیگر از افت شدید فروش (مانند خودروسازی) آسیب دیدند. این وضعیت به‌وضوح بر اهمیت برخورداری زنجیره‌های‌تامین از ساختاری مقاوم، چابک و قابل‌تداوم دلالت دارد. بر همین مبنا، ایوانو و دولگی [11] با اتکا بر چهار مولفه پایداری، چابکی، تاب‌آوری و دیجیتالی‌سازی، چارچوب "زنجیره‌تامین بادوام" را ارایه کردند که بر تقویت ابعاد فناورانه، سازمانی و مالی شبکه تامین تمرکز دارد.

علیزاده و همکاران [12] نیز شبکه‌ای چندسطحی از مراکز درمانی طراحی کردند که سه هدف کلیدی افزایش نرخ بهبود، کاهش هزینه و کاهش مرگ‌ومیر را دنبال می‌کرد و نشان دادند که رویکرد بادوام می‌تواند اثربخشی قابل‌توجهی در بحران‌ها داشته باشد. در راستای تقویت اقتصاد چرخشی، لطفی و همکاران [13] با توسعه یک مدل تصادفی نشان دادند که یکپارچه‌سازی ابعاد بادوام بودن و چرخه معکوس می‌تواند هزینه‌ها را تا ۴۴% کاهش دهد. در پژوهشی دیگر رستمی و همکاران [9]، به‌منظور بررسی مساله انتخاب تامین‌کننده بادوام، یک چارچوب تصمیم‌گیری ارایه کرده‌اند که در آن روش جدید *GP-FBWM*[1] برای وزن‌دهی معیارها و روش فازی *VIKOR*[2] برای رتبه‌بندی تامین‌کنندگان به‌کار گرفته شده است. مطالعه موردی بر دستگاه اکسیژن ساز نشان می‌دهد مدل پیشنهادی قادر است ابعاد زنجیره‌تامین بادوام را در ارزیابی تامین‌کنندگان به‌طور موثر لحاظ کند.

در سطح سازمان‌ها، مطالعه زهاری و همکاران [14] با بررسی ۱۹۷ شرکت مالزیایی نشان داد که اتخاذ استراتژی‌های بادوام اثر معناداری بر ارتقای پایداری عملیاتی دارد. در زمینه فناوری‌های نوظهور، چاوونی بن‌عبدالله و همکاران [15] موانع اصلی پذیرش بلاک‌چین در زنجیره‌تامین بادوام را شناسایی و اولویت‌بندی کردند؛ موانعی نظیر ضعف شفافیت داده، نبود استانداردهای یکپارچه و محدودیت‌های مالی. این مطالعه راهکارهایی عملی برای غلبه بر این چالش‌ها ارایه داد. از سوی دیگر، ژو و همکاران [16] با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عامل مبنا نشان دادند که همکاری میان بنگاه‌های کوچک و بزرگ در مواجهه با اختلالات گسترده، نقشی تعیین‌کننده در تقویت دوام زنجیره دارد.

در پژوهشی دیگر نیری و همکاران [17]، با ترکیب ابعاد اقتصاد چرخشی، قابلیت دوام و *Industry 5.0* یک مدل ارزیابی تامین‌کننده ارایه کرده‌اند که بر پایه روش بهترین–بدترین، فازی–تصادفی و نسخه اصلاح‌شده روش ارزیابی تناسب پیچیده[3] عمل می‌کند. نتایج مطالعه موردی نشان می‌دهد شاخص‌های پایداری و تاب‌آوری بیشترین اهمیت را داشته و تامین‌کنندگان *A2* و *A5* بهترین عملکرد را ارایه داده‌اند. پادونووا و همکاران [18]، یک چارچوب سه‌بعدی برای ارزیابی تاب‌آوری و دوام زنجیره‌تامین ارایه کرده‌اند و با استفاده از معادلات ساختاری و یک مطالعه موردی در زنجیره غلات، نشان داده‌اند که تاب‌آوری و دوام شبکه و محصول بیشترین نقش را در عملکرد زنجیره ایفا می‌کنند.

جدول ۱- خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده.

Table 1- Summary of the conducted research.

نویسندگان	بادوام بودن				عدم قطعیت		مطالعه موردی
	پایداری	تاب‌آوری	چابکی	دیجیتال‌سازی	تصادفی	شناختی	
لطفی و همکاران [19]	✓	–	–	✓	–	–	–
کومار و همکاران [20]	✓	✓	✓	–	–	–	خودروسازی
علیزاده و همکاران [12]	–	✓	✓	✓	–	–	سیستم سلامت
لطفی و همکاران [13]	✓	✓	✓	✓	✓	–	–
زهاری و همکاران [14]	✓	✓	–	–	–	–	صنعت تولید
آجائی و لاسینده [21]	✓	✓	✓	✓	–	–	کشاورزی
چاوونی بن‌عبدالله و همکاران [22]	✓	✓	✓	✓	–	–	–
ژو و همکاران [23]	✓	✓	✓	✓	–	–	–
لطفی و همکاران [24]	✓	✓	✓	✓	–	–	–
پادوانو و ایوانو [18]	✓	✓	✓	✓	–	–	غلات
نیری و همکاران [17]	✓	✓	–	–	✓	✓	–
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓	تجهیزات پزشکی

[1] Geometric Programming-based Fuzzy Best–Worst Method (GP-FBWM)

[2] Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution (VIKOR)

[3] Complex Proportional Assessment (COPRAS)

۲-۲- شکاف پژوهش

باوجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در مدیریت زنجیره‌تامین طی سال‌های اخیر، ادبیات این حوزه همچنان با شکاف‌هایی معنادار مواجه است. در دوران پساکرونا، مفهوم "زنجیره‌تامین بادوام" به‌عنوان رویکردی نوین برای افزایش توان بقا، پایداری و انعطاف‌پذیری شبکه‌های تامین در برابر شوک‌ها و اختلالات محیطی مطرح‌شده و توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این رویکرد با ادغام مولفه‌هایی نظیر پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی، چارچوبی جامع برای مدیریت شبکه‌های تامین در محیط‌های پیچیده و متغیر فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، یکی از چالش‌های اساسی در محیط اقتصادی امروز، سطح بالای عدم قطعیت است که نادیده گرفتن آن می‌تواند منجر به تصمیمات غیرواقع‌بینانه و پیامدهای هزینه‌زای جدی برای سازمان‌ها شود. با توجه به اهمیت این مساله، در این پژوهش متغیر تقاضا به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی تصمیم‌گیری در مدل‌های زنجیره‌تامین به‌صورت غیرقطعی مدل‌سازی شده و با بهره‌گیری از روش سری‌های زمانی *SARIMA* پیش‌بینی می‌گردد تا ویژگی‌های پویا و واقعی بازار در مدل لحاظ شود. مرور پیشینه نشان می‌دهد که تعداد مطالعاتی که به بررسی مسایل زنجیره‌تامین تحت عدم قطعیت ترکیبی (فازی-تصادفی) پرداخته‌اند بسیار محدود است؛ موضوعی که ضرورت توسعه رویکردهای تصمیم‌سازی کارآمدتر و واقع‌گرایانه‌تر را برجسته می‌سازد.

از منظر ساختاری، طراحی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تامین یک مساله چندلایه و چندبعدی است؛ تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی در این شبکه بر یکدیگر اثرگذارند و تحلیل منفرد هر سطح نمی‌تواند تصویری کامل از عملکرد شبکه ارایه دهد. باوجود این پیچیدگی، بخش عمده ادبیات موجود تنها به بررسی بخشی از تصمیمات زنجیره‌تامین محدودشده و تاکنون مدلی جامع که انتخاب تامین‌کنندگان، تعیین روش حمل‌ونقل، مکان‌یابی تسهیلات و ظرفیت‌گذاری را در قالب زنجیره‌تامین بادوام و در فضای عدم قطعیت ترکیبی به‌صورت یکپارچه تحلیل کند، ارایه نشده است. در این چارچوب، نوآوری اصلی پژوهش حاضر توسعه یک سازوکار تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای است که امکان طراحی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته و بادوام را تحت عدم قطعیت ترکیبی فراهم می‌سازد. این چارچوب با یکپارچه‌سازی ابعاد حیاتی همچون پایداری، تاب‌آوری و چابکی، در کنار مدل‌سازی واقع‌بینانه عدم قطعیت تقاضا، می‌تواند مبنایی نظری و کاربردی برای تصمیم‌گیری مدیران در شرایط محیطی پویا و نامطمئن ارایه دهد.

۳- روش تحقیق

هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته بادوام در شرایط عدم قطعیت است. برای این منظور، یک چارچوب تصمیم‌گیری سه‌مرحله‌ای ارایه شده است. در مرحله نخست، تقاضا به‌عنوان پارامتر کلیدی و غیرقطعی با استفاده از مدل سری‌های زمانی *SARIMA* پیش‌بینی می‌شود. در مرحله دوم، معیارهای ارزیابی تامین‌کنندگان از طریق ادبیات و نظر خبرگان تعیین‌شده و با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی وزن‌دهی می‌شوند؛ سپس تامین‌کنندگان بالقوه با به‌کارگیری روش تاپسیس فازی-تصادفی ارزیابی و رتبه‌بندی می‌گردند. در گام پایانی، یک مدل چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته تحت عدم قطعیت فازی-تصادفی تدوین‌شده و با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار و روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده لکسیکوگرافیک-چبی‌شف حل می‌شود.

۳-۱- روش SARIMA

با توجه به آن‌که عدم قطعیت بخش جدایی‌ناپذیر محیط کسب‌وکار امروزی است، چشم‌پوشی از آن در فرآیندهای تصمیم‌گیری می‌تواند منجر به برداشت‌های نادرست و درنهایت پیامدهای هزینه‌زا برای سازمان‌ها شود. بر همین اساس، در پژوهش حاضر پارامتر تقاضا به‌عنوان یکی از موثرترین متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل‌های زنجیره‌تامین به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده و برآورد آن با استفاده از مدل سری‌های زمانی *SARIMA* انجام گرفته است. مدل *SARIMA* نسخه پیشرفته‌تری از مدل *ARIMA* است که برای تحلیل داده‌های دارای الگوهای فصلی و رفتارهای دوره‌ای

مناسب است. این مدل با ترکیب اجزای خود رگرسیونی[1]، میانگین متحرک[2]، جزء تفاضلی (I) و مولفه‌های فصلی متناظر، توانایی مدل‌سازی نوسانات پیچیده و پیش‌بینی دقیق تغییرات تقاضا را فراهم می‌کند[25] . فرآیند پیاده‌سازی مدل *SARIMA* معمولا شامل مراحل زیر است:

۱. تحلیل اولیه داده‌ها به‌منظور شناسایی روند، الگوهای فصلی و ساختار وابستگی زمانی
۲. ایستا سازی سری زمانی از طریق تفاضل‌گیری معمولی و فصلی
۳. تعیین پارامترهای مدل و انتخاب ترکیب مناسب مولفه‌های *AR*، *MA* و *I* در بخش‌های غیر فصلی و فصلی
۴. برازش مدل و اعتبارسنجی با استفاده از معیارهای خطا و بررسی باقی‌مانده‌ها
۵. پیش‌بینی تقاضا با مدل نهایی و تحلیل رفتار پیش‌بینی‌شده

انتخاب مدل *SARIMA* در این تحقیق به دلیل قابلیت آن در بازتاب دقیق الگوهای فصلی و رفتار واقعی تقاضا انجام شده است؛ موضوعی که به افزایش دقت تخمین‌ها و کاهش ریسک تصمیم‌گیری در مراحل بعدی طراحی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تامین کمک می‌کند.

۲-۳- بهترین-بدترین فازی تصادفی

یکی از رویکردهای پرکاربرد در وزن‌دهی معیارها در مسایل تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش بهترین-بدترین است. در این روش، برخلاف روش‌هایی مانند *AHP* که مستلزم مقایسه زوجی تمامی معیارها هستند، تنها دو معیار "بهترین" و "بدترین" تعیین می‌شود و سایر معیارها صرفا نسبت به این دو مقایسه می‌گردند؛ موضوعی که پیچیدگی محاسبات و میزان ناسازگاری را کاهش می‌دهد [26]، [27].

روش کلاسیک بهترین-بدترین مبتنی بر قضاوت‌های قطعی است و در محیط‌های همراه با عدم قطعیت کارایی محدودی دارد. به همین دلیل، نسخه‌های توسعه‌یافته‌ای نظیر بهترین-بدترین فازی، خاکستری، تصادفی و فازی-تصادفی معرفی شده‌اند. در این پژوهش از روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی استفاده شده است؛ رویکردی که ضمن کاهش تعداد مقایسات، امکان لحاظ هم‌زمان عدم قطعیت شناختی و تصادفی و نیز استفاده از سناریوهای خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها موجب می‌شود وزن معیارها بازتاب‌دهنده پویایی محیط تصمیم‌گیری بوده و نتایج از دقت و پایداری بیشتری برخوردار می‌باشند [28]. در این روش، ابتدا معیارهای بهترین و بدترین تعیین می‌شوند. سپس مقایسات زوجی سایر معیارها با این دو معیار در قالب اعداد فازی و در سناریوهای مختلف انجام می‌گیرد. پس از محاسبه وزن معیارها در هر سناریو، وزن نهایی از طریق حل یک مدل ریاضی سناریو محور با هدف حداقل سازی ناسازگاری انتظاری به‌دست می‌آید. میزان سازگاری مدل نیز بر اساس نرخ ناسازگاری بهینه ارزیابی می‌شود [29]. مراحل محاسباتی روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی به‌طور کامل در فایل پیوست ارایه شده است.

۳-۳- تاپسیس فازی تصادفی

در این پژوهش برای ارزیابی و رتبه‌بندی تامین‌کنندگان، از نسخه پیشرفته شده روش چندمعیاره تاپسیس استفاده شده است. این روش به دلیل ساختار ساده، تفسیرپذیری بالا و توانایی کار با معیارهای کمی و کیفی مثبت و منفی، جایگاهی گسترده در تصمیم‌گیری دارد [30]، [31]. باوجود این، نسخه‌های کلاسیک تاپسیس ازجمله انواع فازی و خاکستری، اگرچه امکان لحاظ کردن عدم قطعیت را فراهم می‌کنند، اما عمدتا قادر نیستند تغییرپذیری قضاوت تصمیم‌گیرندگان را در شرایط محیطی متفاوت، مانند دوره‌های پیش و پس از بحران‌هایی نظیر کووید-۱۹، به‌درستی بازتاب دهند [32]، [33].

[1] AutoRegressive (AR)
[2] Moving Average (MA)

با توجه به ماهیت مساله حاضر که با دو نوع عدم قطعیت شناختی و تصادفی مواجه است، از تاپسیس فازی-تصادفی بهره گرفته شده است. این روش چند مزیت اساسی دارد: نخست، امکان مدل‌سازی هم‌زمان عدم قطعیت شناختی حاصل از ابهام در قضاوت خبرگان و عدم قطعیت تصادفی ناشی از نوسانات داده‌ها را فراهم می‌کند؛ دوم، رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس فاصله آن‌ها از راه‌حل‌های ایده آل مثبت و منفی صورت می‌گیرد که موجب شفافیت و سهولت تفسیر نتایج می‌شود و سوم، ترکیب این روش با تحلیل سناریویی، انعطاف‌پذیری تصمیم‌گیری را افزایش داده و زمینه اتخاذ انتخاب‌های پایدارتر را در محیط‌های پویا و پر ریسک فراهم می‌سازد. این ویژگی‌ها سبب می‌شود تاپسیس فازی-تصادفی رویکردی کارآمد برای مساله انتخاب تامین‌کنندگان در زنجیره‌تامین حلقه بسته بادوام و تحت عدم قطعیت محسوب شود ساختار ریاضی و مراحل اجرای این روش به‌تفصیل در فایل پیوست ارایه شده است.

۴-۳- مدل ریاضی چندهدفه

در این بخش، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته بادوام تحت عدم قطعیت فازی-تصادفی ارایه می‌شود. در ساختار مدل، زنجیره روبه‌جلو شامل تامین‌کنندگان اصلی و پشتیبان، مراکز تولید، مراکز توزیع و مشتریان حضوری و آنلاین است؛ درحالی‌که زنجیره معکوس از مراکز جمع‌آوری، بازیافت، دفع و بازار ثانویه تشکیل می‌شود. جریان مواد از تامین‌کنندگان به تولید و سپس به توزیع و مشتریان هدایت‌شده و محصولات برگشتی پس از ارزیابی، به مراکز بازیافت یا دفع منتقل می‌شوند؛ قطعات بازیافتی نیز به تامین‌کنندگان فروخته‌شده و منبع درآمدی برای شبکه محسوب می‌شود. مدل پیشنهادی مبتنی بر سناریو بوده و چهار بعد کلیدی زنجیره‌تامین بادوام-پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی-را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. بعد پایداری از جنبه‌های اقتصادی (حداقل سازی هزینه و لحاظ درآمد بازیافت)، زیست‌محیطی (کاهش انتشار آلودگی و توسعه لجستیک معکوس) و اجتماعی (اشتغال‌زایی و بهبود ایمنی) مدل‌سازی شده است. تاب‌آوری شبکه از طریق سناریوهای اختلال، استفاده از تامین‌کنندگان جایگزین، ظرفیت مازاد و تحلیل پیچیدگی ساختار شبکه تقویت می‌شود. چابکی با لحاظ زمان تحویل کوتاه‌تر و حفظ حداقل سطح خدمت در مدل گنجانده شده است. در بعد دیجیتال‌سازی نیز فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا و بلاک‌چین برای ارتقای شفافیت، هماهنگی و افزایش نرخ بازیافت در نظر گرفته شده‌اند. به‌طورکلی، مدل توسعه‌یافته چارچوبی جامع برای طراحی شبکه‌ای پایدار، مقاوم، چابک و دیجیتال‌محور فراهم می‌کند که در شرایط عدم قطعیت عملکرد قابل اتکایی دارد. در ادامه، پارامترها، شاخص‌ها و متغیرهای تصمیم معرفی‌شده و فرم ریاضی مدل چندهدفه ارایه می‌شود.

اندیس‌ها

m	اندیس تامین‌کنندگان اصلی
b	اندیس تامین‌کنندگان پشتیبان
f	اندیس مراکز تولید
d	اندیس مراکز توزیع
g	اندیس مراکز جمع‌آوری
p	اندیس مراکز بازیافت
l	اندیس مراکز دفن
c	اندیس مشتریان حضوری
o	اندیس مشتریان آنلاین
r	اندیس مواد اولیه
v	اندیس وسایل نقلیه
i	اندیس سیستم‌های اشتراک‌گذاری اطلاعات
s	اندیس سناریوها

پارامترها

پارامترهای به‌دست‌آمده از مرحله اول:

$\widetilde{Dem}_{cs}$	تقاضای مشتری حضوری
$\widetilde{Dem}_{os}$	تقاضای مشتری آنلاین

پارامترهای بدست آمده از مرحله دوم:

S_m	امتیاز تامین‌کننده اصلی m
S_b	امتیاز تامین‌کننده پشتیبان b

پارامترهای پایداری

پارامترهای مربوط به معیار اقتصادی شامل:

$\widetilde{FCM}_m$	هزینه ثابت قرارداد با تامین‌کننده اصلی m
$\widetilde{FCB}_b$	هزینه ثابت قرارداد با تامین‌کننده پشتیبان b
$\widetilde{PCM}_{mr}$	هزینه خرید ماده اولیه r از تامین‌کننده اصلی m
$\widetilde{PCB}_{br}$	هزینه خرید ماده اولیه r از تامین‌کننده پشتیبان b
$\widetilde{MC}_f$	هزینه تولید در مرکز تولید f
$\widetilde{DC}_d$	هزینه توزیع در مرکز توزیع d
$\widetilde{OCG}_g$	هزینه عملیاتی در مرکز جمع‌آوری g
$\widetilde{OCP}_p$	هزینه عملیاتی در مرکز بازیابی p
$\widetilde{LC}_l$	هزینه دفن در مرکز دفن l
$\widetilde{TC}_v$	هزینه حمل‌ونقل وسیله نقلیه v
$\widetilde{SC}_s$	هزینه کمبود برای مشتری (حضوری و انلاین) در s
$\widetilde{FCG}_g$	هزینه احداث مرکز جمع آوری g
$\widetilde{FCP}_p$	هزینه احداث مرکز بازیافت p
$\widetilde{CIOT}$	هزینه استقرار سیستم اینترنت اشیا
$\widetilde{CI}_i$	هزینه راه‌اندازی سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات i
$\widetilde{Rev}_{rm}$	درآمد حاصل از فروش ماده اولیه r به تامین‌کننده m

پارامترهای زیست محیطی

$\widetilde{EF}_f$	آلایندگی ایجاد شده در مرکز تولید f
$\widetilde{EP}_p$	آلایندگی ایجاد شده در مرکز بازیافت p
$\widetilde{EV}_v$	آلایندگی ایجاد شده توسط وسیله نقلیه v

پارامترهای اجتماعی

$\widetilde{JCM}_m$	تعداد شغل ایجاد شده در صورت انتخاب تامین‌کننده اصلی i
$\widetilde{JCB}_b$	تعداد شغل ایجاد شده در صورت انتخاب تامین‌کننده پشتیبان b
$\widetilde{JCG}_g$	تعداد شغل ایجاد شده در صورت احداث مرکز جمع آوری j
$\widetilde{JCP}_p$	تعداد شغل ایجاد شده در صورت احداث مرکز بازیافت p

پارامترهای تاب‌آوری

$\widetilde{ECF}_f$	هزینه تاسیس ظرفیت مازاد در مرکز تولید j
$\widetilde{ECD}_d$	هزینه تاسیس ظرفیت مازاد در مرکز توزیع d
CL_{es}	درصد ظرفیت مختل شده برای تسهیل e تحت سناریو s
$A_{ee\acute{v}}$	پارامتر باینری (برابر با مقدار یک است اگر وسیله نقلیه q قابل استفاده بین نقاط e و $\acute{e}$ قابل استفاده باشد، در غیراین‌صورت برابر با صفر است).

پارامترهای چابکی

SLC	سطح سرویس برای مشتری حضوری
SLO	سطح سرویس برای مشتری آنلاین
$\widetilde{TT}_v$	متوسط واحد زمان حمل برای حالت حمل‌ونقل v $(H\|Kg\text{-}Km)$
$\widetilde{LTM}_m$	زمان تحویل مواد اولیه از تامین‌کننده اصلی m
$\widetilde{LTB}_b$	زمان تحویل مواد اولیه از تامین‌کننده پشتیبان b
$\widetilde{DT}_r$	حداکثر زمان تحویل مورد قبول برای ماده اولیه r

پارامترهای دیجیتال‌سازی

$\widetilde{ISG}$	میزان صرفه جویی در هزینه‌های جمع آوری در صورت استفاده از اینترنت اشیا
$\widetilde{ISP}$	میزان صرفه جویی در هزینه‌های بازیابی در صورت استفاده از اینترنت اشیا
RRC_{cs}	نرخ بازگشت محصول از نقطه تقاضا c تحت سناریو s (در صورت استفاده از اینترنت اشیا)
RRC'_{cs}	نرخ بازگشت محصول از نقطه تقاضا c تحت سناریو s (در صورت عدم استفاده از اینترنت اشیا)
RRC_{os}	نرخ بازگشت محصول از مشتری آنلاین o تحت سناریو s (در صورت استفاده از اینترنت اشیا)
RRC'_{cs}	نرخ بازگشت محصول از مشتری آنلاین o تحت سناریو s (در صورت عدم استفاده از اینترنت اشیا)
SR_s	درصدی از محصولات که با موفقیت بازیابی می‌شوند تحت سناریو s (در صورت استفاده از اینترنت اشیا)
SR'_s	درصدی از محصولات که با موفقیت بازیابی می‌شوند تحت سناریو s (در صورت عدم استفاده از اینترنت اشیا)
INF_{is}	مجموع اطلاعات تبادل شده توسط سیستم اشتراک گذاری اطلاعات i در سناریو s
IDR_{is}	درصد اطلاعات مختل شده برای سیستم اشتراک گذاری i تحت سناریو s
$Dist_{max}$	حداکثر فاصله قابل قبول برای خدمت‌رسانی به مشتریان آنلاین توسط مرکز توزیع مربوطه

سایر پارامترها

Cm_{rm}	ظرفیت تامین‌کننده اصلی m در تامین ماده اولیه r
Cb_{rb}	ظرفیت تامین‌کننده پشتیبان b در تامین ماده اولیه r
Cf_f	ظرفیت مرکز تولید f
Cd_d	ظرفیت مرکز توزیع d
Cg_g	ظرفیت مرکز جمع آوری g
Cp_p	ظرفیت مرکز بازیافت p
$Dist_{eé}$	فاصله میان دو نقطه (تسهیل) e و e'
$Cons_r$	درصد مصرف ماده اولیه r در تولید محصول
α_s	درصد محصولاتی که قابل بازیابی (*Recoverable*) تشخیص داده می‌شوند در سناریوی s
Rec_r	مقدار ماده r به دست آمده از بازیابی محصول
λs	وزن معیار زیست‌محیطی
λe	وزن معیار اجتماعی
λv	وزن معیار بینایی
λc	وزن معیار پیچیدگی گره‌ها
P_s	احتمال رخداد سناریو s
BM	عدد مثبت بسیار بزرگ

متغیرهای تصمیم

XM_m	اگر تامین‌کننده اصلی m انتخاب شود برابر با مقدار ۱ است، درغیر این‌صورت ۰ است.
XB_b	اگر تامین‌کننده پشتیبان b انتخاب شود برابر با مقدار ۱ است، درغیر این‌صورت ۰ است.
YG_g	اگر مرکز جمع آوری g احداث شود برابر با مقدار ۱ است، در غیر این‌صورت ۰ است.
YP_p	اگر مرکز بازیافت p احداث شود برابر با مقدار ۱ است، در غیراین‌صورت ۰ است.
ZI_i	اگر سیستم اشتراک گذاری اطلاعات i راه اندازی شود برابر با مقدار ۱ است، در غیر این‌صورت ۰ است.
$ZIOT$	اگر سیستم اینترنت اشیا راه اندازی شود برابر با مقدار ۱ است، در غیراین‌صورت ۰ است.
$U_{eév}$	اگر وسیله نقلیه v میان دو نقطه (تسهیل) e و e' مورد استفاده قرار گیرد برابر با مقدار ۱ است، در غیر این‌صورت ۰ است.
QMF_{rmfvs}	مقدار مواد اولیه r که از تامین‌کننده اصلی m به مرکز تولید f با وسیله نقلیه v تحت سناریو S ارسال می‌گردد.
QBF_{rbfvs}	مقدار مواد اولیه r که از تامین‌کننده پشتیبان b به مرکز تولید f با وسیله نقلیه v تحت سناریو s ارسال می‌گردد.
QFD_{fdvs}	مقدار محصول ارسالی که از مرکز تولید f به مرکز توزیع d با وسیله نقلیه v تحت سناریو s ارسال می‌گردد.
QDC_{dcvs}	مقدار محصول ارسالی که از مرکز توزیع d به مشتری حضوری c با وسیله نقلیه v تحت سناریو s ارسال می‌گردد.
QDO_{dovs}	مقدار محصول ارسالی که از مرکز توزیع d به مشتری آنلاین o با وسیله نقلیه v تحت سناریو s ارسال می‌گردد.
QCG_{cgvs}	محصول برگشتی از مشتری حضوری c به مرکز جمع آوری g در سناریو s
QOG_{ogvs}	محصول برگشتی از مشتری آنلاین o به مرکز جمع آوری g در سناریو s
QGP_{gpvs}	محصول ارسالی از مرکز جمع آوری g به مرکز بازیافت p در سناریو s
QGL_{glvs}	محصول برگشتی از مرکز جمع آوری g به مرکز دفن l در سناریو s
QPM_{rpmvs}	مقدار مواد اولیه بازیافت شده از مرکز بازیافت p به تامین کننده اصلی m در سناریو s
QGL_{rglvs}	مقدار ضایعات ارسالی از مرکز بازیافت p به مرکز دفن l در سناریو s

VIS_{is}	میزان بینایی در زنجیره تامین تحت سناریو s زمانی که سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات i ایجاد شده باشد.
Shc_{cs}	مقدار کمبود کالا برای مشتری حضوری c تحت سناریو s
Sho_{os}	مقدار کمبود کالا برای مشتری آنلاین o تحت سناریو s
$Comp$	پیچیدگی گره در زنجیره تامین
ECF_f	ظرفیت مازاد ایجاد شده در مرکز تولید f
ECD_d	ظرفیت مازاد ایجاد شده در مرکز توزیع d

با توجه به مباحث پیشین، مدل پیشنهادی شامل پنج هدف اصلی به شرح زیر است:

$$minimize\ Z1 =$$

$$\begin{gathered}\sum_s P_s \left(\sum_{r,m,f,v} \widetilde{PCM}_{rm} \times QMF_{rmfvs} + \sum_{r,b,f,v} \widetilde{PC}_{rb} \times QBF_{rbfvs} + \sum_{f,d,v} \widetilde{MC}_f \times QFD_{fdvs} + \right. \\ \sum_{d,c,o,v} \widetilde{DC}_d \times (QDC_{dcvs} + QDO_{dovs}) + \sum_{c,o,g,v} (\widetilde{OCG}_g - \widetilde{ISG}_g \times ZIOT) \times \left(QCG_{cgvs} + QOG_{ogvs}\right) + \\ \sum_{p,g,v} (\widetilde{OCP}_p - \widetilde{ISP}_p \times ZIOT) \times QGP_{gpvs} + \sum_{c,o} \widetilde{Short}_s \times (Shc_{cs} + Sho_{os}) + \\ \sum_v \widetilde{TC}_v \left(\sum_{m,f} Dist_{mf} \times U_{mfv} + \sum_{b,f} Dist_{bf} \times U_{bfv} + \sum_{f,d} Dist_{fd} \times U_{fdv} + \sum_{d,c} Dist_{dc} \times U_{dcv} + \right. \\ \sum_{d,o} Dist_{do} \times U_{dov} + \sum_{c,g} Dist_{c,g} \times U_{cgv} + \sum_{o,g} Dist_{og} \times U_{ogv} + \sum_{g,p} Dist_{gp} \times U_{gpv} + \\ \left. \sum_{g,l} Dist_{gl} \times U_{glv} + \sum_{g,m} Dist_{gm} \times U_{gmv} - \sum_{r,m} \widetilde{Rev}_{rm} \times QGM_{rgms}\right) + \sum_m \widetilde{FCM}_m \times XM_m + \\ \left. +\sum_f \widetilde{CEC}_f \times ECF_f + \sum_d \widetilde{CEC}_d \times ECD_d + \sum_b \widetilde{FCB}_b \times XB_b + \sum_g \widetilde{FCG}_g \times YG_g + \sum_p \widetilde{FCP}_p \times YP_p\right) \\ \widetilde{CIOT} \times ZIOT + \widetilde{CI}_i \times ZI_{i.}\end{gathered} \quad (۱)$$

$$minimize\ Z2$$

$$= \lambda e \times \left[\sum_s \frac{P_s \left(\sum_{f,d,v} \widetilde{EF}_f\ QFD_{fdvs} + \sum_{g,p,v} \widetilde{EP}_p\ QGP_{g,p,v,s} + \sum_v \widetilde{EV}_v \left(\begin{array}{c} \sum_{r,m,f} Dist_{mf} \times QMF_{rmfvs} + \\ \sum_{r,b,f} Dist_{bf} \times QBF_{rbfvs} + \\ \sum_{f,d} Dist_{fd} \times QFD_{fdvs} + \\ \sum_{d,c} Dist_{dc} \times QDC_{dcvs} + \\ \sum_{d,o} Dist_{do} \times QDO_{dovs} + \\ \sum_{c,g} Dist_{cg} \times QCG_{cgvs} + \\ \sum_{o,g} Dist_{og} \times QOG_{ogvs} + \\ \sum_{g,p} Dist_{gp} \times QGP_{gpvs} + \\ \sum_{g,l} Dist_{gl} \times QGL_{glvs} + \\ \sum_{r,p,m} Dist_{pm} \times QPM_{rpmvs} + \\ \sum_{r,p,l} Dist_{pl} \times QGL_{rplvs} \end{array} \right) - MinEi \right)}{MaxEi - MinEi}\right] \quad (۲)$$

$$+\lambda s \times \left[\frac{MaxSoc - \left(\sum_m \widetilde{JCM}_m \times XM_m + \sum_b \widetilde{JCB}_b \times XB_b + \sum_g \widetilde{JCG}_g \times YG_g + \sum_p \widetilde{JCP}_p \times YP_p\right)}{MaxSoc - MinSoc}\right].$$

$$Minimize\ Z3 = \lambda v \times \left[\frac{MaxI - \sum_{s,i} P_s \times VIS_{is}}{MaxI - MinI}\right] + \lambda c \times \left[\frac{Comp - MinN}{MaxN - MinN}\right]. \quad (۳)$$

$$maximize\ Z4 = \sum_m XM_m \times S_m + \sum_b XB_b \times S_{b.} \quad (۴)$$

در مدل طراحی‌شده، هدف نخست (**معادله (۱)**) کاهش کلیه هزینه‌های زنجیره‌تامین است. این هزینه‌ها شامل خرید مواد اولیه، تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت، کمبود، حمل‌ونقل، هزینه قرارداد با تامین‌کنندگان، ایجاد مراکز جمع‌آوری و بازیافت، ظرفیت‌سازی مازاد در تولید و توزیع و مخارج مربوط به پیاده‌سازی فناوری‌های IoT و سامانه‌های تبادل اطلاعات می‌شود. هدف دوم (**معادله (۲)**) بر کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش

منافع اجتماعی تمرکز دارد. در این تابع، *MaxEi* و *MinEi* به ترتیب نشان‌دهنده کمترین و بیشترین سطح اثرات زیست‌محیطی ممکن هستند. همچنین *MaxSoc* و *MinSoc* محدوده بیشترین و کمترین منافع اجتماعی قابل‌دستیابی را مشخص می‌کنند. در هدف سوم (**معادله (۳)**)، بهبود شفافیت و مشاهده‌پذیری شبکه همراه با کاهش پیچیدگی ساختار زنجیره دنبال می‌شود. مقادیر *MaxV* و *MinV* به‌عنوان سطوح ایده‌آل مثبت و منفی برای بینایی زنجیره تعریف‌شده و *MinNC* و *MaxNC* نیز نمایانگر مقادیر مطلوب و نامطلوب برای شاخص پیچیدگی گره‌ها هستند. در هدف چهارم (**معادله (۴)**)، امتیاز نهایی تامین‌کنندگان که پیش‌تر بر اساس معیارهای پایداری و تاب‌آوری به‌دست‌آمده بیشینه می‌شود.

محدودیت‌های مدل ارایه شده:

$$\left(\sum_{m,v} QMF_{rmfvs} + \sum_{b,v} QBF_{rbfvs}\right) = \sum_{d,v} Cons_r \times QFD_{fdvs}, \qquad \forall s,r,f. \tag{۵}$$

$$\sum_{f,v} QFD_{fdvs} = \left(\sum_{c,v} QDC_{dcvs} + \sum_{o,v} QDO_{dovs}\right), \qquad \forall s,r,d. \tag{۶}$$

$$\sum_{d,v} QDC_{dcvs} + DSH_{ds} \geq \widetilde{Dem}_{cs}, \qquad \forall s,c. \tag{۷}$$

$$\sum_{d,v} QDO_{dovs} + Sho_{os} \geq \widetilde{Dem}_{os}, \qquad \forall s,o. \tag{۸}$$

$$QDO_{dovs} \leq BM.max\left\{0, \frac{Dmax - Dist_{do}}{Dmax}\right\}, \qquad \forall d,o,v,s. \tag{۹}$$

$$\sum_{p,v} QGP_{gpvs} = \sum_{c,o,v} \propto_s \left(QCG_{cgvs} + QOG_{ogvs}\right), \quad \forall s,g. \tag{۱۰}$$

$$\sum_{l,v} QGL_{glvs} = \sum_{c,o,v} (1-\propto_s)(QCG_{cgvs} + QOG_{ogvs}), \qquad \forall s,o. \tag{۱۱}$$

$$\sum_{f,v} QMF_{rmfvs} \leq (1 - CL_{ms}).Cm_{rm}.XM_m, \qquad \forall r,m,s. \tag{۱۲}$$

$$\sum_{f,v} QBF_{rbfvs} \leq Cb_{rb}.XB_b, \qquad \forall r,b,s. \tag{۱۳}$$

$$\sum_{d,v} QFD_{fdvs} \leq \sum_{t} \left(1 - CL_{fs}\right).Cf_f + \left(YF_f \times ECF_f\right), \qquad \forall f,s. \tag{۱۴}$$

$$\sum_{o,c,v} (QDC_{dcvs} + QDO_{dovs}) \leq (1 - CL_{ds}).Cd_d + (YD_d \times ECD_d), \qquad \forall d,s. \tag{۱۵}$$

$$\sum_{c,o,v} (QCG_{cgvs} + QOG_{ogvs}) \leq \left(1 - CL_{gs}\right).Cg_g.YG_g, \qquad \forall g,s. \tag{۱۶}$$

$$\sum_{g,v} QGP_{gpvs} \leq \left(1 - CL_{ps}\right).Cp_p.YP_p, \qquad \forall p,s. \tag{۱۷}$$

$$\frac{\sum_{d,c,v,s} QDC_{dcvs}}{\sum_{c,s} \widetilde{Dem}_{cs}} \geq SLC. \tag{۱۸}$$

$$\frac{\sum_{d,o,v,s} QDO_{dovs}}{\sum_{o,s} \widetilde{Dem}_{os}} \geq SLO. \tag{۱۹}$$

$$\widetilde{LTM}_{mr}.XM_m \leq \widetilde{DT}_r, \qquad \forall m,r. \tag{۲۰}$$

$$\widetilde{LTB}_{br}.XB_b \leq \widetilde{DT}_r, \qquad \forall b,r. \tag{۲۱}$$

$$\sum_{g,v} QCG_{cgvs} = \sum_{d,v} \left((RRC_{cs}.ZIoT.QDC_{dcvs}) + (RRC'_{cs}.(1 - ZIoT).QDC_{dcvs})\right), \quad \forall c,s. \tag{۲۲}$$

$$\sum_{g,v} QOG_{ogvs} = \sum_{d,v} \left((RRC_{os}.ZIoT.QDO_{dovs}) + (RRC'_{cs}.(1-ZIoT)).QDO_{dovs} \right), \qquad \forall o,s. \tag{۲۳}$$

$$\sum_{m,v} QPM_{rpmvs} = \sum_{g,v} (SR_s.ZIoT + SR'_s.(1-ZIoT)).Rec_r.QGP_{gpvs}, \qquad \forall p,r,s. \tag{۲۴}$$

$$\sum_{l,v} QGL_{rglvs} = \sum_{g,v} (1-(SR_s.ZIoT + SR'_s.(1-ZIoT))).Rec_r.QGP_{gpvs}, \qquad \forall p,r,s. \tag{۲۵}$$

$$VIS_{is} = (1-IDR_{is}).INF_{is}.ZI_i, \qquad \forall i,s. \tag{۲۶}$$

$$\sum_{i} ZI_i = 1. \tag{۲۷}$$

$$NC = \sum_{m} XM_m + \sum_{b} XB_b + \sum_{f} XF_f + \sum_{d} XD_d + \sum_{g} YG_g + \sum_{p} YP_p. \tag{۲۸}$$

$$U_{mfv} \le XM_m.A_{mfv}, \qquad \forall m,f,v. \tag{۲۹}$$

$$U_{bfv} \le XB_b.A_{bfv}, \qquad \forall b,f,v. \tag{۳۰}$$

$$U_{fdv} \le XF_f.A_{fdv}, \qquad \forall f,d,v. \tag{۳۱}$$

$$U_{dcv} \le XD_d.A_{dcv}, \qquad \forall d,c,v. \tag{۳۲}$$

$$U_{dov} \le XD_d.A_{dov}, \qquad \forall d,o,v. \tag{۳۳}$$

$$U_{cgv} \le YG_g.A_{cgv}, \qquad \forall c,g,v. \tag{۳۴}$$

$$U_{ogv} \le YG_g.A_{ogv}, \qquad \forall o,g,v. \tag{۳۵}$$

$$U_{gpv} \le YG_g.A_{gpv}, \qquad \forall g,p,v. \tag{۳۶}$$

$$U_{glv} \le YG_g.A_{glv}, \qquad \forall g,l,v. \tag{۳۷}$$

$$U_{pmv} \le YP_p.A_{pmv}, \qquad \forall p,m,v. \tag{۳۸}$$

$$U_{plv} \le YP_p.A_{plv}, \qquad \forall p,l,v. \tag{۳۹}$$

$$XM_m, XB_b, XF_f, XD_d, YG_g, YP_p, ZI_i, ZIOT, U_{ee\acute{v}} \in \{0,1\}.$$

$$QMF_{rmfvs}, QBF_{rbfvs}, QFD_{fdvs}, QDC_{dcvs}, \ldots \ge 0. \tag{۴۰}$$

محدودیت‌های (۸)-(۵) شرایط تعادل جریان در شبکه هستند. **رابطه‌های (۵)** و **(۶)** به ترتیب میزان انتقال مواد اولیه از تامین‌کنندگان اصلی و پشتیبان و حجم محصول جابه‌جاشده از مراکز تولید به مراکز توزیع را مشخص می‌کنند. **محدودیت‌های (۷)** و **(۸)** نیز مقدار کالای تحویلی به نقاط تقاضا اعم از مشتریان حضوری و آنلاین و میزان کمبود احتمالی در این نقاط را تعیین می‌نمایند. علاوه بر این، **رابطه (۹)** تضمین می‌کند که هر مشتری آنلاین تنها از نزدیک‌ترین مرکز توزیعی که در محدوده فاصله مجاز قرار دارد، خدمت دریافت کند. **محدودیت‌های (۱۰)** و **(۱۱)** نیز حجم کالاهای برگشتی از مشتریان آنلاین به مراکز جمع‌آوری و نحوه تخصیص آن‌ها به مراکز بازیافت یا دفن را مشخص می‌سازند. **محدودیت‌های (۱۷)-(۱۲)** ظرفیت عملیاتی تسهیلات مختلف زنجیره‌تامین را مدل‌سازی می‌کنند. **رابطه‌های (۱۲)** و **(۱۳)** ظرفیت تامین‌کنندگان اصلی و پشتیبان را پوشش می‌دهند؛ **معادله (۱۴)** محدودیت ظرفیت تولیدی کارخانه‌جات را نشان می‌دهد؛ **رابطه (۱۵)** ظرفیت مراکز توزیع را مشخص می‌کند؛ و **محدودیت‌های (۱۶)** و **(۱۷)** به ترتیب ظرفیت مراکز جمع‌آوری و بازیافت را لحاظ می‌نمایند. **رابطه‌های (۱۸)** و **(۱۹)** سطح حداقلی خدمت‌رسانی مورد انتظار در نقاط تقاضا را تضمین می‌کنند. **محدودیت‌های (۲۰)** و **(۲۱)** نیز زمان تحویل مواد اولیه از تامین‌کنندگان اصلی و پشتیبان را تعیین می‌نمایند. در بخش مرتبط با اینترنت اشیا، **محدودیت‌های (۲۵)-(۲۲)** نقش فناوری‌های هوشمند را در فرآیندهای بازگشت و بازیافت منعکس می‌کنند. به‌طور مشخص، **رابطه‌های (۲۲)** و **(۲۳)** میزان محصولات برگشتی از مشتریان حضوری و آنلاین را با توجه به به‌کارگیری *IoT* برآورد می‌کنند؛ **معادله (۲۴)** مقدار مواد بازیافتی قابل‌فروش به تامین‌کنندگان را نشان می‌دهد؛ و **رابطه (۲۵)** حجم مواد غیرقابل بازیافت ارسال‌شده به مراکز امحا را تعیین می‌نماید. در ادامه، **رابطه (۲۶)** شاخص پیچیدگی گره‌های شبکه را به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی تاب‌آوری محاسبه می‌کند. **معادله (۲۷)** سطح دید پذیری و شفافیت اطلاعاتی ناشی از سامانه اشتراک‌گذاری داده‌ها را نشان می‌دهد و **رابطه (۲۸)** وجود یک بستر ارتباطی مشترک در شبکه را الزام می‌کند. **محدودیت‌های (۳۹) -(۲۹)** نیز تصریح می‌کنند که جابه‌جایی مواد تنها زمانی امکان‌پذیر است که وسیله نقلیه v برای مسیر مربوطه انتخاب شده باشد. درنهایت، **محدودیت‌های (۴۰)** و **(۴۱)** نوع و دامنه متغیرهای تصمیم‌گیری را تعیین می‌کنند.

۳-۵- روش بهینه‌سازی استوار فازی-تصادفی

عدم قطعیت یکی از چالش‌های اساسی در محیط‌های رقابتی امروزی است و نادیده گرفتن آن در فرایند برنامه‌ریزی می‌تواند به پیش‌بینی‌های غیرواقعی و درنهایت پیامدهای مالی و عملیاتی قابل‌توجهی منجر شود. تجربه همه‌گیری ویروس کرونا نمونه‌ای روشن از این واقعیت است؛ بحرانی که با ایجاد اختلالات گسترده در زنجیره‌های‌تامین، سطح بی‌سابقه‌ای از ناپایداری را بر سازمان‌ها تحمیل کرد و ضرورت توجه به عدم‌قطعیت‌های ترکیبی را بیش‌ازپیش آشکار ساخت. بر همین اساس، در این پژوهش مساله موردبررسی در چارچوبی فازی-تصادفی مدل‌سازی شده تا شرایط واقعی‌تر و نوسانات محیطی به‌طور دقیق‌تری بازتاب یابد. برای مدیریت این وضعیت، از رویکرد برنامه‌ریزی استوار فازی-تصادفی استفاده شده است؛ رویکردی که در ادبیات علمی به دلیل توانایی بالا در برخورد با مسایل پیچیده و ریسک‌پذیر موردتوجه قرار دارد [36–34]. توضیحات کامل مربوط به این روش و نسخه متناسب‌سازی‌شده آن برای مدل پیشنهادی در بخش پیوست ارایه شده است.

۳-۶- روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده لکسیکوگرافیک چبی‌شف

در این پژوهش از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده لکسیکوگرافیک-چبی‌شف بهره گرفته شده است. انتخاب این روش به دلیل مزیت‌های آن نسبت به نسخه‌های کلاسیک برنامه‌ریزی آرمانی است. این رویکرد علاوه بر امکان تعریف چندین نقطه آرمانی، کاهش پیچیدگی محاسباتی و لحاظ وزن‌های متفاوت برای اهداف، توانایی ادغام هم‌زمان دو مفهوم کلیدی کارایی و برابری را فراهم می‌سازد. بدین ترتیب، ضمن کاهش مجموع انحرافات، از تمرکز بیش‌ازاندازه بر یک هدف و بی‌توجهی به سایر اهداف جلوگیری می‌شود. استفاده از معیار چبی‌شف نیز باعث می‌شود تعادل بین انحرافات اهداف مختلف حداکثر گردد و ساختار لکسیکوگرافیک این امکان را ایجاد می‌کند که میان جنبه‌های کارایی و برابری اولویت‌بندی مناسبی برقرار شود. درمجموع، روش *LCRMCGP* نسبت به سایر نسخه‌های برنامه‌ریزی آرمانی، چارچوبی جامع‌تر، منعطف‌تر و مناسب برای حل مسایل چندهدفه تحت عدم قطعیت ارایه می‌دهد و می‌تواند مدیران را در دستیابی به راه‌حل‌های باثبات و منسجم یاری کند [28]، [37]، [38]. توضیحات کامل این مدل در فایل پیوست ارایه شده است.

۴- نتایج عددی

۴-۱- مطالعه موردی

بررسی زنجیره‌تامین در صنعت تجهیزات پزشکی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این صنعت مستقیما بر عملکرد نظام سلامت اثر می‌گذارد و هرگونه اختلال در آن می‌تواند به کمبود تجهیزات حیاتی و تهدید ایمنی بیماران منجر شود. حساسیت بالای محصولات، نوسان تقاضا، ضرورت رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه و تجربه بحران‌هایی مانند کووید-۱۹ همگی نشان می‌دهد که مدیریت اثربخش، تاب‌آور و هماهنگ زنجیره‌تامین در این حوزه ضروری است. در همین راستا، پژوهش حاضر به بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تامین حلقه بسته بادوام تحت عدم قطعیت در شرکت "ابتکار تجهیز طب یکتا" می‌پردازد. این شرکت علاوه بر تولید تجهیزات پزشکی و آزمایشگاهی، خدمات تعمیر و نگهداری را نیز ارایه می‌دهد. معیارها و زیرمعیارهای مورداستفاده در این تحقیق از سه منبع اصلی استخراج شده‌اند:

۱. ادبیات علمی مرتبط با زنجیره‌تامین بادوام و حلقه بسته که معیارهای کلیدی مانند هزینه، کیفیت، مدیریت ضایعات و تاب‌آوری را مشخص می‌سازد.
۲. نظرات متخصصان صنعت تجهیزات پزشکی که از طریق مصاحبه‌های ساختاریافته گردآوری‌شده و در تطبیق معیارها با ویژگی‌های واقعی صنعت نقش اساسی داشته است.
۳. الزامات عملیاتی ناشی از عدم قطعیت ترکیبی که ضرورت توجه به حوزه‌هایی مانند انعطاف‌پذیری تولید، موجودی‌های استراتژیک، امنیت اطلاعات و بلوغ دیجیتال را آشکار می‌کند. درنتیجه، مجموعه نهایی معیارها شامل پنج بعد اصلی و زیرمعیارهای وابسته است که هماهنگ با اهداف زنجیره‌تامین بادوام و اقتضائات صنعت تجهیزات پزشکی در **جدول‌های ۷-۳** ارایه شده‌اند.

جدول ۲- اطلاعات کارشناسان.

Table 2- Expert information.

رده‌بندی شغلی	سابقه کاری	تحصیلات
مدیر تولید	7	دکتری مدیریت صنعتی
کارشناس تحقیق و توسعه	11	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع
مدیریت لجستیک	5	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

جدول ۳- زیرمعیارهای عمومی.

Table 3- General sub-criteria.

معیار	تعریف
هزینه	مجموع مخارج مرتبط با فعالیت‌های زنجیره‌تامین
کیفیت	میزان تطابق محصول با استانداردها و الزامات مشتری
زمان تحویل	مدت‌زمان چرخه سفارش تا تحویل
سطح سرویس	توان پشتیبانی و پاسخگویی تامین‌کننده پس از تحویل

جدول ۴- زیرمعیارهای پایداری.

Table 4- Sustainability sub-criteria.

معیار	تعریف
مدیریت پسماند	اثربخشی برنامه‌های کاهش، بازیافت و استفاده مجدد از پسماند
قابلیت اطمینان مالی	ظرفیت مالی تامین‌کننده در شرایط بحرانی
ایمنی و سلامت کارکنان	میزان رعایت استانداردهای ایمنی و حفاظت از کارکنان.
طراحی سبز	استفاده از طراحی‌ها و فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست.
حقوق و شرایط کاری منصفانه	رعایت حقوق کارکنان، استانداردهای کاری و شرایط منصفانه

جدول ۵- زیرمعیارهای تاب‌آوری.

Table 5- Resilience sub-criteria.

شاخص	تعریف
مدیریت ریسک	توانایی شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌های عملیاتی و محیطی
تامین کنندگان پشتیبان	قابلیت ایجاد و حفظ همکاری با منابع تامین جایگزین
ذخایر استراتژیک	میزان ذخایر استراتژیک در شرایط اضطراری
اشتراک اطلاعات	فرآیند شناسایی، ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان برای تامین مواد اولیه یا کالاها
	برقراری ارتباط میزان تبادل موثر داده و هماهنگی با سایر اعضای زنجیره
استواری	توان عملیاتی تامین‌کننده در حفظ عملکرد پس از بروز اختلال

جدول ۶- زیرمعیارهای چابکی.

Table 6- Agile sub-criteria.

شاخص	تعریف
انعطاف‌پذیری در تولید	توان تغییر سریع در حجم یا ترکیب تولید
انعطاف در ارایه خدمات	قابلیت تعدیل قیمت و ارایه امتیازهای ویژه
اعتمادسازی	ایجاد رابطه پایدار و قابل‌اعتماد با خریدار
سرعت پاسخگویی	واکنش سریع به تغییرات بازار یا تقاضا
انعطاف‌پذیری در تولید	استفاده از ظرفیت‌های چندمنظوره در زمان اختلال

جدول ۷- زیرمعیارهای دیجیتال‌سازی.
Table 7- Digitalization sub-criteria.

شاخص	تعریف
شایستگی دیجیتال	توان استفاده موثر از فناوری‌های نوین برای بهبود عملکرد
سازگاری فناوری و کارکرد	میزان هماهنگی سیستم‌های فناوری با فرآیندهای عملیاتی زنجیره
امنیت سایبری	قابلیت حفاظت از داده‌ها و زیرساخت‌های اطلاعاتی در برابر تهدیدات
انبارداری هوشمند	به‌کارگیری ابزارهای دیجیتال برای مدیریت بهینه موجودی و ردیابی کالا
روابط دیجیتال	استفاده از پلتفرم‌های دیجیتال برای تقویت ارتباط و تبادل اطلاعات در زنجیره‌تامین

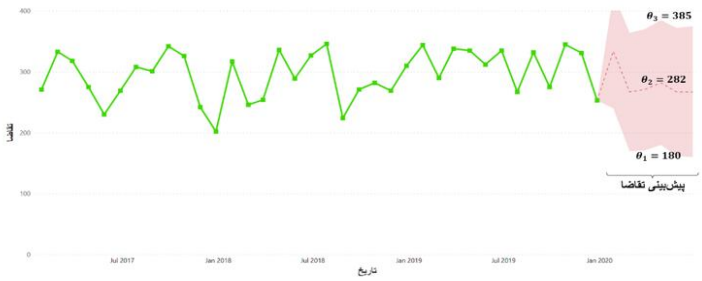
۲-۴- نتایج پیش‌بینی تقاضا

در این بخش، نتایج حاصل از پیش‌بینی پارامتر تقاضا با استفاده از مدل *SARIMA* ارایه می‌شود. کلیه برآوردها در نرم‌افزار *Eviews* و در قالب سه سناریوی متفاوت انجام شده است:

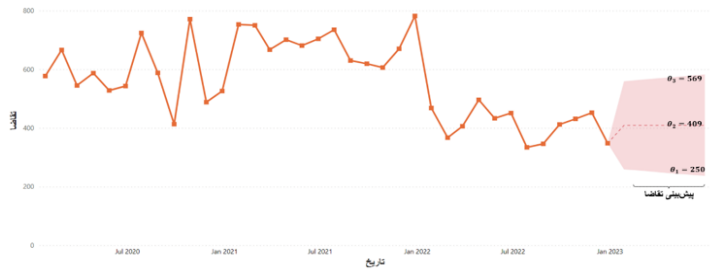
۱. سناریوی بدبینانه: برای بازنمایی شرایط کاهش تقاضا، داده‌های تاریخی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴ مورد تحلیل قرار گرفت و مقدار فازی تقاضا در این وضعیت استخراج شد.
۲. سناریوی محتمل: وضعیت عادی و نرمال بازار به‌عنوان سناریوی پایه در نظر گرفته شد. بدین منظور، داده‌های سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ مبنای پیش‌بینی قرار گرفت و مقدار فازی تقاضا در حالت متعارف برآورد گردید.
۳. سناریوی خوش‌بینانه: به‌منظور مدل‌سازی حالت اوج تقاضا، اطلاعات سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ تحلیل شد و مقدار فازی تقاضا در شرایط افزایش شدید تقاضا تعیین گردید.

شکل‌های ۳-۱ نتایج پیش‌بینی فازی تقاضا را در هر یک از سناریوهای فوق نمایش می‌دهند.

شکل ۱- پیش‌بینی فازی تقاضا در سناریو بدبینانه.
Figure 1- Fuzzy demand forecasting under pessimistic scenario.



شکل ۲- پیش‌بینی فازی تقاضا در سناریو محتمل.
Figure 2- Fuzzy demand forecasting under most-likely scenarios.



شکل ۳- پیش‌بینی فازی تقاضا در سناریو خوش‌بینانه.
Figure 3- Fuzzy demand forecasting under optimistic scenario.

۳-۴- نتایج روش بهترین-بدترین تصادفی

برای در این مرحله از پژوهش، داده‌ها از طریق یک پرسشنامه تخصصی گردآوری شد که امکان انجام مقایسات زوجی میان معیارها و زیرمعیارهای مطالعه را فراهم می‌کرد و بازتاب‌دهنده ارزیابی‌های واقعی خبرگان بود. پاسخ‌دهندگان شامل مدیران و متخصصان باتجربه شرکت موردبررسی بودند که شناخت دقیقی از عملکرد زنجیره‌تامین داشتند. پس از جمع‌آوری پرسشنامه‌ها، داده‌ها تجمیع و میانگین نظرات خبرگان محاسبه شد تا بردارهای نهایی وزن‌ها برای ورود به مدل تصمیم‌گیری استخراج گردد. به‌منظور لحاظ کردن نوسانات محیطی، سه سناریوی خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه تعریف شد که به ترتیب بیانگر شرایط رونق، ثبات نسبی و وضعیت بحرانی بازار هستند. احتمال وقوع هر یک از این سناریوها با اتکا به قضاوت خبرگان تعیین و در تحلیل‌های بعدی اعمال گردید.

نتایج حاصل از روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی نشان داد که تاب‌آوری با وزن ۰/۲۱۶ بیشترین اهمیت را در میان معیارها دارد و بیانگر نقش کلیدی آن در حفظ تداوم عملکرد زنجیره‌تامین در شرایط اختلال است. در میان زیرمعیارهای این بعد، تامین‌کنندگان پشتیبان با وزن ۰/۰۴۵۷۹ بالاترین اولویت را به خود اختصاص داد و اهمیت وجود منابع جایگزین برای پوشش اختلالات احتمالی را برجسته نمود. همچنین زیرمعیارهای اشتراک اطلاعات و ذخایر استراتژیک به ترتیب با وزن‌های ۰/۰۴۳۸۴ و ۰/۰۴۲۷۶ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند که ضرورت ارتقای هماهنگی و آمادگی عملیاتی را تایید می‌کنند. پایداری با وزن ۰/۲۰۴ در جایگاه دوم قرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که زیرمعیار مدیریت ضایعات بیشترین سهم را در این بعد دارد و اهمیت توجه به پیامدهای زیست‌محیطی را نمایان می‌سازد، درحالی‌که حقوق و شرایط کاری منصفانه نیز به‌عنوان یکی از شاخص‌های برجسته اجتماعی شناسایی شد. سایر ابعاد شامل معیارهای عمومی، چابکی و دیجیتال‌سازی به ترتیب با وزن‌های ۰/۲۰۱، ۰/۱۹۴ و ۰/۱۸۵ در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. در معیار عمومی، کاهش هزینه‌ها مهم‌ترین زیرمعیار است. در بعد چابکی، زیرمعیارهای انعطاف در ارایه خدمات و سرعت پاسخگویی بالاترین وزن را دارند که بیانگر ضرورت واکنش سریع و سازگار با نوسانات تقاضاست. درنهایت، در حوزه دیجیتال‌سازی، سازگاری فناوری مهم‌ترین شاخص تشخیص داده شد و تاکید دارد که هم‌راستاسازی فناوری‌های نوین با فرآیندهای عملیاتی، پیش‌شرط اصلی موفقیت دیجیتال‌سازی در زنجیره‌تامین است.

برآیند نتایج نشان می‌دهد که تقویت تاب‌آوری و پایداری، همراه با ارتقای چابکی، کارایی اقتصادی و بلوغ دیجیتال، می‌تواند نقش بسزایی در افزایش انسجام، کارایی و اثربخشی شبکه زنجیره‌تامین تحت شرایط عدم قطعیت ایفا کند.

جدول ۸- وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها.
Table 8- Final weight of criteria and sub-criteria.

معیار	وزن معیار	زیر معیار	وزن اولیه معیار	وزن نهایی
عمومی	0.201	کاهش هزینه	0.221	0.04446
		سطح کیفیت	0. 201	0.0404
		زمان تحویل	0.195	0.03919
		سطح سرویس	0.191	0.03839
		گردش کار	0.192	0.03859

جدول ۸- ادامه.
Table 8- Continued.

معیار	وزن معیار	زیر معیار	وزن اولیه معیار	وزن نهایی
پایداری	0.204	مدیریت ضایعات	0.218	0.0444
		ثبات و قابلیت اطمینان مالی	0.191	0.03896
		ایمنی و سلامت کارکنان	0.194	0.03957
		طراحی سبز	0.188	0.03835
		حقوق و شرایط کاری منصفانه	0.209	0.0426
تاب‌آوری	0.216	مدیریت ریسک	0.194	0.0419
		تامین کنندگان پشتیبان	0.212	0.04579
		ذخایر استراتژیک	0.198	0.04276
		اشتراک اطلاعات	0.203	0.04384
		استواری	0.193	0.04168
چابکی	0.194	انعطاف‌پذیری در تولید	0.199	0.0386
		انعطاف در ارایه خدمات	0.215	0.04171
		اعتمادسازی	0.185	0.03589
		سرعت پاسخگویی	0.208	0.0403
		انعطاف‌پذیری در منابع اولیه	0.192	0.03744
دیجیتال‌سازی	0.185	شایستگی دیجیتال	0.0196	0.03626
		سازگاری فناوری و کارکرد	0.211	0.03903
		امنیت سایبری	0.195	0.03607
		انبارداری هوشمند	0.189	0.03496
		روابط دیجیتال	0.209	0.03866

۴-۴- نتایج روش تاپسیس فازی تصادفی

در راستای چارچوب پژوهش، در این بخش ابتدا فهرستی از تامین‌کنندگان بالقوه شرکت گردآوری شد. پس از شناسایی این مجموعه، عملکرد هر یک از آن‌ها بر اساس معیارهای استخراج‌شده از مساله تحقیق و با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس فازی-تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف این مرحله، تعیین اولویت تامین‌کنندگان و معرفی گزینه‌های برتر جهت پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های راهبردی در مدیریت زنجیره‌تامین است.

خروجی این تحلیل در قالب رتبه نهایی تامین‌کنندگان و در دو گروه "تامین‌کنندگان اصلی" و "تامین‌کنندگان پشتیبان" در **جدول ۹** نمایش داده‌شده است. مطابق نتایج، در میان تامین‌کنندگان اصلی، تامین‌کننده شماره ۲ با کسب مقدار شاخص ۰/۵ بالاترین عملکرد را داشته و در رتبه نخست قرار گرفته است؛ در مقابل، تامین‌کننده شماره ۳ با مقدار ۰/۳ کمترین امتیاز را به دست آورده است. در گروه تامین‌کنندگان پشتیبان نیز، تامین‌کننده شماره ۳ به‌عنوان گزینه اول شناسایی شد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر آن نسبت به سایر گزینه‌های این دسته است.

جدول ۹- شاخص تاپسیس و رتبه تامین کنندگان.
Table 9- The TOPSIS Index and Supplier Ranking.

تامین‌کننده	C_i	رتبه
اصلی اول	0.48	2
اصلی دوم	0.5	1
اصلی سوم	0.3	4
اصلی چهارم	0.43	3
پشتیبان اول	0.49	2
پشتیبان دوم	0.38	3
پشتیبان سوم	0.62	1

۵-۴- نتایج حل مدل ریاضی

در این پژوهش، شبکه زنجیره‌تامین شرکت ابتکار تجهیز طب یکتا به‌عنوان مطالعه موردی بررسی شده است. اطلاعات موردنیاز از سه منبع شامل داده‌های عملیاتی شرکت، مرور ادبیات و نظرات خبرگان گردآوری شد. مقادیری مانند تقاضا، مواد اولیه و هزینه‌های تولید از طریق متخصصان شرکت تعیین گردید، درحالی‌که شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و نرخ اختلالات با اتکا به مطالعات پیشین برآورد شد.

برای مواجهه با عدم قطعیت، سه سناریوی بدبینانه، محتمل و خوش‌بینانه با احتمالات وقوع ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۲۵ تدوین شد. در مدل، سه شیوه حمل‌ونقل (کامیون، هواپیما، راه‌آهن) و دو نوع سامانه تبادل اطلاعات ساختار سنتی و سیستم مبتنی بر بلاک‌چین در نظر گرفته شده است که گزینه دوم علیرغم هزینه بیشتر، از شفافیت و امنیت بالاتری برخوردار است. حل مدل چندهدفه با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده لکسیکوگراف چبیشف انجام شد. وزن‌های اهداف بر اساس نظر کارشناسان به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۲، ۰/۲ و ۰/۲۵ تعیین گردید. برای استخراج حدود آرمانی، مجموعه‌ای از هشت زیرمساله حل شد. نتایج نهایی (**جدول ۱۱**) نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف اقتصادی ۳۰۵۸۲۴ میلیون تومان، مقدار تابع هدف زیست‌محیطی-اجتماعی ۰/۵۳۸۹۱، شاخص بینایی و پیچیدگی ۰/۳۸۱۴۸ و امتیاز تامین‌کنندگان ۱/۲۵۱۳ است. راه‌حل بهینه انتخاب تامین‌کنندگان اصلی اول، دوم و چهارم و تامین‌کننده پشتیبان دوم را نشان می‌دهد. همچنین، مراکز جمع‌آوری اول و سوم و مراکز بازیافت دوم و سوم به‌عنوان تسهیلات بهینه تعیین شده‌اند. علاوه بر این، ایجاد ظرفیت مازاد در دو مرکز تولید و یک مرکز توزیع ضروری تشخیص داده شده است. درنهایت، سیستم بلاک‌چین به‌عنوان گزینه برتر برای اشتراک‌گذاری اطلاعات انتخاب شد.

جدول ۱۰- ابعاد مساله تحقیق.

Table 10- Dimensions of the research problem.

تسهیل	تعداد
تامین‌کنندگان اصلی	4
تامین‌کنندگان پشتیبان	3
مراکز بالقوه تولید	3
مراکز بالقوه بازیابی	3
نقاط تقاضا	8
مشتریان آنلاین	8

جدول ۱۱- نتایج حل مدل ریاضی.

Table 11- Results of solving the mathematical model.

متغیر تصمیم	مقدار
تابع هدف اول	305824
تابع هدف دوم کمینه	0.03891
تابع هدف سوم بینایی	0.38148
تابع هدف چهارم امتیاز	1.2513
تامین کنندگان اصلی اول، دوم و چهارم	1
تامین کننده پشتیبان دوم	1
مراکز تولیدی اول و دوم	1
مراکز توزیع دوم	1
مرکز جمع‌آوری اول و سوم	1
مرکز بازیافت دوم و سوم	1
سیستم اشتراک‌گذاری اطلاعات نوع دوم	1

۵- بررسی کارایی مدل تصمیم‌گیری ارایه شده

در این بخش، عملکرد مدل تصمیم‌گیری پیشنهادی با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از شاخص‌های ارزیابی و از طریق مقایسه با روش‌های جایگزین موردسنجش قرار می‌گیرد. لازم به تاکید است که یافته‌های ارایه‌شده مبتنی بر مطالعه موردی پژوهش حاضر هستند و تعمیم آن‌ها به سایر شرایط یا صنایع نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

۵-۱- کارایی روش بهترین-بدترین فازی تصادفی

در این بخش، عملکرد روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی با سه رویکرد مرجع بهترین-بدترین کلاسیک، بهترین-بدترین فازی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مقایسه شده است. برای این ارزیابی از دو شاخص "نرخ ناسازگاری" و "انحراف کل" استفاده گردید. نرخ ناسازگاری میزان هماهنگی قضاوت‌های زوجی را نشان می‌دهد و مقدار کمتر آن به معنای انسجام بیشتر در ارزیابی‌هاست. در مقابل، انحراف کل فاصله میان وزن‌های به‌دست‌آمده و مقادیر مقایسات زوجی را بیان می‌کند و کاهش آن نشان‌دهنده دقت بالاتر روش است.

بر اساس نتایج **جدول ۱۲**، روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی در شاخص انحراف کل عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. هرچند دو نسخه کلاسیک و فازی در نرخ ناسازگاری اندکی مناسب‌تر ظاهر شده‌اند، اما در مقایسه با فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، رویکرد پیشنهادی از برتری آشکاری برخوردار است. درمجموع، این یافته‌ها مؤید آن است که روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی گزینه‌ای معتبر و کارآمد برای تحلیل چندمعیاره تحت عدم قطعیت محسوب می‌شود.

جدول ۱۲- نرخ ناسازگاری و انحراف کل.
Table 12- Inconsistency Rate and Total Deviation.

معیار	بهترین-بدترین فازی تصادفی		بهترین بدترین سنتی		بهترین بدترین فازی		سلسله مراتبی فازی	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
نرخ ناسازگاری	0.047235	0.01732	0.044516	0.0813824	0.046912	0.01934	0.08038	0.02618
انحراف کل	1.614	0.4167	1.7251	2.1174	1.9893	0.3517	2.2172	0.8241

۵-۲- کارایی روش تاپسیس فازی-تصادفی

برای ارزیابی دقت و کارایی روش تاپسیس فازی-تصادفی، نتایج آن با خروجی چند رویکرد پرکاربرد در ادبیات، شامل تاپسیس فازی، ویکور فازی و ویکور تصادفی، مقایسه شد. در این بررسی تطبیقی، عملکرد تامین‌کنندگان با استفاده از هر یک از روش‌ها محاسبه و رتبه‌بندی گردید و خلاصه نتایج در **جدول ۱۳** ارایه شده است. بررسی رتبه‌ها نشان می‌دهد که جایگاه تامین‌کنندگان در رتبه‌های اول و دوم در تمامی روش‌ها ثابت بوده است. این هم‌گرایی در نتایج، کارآمدی و سازگاری روش پیشنهادی با سایر رویکردهای معتبر را تایید کرده و نشان می‌دهد مدل توسعه‌یافته از قابلیت اطمینان و استحکام مناسبی برخوردار است.

جدول ۱۳- رتبه تامین‌کنندگان.
Table 13- Supplier ranking.

تامین‌کننده	رتبه			
	تاپسیس فازی تصادفی	تاپسیس تصادفی	تاپسیس فازی	ویکور تصادفی
اصلی اول	2	2	1	2
اصلی دوم	2	1	2	1
اصلی سوم	4	3	4	3
اصلی چهارم	3	4	3	4

۳-۵- کارایی روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده لکسیکوگراف چبیشف

با توجه به به‌کارگیری یک نسخه ارتقایافته از برنامه‌ریزی آرمانی در این پژوهش، ارزیابی عملکرد آن در مقایسه با رویکردهای متداول ضروری بود. بدین منظور، روش پیشنهادی با دو تکنیک رایج برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای و نسخه اصلاح‌شده آن بر اساس شاخص "انحرافات" مقایسه شد؛ معیاری که توان هر روش را در دستیابی به اهداف و کاهش فاصله میان مقادیر واقعی و آرمانی نشان می‌دهد. نتایج **جدول ۱۴** بیانگر آن است که رویکرد پیشنهادی در تمامی شاخص‌ها عملکرد برتری داشته و توانسته است میزان انحرافات را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهد. این امر کارایی و قابلیت اتکای بالاتر روش جدید را در حل مسایل چندهدفه تحت عدم قطعیت تایید می‌کند.

جدول ۱۴- مقدار انحرافات در نسخه‌های مختلف از برنامه‌ریزی ارمانی.

Table 14- The values of deviation in the different defuzzification methods.

انحرافات	برنامه‌ریزی آرمانی وزنی	برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده	برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده با تابع مطلوبیت
(d_1^+, d_1^-)	(143.5,0)	(16.1,0)	(0,0)
(d_2^+, d_2^-)	(6.9,0)	(5.4,0)	(0,0)
(d_3^+, d_3^-)	(0.321,0)	(0,0)	(0,0)
(d_4^+, d_4^-)	(22.8,0)	(0,0)	(0,0)
(e_1^+, e_1^-)	-	(198.5,0)	(189.7,0)
(e_2^+, e_2^-)	-	(0.117,0)	(0.94,0)
(e_3^+, e_3^-)	-	(0.183,0)	(0.119,0)
(e_5^+, e_5^-)	-	(0,0.325)	(0,0.29)

نتایج مقایسه‌ای انجام‌شده میان مدل پیشنهادی و روش‌های مرجع موجود در ادبیات نشان می‌دهد که چارچوب ارایه‌شده در این پژوهش ازنظر کیفیت تصمیم‌گیری و پایداری نتایج عملکرد مطلوب‌تری دارد. در بخش وزن‌دهی معیارها، روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی توانست مقدار انحراف کل را نسبت به روش‌های کلاسیک و فازی کاهش دهد که بیانگر افزایش دقت و انسجام در ارزیابی معیارهاست. همچنین در بخش رتبه‌بندی تامین‌کنندگان، نتایج روش تاپسیس فازی-تصادفی با سایر روش‌های معتبر هم‌گرایی قابل‌قبولی داشت که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد و پایداری مدل پیشنهادی است. علاوه بر این، در بخش حل مدل چندهدفه، روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده لکسیکوگراف-چبی‌شف توانست میزان انحراف از اهداف را نسبت به نسخه‌های متداول برنامه‌ریزی آرمانی به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. این موضوع نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در دستیابی هم‌زمان به اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و تاب‌آوری عملکرد موثرتری دارد و می‌تواند تصمیمات پایدارتر و واقع‌بینانه‌تری را در محیط‌های همراه با عدم قطعیت ارایه کند. درمجموع، نتایج حاصل از تحلیل‌های مقایسه‌ای بیانگر آن است که چارچوب پیشنهادی نه‌تنها از منظر نظری دارای جامعیت بیشتری نسبت به مطالعات پیشین است، بلکه ازنظر عملکرد تصمیم‌گیری نیز اثربخشی بالاتری در طراحی شبکه‌های زنجیره‌تامین بادوام ارایه می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در نتایج عددی مدل نشان داد که در میان ابعاد زنجیره‌تامین بادوام، تاب‌آوری با وزن ۰/۲۱۶ بالاترین اهمیت را داشته و معیار "تامین‌کنندگان پشتیبان" مهم‌ترین زیرمعیار تصمیم‌گیری شناخته شد؛ موضوعی که بیانگر ضرورت توسعه منابع جایگزین تامین در شرایط اختلال است. همچنین، در بعد پایداری، معیار مدیریت ضایعات بیشترین تاثیر را بر عملکرد شبکه داشت که اهمیت توجه به بازیافت و اقتصاد چرخشی را در صنعت تجهیزات پزشکی تایید می‌کند.

خروجی مدل بهینه‌سازی نشان داد که انتخاب تامین‌کنندگان اصلی اول، دوم و چهارم و همچنین تامین‌کننده پشتیبان دوم، بهترین عملکرد را از منظر اقتصادی، زیست‌محیطی و تاب‌آوری فراهم می‌کند. افزون بر این، ایجاد مراکز جمع‌آوری اول و سوم و مراکز بازیافت دوم و سوم موجب بهبود جریان معکوس محصولات و افزایش کارایی فرآیند بازیافت شد.

نتایج همچنین نشان داد که استفاده از سامانه اشتراک‌گذاری اطلاعات مبتنی بر بلاک‌چین نسبت به ساختار سنتی، اگرچه هزینه اولیه بیشتری ایجاد می‌کند، اما با افزایش شفافیت اطلاعات، کاهش اختلال داده‌ها و بهبود هماهنگی میان اعضای زنجیره، عملکرد کلی شبکه را بهبود می‌بخشد. علاوه

بر این، بهره‌گیری از فناوری اینترنت اشیا منجر به افزایش نرخ بازگشت محصولات، کاهش هزینه‌های جمع‌آوری و بازیافت و ارتقای قابلیت ردیابی در شبکه شد. از منظر مدیریتی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که سازمان‌ها برای افزایش دوام زنجیره‌تامین خود نباید صرفا بر کاهش هزینه تمرکز کنند، بلکه لازم است ابعاد تاب‌آوری، چابکی، پایداری و بلوغ دیجیتال را به‌صورت هم‌زمان در تصمیم‌گیری‌های راهبردی لحاظ نمایند. این موضوع به‌ویژه در صنایع حساس مانند تجهیزات پزشکی که اختلالات زنجیره‌تامین می‌تواند پیامدهای مستقیم بر سلامت جامعه داشته باشد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

۱-۶- پیشنهادهای مدیریتی

یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند راهنمای عملی ارزشمندی برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوزه زنجیره‌تامین، به‌ویژه در صنایع حساس مانند تجهیزات پزشکی، فراهم آورد. بر اساس نتایج مدل و تحلیل‌های انجام‌شده، مهم‌ترین پیشنهادهای مدیریتی عبارت‌اند از:

۱. تمرکز بر انتخاب تامین‌کنندگان تاب‌آور و چند منبعی: نتایج نشان داد که معیار تاب‌آوری و وجود تامین‌کنندگان پشتیبان از مهم‌ترین عوامل موفقیت شبکه تامین در شرایط اختلال است؛ بنابراین، مدیران باید از وابستگی به یک منبع تامین اجتناب کرده و استراتژی چندتامین‌کنندگی و توسعه منابع جایگزین را در اولویت قرار دهند.

۲. توسعه زیرساخت‌های دیجیتال و سامانه‌های اشتراک اطلاعات: بر اساس خروجی مدل، استفاده از سامانه‌های مبتنی بر بلاک‌چین موجب افزایش شفافیت، امنیت اطلاعات و هماهنگی میان اعضای زنجیره‌تامین می‌شود. ازاین‌رو، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال و توسعه بسترهای تبادل داده می‌تواند ریسک اختلالات اطلاعاتی و عملیاتی را کاهش دهد.

۳. بهره‌گیری از فناوری اینترنت اشیا در لجستیک معکوس: نتایج نشان داد که فناوری اینترنت اشیا موجب افزایش نرخ بازگشت محصولات، بهبود قابلیت ردیابی و کاهش هزینه‌های جمع‌آوری و بازیافت می‌شود؛ بنابراین، سازمان‌ها می‌توانند با پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند، کارایی زنجیره‌تامین حلقه بسته را ارتقا دهند.

۴. ایجاد ظرفیت‌های انعطاف‌پذیر و ذخایر استراتژیک: با توجه به نقش اختلالات محیطی در عملکرد شبکه، ایجاد ظرفیت مازاد در مراکز تولید و توزیع و همچنین نگهداری ذخایر استراتژیک می‌تواند انعطاف‌پذیری و توان پاسخگویی سازمان را در شرایط بحرانی افزایش دهد.

۵. توجه هم‌زمان به ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی: یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر کاهش هزینه‌ها نمی‌تواند عملکرد بلندمدت شبکه را تضمین کند. مدیران باید ابعاد پایداری، کاهش آلاینده‌ها، مدیریت پسماند و مسئولیت اجتماعی را در کنار اهداف اقتصادی در تصمیم‌گیری‌های خود لحاظ نمایند.

۶. استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری داده محور در برنامه‌ریزی زنجیره‌تامین: ترکیب روش‌های پیش‌بینی تقاضا، تصمیم‌گیری چندمعیاره و بهینه‌سازی استوار در این پژوهش نشان داد که رویکردهای داده‌محور می‌توانند کیفیت تصمیم‌گیری مدیران را در محیط‌های پرنوسان و همراه با عدم قطعیت بهبود دهند. ازاین‌رو، استفاده از مدل‌های تحلیلی و هوشمند در برنامه‌ریزی راهبردی زنجیره‌تامین توصیه می‌شود.

۷- محدودیت‌های تحقیق و پیشنهادهای آتی

این پژوهش، همانند بسیاری از مطالعات کاربردی، با مجموعه‌ای از محدودیت‌ها همراه است که می‌تواند مسیر مطالعات آینده را روشن سازد. نخست آنکه تحلیل تجربی این تحقیق بر یک شرکت فعال در حوزه تجهیزات پزشکی متمرکز بوده است؛ بنابراین، تعمیم مستقیم نتایج به سایر صنایع یا بخش‌های تولیدی باید با احتیاط انجام گیرد. هرچند انتخاب این صنعت به دلیل حساسیت بالا، نوسانات قابل‌توجه تقاضا و الزامات کیفی سخت‌گیرانه صورت گرفته است، آزمون مدل در محیط‌های صنعتی متنوع می‌تواند اعتبار بیرونی آن را تقویت کند.

دوم، مدل تنها از اعداد فازی مثلثی برای نمایش عدم قطعیت بهره گرفته است، درحالی‌که در محیط‌های واقعی ممکن است ساختارهای پیچیده‌تری از عدم قطعیت ازجمله فازی نوع دوم، فازی ذوزنقه‌ای یا مجموعه‌های خاکستری وجود داشته باشد. استفاده از این رویکردها در پژوهش‌های آتی می‌تواند دقت مدل و سازگاری آن با شرایط واقعی را افزایش دهد.

سوم، برای مدیریت پیچیدگی محاسباتی، تنها سه سناریوی بدبینانه، محتمل و خوش‌بینانه در تحلیل عدم قطعیت لحاظ شد. توسعه سناریوهای چند سطحی یا ترکیبی می‌تواند چشم‌انداز جامع‌تری از رفتار شبکه زنجیره‌تامین در محیط‌های پویا ارایه کند، هرچند چنین کاری بار محاسباتی و زمان حل مدل را به شکل قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

چهارم، تمرکز پژوهش صرفا بر تامین‌کنندگان داخلی بوده است. حال آن‌که در بسیاری از صنایع، زنجیره‌های‌تامین ماهیتی جهانی دارند و عوامل بیرونی مانند نوسانات نرخ ارز، قوانین تجارت بین‌الملل، تعرفه‌ها، مالیات و ریسک‌های ژئوپلیتیکی می‌توانند نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌ها ایفا کنند. گسترش مدل به بستر تجارت جهانی می‌تواند افق‌های جدیدی برای طراحی شبکه‌های مقاوم و پایدار فراهم آورد.

درمجموع، این محدودیت‌ها نه‌تنها خللی در اعتبار نتایج وارد نمی‌کنند، بلکه زمینه‌های ارزشمندی برای گسترش و تعمیق پژوهش در حوزه زنجیره‌تامین بادوام و هوشمند تحت شرایط عدم قطعیت فراهم می‌آورند.

با توجه به محدودیت‌های مطرح‌شده، چند مسیر تحقیقاتی ارزشمند برای توسعه مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود:

۱. گسترش مدل به صنایع گوناگون و مقایسه بین‌بخشی: بررسی مدل پیشنهادی در صنایع مختلف مانند خودروسازی، صنایع غذایی، دارویی و محصولات الکترونیک می‌تواند میزان تعمیم‌پذیری، سازگاری و عملکرد آن را در ساختارهای صنعتی متفاوت آشکار سازد. مقایسه تطبیقی میان صنایع نیز به شناسایی عوامل موفقیت یا چالش‌های مشترک کمک خواهد کرد.
۲. به‌کارگیری ساختارهای پیشرفته‌تر عدم قطعیت: پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده از مدل‌های پیچیده‌تر عدم قطعیت نظیر فازی نوع دوم، فازی ذوزنقه‌ای، مجموعه‌های خاکستری یا توزیع‌های احتمالی چندوجهی بهره گیرند. این امر می‌تواند دقت تحلیل و انطباق مدل با پیچیدگی‌های دنیای واقعی را افزایش دهد.
۳. طراحی سناریوهای ترکیبی و چندمرحله‌ای: توسعه چارچوب سناریوسازی با رویکردهای چندسطحی، پویا یا تطبیقی می‌تواند پویایی رفتار بازار، اختلالات زنجیره‌تامین و تغییرات محیطی را بهتر بازنمایی کند. چنین رویکردی امکان تحلیل جامع‌تری از انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری شبکه فراهم می‌آورد.
۴. گسترش مدل به زنجیره‌های‌تامین جهانی: پیشنهاد می‌شود مدل حاضر با در نظر گرفتن تامین‌کنندگان بین‌المللی توسعه یابد و عواملی چون نوسانات ارزی، ریسک‌های ژئوپلیتیکی، مقررات تجارت بین‌الملل، مالیات و تعرفه‌ها در فرایند تصمیم‌گیری ادغام گردد. این امر می‌تواند برای سازمان‌هایی که در محیط جهانی رقابت می‌کنند بسیار ارزشمند باشد.
۵. ادغام مفاهیم پیشرفته فناوری و زنجیره‌تامین هوشمند: پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی تاثیر فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، دیجیتال‌توین، اینترنت اشیای پیشرفته و بلاک‌چین نسل دوم را بر بهینه‌سازی شبکه‌های بادوام و حلقه بسته بررسی کنند. ترکیب این فناوری‌ها می‌تواند قابلیت پیش‌بینی، تصمیم‌گیری خودکار و بینایی زنجیره را ارتقا دهد.
۶. ارزیابی پویای عملکرد شبکه با استفاده از شبیه‌سازی: به‌کارگیری روش‌هایی مانند شبیه‌سازی رویداد گسسته، شبیه‌سازی عامل‌مبنا یا دینامیک سیستم می‌تواند رفتار شبکه را در طول زمان و تحت سناریوهای مختلف اختلال یا تغییر تقاضا منعکس کند. تلفیق شبیه‌سازی با مدل ریاضی می‌تواند دقت تصمیم‌گیری را افزایش دهد.
۷. افزودن جنبه‌های رفتاری و انسانی به مدل: بررسی تاثیر ریسک‌گریزی مدیران، همکاری میان واحدها، اعتماد بین شرکای زنجیره و رفتار تصمیم‌گیرندگان در شرایط عدم قطعیت، می‌تواند بعد انسانی زنجیره‌تامین را در مدل‌های آینده تقویت کند.
۸. توسعه مدل‌های یادگیرنده و خود بهینه‌ساز: پیشنهاد می‌شود مدل‌های آتی به نحوی طراحی شوند که با ورود داده‌های جدید یا تغییر شرایط محیطی، به‌طور خودکار به‌روزرسانی شده و راه‌حل‌های جدید بهینه را ارایه دهند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب قدردانی و سپاس خود را از تمامی افرادی که در فرایند انجام این پژوهش یاری‌رسان بوده‌اند، ابراز نمایند. به‌ویژه از کارشناسان و خبرگان صنعت تجهیزات پزشکی که با ارایه تجربیات و اطلاعات تخصصی، زمینه انجام تحلیل‌های دقیق‌تر را فراهم ساختند. قدردانی ویژه نیز از مدیران و کارکنان شرکت "ابتکار تجهیز طب یکتا" به عمل می‌آید که همکاری ارزشمند آنان امکان اجرای مطالعه موردی را فراهم کرد.

منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت هیچ‌گونه حمایت مالی مستقیم یا غیرمستقیم از نهادهای دولتی، خصوصی یا مؤسسات پژوهشی انجام شده است. نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ کمک‌هزینه یا بودجه تحقیقاتی مشخصی در ارتباط با این مقاله دریافت نکرده‌اند.

تعارض با منافع

نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مرتبط با انجام و انتشار این مقاله وجود ندارد. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه، تایید و برای انتشار ارسال کرده‌اند. همچنین، نویسندگان تضمین می‌کنند که این مقاله حاصل کار اصیل آنان است، پیش‌تر منتشرنشده و در حال حاضر نیز در فرآیند داوری یا چاپ در مجله دیگری قرار ندارد.

منابع

[1] Chen, D., Chu, F., Liu, M., & Huang, Y. (2025). A distribution-free-based approach for stochastic food closed-loop supply chain. *International Journal of Production Research*, *63*(7), 2526–2555. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2406994
[2] Zekhnini, K., Chaouni Benabdellah, A., & Cherrafi, A. (2024). A multi-agent based big data analytics system for viable supplier selection. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *35*(8), 3753-3773. https://doi.org/10.1007/s10845-023-02253-7
[3] Asif, K., & Albherat, K. (2024). The impact of procurement strategies on supply chain sustainability in the pharmaceutical industry. *South Asian Journal of Operations and Logistics*, *3*(2), 345-361. https://doi.org/10.57044/SAJOL.2024.3.2.2446
[4] Malhotra, G. (2024). Impact of circular economy practices on supply chain capability, flexibility and sustainable supply chain performance. *The International Journal of Logistics Management*, *35*(5), 1500-1521. https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2023-0019
[5] Dehshiri, S. J. H., & Amiri, M. (2024). Considering the circular economy for designing closed-loop supply chain under hybrid uncertainty: A robust scenario-based possibilistic-stochastic programming. *Expert Systems with Applications*, *238*, 121745. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121745
[6] Ruel, S., El Baz, J., Ivanov, D., & Das, A. (2024). Supply chain viability: Conceptualization, measurement, and nomological validation. *Annals of Operations Research*, *335*(3), 1107–1136. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03974-9
[7] Ivanov, D. (2023). The Industry 5.0 framework: Viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research*, *61*(5), 1683–1695. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892
[8] Sharma, M., & Joshi, S. (2023). Digital supplier selection reinforcing supply chain quality management systems to enhance firm's performance. *TQM Journal*. https://doi.org/10.1108/TQM-07-2020-0160
[9] Rostami, O., Tavakoli, M., Tajally, A. R., & GhanavatiNejad, M. (2023). A goal programming-based fuzzy best–worst method for the viable supplier selection problem: A case study. *Soft Computing*, *27*(6), 2827–2852. https://doi.org/10.1007/s00500-022-07572-0
[10] Goodarzian, F., Taleizadeh, A. A., Ghasemi, P., & Abraham, A. (2021). An integrated sustainable medical supply chain network during COVID-19. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *100*, 104188. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104188
[11] Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: Extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International Journal of Production Research*, *58*(10), 2904–2915. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727
[12] Alizadeh, M., Pishvaee, M. S., Jahani, H., Paydar, M. M., & Makui, A. (2023). Viable healthcare supply chain network design for a pandemic. *Annals of Operations Research*, *328*(1), 35–73. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04934-7%0A%0A
[13] Lotfi, R., Nazarpour, H., Gharehbaghi, A., Sarkhosh, S. M. H., & Khanbaba, A. (2022). Viable closed-loop supply chain network by considering robustness and risk as a circular economy. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(46), 70285–70304. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20713-0%0A%0A
[14] Zahari, M. K., Zakuan, N., Yusoff, M. E., Mat Saman, M. Z., Ali Khan, M. N. A., Muharam, F. M., & Yaacob, T. Z. (2023). Viable supply chain management toward company sustainability during covid-19 Pandemic in Malaysia. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(5). https://doi.org/10.3390/su15053989
[15] Chaouni Benabdellah, G., Bennis, K., Chaouni Benabdellah, A., & Zekhnini, K. (2022). Resilient sustainable supplier selection criteria assessment for economics enhancement in industry 4.0 context. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94335-6_14
[16] Zhu, C., Zhu, N., Zheng, S., Zou, L., & Wang, X. (2025). Analyzing critical success factors for green supplier selection: A combined DEMATEL-ISM approach and convolutional neural network based consensus model. *Applied Soft Computing*, 112760. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112760
[17] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Babaee Tirkolaee, E. (2025). Viable supplier selection problem based on Industry 5.0 and circular economy aspects: A hybrid decision-making approach. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, *12*(1), 2469117. https://doi.org/10.1080/23302674.2025.2469117
[18] Padovano, A., & Ivanov, D. (2025). Towards resilient and viable supply chains: A multidimensional model and empirical analysis. *International Journal of Production Research*, *63*(17), 6252-6290. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2470350

[19] Lotfi, R., Safavi, S., Gharehbaghi, A., Ghaboulian Zare, S., Hazrati, R., & Weber, G. W. (2021). Viable supply chain network design by considering blockchain technology and cryptocurrency. *Mathematical Problems in Engineering, 2021*(1), 7347389. https://doi.org/10.1155/2021/7347389

[20] Kumar, D., Soni, G., Joshi, R., Jain, V., & Sohal, A. (2022). Modelling supply chain viability during COVID-19 disruption: A case of an Indian automobile manufacturing supply chain. *Operations Management Research, 15*(3), 1224-1240. https://doi.org/10.1007/s12063-022-00277-5

[21] Ajayi, M. O., & Laseinde, O. T. (2022, August). Promoting viable supply chain management (SCM) in the Nigeria agro-allied industry using internet of things. *In Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2022, London, Volume 1* (pp. 389-399). Singapore: Springer Nature Singapore.. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1607-6_34

[22] Chaouni Benabdellah, A., Zekhnini, K., Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Kumar, A., & El Baz, J. (2023). Blockchain technology for viable circular digital supplychains: an integrated approach for evaluating the implementation barriers. *Benchmarking: An International Journal, 30*(10), 4397-4424. https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2022-0240

[23] Zhu, A., Han, Y., & Liu, H. (2024). Effects of adaptive cooperation among heterogeneous manufacturers on supply chain viability under fluctuating demand in post-COVID-19 era: An agent-based simulation. *International Journal of Production Research, 62*(4), 1162–1188. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2178370

[24] Lotfi, R., Hazrati, R., Aghakhani, S., Afshar, M., Amra, M., & Ali, S. S. (2024). A data-driven robust optimization in viable supply chain network design by considering Open Innovation and Blockchain Technology. *Journal of Cleaner Production, 436*, 140369. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140369

[25] Ebhuoma, O., Gebreslasie, M., & Magubane, L. (2018). A seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) forecasting model to predict monthly malaria cases in KwaZulu-Natal, South Africa. *South African Medical Journal, 108*(7), 573-578. https://doi.org/10.7196/SAMJ.2018.v108i7.12885

[26] Avazpour, M., Zarei, J., & Alinezhad, E. (2025). Evaluation and prioritization of electricity generation technologies in Iran using a multi-criteria decision-making approach. *System Engineering and Productivity, 5*(3), 179-198. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2063697.1333

[27] Bayatzadeh, S., & Talaie, H. (2024). Identifying and evaluating of sustainable and resilient supplier selection criteria according to industry 5.0 concepts (Case study: Steel industry). *Journal of Decisions And Operations Research, 9*(4), 1045-1063. (**In Persian**). https://doi.org/10.22105/dmor.2025.498734.1904

[28] Asadi, Z., Aghajani, H., Khatir, M. V., & Tirkolaee, E. B. (2025). Viable-sustainable supplier selection and order allocation problem considering Industry 5.0 pillars under mixed uncertainty. *International Journal of Production Research, 63*(20), 7591-7616. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2502848

[29] Nayeri, S., Khoei, M. A., Rouhani Tazangi, M. R., GhanavatiNejad, M., Rahmani, M., & Tirkolaee, E. B. (2023). A data-driven model for sustainable and resilient supplier selection and order allocation problem in a responsive supply chain: A case study of healthcare system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 124*, 106511. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106511

[30] Kashanian Monfared, N., Safaie, N., & Hosseininezhad, S. J. (2025). A decision-making model for the problem of designing the layout of medical centers considering uncertainty. *System Engineering and Productivity, 5*(2), 97-118. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2049327.1252

[31] Yazdani Hoshyar, A., & Keshvari, A. (2023). Investigating and formulating anthropogenic threats in refinery projects with a combination of AHP-TOPSIS method: A case study of Tehran oil refinery. *System Engineering and Productivity, 2*(4), 94–119. https://doi.org/10.22034/sep.2023.704334

[32] Sun, L., Yu, C., Li, J., Yuan, Q., & Zhao, S. (2025). A two-stage decision model for sustainable-resilient supplier selection and order allocation under uncertain environment. *Kybernetes, 54*(8), 4078-4113. https://doi.org/10.1108/K-11-2023-2347

[33] Leong, W. Y., Wong, K. Y., & Wong, W. P. (2022). A new integrated multi-criteria decision-making model for resilient supplier selection. *Applied System Innovation, 5*(1). https://doi.org/10.3390/asi5010008

[34] Hasani, A., Mokhtari, H., & Fattahi, M. (2021). A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: A real-life case study. *Journal of Cleaner Production, 278*, 123199. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123199

[35] Sazvar, Z., Zokaee, M., Tavakkoli Moghaddam, R., Salari, S. A., & Nayeri, S. (2021). Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty, manufacturer's brand and waste management. *Annals of Operations Research*, 1–32. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03961-0

[36] Babaei, Y. S., Sazvar, Z., Nayeri, S., & Tavakkoli Moghaddam, R. (2024). A two-stage framework for a resilient medical tourism supply chain considering social aspects and supplier evaluation under uncertainty: A real-case study. *Annals of Operations Research*, 1–47. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06128-9

[37] Mamashli, Z., Bozorgi Amiri, A., Dadashpour, I., Nayeri, S., & Heydari, J. (2021). A heuristic-based multi-choice goal programming for the stochastic sustainable-resilient routing-allocation problem in relief logistics. *Neural Computing and Applications*, 1–27. https://doi.org/10.1007/s00521-021-06074-8

[38] Khalili Nasr, A., Tavana, M., Alavi, B., & Mina, H. (2021). A novel fuzzy multi-objective circular supplier selection and order allocation model for sustainable closed-loop supply chains. *Journal of Cleaner Production, 287*, 124994. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124994