Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. x, No. x (xx) x–x.

Paper Type: Original Article

An optimization Model for Improving Quality and Resilience in a Viable Cosed-Loop Supply Chain under Hybrid Uncertainty

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.

Corresponding Author:

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).

Keywords: Supply Chain Management; Viable Supply Chain; Closed-Loop Supply Chain; Uncertainty.

آماده انتشار

مهندسی و مدیریت کیفیت

www.pqprc.ir

دوره x ، شماره(x) ، (xx)، x-x

نوع مقاله: پژوهشی

ارائه مدل بهینه‌سازی برای بهبود کیفیت و تاب‌آوری در زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام تحت عدم‌قطعیت ترکیبی

هدف: این پژوهش با هدف توسعه یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته 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 از آن جهت است که اغلب زنجیره‌های تأمین 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 سه‌مرحله‌ای طراحی گردید. در گام نخست، به‌منظور لحاظ‌کردن نوسانات بازار و الگوهای فصلی در ورودی‌های مدل، تقاضا با استفاده از مدل سری‌های زمانی SARIMAپیش‌بینی شد. در مرحله دوم، معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان بر اساس مرور نظام‌مند ادبیات و نظرات متخصصان شناسایی و سپس با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی (SFBWM)وزن‌دهی گردید؛ پس از آن، رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان با بهره‌گیری از تکنیک تاپسیس فازی-تصادفی (SFTOPSIS) انجام پذیرفت. در نهایت، برای طراحی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین، یک مدل ریاضی چندهدفه با ماهیت فازی-تصادفی توسعه داده شد و به‌منظور مدیریت عدم‌قطعیت داده‌ها، رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی-تصادفی در فرآیند حل به کار گرفته شد. حل مسئله چندهدفه نیز با استفاده از نسخه اصلاح‌شده روش برنامه‌ریزی آرمانی لکسیکوگراف-چبی‌شف چندگزینه‌ای (LCRMCGP) صورت گرفت.

یافته‌ها: مطالعه موردی انجام‌شده در شرکت «ابتکار تجهیز طب یکتا» در صنعت تجهیزات پزشکی نشان داد که مدل ارائه‌شده قادر است تصمیمات استراتژیک کلیدی—از جمله انتخاب تأمین‌کنندگان 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 مؤثری بین اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی برقرار کند و در عین حال، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری شبکه را در شرایط عدم‌قطعیت تقویت نماید.

اصالت/ارزش افزوده علمی: نوآوری پژوهش حاضر در توسعه یک چارچوب یکپارچه برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام تحت عدم‌قطعیت ترکیبی فازی-تصادفی است. برخلاف مطالعات پیشین که هر یک تنها بر بخشی از ابعاد زنجیره تأمین تمرکز داشته‌اند، این پژوهش ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی را به‌صورت هم‌زمان در قالب یک مدل چندهدفه یکپارچه‌سازی می‌کند. همچنین، تلفیق روش‌هایSARIMA ، SFBWM، SFTOPSISو 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 زنجیره تامین، زنجیره تامین بادوام، زنجیره تامین حلقه بسته، عدم قطعیت.

۱- مقدمه

در فضای رقابتی و پرچالش کنونی، مدیریت زنجیره تأمین به یکی از ارکان اساسی بهبود عملکرد و ایجاد مزیت رقابتی سازمان‌ها بدل شده است. زنجیره تأمین، مجموعه‌ای یکپارچه از فعالیت‌های مرتبط با تأمین، تولید و رساندن محصول به مشتری نهایی است و کارایی آن به مدیریت مؤثر جریان مواد، اطلاعات و منابع در سراسر شبکه وابسته است[1, 2] . طی سال‌های اخیر، تحولاتی همچون الزامات زیست‌محیطی، رقابت جهانی، پیشرفت فناوری و بروز اختلالات پیش‌بینی‌ناپذیر موجب شده‌اند شاخص‌هایی نظیر پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی به‌عنوان معیارهای کلیدی در تحلیل و طراحی زنجیره‌های تأمین مورد توجه قرار گیرند [3, 4].

در این میان، نگرانی‌های محیط‌زیستی و فشارهای بازار، توجه ویژه‌ای را به الگوهای پایدار و کارآمد جلب کرده است. زنجیره تأمین حلقه‌بسته، که جریان رو به جلو 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 تأمین 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 «زنجیره تأمین بادوام» را افزایش داد؛ مفهومی که ترکیبی از پایداری، مقاوم‌سازی، چابکی و دیجیتال‌سازی در طراحی شبکه را دنبال می‌کند [6–8].

صنعت تجهیزات پزشکی، به‌دلیل حساسیت و نقش حیاتی در نظام سلامت، بیش از دیگر صنایع از این اختلالات آسیب دید و ناگزیر به بازنگری فرآیندهای تأمین و توسعه استراتژی‌های جدید شد [9, 10]. بر همین اساس، این پژوهش با تمرکز بر بهینه‌سازی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته در این صنعت، به‌دنبال ارائه چارچوبی برای افزایش کارایی و دوام شبکه در شرایط عدم‌قطعیت است.

برای دستیابی به این هدف، یک چارچوب تصمیم‌گیری سه‌مرحله‌ای تدوین شد. در مرحله نخست، تقاضا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع عدم‌قطعیت با استفاده از مدل سری‌های زمانی SARIMA پیش‌بینی شد. در مرحله دوم، معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان از طریق مرور ادبیات و نظرات خبرگان تعیین و با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی (SFBWM) وزن‌دهی شد؛ سپس رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان با رویکرد تاپسیس فازی-تصادفی (SFTOPSIS)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. در نهایت، نسخه بهبودیافته روش برنامه‌ریزی آرمانی لکسیکوگراف-چبی‌شف چندگزینه‌ای (LCRMCGP) برای حل مدل چندهدفه به‌کار گرفته شد.

دبر این اساس، نوآوری اصلی پژوهش حاضر را می‌توان در چند محور کلیدی خلاصه کرد:

۱. توسعه یک چارچوب یکپارچه برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام با درنظرگرفتن هم‌زمان ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی؛

۲. مدل‌سازی عدم‌قطعیت ترکیبی فازی-تصادفی به‌منظور بازتاب واقع‌بینانه شرایط محیطی و نوسانات تقاضا؛

۳. ترکیب هم‌زمان روش‌های پیش‌بینیSARIMA ، وزن‌دهیSFBWM ، رتبه‌بندی SFTOPSIS و مدل‌سازی چندهدفه LCRMCGP در قالب یک فرآیند تصمیم‌گیری منسجم؛

۴. ارائه یک مطالعه موردی کاربردی در صنعت تجهیزات پزشکی با تمرکز بر ارتقای کیفیت عملکرد و دوام شبکه زنجیره تأمین. این ویژگی‌ها موجب می‌شود پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین، چارچوبی جامع‌تر، کاربردی‌تر و سازگارتر با شرایط واقعی محیط‌های پرریسک و متغیر ارائه دهد.

۲- پیشینه پژوهش

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

۲-۱- زنجیره تامین بادوام

افزایش شدت رقابت در بازار، نوسانات شدید تقاضا، و اختلالات گسترده‌ای نظیر همه‌گیری کووید-۱۹، ضرورت بازنگری در الگوهای سنتی مدیریت زنجیره تأمین 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 زنجیره‌های تأمین از ساختاری مقاوم، چابک و قابل تداوم دلالت دارد. بر همین مبنا، ایوانف و دولگی با اتکا بر چهار مؤلفه پایداری، چابکی، تاب‌آوری و دیجیتالی‌سازی، چارچوب «زنجیره تأمین بادوام» را ارائه کردند که بر تقویت ابعاد فناورانه، سازمانی و مالی شبکه تأمین تمرکز دارد [11].

مهدی و احمد (۲۰۲۲) 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 [12]. در راستای تقویت اقتصاد چرخشی، لطفی و همکاران (۲۰۲۲) با توسعه یک مدل تصادفی نشان دادند که یکپارچه‌سازی ابعاد بادوام بودن و چرخه معکوس می‌تواند هزینه‌ها را تا ۴۴ درصد کاهش دهد [13].

در پژوهشی دیگر رستمی و همکاران (۲۰۲۳)، به منظور بررسی مسئله انتخاب تأمین‌کننده بادوام، یک چارچوب تصمیم‌گیری ارائه کرده‌اند که در آن روش جدید GP-FBWM برای وزن‌دهی معیارها و روش فازی VIKOR برای رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان به‌کار گرفته شده است. مطالعه موردی بر دستگاه اکسیژن‌ساز نشان می‌دهد مدل پیشنهادی قادر است ابعاد زنجیره تأمین بادوام را در ارزیابی تأمین‌کنندگان به‌طور مؤثر لحاظ کند. [9]. در سطح سازمان‌ها، مطالعه زهیری و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی ۱۹۷ شرکت مالزیایی نشان داد که اتخاذ استراتژی‌های بادوام اثر معناداری بر ارتقای پایداری عملیاتی دارد [14]. در زمینه فناوری‌های نوظهور، چاوونی بن‌عبدالله و همکاران (۲۰۲۳) موانع اصلی پذیرش بلاک‌چین در زنجیره تأمین 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 ارائه داد [15]. از سوی دیگر، ژو و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عامل‌مبنا نشان دادند که همکاری میان بنگاه‌های کوچک و بزرگ در مواجهه با اختلالات گسترده، نقشی تعیین‌کننده در تقویت دوام زنجیره دارد [16]. در پژوهشی دیگر.نیری و همکاران (۲۰۲۵)، با ترکیب ابعاد اقتصاد چرخشی، قابلیت دوام و Industry 5.0 یک مدل ارزیابی تأمین‌کننده ارائه کرده‌اند که بر پایه روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی و نسخه اصلاح‌شده COPRAS عمل می‌کند. نتایج مطالعه موردی نشان می‌دهد شاخص‌های پایداری و تاب‌آوری بیشترین اهمیت را داشته و تأمین‌کنندگان A2 و A5 بهترین عملکرد را ارائه داده‌اند [16]. پادونووا و همکاران (۲۰۲۵)، یک چارچوب سه‌بعدی برای ارزیابی تاب‌آوری و دوام زنجیره تأمین ارائه 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. [18].

جدول۱- خلاصه ای از تحقیقات انجام شده

Table 1- Summary of the conducted research

بادوام بودن	**عدم قطعیت**

نویسندگان	پایداری	تاب آوری	چابکی	دیجیتال سازی	تصادفی	شناختی	مطالعه موردی
لطفی و همکاران[17].	✓	–	–	✓	–	–	–
کومار و همکاران [18].	✓	✓	✓	–	–	–	خودروسازی
مهدی و احمد [12].	–	✓	✓	✓	–	–	سیستم سلامت
لطفی و همکاران [13].	✓	✓	✓	✓	✓	–	–
ظاهاری و همکاران [14].	✓	✓	–	–	–	–	صنعت تولید
آجائی [20].	✓	✓	✓	✓	–	–	کشاورزی
چائونی همکاران [21].	✓	✓	✓	✓	–	–	–
ژو همکاران [22].	✓	✓	✓	✓	–	–	–
لطفی و همکاران [23].	✓	✓	✓	✓	–	–	–
پادوانو و همکاران[18]	✓	✓	✓	✓	–	–	غلات
نیری و هکاران[16].	✓	✓	–	–	✓	✓	–
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓	تجهیزات پزشکی

۲-۲- شکاف پژوهش

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در مدیریت زنجیره تأمین طی سال‌های اخیر، ادبیات این حوزه همچنان با شکاف‌هایی معنادار مواجه است. در دوران پساکرونا، مفهوم «زنجیره تأمین بادوام» به‌عنوان رویکردی نوین برای افزایش توان بقا، پایداری و انعطاف‌پذیری شبکه‌های تأمین در برابر شوک‌ها و اختلالات محیطی مطرح شده و توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این رویکرد با ادغام مؤلفه‌هایی نظیر پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی، چارچوبی جامع برای مدیریت شبکه‌های تأمین در محیط‌های پیچیده و متغیر فراهم می‌آورد.

از سوی دیگر، یکی از چالش‌های اساسی در محیط اقتصادی امروز، سطح بالای عدم‌قطعیت است که نادیده‌گرفتن آن می‌تواند منجر به تصمیمات غیرواقع‌بینانه و پیامدهای هزینه‌زای جدی برای سازمان‌ها شود. با توجه به اهمیت این مسئله، در این پژوهش متغیر تقاضا—به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی تصمیم‌گیری در مدل‌های زنجیره تأمین—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 مسائل زنجیره تأمین تحت عدم‌قطعیت 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 زنجیره تأمین یک مسئله 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 ارائه دهد. با وجود این پیچیدگی، بخش عمده ادبیات موجود تنها به بررسی بخشی از تصمیمات زنجیره تأمین محدود شده و تاکنون مدلی جامع که انتخاب تأمین‌کنندگان، تعیین روش حمل‌ونقل، مکان‌یابی تسهیلات و ظرفیت‌گذاری را در قالب زنجیره تأمین بادوام و در فضای عدم‌قطعیت ترکیبی به‌صورت یکپارچه تحلیل کند، ارائه نشده است. در این چارچوب، نوآوری اصلی پژوهش حاضر توسعه یک سازوکار تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای است که امکان طراحی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته و بادوام را تحت عدم‌قطعیت ترکیبی فراهم می‌سازد. این چارچوب با یکپارچه‌سازی ابعاد حیاتی همچون پایداری، تاب‌آوری و چابکی، در کنار مدل‌سازی واقع‌بینانه عدم‌قطعیت تقاضا، می‌تواند مبنایی نظری و کاربردی برای تصمیم‌گیری مدیران در شرایط محیطی پویا و نامطمئن ارائه دهد.

۳- روش تحقیق

هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام در شرایط عدم‌قطعیت است. برای این منظور، یک چارچوب تصمیم‌گیری سه‌مرحله‌ای ارائه 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 تأمین‌کنندگان از طریق ادبیات و نظر خبرگان تعیین شده و با روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی وزن‌دهی می‌شوند؛ سپس تأمین‌کنندگان بالقوه با به‌کارگیری روش تاپسیس فازی-تصادفی ارزیابی و رتبه‌بندی می‌گردند. در گام پایانی، یک مدل چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته تحت عدم‌قطعیت فازی-تصادفی تدوین شده و با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار و روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده لکسیکوگرافیک-چبی‌شف (LCRMCGP) حل می‌شود.

۳- ۱-روش SARIMA

با توجه به آن‌که عدم‌قطعیت بخش جدایی‌ناپذیر محیط کسب‌وکار امروزی است، چشم‌پوشی از آن در فرآیندهای تصمیم‌گیری می‌تواند منجر به برداشت‌های نادرست و در نهایت پیامدهای هزینه‌زا برای سازمان‌ها شود. بر همین اساس، در پژوهش حاضر پارامتر تقاضا—به‌عنوان یکی از مؤثرترین متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل‌های زنجیره تأمین—به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده و برآورد آن با استفاده از مدل سری‌های زمانی SARIMAانجام گرفته است.

مدل SARIMA (Seasonal ARIMA)نسخه پیشرفته‌تری از مدل ARIMA است که برای تحلیل داده‌های دارای الگوهای فصلی و رفتارهای دوره‌ای مناسب است. این مدل با ترکیب اجزای خودرگرسیونی(AR) ، میانگین متحرک(MA) ، جزء تفاضلی (I) و مؤلفه‌های فصلی متناظر، توانایی مدل‌سازی نوسانات پیچیده و پیش‌بینی دقیق تغییرات تقاضا را فراهم می‌کند[25] .

فرآیند پیاده‌سازی مدل SARIMA معمولاً شامل مراحل زیر است:

- **تحلیل اولیه داده‌ها** به‌منظور شناسایی روند، الگوهای فصلی و ساختار وابستگی زمانی،
- **ایستاسازی سری زمانی** از طریق تفاضل‌گیری معمولی و فصلی،
- **تعیین پارامترهای مدل** و انتخاب ترکیب مناسب مؤلفه‌هایAR ، MAو I در بخش‌های غیرفصلی و فصلی،
- **برازش مدل و اعتبارسنجی** با استفاده از معیارهای خطا و بررسی باقی‌مانده‌ها،
- **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 زنجیره تأمین کمک می‌کند.

۳- ۲-بهترین-بدترین فازی تصادفی

یکی از رویکردهای پرکاربرد در وزن‌دهی معیارها در مسائل 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 صرفاً 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 عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت 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 باشند[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 سناریومحور با هدف حداقل‌سازی 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 ارائه شده است.

۳-۳-تاپسیس فازی تصادفی

در این پژوهش برای ارزیابی و رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان، از نسخه پیشرفته‌شده روش چندمعیاره تاپسیس استفاده شده است. این روش به دلیل ساختار ساده، تفسیرپذیری بالا و توانایی کار با معیارهای کمی و کیفیِ مثبت و منفی، جایگاهی گسترده در تصمیم‌گیری دار [31 ,30]. با وجود این، نسخه‌های کلاسیک تاپسیس—از جمله انواع فازی و خاکستری—اگرچه امکان لحاظ‌کردن عدم‌قطعیت را فراهم می‌کنند، اما عمدتاً قادر نیستند تغییرپذیری قضاوت تصمیم‌گیرندگان را در شرایط محیطی متفاوت، مانند دوره‌های پیش و پس از بحران‌هایی نظیر کووید-۱۹، به‌درستی بازتاب دهند [33 ,32].

با توجه به ماهیت مسئله حاضر که با دو نوع عدم‌قطعیت شناختی و تصادفی مواجه است، از تاپسیس فازی-تصادفی بهره گرفته شده است. این روش چند مزیت اساسی دارد:

نخست، امکان مدل‌سازی هم‌زمان عدم‌قطعیت شناختی—حاصل از ابهام در قضاوت خبرگان—و عدم‌قطعیت تصادفی—ناشی از نوسانات داده‌ها—را فراهم می‌کند. دوم، رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس فاصله آن‌ها از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی صورت می‌گیرد که موجب شفافیت و سهولت تفسیر نتایج می‌شود. سوم، ترکیب این روش با تحلیل سناریویی، انعطاف‌پذیری تصمیم‌گیری را افزایش داده و زمینه اتخاذ انتخاب‌های پایدارتر را در محیط‌های پویا و پرریسک فراهم می‌سازد.

این ویژگی‌ها سبب می‌شود تاپسیس فازی-تصادفی رویکردی کارآمد برای مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام و تحت عدم‌قطعیت محسوب شود ساختار ریاضی و مراحل اجرای این روش به‌تفصیل در فایل پیوست ارائه شده است.

۳- ۴-مدل ریاضی چندهدفه

در این بخش، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته بادوام تحت عدم‌قطعیت فازی-تصادفی ارائه می‌شود. در ساختار مدل، زنجیره رو به جلو شامل تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان، مراکز تولید، مراکز توزیع و مشتریان حضوری و آنلاین است؛ در حالی‌که زنجیره معکوس از مراکز جمع‌آوری، بازیافت، دفع و بازار ثانویه تشکیل می‌شود. جریان مواد از تأمین‌کنندگان به تولید و سپس به توزیع و مشتریان هدایت شده و محصولات برگشتی پس از ارزیابی، به مراکز بازیافت یا دفع منتقل می‌شوند؛ قطعات بازیافتی نیز به تأمین‌کنندگان فروخته شده و منبع درآمدی برای شبکه محسوب می‌شود.

مدل پیشنهادی مبتنی بر سناریو بوده و چهار بُعد کلیدی زنجیره تأمین بادوام—پایداری، تاب‌آوری، چابکی و دیجیتال‌سازی—را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. بُعد پایداری از جنبه‌های اقتصادی (حداقل‌سازی 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 تأمین‌کنندگان 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.

به‌طور کلی، مدل توسعه‌یافته چارچوبی جامع برای طراحی شبکه‌ای پایدار، مقاوم، چابک و دیجیتال‌محور فراهم می‌کند که در شرایط عدم‌قطعیت عملکرد قابل اتکایی دارد. در ادامه، پارامترها، شاخص‌ها و متغیرهای تصمیم معرفی شده و فرم ریاضی مدل چندهدفه ارائه 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 اشتراک گذاری اطلاعات
s	اندیس سناریوها
پارامترها	
پارامترهای بدست آمده 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	
$\widetilde{FCM}_m$	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 جمع آوری 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 تامین کننده 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
$A_{ee'v}$	پارامتر باینری (برابر با مقدار یک است اگر وسیله نقلیه q قابل استفاده بین نقاط e و $é$ 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-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
XB_b	اگر تامین‌کننده پشتیبان b انتخاب شود برابر با مقدار ۱ است، درغیر اینصورت ۰
YG_g	اگر مرکز جمع آوری g احداث شود برابر با مقدار ۱ است، در غیر اینصورت ۰
YP_p	اگر مرکز بازیافت p احداث شود برابر با مقدار ۱ است، در غیراینصورت ۰
ZI_i	اگر سیستم اشتراک گذاری اطلاعات i راه اندازی شود برابر با مقدار ۱ است، در غیر اینصورت ۰
$ZIOT$	اگر سیستم اینترنت اشیا راه اندازی شود برابر با مقدار ۱ است، در غیراینصورت ۰
$U_{eév}$	اگر وسیله نقلیه v میان دو نقطه (تسهیل) e و e' مورد استفاده قرار گیرد برابر با مقدار ۱ است، در غیر اینصورت ۰
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:

$$\begin{aligned}
&\textbf{minimize } \boldsymbol{Z1} = \\
&\sum_s \boldsymbol{P_s} \Big(\sum_{r,m,f,v} \widetilde{\boldsymbol{PCM}}_{\boldsymbol{rm}} \times \boldsymbol{QMF_{rmfvs}} + \sum_{r,b,f,v} \widetilde{\boldsymbol{PC}}_{\boldsymbol{rb}} \times \boldsymbol{QBF_{rbfvs}} + \sum_{f,d,v} \widetilde{\boldsymbol{MC}}_{\boldsymbol{f}} \times \boldsymbol{QFD_{fdvs}} + \\
&\sum_{d,c,o,v} \widetilde{\boldsymbol{DC}}_{\boldsymbol{d}} \times (\boldsymbol{QDC_{dcvs}} + \boldsymbol{QDO_{dovs}}) + \sum_{c,o,g,v} (\widetilde{\boldsymbol{OCG}}_{\boldsymbol{g}} - \widetilde{\boldsymbol{ISG}}_{\boldsymbol{g}} \times \boldsymbol{ZIOT}) \times \big(\boldsymbol{QCG_{cgvs}} + \boldsymbol{QOG_{ogvs}}\big) + \\
&\sum_{p,g,v} (\widetilde{\boldsymbol{OCP}}_{\boldsymbol{p}} - \widetilde{\boldsymbol{ISP}}_{\boldsymbol{p}} \times \boldsymbol{ZIOT}) \times \boldsymbol{QGP_{gpvs}} + \sum_{c,o} \widetilde{\boldsymbol{Short}}_{\boldsymbol{s}} \times (\boldsymbol{Shc_{cs}} + \boldsymbol{Sho_{os}}) + \\
&\sum_v \widetilde{\boldsymbol{TC}}_{\boldsymbol{v}} \Big(\sum_{m,f} \boldsymbol{Dist_{mf}} \times \boldsymbol{U_{mfv}} + \sum_{b,f} \boldsymbol{Dist_{bf}} \times \boldsymbol{U_{bfv}} + \sum_{f,d} \boldsymbol{Dist_{fd}} \times \boldsymbol{U_{fdv}} + \sum_{d,c} \boldsymbol{Dist_{dc}} \times \boldsymbol{U_{dcv}} + \\
&\sum_{d,o} \boldsymbol{Dist_{do}} \times \boldsymbol{U_{dov}} + \sum_{c,g} \boldsymbol{Dist_{c,g}} \times \boldsymbol{U_{cgv}} + \sum_{o,g} \boldsymbol{Dist_{og}} \times \boldsymbol{U_{ogv}} + \sum_{g,p} \boldsymbol{Dist_{gp}} \times \boldsymbol{U_{gpv}} + \\
&\sum_{g,l} \boldsymbol{Dist_{gl}} \times \boldsymbol{U_{glv}} + \sum_{g,m} \boldsymbol{Dist_{gm}} \times \boldsymbol{U_{gmv}} - \sum_{r,m} \widetilde{\boldsymbol{Rev}}_{\boldsymbol{rm}} \times \boldsymbol{QGM_{rgms}}\Big) + \sum_m \widetilde{\boldsymbol{FCM}}_{\boldsymbol{m}} \times \boldsymbol{XM_m} + \\
&\sum_b \widetilde{\boldsymbol{FCB}}_{\boldsymbol{b}} \times \boldsymbol{XB_b} + \sum_g \widetilde{\boldsymbol{FCG}}_{\boldsymbol{g}} \times \boldsymbol{YG_g} + \sum_p \widetilde{\boldsymbol{FCP}}_{\boldsymbol{p}} \times \boldsymbol{YP_p}\Big) + \sum_f \widetilde{\boldsymbol{CEC}}_{\boldsymbol{f}} \times \boldsymbol{ECF_f} + \sum_d \widetilde{\boldsymbol{CEC}}_{\boldsymbol{d}} \times \boldsymbol{ECD_d} + \\
&\widetilde{\boldsymbol{CIOT}} \times \boldsymbol{ZIOT} + \widetilde{\boldsymbol{CI}}_{\boldsymbol{i}} \times \boldsymbol{ZI_i}
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{minimize } Z2 = \lambda e \times \left[P_s \left(\sum_{f,d,v} \widetilde{EF}_f \, QFD_{fdvs} + \sum_{g,p,v} \widetilde{EP}_p \, QGP_{g,p,v,s} + \sum_v \widetilde{EV}_v \begin{pmatrix} \sum_{r,m,f} Dist_{mf} \times QMF_{rmfvs} + \\ \sum_{r,b,f} Dist_{bf} \times QBF_{rbfvs} + \\ \sum_{f,d} Dist_{fd} \times QFD_{fdvs} + \\ \sum_{d,c} Dist_{dc} \times QDC_{dcvs} + \\ \sum_{d,o} Dist_{do} \times QDO_{dovs} + \\ \sum_{c,g} Dist_{cg} \times QCG_{cgvs} + \\ \sum_{o,g} Dist_{og} \times QOG_{ogvs} + \\ \sum_{g,p} Dist_{gp} \times QGP_{gpvs} + \\ \sum_{g,l} Dist_{gl} \times QGL_{glvs} + \\ \sum_{r,p,m} Dist_{pm} \times QPM_{rpmvs} + \\ \sum_{r,p,l} Dist_{pl} \times QGL_{rplvs} \end{pmatrix} \right) - MinEi \right] \times \sum_s \frac{}{MaxEi - MinEi} + \lambda s \times \left[\frac{MaxSoc - \left(\sum_m \widetilde{JCM}_m \times XM_m + \sum_b \widetilde{JCB}_b \times XB_b + \sum_g \widetilde{JCG}_g \times YG_g + \sum_p \widetilde{JCP}_p \times YP_p \right)}{MaxSoc - MinSoc} \right]$$

$$\text{Minimize } Z3 = \lambda v \times \left[\frac{MaxI - \sum_{s,i} P_s \times VIS_{is}}{MaxI - MinI} \right] + \lambda c \times \left[\frac{Comp - MinN}{MaxN - MinN} \right] \quad (3)$$

$$\text{maximize } Z4 = \sum_m XM_m \times S_m + \sum_b XB_b \times S_b \quad (4)$$

در مدل طراحی‌شده، هدف نخست (معادله ۱) کاهش کلیه هزینه‌های زنجیره تأمین است. این هزینه‌ها شامل خرید مواد اولیه، تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت، کمبود، حمل‌ونقل، هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان، 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* به‌ترتیب نشان‌دهنده کمترین و بیشترین سطح اثرات زیست‌محیطی ممکن هستند. همچنین *MaxSoc* و *MinSoc* محدوده بیشترین و کمترین منافع اجتماعی قابل دستیابی 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 تعریف شده و *MaxNC* و *MinNC* نیز نمایانگر مقادیر مطلوب و نامطلوب برای شاخص پیچیدگی گره‌ها هستند. در هدف چهارم (معادله ۴)، امتیاز نهایی تأمین‌کنندگان—که پیش‌تر بر اساس معیارهای پایداری و تاب‌آوری به دست آمده—بیشینه می‌شود.

محدودیت های مدل ارائه شده:

$$\left(\sum_{m,v} QMF_{rmfvs} + \sum_{b,v} QBF_{rbfvs} \right) = \sum_{d,v} Cons_r \times QFD_{fdvs} \qquad \forall s, r, f \quad (5)$$

$$\sum_{f,v} QFD_{fdvs} = \left(\sum_{c,v} QDC_{dcvs} + \sum_{o,v} QDO_{dovs}\right) \quad \forall s,r,d \quad (6)$$

$$\sum_{d,v} QDC_{dcvs} + DSH_{ds} \geq \widetilde{Dem}_{cs} \quad \forall s,c \quad (7)$$

$$\sum_{d,v} QDO_{dovs} + Sho_{os} \geq \widetilde{Dem}_{os} \quad \forall s,o \quad (8)$$

$$QDO_{dovs} \leq BM.\max\{0, \frac{Dmax - Dist_{do}}{Dmax}\} \quad \forall d,o,v,s \quad (9)$$

$$\sum_{p,v} QGP_{gpvs} = \sum_{c,o,v} \propto_s (QCG_{cgvs} + QOG_{ogvs}) \quad \forall s,g \quad (10)$$

$$\sum_{l,v} QGL_{glvs} = \sum_{c,o,v} (1-\propto_s)(QCG_{cgvs} + QOG_{ogvs}) \quad \forall s,o \quad (11)$$

$$\sum_{f,v} QMF_{rmfvs} \leq (1 - CL_{ms}).Cm_{rm}.XM_m \quad \forall r,m,s \quad (12)$$

$$\sum_{f,v} QBF_{rbfvs} \leq Cb_{rb}.XB_b \quad \forall r,b,s \quad (13)$$

$$\sum_{d,v} QFD_{fdvs} \leq \sum_{t} (1 - CL_{fs}).Cf_f + (YF_f \times ECF_f) \quad \forall f,s \quad (14)$$

$$\sum_{o,c,v} (QDC_{dcvs} + QDO_{dovs}) \leq (1 - CL_{ds}).Cd_d + (YD_d \times ECD_d) \quad \forall d,s \quad (15)$$

$$\sum_{c,o,v} (QCG_{cgvs} + QOG_{ogvs}) \leq (1 - CL_{gs}).Cg_g.YG_g \quad \forall g,s \quad (16)$$

$$\sum_{g,v} QGP_{gpvs} \leq (1 - CL_{ps}).Cp_p.YP_p \quad \forall p,s \quad (17)$$

$$\frac{\sum_{d,c,v,s} QDC_{dcvs}}{\sum_{c,s} \widetilde{Dem}_{cs}} \geq \text{SLC} \quad (18)$$

$$\frac{\sum_{d,o,v,s} QDO_{dovs}}{\sum_{o,s} \widetilde{Dem}_{os}} \geq \text{SLO} \quad (19)$$

$$\widetilde{LTM}_{mr}.XM_m \leq \widetilde{DT}_r \quad \forall m,r \quad (20)$$

$$\widetilde{LTB}_{br}.XB_b \leq \widetilde{DT}_r \quad \forall b,r \quad (21)$$

$$\sum_{g,v} QCG_{cgvs} = \sum_{d,v} ((RRC_{cs}.ZIoT.QDC_{dcvs}) + (RRC'_{cs}.(1 - ZIoT).QDC_{dcvs})) \quad \forall c,s \quad (22)$$

$$\sum_{g,v} QOG_{ogvs} = \sum_{d,v} ((RRC_{os}.ZIoT.QDO_{dovs}) + (RRC'_{cs}.(1 - ZIoT)).QDO_{dovs})) \quad \forall o,s \quad (23)$$

$$\sum_{m,v} QPM_{rpmvs} = \sum_{g,v} (SR_s.ZIoT + SR'_s.(1 - ZIoT)).Rec_r.QGP_{gpvs} \quad \forall p,r,s \quad (24)$$

$$\sum_{l,v} QGL_{rglvs} = \sum_{g,v} (1 - (SR_s.ZIoT + SR'_s.(1 - ZIoT))).Rec_r.QGP_{gpvs} \quad \forall p,r,s \quad (25)$$

$$VIS_{is} = (1 - IDR_{is}).INF_{is}.ZI_i \quad \forall i,s \quad (26)$$

$$\sum_{i} ZI_i = 1 \quad (27)$$

$$NC = \sum_{m} XM_m + \sum_{b} XB_b + \sum_{f} XF_f + \sum_{d} XD_d + \sum_{g} YG_g + \sum_{p} YP_p \quad (28)$$

$$U_{mfv} \leq XM_m.A_{mfv} \quad \forall m,f,v \quad (29)$$

$$U_{bfv} \leq XB_b.A_{bfv} \quad \forall b,f,v \quad (30)$$

$$U_{fdv} \leq XF_f.A_{fdv} \quad \forall f,d,v \quad (31)$$

$$U_{dcv} \leq XD_d.A_{dcv} \quad \forall d,c,v \quad (32)$$

$$U_{dov} \leq XD_d.A_{dov} \quad \forall d,o,v \quad (33)$$

$$U_{cgv} \le YG_g.A_{cgv} \quad \forall c,g,v \tag{34}$$

$$U_{ogv} \le YG_g.A_{ogv} \quad \forall o,g,v \tag{35}$$

$$U_{gpv} \le YG_g.A_{gpv} \quad \forall g,p,v \tag{36}$$

$$U_{glv} \le YG_g.A_{glv} \quad \forall g,l,v \tag{37}$$

$$U_{pmv} \le YP_p.A_{pmv} \quad \forall p,m,v \tag{38}$$

$$U_{plv} \le YP_p.A_{plv} \quad \forall p,l,v \tag{39}$$

$$XM_m, XB_b, XF_f, XD_d, YG_g, YP_p, ZI_i, ZIOT, U_{ee'v} \in \{0,1\} \tag{40}$$

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

محدودیت‌های (۵-۸) شرایط تعادل جریان در شبکه هستند. روابط (۵) و (۶) به ترتیب میزان انتقال مواد اولیه از تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان و حجم محصول جابه‌جا شده 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 (۱۲-۱۷) ظرفیت عملیاتی تسهیلات مختلف زنجیره تأمین را مدل‌سازی می‌کنند. روابط (۱۲) و (۱۳) ظرفیت تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان را پوشش می‌دهند؛ معادله (۱۴) محدودیت ظرفیت تولیدی کارخانجات را نشان می‌دهد؛ رابطه (۱۵) ظرفیت مراکز توزیع را مشخص می‌کند؛ و محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) به‌ترتیب ظرفیت مراکز جمع‌آوری و بازیافت را لحاظ می‌نمایند. روابط (۱۸و۱۹) سطح حداقلی خدمت‌رسانی مورد انتظار در نقاط تقاضا را تضمین می‌کنند. محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) نیز زمان تحویل مواد اولیه از تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان را تعیین می‌نمایند. در بخش مرتبط با اینترنت اشیا، محدودیت‌های (۲۲-۲۵) نقش فناوری‌های هوشمند را در فرآیندهای بازگشت و بازیافت منعکس می‌کنند. به‌طور مشخص، روابط (۲۲) و (۲۳) میزان محصولات برگشتی از مشتریان حضوری و آنلاین را با توجه به به‌کارگیری IoT برآورد می‌کنند؛ معادله (۲۴) مقدار مواد بازیافتی قابل فروش به تأمین‌کنندگان 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 دیدپذیری 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 ۲۹ تا ۳۹ نیز تصریح می‌کنند که جابه‌جایی مواد تنها زمانی امکان‌پذیر است که وسیله نقلیه v برای مسیر مربوطه انتخاب شده باشد. در نهایت، محدودیت‌های ۴۰ و ۴۱ نوع و دامنه متغیرهای تصمیم‌گیری را تعیین می‌کنند.

۳- ۵-روش بهینه سازی استوار فازی-تصادفی

عدم‌قطعیت یکی از چالش‌های اساسی در محیط‌های رقابتی امروزی است و نادیده‌گرفتن آن در فرایند برنامه‌ریزی می‌تواند به پیش‌بینی‌های غیرواقعی و در نهایت پیامدهای مالی و عملیاتی قابل‌توجهی منجر شود. تجربه همه‌گیری ویروس کرونا نمونه‌ای روشن از این واقعیت است؛ بحرانی که با ایجاد اختلالات گسترده در زنجیره‌های تأمین، سطح بی‌سابقه‌ای از ناپایداری را بر سازمان‌ها تحمیل کرد و ضرورت توجه به عدم‌قطعیت‌های ترکیبی را بیش از پیش آشکار ساخت. بر همین اساس، در این پژوهش مسئله مورد بررسی 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 مسائل پیچیده و ریسک‌پذیر مورد توجه قرار دارد[36–34] . توضیحات کامل مربوط به این روش و نسخه متناسب‌سازی‌شده آن برای مدل پیشنهادی در بخش پیوست ارائه شده است.

۳- ۶- روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح شده لکسیکوگرافیک چبی‌شف

در این پژوهش از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای اصلاح‌شده لکسیکوگرافیک-چبی‌شف (LCRMCGP) 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 بیش از اندازه 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. در مجموع، روش LCRMCGP نسبت به سایر نسخه‌های برنامه‌ریزی آرمانی، چارچوبی جامع‌تر، منعطف‌تر و مناسب برای حل مسائل چندهدفه تحت عدم‌قطعیت ارائه می‌دهد و می‌تواند مدیران را در دستیابی به راه‌حل‌های باثبات و منسجم یاری کند[28, 37, 38] . توضیحات کامل این مدل در فایل پیوست ارائه شده است.

۴-نتایج عددی

۴- ۱-مطالعه موردی

بررسی زنجیره تأمین در صنعت تجهیزات پزشکی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این صنعت مستقیماً 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 زنجیره تأمین در این حوزه ضروری است. در همین راستا، پژوهش حاضر به بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته بادوام تحت عدم‌قطعیت در شرکت »ابتکار تجهیز طب یکتا «می‌پردازد. این شرکت علاوه بر تولید تجهیزات پزشکی و آزمایشگاهی، خدمات تعمیر و نگهداری را نیز ارائه می‌دهد. معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در این تحقیق از سه منبع اصلی استخراج شده‌اند:

۱. ادبیات علمی مرتبط با زنجیره تأمین بادوام و حلقه‌بسته که معیارهای کلیدی مانند هزینه، کیفیت، مدیریت ضایعات و تاب‌آوری را مشخص می‌سازد.
۲. نظرات متخصصان صنعت تجهیزات پزشکی که از طریق مصاحبه‌های ساختاریافته گردآوری شده و در تطبیق معیارها با ویژگی‌های واقعی صنعت نقش اساسی داشته است.
۳. الزامات عملیاتی ناشی از عدم‌قطعیت ترکیبی که ضرورت توجه به حوزه‌هایی مانند انعطاف‌پذیری تولید، موجودی‌های استراتژیک، امنیت اطلاعات و بلوغ دیجیتال را آشکار می‌کند.در نتیجه، مجموعه نهایی معیارها شامل پنج بُعد اصلی و زیرمعیارهای وابسته است که هماهنگ با اهداف زنجیره تأمین بادوام و اقتضائات صنعت تجهیزات پزشکی در جداول ۳ تا ۷ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- اطلاعات کارشناسان
Table 2- Expert information

رده بندی شغلی	سابقه کاری	تحصیلات
مدیر تولید	۷	دکتری مدیریت صنعتی
کارشناس تحقیق و توسعه	۱۱	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع
مدیریت لجستیک	۵	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

جدول ۳- زیرمعیارهای عمومی
Table 3- General sub-criteria.

معیار	تعریف
هزینه	مجموع مخارج مرتبط با فعالیت‌های زنجیره تأمین
کیفیت	میزان تطابق محصول با استانداردها و الزامات مشتری
زمان تحویل	مدت‌زمان چرخه سفارش تا تحویل
سطح سرویس	توان پشتیبانی و پاسخگویی تأمین‌کننده 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 تأمین‌کننده 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 تأمین جایگزین.
ذخایر استراتژیک	میزان ذخایز استراتژیک در شرایط اضطراری
اشتراک اطلاعات	فرآیند شناسایی، ارزیابی، و انتخاب تأمین‌کنندگان برای تأمین مواد اولیه یا کالاها. برقراری ارتباط میزان تبادل مؤثر داده و هماهنگی با سایر اعضای زنجیره.
استواری	توان عملیاتی تأمین‌کننده در حفظ عملکرد پس از بروز اختلال.

جدول ۶- زیرمعیارهای چابکی

Table 6- Agile sub-criteria.

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

جدول ۷- زیرمعیارهای دیجیتال سازی

Table 7- Digitalization sub-criteria.

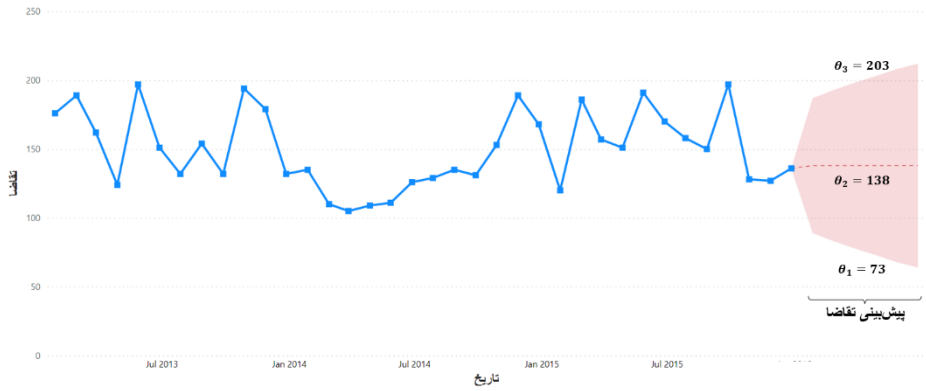
شاخص	تعریف
شایستگی دیجیتال	توان استفاده مؤثر از فناوری‌های نوین برای بهبود عملکرد.
سازگاری فناوری و کارکرد	میزان هماهنگی سیستم‌های فناوری با فرآیندهای عملیاتی زنجیره.
امنیت سایبری	قابلیت حفاظت از داده‌ها و زیرساخت‌های اطلاعاتی در برابر تهدیدات.
انبارداری هوشمند	به‌کارگیری ابزارهای دیجیتال برای مدیریت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

۴- ۲-نتایج پیش بینی تقاضا

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

- **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.
- **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.
- **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 (۱) تا (۳) نتایج پیش‌بینی فازی تقاضا را در هر یک از سناریوهای فوق نمایش می‌دهند.

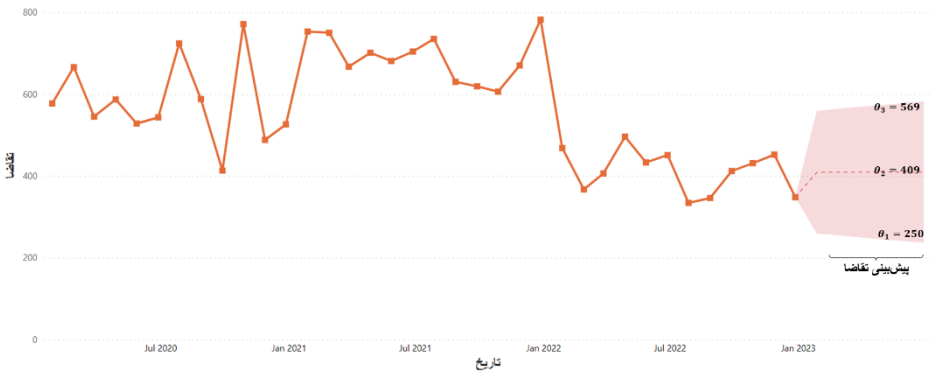


شکل ۱- پیش بینی فازی تقاضا در سناریو بدبینانه

Figure 1- ***Fuzzy Demand Forecasting under Pessimistic Scenario***

شکل ۲- پیش بینی فازی تقاضا در سناریو محتمل

Figure 2- ***Fuzzy Demand Forecasting under Most-Likely Scenarios***



شکل ۳- پیش بینی فازی تقاضا در سناریو خوشبینانه

Figure 3- ***Fuzzy Demand Forecasting under Optimistic Scenario***

۴-۳- 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 مورد بررسی بودند که شناخت دقیقی از عملکرد زنجیره تأمین 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 لحاظ‌کردن نوسانات محیطی، سه سناریوی خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه تعریف شد که به‌ترتیب 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 زنجیره تأمین در شرایط اختلال است. در میان زیرمعیارهای این بعد، تأمین‌کنندگان 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 به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۰۴۳۸۴ و ۰/۰۴۲۷۶ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند که ضرورت ارتقای هماهنگی و آمادگی عملیاتی را تأیید 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، در حالی که حقوق و شرایط کاری منصفانه نیز به‌عنوان یکی از شاخص‌های برجسته اجتماعی شناسایی شد. سایر ابعاد شامل معیارهای عمومی، چابکی و دیجیتال‌سازی به‌ترتیب 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 ارائه خدمات و سرعت پاسخگویی بالاترین وزن را دارند که بیانگر ضرورت واکنش سریع و سازگار با نوسانات تقاضاست. در نهایت، در حوزه دیجیتال‌سازی، سازگاری فناوری مهم‌ترین شاخص تشخیص داده شد و تأکید دارد که هم‌راستاسازی فناوری‌های نوین با فرآیندهای عملیاتی، پیش‌شرط اصلی موفقیت دیجیتال‌سازی در زنجیره تأمین 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 زنجیره تأمین تحت شرایط عدم‌قطعیت 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	۰/۲۰۱	کاهش هزینه	۰/۲۲۱	۰/۰۴۴۴۲
		سطح کیفیت	۰/۲۰۱	۰/۰۴۰۴
		زمان تحویل	۰/۱۹۵	۰/۰۳۹۱۹
		سطح سرویس	۰/۱۹۱	۰/۰۳۸۳۹
		گردش کار	۰/۱۹۲	۰/۰۳۸۵۹
	۰/۲۰۴	مدیریت ضایعات	۰/۲۱۸	۰/۰۴۴۴

پایداری		ثبات و قابلیت اطمینان مالی	۰/۱۹۱	۰/۰۳۸۹۶
		ایمنی و سلامت کارکنان	۰/۱۹۴	۰/۰۳۹۵۷
		طراحی سبز	۰/۱۸۸	۰/۰۳۸۳۵
		حقوق و شرایط کاری منصفانه	۰/۲۰۹	۰/۰۴۲۶
تاب آوری	۰/۲۱۶	مدیریت ریسک	۰/۱۹۴	۰/۰۴۱۹
		تامین کنندگان پشتیبان	۰/۲۱۲	۰/۰۴۵۷۹
		ذخایر استراتژیک	۰/۱۹۸	۰/۰۴۲۷۶
		اشتراک اطلاعات	۰/۲۰۳	۰/۰۴۳۸۴
		استواری	۰/۱۹۳	۰/۰۴۱۶۸
چابکی	۰/۱۹۴	انعطاف پذیری در تولید	۰/۱۹۹	۰/۰۳۸۶
		انعطاف در ارائه خدمات	۰/۲۱۵	۰/۰۴۱۷۱
		اعتماد سازی	۰/۱۸۵	۰/۰۳۵۸۹
		سرعت پاسخگویی	۰/۲۰۸	۰/۰۴۰۳
		انعطاف پذیری در منابع اولیه	۰/۱۹۲	۰/۰۳۷۴۴
دیجیتال سازی	۰/۱۸۵	شایستگی دیجیتال	۰/۱۹۶	۰/۰۳۶۲۶
		سازگاری فناوری و کارکرد	۰/۲۱۱	۰/۰۳۹۰۳
		امنیت سایبری	۰/۱۹۵	۰/۰۳۶۰۷
		انبارداری هوشمند	۰/۱۸۹	۰/۰۳۴۹۶
		روابط دیجیتال	۰/۲۰۹	۰/۰۳۸۶۶

۴-۴- نتایج روش تاپسیس فازی تصادفی

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

خروجی این تحلیل در قالب رتبه نهایی تأمین‌کنندگان و در دو گروه «تأمین‌کنندگان اصلی» و «تأمین‌کنندگان پشتیبان» در جدول ۹ نمایش داده شده است. مطابق نتایج، در میان تأمین‌کنندگان اصلی، تأمین‌کننده شماره ۲ با کسب مقدار شاخص ۰/۵ بالاترین عملکرد را داشته و در رتبه نخست قرار گرفته است؛ در مقابل، تأمین‌کننده شماره ۳ با مقدار ۰/۳ کمترین امتیاز را به دست آورده است. در گروه تأمین‌کنندگان پشتیبان نیز، تأمین‌کننده 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	۰/۴۸	۲
اصلی دوم	۰/۵	۱
اصلی سوم	۰/۳	۴
اصلی چهارم	۰/۴۳	۳
پشتیبان اول	۰/۴۹	۲
پشتیبان دوم	۰/۳۸	۳
پشتیبان سوم	۰/۶۲	۱

۴-۵- نتایج حل مدل ریاضی

در این پژوهش، شبکه زنجیره تأمین 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، در حالی که شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و نرخ اختلالات با اتکا به مطالعات پیشین برآورد شد.

برای مواجهه با عدم‌قطعیت، سه سناریوی بدبینانه، محتمل و خوش‌بینانه با احتمالات وقوع 0.25، 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 به‌ترتیب برابر با 0.35، ۰/۲، ۰/۲، ۰/۲ و ۰/۲۵ تعیین گردید. برای استخراج حدود آرمانی، مجموعه‌ای از هشت زیرمسأله حل شد. نتایج نهایی (جدول ۱۱) نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف اقتصادی 305824 میلیون تومان، مقدار تابع هدف زیست‌محیطی-اجتماعی 0.53891، شاخص بینایی و پیچیدگی 0.38148و امتیاز تأمین‌کنندگان 1.2513است. راه‌حل بهینه انتخاب تأمین‌کنندگان اصلی اول، دوم و چهارم و تأمین‌کننده 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. در نهایت، سیستم بلاک‌چین به‌عنوان گزینه برتر برای اشتراک‌گذاری اطلاعات انتخاب شد.

جدول ۱۰- ابعاد مساله تحقیق

Table 10- Dimensions of the research problem

تسهیل	تعداد
تامین کنندگان اصلی	۴
تامین کنندگان پشتیبان	۳
مراکز بالقوه تولید	۳
مراکز بالقوه بازیابی	۳
نقاط تقاضا	۸
مشتریان آنلاین	۸

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 جمع آوری اول و سوم	1
مرکز بازیافت دوم و سوم	1
سیستم اشتراک گذاری اطلاعات نوع دوم	1

۶- بررسی کارایی مدل تصمیم گیری ارائه شده

در این بخش، عملکرد مدل تصمیم‌گیری پیشنهادی با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از شاخص‌های ارزیابی و از طریق مقایسه با روش‌های جایگزین مورد سنجش قرار می‌گیرد. لازم به تأکید است که یافته‌های ارائه‌شده 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. در مجموع، این یافته‌ها مؤید آن است که روش بهترین-بدترین فازی-تصادفی گزینه‌ای معتبر و کارآمد برای تحلیل چندمعیاره تحت عدم‌قطعیت 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	۰/۰۴۷۲۳۵	۰/۰۱۷۳۲	۰/۰۴۴۵۱۶	۰/۰۸۱۳۸۲۴	۰/۰۴۶۹۱۲	۰/۰۱۹۳۴	۰/۰۸۰۳۸	۰/۰۲۶۱۸
انحراف کل	۱/۶۱۴	۰/۴۱۶۷	۱/۷۲۵۱	۲/۱۱۷۴	۱/۹۸۹۳	۰/۳۵۱۷	۲/۲۱۷۲	۰/۸۲۴۱

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 تأمین‌کنندگان با استفاده از هر یک از روش‌ها محاسبه و رتبه‌بندی گردید و خلاصه نتایج در جدول (۱۳) ارائه شده است. بررسی رتبه‌ها نشان می‌دهد که جایگاه تأمین‌کنندگان 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 تأیید 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	۲	۲	۱	۲
اصلی دوم	۱	۱	۲	۱
اصلی سوم	۴	۳	۴	۳
اصلی چهارم	۳	۴	۳	۴

۵-۳-کارایی روش برنامه ریز ی آرمانی چندگزینه ای اصلاح شده لکسیکوگراف چبیشف

با توجه به به‌کارگیری یک نسخه ارتقاءیافته 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 مسائل چندهدفه تحت عدم‌قطعیت تأیید می‌کند.

جدول ۱۴- مقدار انحرافات در نسخه های مختلف از برنامه ریزی ارمانی
Table 14- The values of deviation in the different defuzzification methods.

انحرافات	برنامه ریزی آرمانی وزنی	برنامه ریزی آرمانی چندگزینه ای اصلاح شده	برنامه ریزی آرمانی چند گزینه ای اصلاح شده با تابع مطلوبیت
(d_1^+, d_1^-)	(۱۴۳/۵ ،۰)	(۱۶/۱ ،۰)	(۰،۰)
(d_2^+, d_2^-)	(۶/۹ ،۰)	(۵/۴ ،۰)	(۰،۰)
(d_3^+, d_3^-)	(۰/۳۲۱ ،۰)	(۰،۰)	(۰،۰)
(d_4^+, d_4^-)	(۲۲/۸ ،۰)	(۰،۰)	(۰،۰)
(e_1^+, e_1^-)	-	(۱۹۸/۵ ،۰)	(۱۸۹/۷ ،۰)
(e_2^+, e_2^-)	-	(۰/۱۱۷ ،۰)	(۰/۹۴ ،۰)
(e_3^+, e_3^-)	-	(۰/۱۸۳ ،۰)	(۰/۱۱۹ ،۰)
(e_5^+, e_5^-)	-	(۰،۰/۳۲۵)	(۰،۰/۲۹)

نتایج مقایسه‌ای انجام‌شده میان مدل پیشنهادی و روش‌های مرجع موجود در ادبیات نشان می‌دهد که چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش از نظر 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 تأمین‌کنندگان، نتایج روش تاپسیس فازی-تصادفی با سایر روش‌های معتبر هم‌گرایی قابل قبولی 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 مؤثرتری دارد و می‌تواند تصمیمات پایدارتر و واقع‌بینانه‌تری را در محیط‌های همراه با عدم‌قطعیت ارائه کند. در مجموع، نتایج حاصل از تحلیل‌های مقایسه‌ای بیانگر آن است که چارچوب پیشنهادی نه‌تنها از منظر نظری دارای جامعیت بیشتری نسبت به مطالعات پیشین است، بلکه از نظر عملکرد تصمیم‌گیری نیز اثربخشی بالاتری در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین بادوام ارائه می‌دهد.

۶- نتیجه گیری

درنتایج عددی مدل نشان داد که در میان ابعاد زنجیره تأمین بادوام، تاب‌آوری با وزن ۰/۲۱۶ بالاترین اهمیت را داشته و معیار «تأمین‌کنندگان پشتیبان» مهم‌ترین زیرمعیار تصمیم‌گیری شناخته شد؛ موضوعی که بیانگر ضرورت توسعه منابع جایگزین تأمین در شرایط اختلال است. همچنین، در بعد پایداری، معیار مدیریت ضایعات بیشترین تأثیر را بر عملکرد شبکه داشت که اهمیت توجه به بازیافت و اقتصاد چرخشی را در صنعت تجهیزات پزشکی تأیید می‌کند.

خروجی مدل بهینه‌سازی نشان داد که انتخاب تأمین‌کنندگان اصلی اول، دوم و چهارم و همچنین تأمین‌کننده 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 زنجیره تأمین خود نباید صرفاً 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 زنجیره تأمین می‌تواند پیامدهای مستقیم بر سلامت جامعه داشته باشد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

پیشنهادات مدیریتی

پیشنهادات مدیریتی

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

-1تمرکز بر انتخاب تأمین‌کنندگان تاب‌آور و چندمنبعی

نتایج نشان داد که معیار تاب‌آوری و وجود تأمین‌کنندگان پشتیبان از مهم‌ترین عوامل موفقیت شبکه تأمین در شرایط اختلال است. بنابراین، مدیران باید از وابستگی به یک منبع تأمین اجتناب کرده و استراتژی چندتأمین‌کنندگی و توسعه منابع جایگزین را در اولویت قرار دهند.

-2توسعه 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 زنجیره تأمین می‌شود. ازاین‌رو، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال و توسعه بسترهای تبادل داده می‌تواند ریسک اختلالات اطلاعاتی و عملیاتی را کاهش دهد.

-3بهره‌گیری 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 زنجیره تأمین حلقه‌بسته را ارتقا دهند.

-4ایجاد 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.

-5توجه 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.

-6استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری داده‌محور در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین

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 عدم‌قطعیت بهبود دهند. ازاین‌رو، استفاده از مدل‌های تحلیلی و هوشمند در برنامه‌ریزی راهبردی زنجیره تأمین توصیه می‌شود.

۷- محدودیت های تحقیق و پیشنهادات 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 قابل توجه 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 عدم‌قطعیت بهره گرفته است، در حالی که در محیط‌های واقعی ممکن است ساختارهای پیچیده‌تری از عدم‌قطعیت—از جمله 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 عدم‌قطعیت لحاظ شد. توسعه سناریوهای چندسطحی یا ترکیبی می‌تواند چشم‌انداز جامع‌تری از رفتار شبکه زنجیره تأمین در محیط‌های پویا ارائه کند، هرچند چنین کاری بار محاسباتی و زمان حل مدل را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد.

چهارم، تمرکز پژوهش صرفاً بر تأمین‌کنندگان داخلی بوده است. حال آنکه در بسیاری از صنایع، زنجیره‌های تأمین 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.

در مجموع، این محدودیت‌ها نه‌تنها خللی در اعتبار نتایج وارد نمی‌کنند، بلکه زمینه‌های ارزشمندی برای گسترش و تعمیق پژوهش در حوزه زنجیره تأمین بادوام و هوشمند تحت شرایط عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت**: پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده از مدل‌های پیچیده‌تر عدم‌قطعیت 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 زنجیره تأمین و تغییرات محیطی را بهتر بازنمایی کند. چنین رویکردی امکان تحلیل جامع‌تری از انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری شبکه فراهم می‌آورد.

۴. **گسترش مدل به زنجیره‌های تأمین جهانی**: پیشنهاد می‌شود مدل حاضر با در نظر گرفتن تأمین‌کنندگان 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 زنجیره تأمین هوشمند**: پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی تأثیر فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، دیجیتال‌توین، اینترنت اشیای پیشرفته و بلاک‌چین نسل دوم را بر بهینه‌سازی شبکه‌های بادوام و حلقه‌بسته 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 تأثیر ریسک‌گریزی مدیران، همکاری میان واحدها، اعتماد بین شرکای زنجیره و رفتار تصمیم‌گیرندگان در شرایط عدم‌قطعیت، می‌تواند بعد انسانی زنجیره تأمین را در مدل‌های آینده تقویت کند.

۸. **توسعه مدل‌های یادگیرنده و خودبهینه‌ساز**: 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 ارائه 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 ارائه تجربیات و اطلاعات تخصصی، زمینه انجام تحلیل‌های دقیق‌تر را فراهم ساختند. قدردانی ویژه نیز از مدیران و کارکنان شرکت «ابتکار تجهیز طب یکتا» به‌عمل 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، تأیید و برای انتشار ارسال کرده‌اند. همچنین، نویسندگان تضمین می‌کنند که این مقاله حاصل کار اصیل آنان است، پیش‌تر منتشر نشده 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.

[2] Zekhnini, K., Chaouni Benabdellah, A., & Cherrafi, A. (2023). A multi-agent based big data analytics system for viable supplier selection. *Journal of intelligent manufacturing*. DOI: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. DOI: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. DOI: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.

[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. DOI: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. DOI: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*. DOI: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. DOI:10.1007/s00500-022-07572-0

[10] 1. Goodarzian F, Taleizadeh AA, Ghasemi P, Abraham A (2021) An integrated sustainable medical supply chain network during COVID-19. Eng Appl Artif Intell 100:104188Goodarzian, 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.

[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.

[12] Mahdi, M., & Ahmad, P. (2022). Viable healthcare supply chain network design for a pandemic. *Annals of operations research*. DOI:10.1007/s10479-022-04934-7

[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.

[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). DOI: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* [presentation]. IFIP advances in information and communication technology. DOI: 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.

[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.

[18] Padovano, A., & Ivanov, D. (2025). Towards resilient and viable supply chains: a multidimensional model and empirical analysis. *International journal of production research*, 1–39.

[19] Lotfi, R., Safavi, S., Gharehbaghi, A., Zare, S. G., Hazrati, R., & Weber, G. (2021). Viable Supply Chain Network Design by considering Blockchain Technology and Cryptocurrency, *2021*.

[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*, (Ivanov 2021). DOI:10.1007/s12063-022-00277-5

[21] Ajayi, M. O., & Laseinde, O. T. (2023). Promoting viable supply chain management (scm) in the nigeria agro-allied industry using internet of things bt - proceedings of seventh international congress on information and communication technology (pp. 389–399). Singapore: Springer Nature Singapore.

[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. DOI: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. DOI: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. DOI: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).

[26] Avazpoor, 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*, e726365.

[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.

[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*, 1–26.

[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.

[30] Kashanian Monfared, N., Safaie, N., & Hosseini Nezhad, S. J. (2025). A decision-making model for the problem of designing the layout of medical centers considering uncertainty. *System engineering and productivity*.

[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.

[32] Sun, L., Yu, C., Li, J., Yuan, Q., & Zhao, S. (2024). A two-stage decision model for sustainable-resilient supplier selection and order allocation under uncertain environment. *Kybernetes*, *ahead-of-print*(ahead-of-print). DOI:10.1108/K-11-2023-2347/FULL/XML

[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). DOI: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. DOI: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.

[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.

[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.

[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. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.124994