



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 17, Issue 1, No. 44, 2026



DOI: [10.22108/pom.2026.146171.1631](https://doi.org/10.22108/pom.2026.146171.1631)

(Research paper)

Optimizing the Biofuel Supply Chain with an Emphasis on Sustainability and the Mitigation of Inventory Risk

Elham Mohseni*

Department of Management, Faculty of Administrative Science and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran, elhammohseni@ase.ui.ac.ir

Dariush Zanjirani

Department of Management, Faculty of Administrative Science and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran, d.mohamadi@ase.ui.ac.ir

Purpose: The increasing environmental concerns linked to fossil fuel consumption—greenhouse gas emissions, climate change, and resource depletion—have heightened the global demand for sustainable, renewable energy systems. Among alternatives, biofuels have drawn considerable attention for their potential to bolster energy security, reduce environmental pollution, and make effective use of agricultural and forestry residues. However, designing and managing biofuel supply chains is inherently complex due to uncertainties in biomass availability, fluctuating market demand, transportation limitations, and operational risks. To address these challenges, this study develops a comprehensive multi-objective optimization model for the sustainable design and management of a biofuel supply chain under uncertain supply and demand. The proposed framework simultaneously minimizes total operational costs, unmet demand, carbon dioxide (CO₂) emissions, and inventory risk to enhance supply chain sustainability, resilience, and operational efficiency. A central aim of this research is to fill a gap in the literature by treating inventory risk as an independent optimization objective alongside economic and environmental sustainability indicators.

Design/methodology/approach: This study proposes a multi-objective mathematical optimization framework for biofuel supply chain network design and management under uncertainty. The model integrates economic, environmental, and operational risk dimensions within a unified decision-making structure. To obtain balanced compromise solutions among conflicting objectives, the LP-metric method is employed as the primary multi-objective optimization technique. Because sustainability objectives are often contradictory, the LP-metric approach enables identification of efficient trade-offs among cost minimization, environmental protection, service-level improvement, and inventory risk reduction. Furthermore, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) is used to determine the relative importance and weights of objectives based on expert judgment under uncertainty. Applying FAHP enhances the realism and flexibility of the decision-making process by incorporating ambiguity in human evaluations. In addition, sensitivity analysis and Pareto optimal solutions are examined to validate the robustness and performance of

* Corresponding author, 0000-0002-2987-6765

2981-0329 / © University of Isfahan

This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)



the proposed model under different supply and demand scenarios. The scenario-based analysis investigates the impacts of supply and demand fluctuations on network configuration, facility utilization, operational costs, greenhouse gas emissions, and inventory risk.

Findings: The findings demonstrate that the proposed optimization framework effectively manages uncertainties while improving economic efficiency, environmental sustainability, and operational stability within the biofuel supply chain. Results indicate that integrating inventory risk into the optimization process significantly enhances the supply chain's resilience to fluctuations in supply and demand. The proposed model reduces total costs, unmet demand, and CO₂ emissions while maintaining a balanced trade-off among sustainability objectives. Scenario analysis reveals that variations in supply and demand directly affect the structure and operational performance of the supply chain network, particularly the number and utilization rates of warehouses, preprocessing centers, and active biogas facilities. Scenarios with reduced supply and demand generally lead to lower operational costs and reduced greenhouse gas emissions due to decreased production and transportation activities. However, underutilization of facilities in these scenarios may increase inventory-related risks and reduce operational efficiency. Conversely, higher supply and demand scenarios improve capacity utilization and reduce inventory risk, although they may raise transportation and operational costs. Overall, the results confirm that the proposed model provides an effective decision-support framework for identifying sustainable and resilient strategies in biofuel supply chain management under uncertainty.

Research limitations/implications: Despite its contributions, this research has several limitations that suggest opportunities for future studies. The proposed model relies on simplifying assumptions that may not fully capture the complexities of real-world biofuel supply chains. In particular, the study primarily addresses economic and environmental dimensions while social and cultural sustainability indicators are considered only indirectly. Future research could incorporate broader sustainability dimensions such as employment generation, social welfare, public acceptance, and regional development impacts. Moreover, the current model treats uncertainty via scenario-based analysis; future studies may benefit from integrating more advanced uncertainty modeling approaches such as robust optimization, stochastic programming, and machine learning techniques. Additional research could also explore the application of metaheuristic algorithms to solve larger, more complex real-world supply chain problems more efficiently. Comparative analyses across different countries and renewable energy systems could further enhance the generalizability and applicability of the proposed framework.

Practical implications: The proposed framework offers valuable managerial and strategic implications for policymakers, industrial managers, and energy planners engaged in renewable energy development and sustainable supply chain management. By concurrently considering economic performance, environmental impacts, and inventory risk, the model enables decision-makers to make more balanced, well-informed strategic choices regarding facility locations, storage capacity planning, biomass allocation, and transportation management. The results of this study can support the development of resilient, sustainable biofuel supply chain infrastructures, especially in countries aiming to reduce dependence on fossil fuels and enhance renewable energy utilization. The integration of FAHP and LP-metric methods also provides a practical, flexible decision-making tool capable of addressing uncertainty and conflicting objectives in real-world planning contexts. Additionally, the scenario-based analysis delivers useful insights for designing adaptive strategies under varying market and supply conditions.

Social implications: The development of sustainable biofuel supply chains can generate significant social and environmental benefits by reducing greenhouse gas emissions, decreasing reliance on non-renewable fossil fuels, and promoting cleaner energy production systems. The utilization of agricultural and forestry residues as biomass feedstock can also contribute to waste reduction and improved resource efficiency. In addition, the expansion of biofuel industries may create employment opportunities in rural and agricultural regions, thereby supporting local economic development and improving social welfare. By improving supply chain resilience and sustainability, the proposed framework can assist governments and organizations in promoting long-term environmental protection and sustainable energy transitions. The findings of this study may also support national strategies aimed at achieving carbon reduction targets and strengthening energy security.

Originality/value: This study contributes to the literature by proposing a comprehensive, integrated multi-objective optimization framework for biofuel supply chain design under supply and demand uncertainty. Unlike many previous studies that focused mainly on cost reduction or environmental performance, this research introduces inventory risk as an independent optimization objective within a sustainable supply chain framework. This novel perspective enhances the realism and applicability of the model for operational and strategic decision-making. Additionally, integrating FAHP for objective weighting with LP-metric optimization to generate compromise solutions represents an innovative hybrid decision-making approach capable of handling uncertainty and conflicting sustainability objectives more effectively. The scenario-based analysis provides a systematic evaluation of the simultaneous impacts of supply and demand fluctuations on economic, environmental, and operational performance. Thus, the proposed model offers both theoretical and practical contributions to advancing sustainable and resilient biofuel supply chain management.

Keywords: Multi-objective optimization, Sustainability, Random analysis, Fuzzy Analytical Hierarchical Process (FAHP), Biofuels supply chain, Probable scenarios



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۷، شماره ۱، پیاپی ۴۴، ۱۴۰۵

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷ ص ۶۹-۹۲



DOI: [10.22108/pom.2026.146171.1631](https://doi.org/10.22108/pom.2026.146171.1631)

(مقاله پژوهشی)

بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی با تمرکز بر پایداری و کاهش ریسک انبار

الهام محسنی^۱؛ داریوش محمدی زنجیرانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، elhammohseni@ase.ui.ac.ir

۲- دانشیار گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، d.mohamadi@ase.ui.ac.ir

چکیده: در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی و مدیریت زنجیره تأمین سوخت زیستی تحت شرایط عدم قطعیت عرضه و تقاضا ارائه شده است و اهدافی چون کاهش هزینه‌های کلی، تقاضای تأمین‌نشده، انتشار گاز CO₂ و کاهش ریسک انبار را با هدف بهبود پایداری، کاهش آثار زیست‌محیطی و ارتقای کارایی دنبال می‌کند. مدل چندهدفه با استفاده از روش معیار جامع^۱، برای بهینه‌سازی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^۲ برای وزن‌دهی اهداف، تعادل دقیق و پایداری را میان اهداف مختلف برقرار کرده است. همچنین تحلیل حساسیت و راه‌حل‌های پارتو برای اعتبارسنجی عملکرد مدل و بررسی مبادلات میان اهداف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی با مدیریت عدم قطعیت‌ها، نه تنها هزینه‌ها را به‌طور مؤثری کاهش و کارایی را افزایش می‌دهد، آثار زیست‌محیطی و ریسک انبار را نیز به حداقل می‌رساند. تحلیل سناریوها حاکی از آن است که تغییرات در عرضه و تقاضا، تأثیر مستقیمی بر پیکربندی زنجیره تأمین دارد و به‌ویژه تعداد انبارها، مراکز پیش‌پردازش و تأسیسات بیوگاز فعال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش عرضه و تقاضا، به کاهش هزینه‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شد؛ اما در برخی موارد افزایش ریسک انبار را نیز به همراه داشت. در مقابل، افزایش عرضه و تقاضا به بهبود بهره‌برداری از ظرفیت‌ها و کاهش ریسک انبار منجر شد. این مدل با ارائه تحلیل‌های دقیق و مبادلات استراتژیک میان اهداف، به تصمیم‌گیرندگان در انتخاب بهترین استراتژی‌ها برای تخصیص منابع و زیرساخت‌ها کمک می‌کند و رویکرد جامعی را برای مدیریت پایدار و بهینه زنجیره تأمین سوخت زیستی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، پایداری، تحلیل تصادفی، روش سلسله‌مراتبی فازی، زنجیره تأمین

سوخت‌های زیستی، سناریوهای احتمالی



۱- مقدمه

توسعه پایدار، رویکردی است که ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی را به‌طور یکپارچه در نظر می‌گیرد و هدف آن تأمین نیازهای انسانی به شکلی کارآمد و پایدار است (Karakosta & Askounis, 2010). انرژی نقش کلیدی در توسعه پایدار دارد؛ اما افزایش مصرف انرژی، موجب کاهش منابع و آلودگی می‌شود. با توجه به اینکه سوخت‌های فسیلی، محدود و تجدیدنپذیرند و به آلودگی هوا، گرمایش جهانی و تغییرات آب‌وهوایی منجر می‌شوند، بنابراین جایگزینی آنها با منابع تجدیدپذیر ضروری است (Kiwjaroun et al., 2009) و بهبود بهره‌وری انرژی از طریق منابع پایدار و توسعه منابع جایگزین برای کاهش وابستگی به انرژی‌های تجدیدنپذیر، اهمیت دارد (Tan et al., 2018). علاوه بر این، صنعت سوخت‌های زیستی با استفاده از ضایعات کشاورزی و جنگلی به‌عنوان مواد اولیه، به کاهش پسماندها و حفظ منابع طبیعی کمک می‌کند (Jeswani et al., 2020). در میان منابع تجدیدپذیر نیز زیست‌توده، منبعی پاک و پایدار است که پتانسیل چشمگیری برای ارتقای امنیت انرژی دارد. استفاده از زیست‌توده به‌عنوان یک منبع انرژی، وابستگی به واردات نفت و گاز را کاهش و امنیت انرژی کشور را افزایش می‌دهد که این امر به سهم خود، به صرفه‌جویی ارزی و کاهش هزینه‌های تولید منجر می‌شود (Haghighi & Babapour, 2018).

زنجیره تأمین سوخت زیستی^۳ شامل تمام مراحل از تولید و برداشت زیست‌توده تا تبدیل آن به سوخت و توزیع به مصرف‌کنندگان است (Wang et al., 2022). به دلیل پیچیدگی‌های فرآیند تبدیل زیست‌توده به انرژی زیستی، ارزیابی دقیق شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی اهمیت زیادی دارد (Jakubowski, 2022). با وجود توسعه گسترده پژوهش‌ها در زمینه طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی، بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین، تمرکز خود را بر کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری اقتصادی یا کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی معطوف کرده‌اند. این در حالی است که زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی به دلیل ماهیت زیست‌توده، وابستگی شدید به شرایط اقلیمی و نوسانات عرضه و تقاضا، با انواع ریسک‌های عملیاتی مواجه است که پایداری و عملکرد بلندمدت آن را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد. با وجود این، ریسک انبارداری یکی از مؤلفه‌های کلیدی ریسک عملیاتی است که در بیشتر پژوهش‌ها نادیده گرفته شده است، تنها به‌صورت محدودیت جانبی در مدل‌ها لحاظ شده و کمتر به‌عنوان یک هدف مستقل در چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه بررسی شده است.

از سوی دیگر، اگرچه در پیشینه زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی به مفهوم پایداری به‌طور فزاینده‌ای توجه شده است، بسیاری از مطالعات موجود تنها یک یا دو بعد از پایداری، نظیر ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی را بررسی کرده‌اند. فقدان چارچوبی جامع که ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و ریسک عملیاتی را به‌صورت هم‌زمان در یک مدل یکپارچه لحاظ کند، یکی از خلأهای مهم پیشینه محسوب می‌شود که به تصمیم‌گیری‌های ناقص و کاهش تاب‌آوری زنجیره تأمین در مواجهه با عدم قطعیت‌ها منجر می‌شود. علاوه بر این، در بیشتر مدل‌های چندهدفه ارائه‌شده، وزن‌دهی اهداف یا به‌صورت فرضی انجام می‌شود و یا مبتنی بر روش‌های کلاسیک تصمیم‌گیری است که توانایی محدودی در مواجهه با عدم قطعیت و قضاوت‌های انسانی دارند. همچنین، اگرچه

عدم قطعیت عرضه و تقاضا در برخی مطالعات لحاظ شده است، تحلیل سناریو محور آثار هم‌زمان تغییرات عرضه و تقاضا بر هزینه‌ها، به پیامدهای زیست‌محیطی و ریسک‌های عملیاتی به صورت یکپارچه و نظام‌مند کمتر توجه شده است. این کاستی‌ها، نیاز به رویکردهای تصمیم‌گیری پیشرفته و منعطف را برجسته می‌کند.

در راستای پوشش خلأهای شناسایی شده، هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی و مدیریت زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی تحت شرایط عدم قطعیت عرضه و تقاضاست؛ مدلی که با در نظر گرفتن هم‌زمان هزینه‌های اقتصادی، آثار زیست‌محیطی و ریسک انبارداری، امکان ارتقای پایداری و تاب‌آوری زنجیره تأمین را فراهم می‌آورد. به‌طور مشخص، این پژوهش با هدف حداقل‌سازی هزینه کل شبکه، کاهش تقاضای برآورده‌نشده، کاهش انتشار CO_2 و کنترل ریسک انبارداری انجام شده است.

در این پژوهش، یک رویکرد نوآورانه برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی ارائه می‌شود که در آن ریسک انبارداری یک هدف مستقل و هم‌تراز با دیگر اهداف پایداری و در چارچوب یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه لحاظ شده است. این رویکرد امکان تبیین نقش ریسک‌های عملیاتی را در عملکرد کلی زنجیره تأمین فراهم می‌کند و بخشی از خلأ موجود در مطالعات پیشین را پوشش می‌دهد. به‌منظور افزایش واقع‌گرایی فرآیند تصمیم‌گیری، وزن اهداف چندگانه با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و مبتنی بر تجمیع نظرات خبرگان، تعیین شده است. همچنین با به‌کارگیری روش معیار جامع و تحلیل سناریوهای تغییرات عرضه و تقاضا، تعادل کارآمدی میان اهداف متعارض ایجاد و اثر هم‌زمان این نوسانات بر هزینه‌ها، انتشار CO_2 و ریسک‌های عملیاتی به صورت نظام‌مند بررسی می‌شود.

مدل پیشنهادی با هدف ایجاد توازن میان ابعاد مختلف پایداری، شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد و داده‌های استخراج‌شده از مطالعات پیشین، امکان اعتبارسنجی نتایج و تقویت کاربردپذیری مدل را در تصمیم‌گیری‌های راهبردی فراهم می‌کند.

این مقاله در پنج بخش ساختار یافته است: در بخش اول، اهمیت موضوع و چالش‌های موجود در بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی بررسی شده است، بخش دوم مطالعات مرتبط را مرور کرده است، در بخش سوم، مدل بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد می‌شود، بخش چهارم به بررسی نتایج اختصاص دارد و تحلیل حساسیت و توصیه‌های مدیریتی، در بخش پنجم بررسی می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری پژوهش و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده در بخش ششم ارائه شده است.

۲- پیشینه نظری پژوهش

زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها و فرایندهای متوالی و منسجمی است که تولید، پردازش، توزیع و مصرف سوخت‌های زیستی را شامل می‌شود و نقش کلیدی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد (Zhou et al., 2024). با مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی، پژوهشگران بیشتر به آثار زیست‌محیطی مانند تغییرات آب و هوا، تخریب منابع طبیعی، گرمایش جهانی و هزینه‌های جنبی توجه کرده‌اند (Hsu et al., 2023) و این زنجیره یک حوزه تحقیقاتی پویا و در حال توسعه است که هدف

آن یافتن راه‌حل‌های پایدار و کارآمد برای تبدیل زیست‌توده به انرژی‌های تجدیدپذیر است (Zarafati and Gol, 2021).

آمبای و همکاران^۴ (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای، لایه‌ها و زیرساخت‌های زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی را بررسی و پیشنهادهایی را برای حمایت از رده‌های مختلف این زنجیره ارائه کرده‌اند. چودوری و همکاران^۵ (۲۰۲۵) نقش حمایتی دولت‌ها را در تدوین مقررات و استانداردهای لازم به جهت بهره‌برداری از منابع زیست‌توده را ضروری دانسته‌اند.

پژوهش‌ها و مطالعات گسترده‌ای درباره چالش‌ها و استراتژی‌های مقابله با آنها انجام شده است. کاندپال و همکاران^۶ (۲۰۲۴) درباره افزایش نرخ خرید سوخت‌های زیستی و مشکلات سرمایه‌گذاری، واسی^۷ (۲۰۲۰) مشکلات مربوط به کشت زمین و دسترسی به منابع زیستی، پن و همکاران^۸ (۲۰۲۴) انتشار گازهای گلخانه‌ای، عباسی و همکاران^۹ (۲۰۱۲) هزینه‌های بالای حمل‌ونقل، قدیر و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۱) احتیاجات و ملزومات زیرساختی و گادج و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۰) الزام استفاده از تکنولوژی و فناوری‌های پیشرفته و تحقیقاتی را انجام داده‌اند.

از دیگر چالش‌های مهم در این زنجیره، عدم قطعیت است که شامل نوسانات عرضه زیست‌توده، تغییرات تقاضای بازار، شرایط اقلیمی پیش‌بینی ناپذیر و محدودیت‌های لجستیکی می‌شود (Abbasi et al., 2012). عواملی نظیر خشک‌سالی، سیل و تغییرات دمایی، تولید و کیفیت زیست‌توده را کاهش می‌دهند و موجب اختلال در فرآیندهای زنجیره تأمین می‌شوند (Kandpal et al., 2024). مدیریت ریسک در مواجهه با عدم قطعیت نیز حیاتی تلقی می‌شود (Zhou et al., 2024). برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها، استفاده از رویکردهایی مانند برنامه‌ریزی سناریو، مدل‌سازی چندهدفه و ابزارهای تصمیم‌گیری نظیر منطق فازی ضروری است (Gital & Bilgen, 2024). این اقدامات با کاهش ریسک‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری، پایداری زنجیره تأمین را تضمین و به بهبود عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی آن کمک می‌کنند (Han & Um, 2024).

طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی، یکی از حوزه‌های مهم و پرکاربرد پژوهشی است که در دهه اخیر، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. آنها از روش‌های متنوع مدل‌سازی از جمله شبیه‌سازی، برنامه‌ریزی ریاضی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی^{۱۲} برای بهینه‌سازی رده‌های مختلف این فرایند پیچیده استفاده می‌کنند (Azar & Raoufian, 2010). بهمنی و همکاران^{۱۳} (۲۰۲۴) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه را برای طراحی و مدیریت زنجیره تأمین بیودیزل تحت شرایط اختلال ارائه کرده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که استفاده از راهبردهای بهینه، آثار اختلالات را کاهش می‌دهند، هزینه‌ها را کنترل می‌کند و تاب‌آوری زنجیره تأمین را بهبود می‌بخشد. در همین راستا، عربی و یعقوبی^{۱۴} (۲۰۲۴) با استفاده از رویکرد لاگرانژی و مدل‌سازی دوهدفه، تحت شرایط عدم قطعیت، زنجیره تأمین سوخت زیستی را بررسی کرده‌اند. به‌طور مشابه، هوانگ و همکاران^{۱۵} (۲۰۲۵) با بهره‌گیری از مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی استوار و ژو و همکاران^{۱۶} (۲۰۲۴) با به‌کارگیری مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، طراحی و بهینه‌سازی این زنجیره را بررسی کرده‌اند. همچنین هو و همکاران^{۱۷} (۲۰۲۴)، برنامه‌ریزی خطی چند هدفه فازی را برای مدیریت عدم قطعیت‌ها در پارامترها و متغیرهای مختلف را پیشنهاد داده‌اند.

تکنیک‌های شبیه‌سازی و فراابتکاری، روش‌های نوین در طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی اند و نقش درخور توجهی در ارائه راه‌حل‌های کارآمد برای مسائل پیچیده و چندهدفه دارند. این تکنیک‌ها با قابلیت مدیریت محدودیت‌ها و شرایط عدم قطعیت، امکان یافتن راه‌حل‌های بهینه و انعطاف‌پذیر را در سیستم‌های پیچیده زنجیره تأمین فراهم و به بهبود عملکرد و پایداری این زنجیره‌ها کمک می‌کنند (Suresh et al., 2025).

مهارانا و همکاران^{۱۸} با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، یک مدل ریاضی غیرخطی را برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی طراحی کرده‌اند. این مدل با مدیریت محدودیت‌های نرخ جریان و ظرفیت، هزینه‌های کل را کاهش داده و کارایی زنجیره تأمین را بهبود بخشیده است. در مطالعه دیگری، سورش و همکاران^{۱۹} با استفاده از بهینه‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۲۰} از طریق الگوریتم‌های فراابتکاری، پیش‌بینی دقیقی از آلاینده‌های موتور بیودیزل ارائه کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده کاهش مونوکسید کربن^{۲۱}، هیدروکربن‌های نسوخته^{۲۲} و دود، همراه با افزایش اکسیدهای نیتروژن^{۲۳} است. این پژوهش نقش مهمی در بهبود عملکرد و پایداری زنجیره تأمین سوخت زیستی دارد.

جدول (۱)، خلاصه‌ای از پژوهش‌های پیشین را در زمینه بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی، با تمرکز بر مدل‌سازی ریاضی، ابعاد پایداری و رویکردهای عدم قطعیت نمایش می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات مرتبط با بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی

Table 1 - Summary of studies related to biofuel supply chain optimization

روش	عدم قطعیت	اهداف پایداری			سال	رفرنس
		زیست محیطی	اجتماعی	اقتصادی		
برنامه‌ریزی خطی چند هدفه	--	--	●	●	(۲۰۲۲)	ابراهیمی و باقری ^{۲۴}
برنامه‌ریزی خطی فازی	●	--	--	--	(۲۰۱۴)	زیولکوفسکا ^{۲۵}
ارزیابی چند معیاره مبتنی بر GIS فازی	--	●	--	--	(۲۰۱۵)	لوتیس و همکاران ^{۲۶}
برنامه‌ریزی تصادفی چند دوره‌ای	●	●	●	●	(۲۰۱۷)	عثمانی و ژانگ ^{۲۷}
بهینه‌سازی استوار	●	--	--	--	(۲۰۱۷)	ژانگ و جیانگ ^{۲۸}
برنامه‌ریزی خطی فازی	●	●	--	●	(۲۰۱۸)	احمد و سارک ^{۲۹}
فراابتکاری چندهدفه	--	●	--	●	(۲۰۱۸)	اسدی و همکاران ^{۳۰}
مدل ریاضی تحت شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک	--	--	--	●	(۲۰۱۹)	سیوامانی و همکاران ^{۳۱}
برنامه‌ریزی خطی تصادفی	●	--	--	--	(۲۰۲۰)	گنسن و همکاران ^{۳۲}
فراابتکاری چندهدفه	●	--	●	●	(۲۰۲۱)	علی احمدی و همکاران ^{۳۳}
برنامه‌ریزی خطی و دینامیک سیستم	--	●	●	●	(۲۰۲۱)	رفیق و همکاران ^{۳۴}
برنامه‌ریزی خطی تصادفی	--	●	--	●	(۲۰۲۱)	فرناندز-پوراتیچ و همکاران ^{۳۵}
برنامه‌ریزی عدد صحیح دومرحله‌ای	●	--	●	●	(۲۰۲۴)	ابویت‌ها-اوجدا و همکاران ^{۳۶}
برنامه‌ریزی خطی دو هدفه فازی	●	●	--	●	(۲۰۲۲)	ساوجی و همکاران ^{۳۷}
تلفیق یادگیری ماشین و برنامه‌ریزی خطی	--	●	●	●	(۲۰۲۲)	مؤمنی تبار و همکاران
ترکیب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح فازی	--	●	●	●	(۲۰۲۳)	آلیانو فیلهو و همکاران ^{۳۸}
ترکیب هوش مصنوعی و برنامه‌ریزی خطی	--	●	●	●	(۲۰۲۳)	هلال و همکاران ^{۳۹}
برنامه‌ریزی خطی چند هدفه	--	●	●	●	(۲۰۲۴)	ژو و همکاران
برنامه‌ریزی خطی چند هدفه	●	●	●	●	(۲۰۲۵)	پژوهش حاضر

۳- روش شناسی پژوهش

مدل پیشنهادی این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین انرژی زیستی در شرایط عدم قطعیت در عرضه و تقاضاست.

۳-۱ مدل سازی ریاضی

قبل از تشریح مدل ریاضی، اجزای مدل به شرح زیر معرفی می‌شود:

مجموعه‌ها (اندیس‌ها)	
i	مجموعه مزارع برداشت توده چوب و درخت پالونیا
p	نوع محصول برداشت شده (توده چوب یا درخت پالونیا)
j_1	مجموعه تعداد انبارهای احداث شدنی
j_2	مجموعه تعداد انبارهای اجاره شدنی
k	مجموعه مراکز پیش‌پردازش
k'	مجموعه ظرفیت‌های مراکز پیش‌پردازش
r	مجموعه تأسیسات بیوگاز
d	مجموعه مراکز تقاضا
A_1	مجموعه مسیرهای منتخب از مزرعه تا انبارهای احداث شده یا استیجاری
A_2	مجموعه مسیرهای منتخب از انبارها تا مراکز پیش‌پردازش
A_3	مجموعه مسیرهای منتخب از مراکز پیش‌پردازش تا تأسیسات بیوگاز
A_4	مجموعه مسیرهای منتخب از تأسیسات بیوگاز تا متقاضیان

پارامترهای اقتصادی	
C_{fws1j_1}	هزینه ثابت برای احداث انبار j_1
C_{fws2j_2}	هزینه ثابت برای احداث انبار j_2
$cfwc_{kk'}$	هزینه ثابت برای دایر کردن مرکز پردازش k با K' ظرفیت
$cfBG_r$	هزینه ثابت برای دایر کردن پالایشگاه بیوگاز r
cv	هزینه خرید زیست توده
$cvs1_{j_1p}$	هزینه دستمزد انبارداری (احداث شده) j_1 و خشک کردن زیست توده نوع p
$cvs2_{j_2p}$	هزینه دستمزد انبارداری (استیجاری) j_2 و خشک کردن زیست توده نوع p
cvw_{ip}	هزینه دستمزد جمع‌آوری زیست توده نوع p از مزرعه i
$cvwc_k$	هزینه دستمزد کارکنان در مرکز پردازش k
$cvBG_r$	هزینه دستمزد کارکنان در پالایشگاه بیوگاز r
ct	هزینه سوخت برای حمل و نقل

پارامترهای محیط زیستی	
ept	ضریب انتشار CO ₂ برای حمل‌ونقل با کامیون (گرم در کیلومتر)
ett	ضریب انتشار CO ₂ برای حمل‌ونقل با تریلی مخزن‌دار (گرم در کیلومتر)

پارامترهای فنی	
$dws1_{ij_1pA_1}$	فاصله مسیر A_1 از مزرعه i تا انبار احداث شده j_1
$dws2_{ij_2pA_1}$	فاصله مسیر A_1 از مزرعه i تا انبار استیجاری j_2
$dwc1_{j_1kpA_2}$	فاصله مسیر A_2 از انبار احداث شده j_1 تا مرکز پردازش k
$dwc2_{j_2kpA_2}$	فاصله مسیر A_2 از انبار استیجاری j_2 تا مرکز پردازش k
dBG_{krA_3}	فاصله مسیر A_3 از مرکز پردازش k تا تأسیسات بیوگاز r
f^{pt}	میزان مصرف سوخت برای حمل‌ونقل کامیون (کیلومتر بر لیتر)
f^{tt}	میزان مصرف سوخت برای حمل‌ونقل تریلی مخزن‌دار (کیلومتر بر لیتر)
$capws1_{j_1}$	ظرفیت انبار احداث شده j_1
$capws2_{j_2}$	ظرفیت انبار احداث شده j_2
$capwc_{kk'}$	ظرفیت مرکز پردازش k با مقدار k'
$capBG_r$	ظرفیت پالایشگاه بیوگاز r
q^1	حداقل ظرفیت (۵ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز
q^2	حداقل ظرفیت (۶ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز
q^3	حداقل ظرفیت (۷ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز
q^4	حداقل ظرفیت (۸ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز
q^5	حداقل ظرفیت (۹ مگاوات) برای تأسیسات بیوگاز
cr^{W-BG}	نرخ تبدیل از زیست‌توده به بیوگاز (بر حسب مترمکعب/تن)
cr^{mk}	عامل تبدیل بر حسب مگاوات
cr^{BG-E}	نرخ تبدیل بیوگاز به برق (بر حسب مترمکعب/تن)
d^{min}	حداقل توافق برق تولید شده برای جامعه (درصد)
M	یک عدد بزرگ

پارامترهای ریسک انبار	
δS	انحراف معیار ظرفیت نگهداری در انبار
wr	نرخ ضایعات و خرابی کالاها در انبار
Dt	تأخیر در تحویل کالا که یک عامل ریسک در نظر گرفته شده است.
SI	شاخص ایمنی انبار که معکوس آن ریسک ایمنی در نظر گرفته شده است.
α	ضریب هزینه نگهداری زیست‌توده در انبار
β	ضریب ریسک ضایعات در انبار

γ	ضریب ریسک هزینه‌های بیمه زیست‌توده در انبار
δ	ضریب تأخیر در زمان تحویل زیست‌توده در انبار
θ	ضریب شاخص ایمنی زیست‌توده در انبار

متغیرهای تصادفی	
S_{ip}	مقدار عرضه زیست‌توده نوع p
d_d	مقدار برق مورد نیاز به ازای d متقاضی

متغیرهای تصمیم پیوسته	
L_{ip}	مقدار کل زیست تودل خریداری شده نوع p از مزرعه i
01_{j_1p}	مقدار زیست‌توده ذخیره شده نوع p در انبار احداث شده j_1
02_{j_2p}	مقدار زیست‌توده ذخیره شده نوع p در انبار استیجاری j_2
M_k	مقدار زیست‌توده فراوری شده در مرکز پردازش k
N_r	مقدار خرده چوب استفاده شده در تأسیسات بیوگاز r
B_d	مقدار بیوگاز تولید شده به ازای d متقاضی
E_d	مقدار برق تولید شده به ازای d متقاضی
Ud_d	مقدار تقاضای برق برآورده نشده به ازای d متقاضی
$Xws1_{ij_1pA_1}$	مقدار/جریان حمل زیست‌توده نوع p از مزرعه i به انبار احداث شده j_1 از مسیر منتخب A_1
$Xws2_{ij_2pA_1}$	مقدار/جریان حمل زیست‌توده نوع p از مزرعه i به انبار استیجاری j_2 از مسیر منتخب A_1
$Xwc1_{j_1kpA_2}$	مقدار/جریان حمل زیست‌توده نوع p از انبار احداث شده j_1 به مرکز پردازش k از مسیر منتخب A_2
$Xwc2_{j_2kpA_2}$	مقدار/جریان حمل زیست‌توده نوع p از انبار استیجاری j_2 به مرکز پردازش k از مسیر منتخب A_2
XBG_{krA_3}	مقدار/جریان حمل زیست‌توده فراوری شده از مرکز پردازش k به تأسیسات بیوگاز r از مسیر منتخب A_3
XD_{drA_4}	مقدار/جریان حمل برق تولید شده برای متقاضی d از تأسیسات بیوگاز r از مسیر منتخب A_4
Q_r^2	به جهت محدود کردن حداقل ظرفیت نصب شده (۶ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز
Q_r^4	به جهت محدود کردن حداقل ظرفیت نصب شده (۸ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز

متغیرهای تصمیم باینری	
$Yws1_{j_1}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری برای احداث انبار j_1 ، برابر با ۱ اگر انبار احداث شود، در غیر این صورت صفر
$Yws2_{j_2}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری برای اجاره انبار j_2 ، برابر با ۱ اگر انبار اجاره شود، در غیر این صورت صفر
$Ywc_{kk'}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری برای دایر کردن مرکز پردازش k با ظرفیت k' ، برابر با ۱ اگر مرکز پردازش دایر شود، در غیر این صورت صفر
YBG_r	متغیر تصمیم‌گیری برای دایر کردن تأسیسات بیوگاز r

متغیر باینری برای نشان دادن انتقال زیست‌توده نوع p از مزرعه i به انبار احداث شده j_1 از مسیر منتخب A_1 ، برابر با ۱ اگر از مسیر استفاده شود، در غیر این صورت صفر	$Wws1_{ij_1pA_1}$
متغیر باینری برای نشان دادن انتقال زیست‌توده نوع p از مزرعه i به انبار استیجاری j_2 از مسیر منتخب A_1 ، برابر با ۱ اگر از مسیر استفاده شود، در غیر این صورت صفر	$Wws2_{ij_2pA_1}$
متغیر باینری برای نشان دادن انتقال زیست‌توده نوع p از انبار احداث شده j_1 به مرکز پردازش k از مسیر منتخب A_2 برابر با ۱ اگر از مسیر استفاده شود، در غیر این صورت صفر	$Wwc1_{j_1kpA_2}$
متغیر باینری برای نشان دادن انتقال زیست‌توده نوع p از انبار استیجاری j_2 به مرکز پردازش k از مسیر منتخب A_2 ، برابر با ۱ اگر از مسیر استفاده شود، در غیر این صورت صفر	$Wwc2_{j_2kpA_2}$
متغیر باینری برای نشان دادن انتقال زیست‌توده فراوری شده از مرکز پردازش k به تأسیسات بیوگاز r از مسیر منتخب A_2 ، برابر با ۱ اگر از مسیر استفاده شود، در غیر این صورت صفر	WBG_{krA_3}
متغیر باینری برای محدود کردن حداقل ظرفیت نصب شده (۵ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز	Q_r^1
متغیر باینری برای محدود کردن حداقل ظرفیت نصب شده (۷ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز	Q_r^3
متغیر باینری برای محدود کردن حداقل ظرفیت نصب شده (۹ مگاوات) برای یک تأسیسات بیوگاز	Q_r^5

۳-۱-۱ توابع هدف مدل

در مدل ریاضی، از سه تابع هدف برای ارزیابی سه جنبه کلیدی از پارادایم پایداری (جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی) برای زنجیره تأمین سوخت زیستی (BSCN) استفاده شده است.

تابع هدف رابطه (۱) مجموع هزینه‌های احداث یا اجاره انبارها، مجموع هزینه‌های راه‌اندازی (شامل سایت‌های جمع‌آوری و پردازش چوب و تأسیسات بیوگاز)، کل هزینه خرید زیست‌توده (توده چوب و درخت پالونیا)، کل هزینه دستمزد و عملیات (شامل جمع‌آوری توده چوب و برداشت درخت پالونیا در مزرعه، پردازش چوب‌ها در سایت پردازش و تولید در تأسیسات بیوگاز) و کل هزینه‌های حمل و نقل و توزیع (شامل جریان حمل و نقل زیست‌توده چوب به سایت پردازش و خرده چوب‌ها به تأسیسات بیوگاز) به حداقل می‌رسد.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z1 = & \left(\sum_{j_1} cfws1_{j_1} Yws_{j_1} + \sum_{j_2} cfws2_{j_2} Yws_{j_2} \right) \\
 & + \sum_k \sum_{k'} cfwc_{kk'} Ywc_{kk'} + \sum_r cfBG_r YBG_r + \sum_i \sum_p cv L_{ip} \\
 & + \sum_i \sum_p cvw_{ip} L_{ip} + \sum_{j_1} \sum_p cvs1_{j_1p} O1_{j_1p} + \sum_{j_2} \sum_p cvs2_{j_2p} O2_{j_2p} \\
 & + \sum_k cvwc_k M_k + \sum_r cvBG_r N_r \\
 & + \left(\sum_i \sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_1} dws1_{ij_1pA_1} ct Xws1_{ij_1pA_1} / f^{pt} \right) \\
 & + \left(\sum_i \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_1} dws2_{ij_2pA_1} ct Xws2_{ij_2pA_1} / f^{pt} \right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
& + (\sum_{j_1} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} dwc1_{j_1kpA_2} ct Xwc1_{j_1ipA_2} / f^{pt}) \\
& \quad + \sum_{j_2} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} dwc2_{j_2kpA_2} ct Xwc2_{j_2kpA_2} / f^{pt}) \\
& + (\sum_k \sum_r \sum_{A_3} dBG_{krA_3} ct XBG_{krA_3} / f^{tt})
\end{aligned}$$

تابع هدف رابطه (۲)، به حداقل رساندن کل تقاضای برق برآورده نشده مورد انتظار را در مناطق تقاضا نشان می‌دهد.

$$Min Z2 = M \sum_d U d_d \quad (2)$$

تابع هدف رابطه (۳) به منظور به حداقل رساندن آثار زیست‌محیطی و کاهش انتشار CO2 ناشی از حمل و نقل جاده‌ای و مسیرهای منتخب طراحی شده است.

$$\begin{aligned}
Min Z3 = & \sum_i \sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_1} dws1_{ij_1pA_1} ept Wws1_{ij_1pA_1} \\
& + \sum_i \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_1} dws1_{ij_2pA_1} ept Wws2_{ij_2pA_1} \\
& + \sum_{j_1} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} dwc1_{j_1kpA_2} ept Wwc1_{j_1kpA_2}) \\
& + \sum_{j_2} \sum_k \sum_p \sum_{A_2} dwc2_{j_2kpA_2} ept Wwc2_{j_2kpA_2} \\
& + \sum_k \sum_r \sum_{A_3} dBG_{krA_3} ett WBG_{krA_3}
\end{aligned} \quad (3)$$

تابع هدف رابطه (۴)، ریسک انبار را حداقل می‌رساند. وضعیت نگهداری موجودی‌های داخل انبار، ضایعات احتمالی محصولات، تأخیر در تحویل محصول به انبار، ایمنی انبار از لحاظ سرقت، آتش‌سوزی، تهویه مناسب و موارد دیگر، شاخص‌های ریسک در نظر گرفته می‌شود و ضرایب وزنی $(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \theta)$ اهمیت نسبی هر متغیر، در میزان ریسک کلی انبار مشخص می‌شود و متخصصان و کارشناسان این را تعیین می‌کنند.

$$\begin{aligned}
Min Z4 = & \alpha. \delta S (\sum_{j_1} Yws1_{j_1} + \sum_{j_2} Yws2_{j_2}) \\
& + \beta. wr (\sum_{j_1} Yws1_{j_1} + \sum_{j_2} Yws2_{j_2}) + \gamma. Ins (\sum_{j_1} Yws1_{j_1} + \sum_{j_2} Yws2_{j_2}) \\
& + \delta. Dt (\sum_{j_1} Yws1_{j_1} + \sum_{j_2} Yws2_{j_2}) + \theta. (1 - SI) (\sum_{j_1} Yws1_{j_1} + \sum_{j_2} Yws2_{j_2})
\end{aligned} \quad (4)$$

۳-۱-۲ محدودیت‌ها

$$L_{ip} \leq S_{ip} \quad \forall i, p \quad (5)$$

$$\sum_{j_1} \sum_{A_1} Xws1_{ij_1pA_1} + \sum_{j_2} \sum_{A_1} Xws2_{ij_2pA_1} = L_{ip} \quad \forall i, p \quad (6)$$

$$O1_{j_1p} = \sum_i \sum_{A_1} Xws1_{ij_1pA_1} \quad \forall j_1, p \quad (7)$$

$$O2_{j_2p} = \sum_i \sum_{A_1} Xws2_{ij_2pA_1} \quad \forall j_2, p \quad (۸)$$

$$\sum_i \sum_p \sum_{A_1} Xws1_{ij_1pA_1} \leq capws1_{j_1} Yws1_{j_1} \quad \forall j_1 \quad (۹)$$

$$\sum_i \sum_p \sum_{A_1} Xws2_{ij_2pA_1} \leq capws2_{j_2} Yws2_{j_2} \quad \forall j_2 \quad (۱۰)$$

$$\sum_i \sum_{A_1} Xws1_{ij_1pA_1} \geq \sum_k \sum_{A_2} Xwc1_{j_1kpA_2} \quad \forall j_1, p \quad (۱۱)$$

$$\sum_i \sum_{A_1} Xws2_{ij_2pA_1} \geq \sum_k \sum_{A_2} Xwc2_{j_2kpA_2} \quad \forall j_2, p \quad (۱۲)$$

$$Yws1_{j_1} \leq 1 \quad \forall j_1 \quad (۱۳)$$

$$Yws2_{j_2} \leq 1 \quad \forall j_2 \quad (۱۴)$$

$$M_k = \sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_2} Xwc1_{j_1kpA_2} + \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_2} Xwc2_{j_2kpA_2} \quad \forall k \quad (۱۵)$$

$$\sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_2} Xwc1_{j_1kpA_2} + \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_2} Xwc2_{j_2kpA_2} \leq \sum_{k'} capwc_{kk'} Ywc_{kk'} \quad \forall k \quad (۱۶)$$

$$\sum_{k'} Ywc_{kk'} \leq 1 \quad \forall k \quad (۱۷)$$

$$\sum_{j_1} \sum_p \sum_{A_2} Xwc1_{j_1kpA_2} + \sum_{j_2} \sum_p \sum_{A_2} Xwc2_{j_2kpA_2} \geq \sum_r \sum_{A_3} XBG_{krA_3} \quad \forall k \quad (۱۸)$$

$$\sum_k \sum_{A_3} XBG_{krA_3} \leq capBG_r YBG_r \quad \forall r \quad (۱۹)$$

$$N_r = \sum_k \sum_{A_3} XBG_{krA_3} \quad \forall r \quad (۲۰)$$

$$\sum_k \sum_{A_3} XBG_{krA_3} \geq \sum_d \sum_{A_4} XD_{rdA_4} \quad \forall r \quad (۲۱)$$

$$YBG_r = q^1 Q_r^1 + q^2 Q_r^2 + q^3 Q_r^3 + q^4 Q_r^4 + q^5 Q_r^5 \quad \forall r \quad (۲۲)$$

$$YBG_r \leq 1 \quad \forall r \quad (۲۳)$$

$$B_d = cr^{W-BG} \sum_r \sum_{A_4} XD_{rdA_4} \quad \forall d \quad (۲۴)$$

$$E_d = cr^{mk} cr^{BG-E} B_d \quad \forall d \quad (۲۵)$$

$$E_d \geq d^{min} d_d \quad \forall d \quad (۲۶)$$

$$Ud_d = d_d - E_d \quad \forall d \quad (۲۷)$$

$$MM(Wws1_{ij_1pA_1}) \geq Xws1_{ij_1pA_1} \quad \forall i, j_1, p, A_1 \quad (۲۸)$$

$$MM(Wws2_{ij_2pA_1}) \geq Xws2_{ij_2pA_1} \quad \forall i, j_2, p, A_1 \quad (۲۹)$$

$$MM(Wwc1_{j_1kpA_2}) \geq Xwc1_{j_1kpA_2} \quad \forall j_1, k, p, A_2 \quad (۳۰)$$

$$MM(Wwc2_{j_2kpA_2}) \geq Xwc2_{j_2kpA_2} \quad \forall j_2, k, p, A_2 \quad (۳۱)$$

$$MM(WBG_{krA_3}) \geq XBG_{krA_3} \quad \forall k, r, A_3 \quad (۳۲)$$

$$Yws1_{j_1}, Yws2_{j_2}, Ywc_{kk'}, Wws1_{ij_1pA_1}, Wws2_{ij_2pA_1}, Wwc1_{j_1kpA_2}, Wwc2_{j_2kpA_2}, WBG_{krA_3}, \quad (33)$$

$$Q_r^1, Q_r^3, Q_r^5 \in \{0,1\} \\ YBG_r, Xws1_{ij_1pA_1}, Xws2_{ij_2pA_1}, Xwc1_{j_1kpA_2}, Xwc2_{j_2kpA_2}, XBG_{krA_3} \geq 0 \quad (34)$$

$$L_{ip}, O1_{j_1p}, O1_{j_2p}, M_k, N_r, B_d, E_d, Ud_d, Q_r^2, Q_r^4 \geq 0 \quad (35)$$

برای حل مدل ریاضی، از روش معیار جامع استفاده و به جهت تعیین درجه اهمیت اهداف نیز، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) استفاده شده است. به منظور انجام مقایسه‌های زوجی در روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، قضاوت‌های کیفی تصمیم‌گیرندگان ابتدا به متغیرهای زبانی بیان و سپس به اعداد فازی مثلثی متناظر تبدیل می‌شوند. این تبدیل امکان مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام موجود در قضاوت‌های انسانی را فراهم می‌کند. در همین راستا، جدول (۲) متغیرهای زبانی به کار رفته و اعداد فازی متناظر با هریک را نشان می‌دهد که در فرآیند مقایسه‌های زوجی به کار رفته‌اند.

جدول ۲- متغیرهای زبانی و اعداد فازی استفاده شده در مقایسات زوجی

Table 2 - Linguistic variables and fuzzy numbers used in FAHP pairwise comparisons

اصطلاحات زبانی	اعداد فازی	اصطلاحات زبانی	اعداد فازی	اصطلاحات زبانی	اعداد فازی
ترجیح کم	(۱،۱،۱)	ترجیح متوسط تا زیاد	(۳،۴،۵)	ترجیح خیلی زیاد	(۶،۷،۸)
ترجیح کم تا متوسط	(۱،۲،۳)	ترجیح زیاد	(۴،۵،۶)	ترجیح خیلی زیاد تا کاملاً زیاد	(۷،۸،۹)
ترجیح متوسط	(۲،۳،۴)	ترجیح زیاد تا خیلی زیاد	(۵،۶،۷)	ترجیح کاملاً زیاد	(۹،۹،۹)

اگر $\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}]$ یک ماتریس مقایسه زوجی فازی باشد، $\tilde{a}_{ij}$ یک عدد فازی مثلثی است که بیانگر مقایسه فازی بین معیار i و معیار j است. هر عنصر $\tilde{a}_{ij}$ به صورت یک عدد فازی مثلثی به شکل $\tilde{a}_{ij} = (L_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ تعریف می‌شود که در آن L_{ij} حد پایین (کمترین مقدار ممکن)، m_{ij} مقدار میانی (محتمل‌ترین مقدار) و u_{ij} حد بالا (بیشترین مقدار ممکن) را نشان می‌دهد. ماتریس مقایسه زوجی فازی $\tilde{A}$ برای یک مسئله با n معیار به صورت زیر نمایش داده می‌شود و معیارهای منفی، یعنی اعداد معکوس، به صورت $\tilde{a}_{ij} = (\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{L_{ij}})$ نوشته می‌شوند.

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1, 1, 1) & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & (1, 1, 1) & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & (1, 1, 1) \end{pmatrix} \quad (36)$$

برای به دست آوردن وزن اهداف، ابتدا میانگین هندسی هر سطر ماتریس طبق رابطه (۳۷) به دست می‌آید و سپس وزن اهداف مطابق رابطه (۳۸) محاسبه می‌شود.

$$r_i \sim = \left[\left(\prod_{j=1}^n L_{ij} \right)^{1/n}, \left(\prod_{j=1}^n m_{ij} \right)^{1/n}, \left(\prod_{j=1}^n u_{ij} \right)^{1/n} \right] \quad (37)$$

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes \left(\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n \right)^{-1} \quad (38)$$

برای استفاده از تکنیک فوق، از نظر سه کارشناس خبره شامل یک متخصص از بخش صنعتی با تجربه در تولید سوخت‌های زیستی، یک کارشناس دولتی و سیاست‌گذار با تخصص در انرژی‌های تجدیدپذیر و یک استاد دانشگاه با تسلط در پژوهش‌های پایداری استفاده شده است.

۴- یافته های پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای مدل ریاضی توسعه‌یافته برای زنجیره تأمین سوخت زیستی ارائه شده است. این نتایج شامل تحلیل عملکرد مدل در مقابل اهداف متعدد و ارزیابی حساسیت جواب آن نسبت به پارامترهای کلیدی است. برای تعیین مقادیر اولیه پارامترهای مدل، از مطالعات پیشین استفاده و برخی از مفروضات در جدول (۳) آورده شده است که از مطالعات پیشین اقتباس شده اند.

جدول ۳- مفروضات و مقادیر برخی از پارامترهای مدل این پژوهش (Ransicarbun and Pitakasu, 2024)

Table 3- Assumptions and values of some model parameters of this research (Ransicarbun and Pitakasu, 2024)

مفروضات یا پارامترها	مقادیر و توضیحات
S_{ip}	تعداد ۹ مزرعه برای برداشت زیست‌توده چوب و درخت پالونیا فرض شده است. پیش فرض اولیه امکان برداشت ۵۰ تا ۶۰ تن زیست‌توده از هر مزرعه است.
d_d	تعداد ۵ مرکز تقاضای مختلف به جهت برق تولیدی با تقاضای اولیه ۴۰ تا ۵۰ مگاوات بر مترمکعب
$Yws1_{j1}$	تعداد ۳ انبار احداث پذیر با ظرفیت ۱۵ تن
$Yws2_{j2}$	تعداد ۴ انبار استیجاری با ظرفیت‌های ۱۰ تن
$Ywc_{kk'}$	تعداد ۹ مرکز پیش‌پردازش با سه ظرفیت مختلف ۴۰، ۶۰ و ۸۰ تن
YBG_r	تعداد ۵ تأسیسات بیوگاز با ظرفیتهای ۹۰، ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ مگاوات
$Cfws1_{j1}$	هزینه ثابت دایر کردن هر انبار احداث پذیر ۳۰۰ هزار دلار
$Cfws2_{j2}$	هزینه ثابت برای اجاره یک ساله هر انبار استیجاری ۱۱ هزار دلار
$cfwc_{kk'}$	هزینه ثابت دایر کردن هر مرکز پیش‌پردازش ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ هزار دلار
$cfBG_r$	هزینه ثابت دایر کردن هر تأسیسات بیوگاز بین یک میلیون تا یک میلیون و پانصد هزار دلار
cv	هزینه خرید هر تن زیست‌توده ۵۰۰ دلار برای یک تن
cvw_{ip}	هزینه دستمزد جمع‌آوری هر تن زیست‌توده ۱۳ دلار برای هر تن
ct	هزینه مصرف سوخت برای حمل‌ونقل ۳ دلار برای هر کیلومتر
f^{pt}	میزان مصرف سوخت برای کامیون ۶ لیتر در هر کیلومتر
f^{tt}	میزان مصرف سوخت برای حمل‌ونقل تریلی مخزن‌دار ۴ لیتر در کیلومتر
ept	ضریب انتشار CO2 برای حمل‌ونقل با کامیون ۰،۰۰۰۶ گرم در کیلومتر
ett	ضریب انتشار CO2 برای حمل‌ونقل با تریلی مخزن‌دار ۰،۰۰۲۳ گرم در کیلومتر

جدول (۴)، نتایج حاصل از تحلیل اوزان پایداری را با استفاده از تکنیک سلسله‌مراتبی فازی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج بیانگر آن است که دیدگاه اقتصادی در میان کارشناسان صنعتی و دانشگاهی، بالاترین اهمیت را دارد؛ در حالی که کارشناسان دولتی بیشترین توجه را به معیار اجتماعی داشته‌اند. همچنین وزن معیار ریسک در تمامی گروه‌ها پایین‌تر بوده است. به طور کلی، تصمیم‌گیری گروهی نشان‌دهنده اولویت ابعاد اقتصادی و اجتماعی نسبت به ریسک و زیست‌محیطی است.

جدول ۲- تجزیه و تحلیل اوزان پایداری با تکنیک سلسله مراتبی فازی (FAHP)

Table 4- Analysis of sustainability weights using the fuzzy hierarchical technique (FAHP)

وزن قطعی	وزن فازی			میانگین هندسی فازی			دیدگاه پایداری	تصمیم گیرنده
	U	M	L	U	M	L		
۰/۷۳۳	۰/۸۹۲	۰/۷۳۴	۰/۶۰۲	۳/۹۸	۳/۶۳	۳/۲۷	اقتصادی	کارشناس صنعتی
۰/۲۱۴	۰/۲۶۲	۰/۲۱۳	۰/۱۷۵	۱/۱۷	۱/۰۵	۰/۹۵	اجتماعی	
۰/۰۵۳	۰/۰۶۴	۰/۰۵۳	۰/۰۴۴	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۲۴	زیست محیطی	
۰/۱۰۷	۰/۶۴	۰/۲۱۳	۰/۴۴	۰/۲۹	۱/۰۵	۰/۲۴	ریسک	
۰/۰۶۴	۰/۰۸۲	۰/۰۶۸	۰/۰۴۹	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۲۵	اقتصادی	کارشناس دولتی
۰/۶۱۷	۰/۸۶۲	۰/۶۰۱	۰/۴۵۲	۳/۱۷	۲/۴۱	۲/۲۹	اجتماعی	
۰/۳۱۸	۰/۴۳۱	۰/۳۳۱	۰/۲۲۶	۱/۵۹	۱/۳۳	۱/۱۴	زیست محیطی	
۰/۰۵۰	۰/۰۶۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۲۹	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	ریسک	
۰/۴۶۹	۰/۹۵۷	۰/۴۹۳	۰/۲۲۱	۲/۰۸	۱/۵۹	۱/۰۰	اقتصادی	کارشناس دانشگاهی
۰/۳۱۷	۰/۶۶۳	۰/۳۱۱	۰/۱۵۳	۱/۴۴	۱/۰۰	۰/۶۹	اجتماعی	
۰/۲۱۴	۰/۴۶۰	۰/۱۹۶	۰/۱۰۶	۱/۰۰	۰/۶۳	۰/۴۸	زیست محیطی	
۰/۱۸۹	۰/۰۶۴	۰/۰۴۴	۰/۴۶۰	۰/۰۲۹	۰/۰۲۴	۱/۰۰	ریسک	
۰/۳۶۴							اقتصادی	تصمیم گیری گروهی
۰/۳۰۳							اجتماعی	
۰/۱۷۷							زیست محیطی	
۰/۱۵۶							ریسک	

مدل در نرم افزار تخصصی GAMS (ورژن ۲/۲۵) به دقت کدنویسی و پیاده سازی شده است. پس از تعیین اوزان، هر تابع هدف به صورت یک مدل بهینه سازی تک هدفه حل شده است تا مقادیر بهینه هر هدف یعنی f_i^* مشخص شود؛ سپس با قرار دادن مقادیر وزنی w_j و در نظر گرفتن $p=1$ مقدار کلی هر هدف مشخص شد. جدول (۵)، نتایج بهینه توابع هدف حاصل از حل مدل ریاضی را نشان می دهد.

جدول ۳- مقادیر بهینه توابع هدف

Table 5-Optimal values of objective functions

Z4	Z3	Z2	Z1
کاهش ریسک انبار (درصد)	کاهش انتشار کربن (کیلوگرم دی اکسید کربن)	کاهش تقاضای برآورده نشده (کیلووات ساعت)	کاهش کل هزینه زنجیره تأمین (هزار دلار)
۲/۶۱۵	۰/۵۵۳	۵۷۹۶۰۰	۳۳۰۹۰/۶۱

جدول (۵) عملکرد بهینه مدل پیشنهادی را در دستیابی به اهداف چندگانه، به وضوح نشان می دهد. مدل با کاهش هزینه های زنجیره تأمین، برآورده سازی تقاضای بیشتر، کاهش میزان انتشار کربن و کاهش ریسک انبار، تعادل مناسبی بین اهداف اقتصادی، زیست محیطی و مدیریت ریسک ایجاد کرده است. این نتایج حاکی از کارایی مدل در بهبود پایداری و ارتقای عملکرد زنجیره تأمین سوخت زیستی است.

۴-۱ سناریوسازی داده‌های تصادفی عرضه و تقاضا

در این بخش، تأثیر داده‌های تصادفی عرضه و تقاضا بر طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده^{۴۰} با ارزیابی پنج سناریوی احتمالی در جدول (۶) نشان داده شده است. این سناریوها با هدف بررسی رفتار مدل، تحت شرایط مختلف طراحی شده است و شامل پنج حالت از خوش‌بینانه تا بدبینانه است. در این تحلیل، تغییرات عرضه و تقاضا به صورت درصدی نسبت به مقادیر اولیه در نظر گرفته شده است. این سناریوها ابزار مؤثری را برای ارزیابی پایداری و عملکرد زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت‌های متغیر ارائه می‌دهند و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا راهبردهای بهینه را در مواجهه با شرایط مختلف، طراحی کنند.

جدول ۴-تحلیل سناریوهای داده‌های تصادفی عرضه و تقاضا

Table 6-Scenario analysis of random supply and demand data

سناریو	عرضه (Si)	تقاضا (ddi)
اول (خوش‌بینانه)	مقدار اولیه	مقدار اولیه
دوم (محتمل)	٪۱۵ کاهش	٪۱۵ کاهش
سوم (بدبینانه)	٪۲۰ کاهش	بدون تغییر در مقدار اولیه
چهارم (پرخطر)	٪۲۵ افزایش	٪۲۵ افزایش
پنجم (حداقل)	٪۲۰ کاهش	٪۲۰ کاهش

جداول (۷) تا (۱۰)، عملکرد توابع هدف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و ریسک را در سناریوهای مختلف تحلیل و مقایسه می‌کنند. در سناریوی دوم، که عرضه و تقاضا هر دو ٪۱۵ کاهش یافته‌اند، مقدار تابع هدف اقتصادی (Z1) نسبت به سناریوی اول کاهش یافته است و همین روند در سناریوی پنجم نیز مشاهده می‌شود. تابع هدف دوم (Z2)، که بیانگر تقاضای برآورده‌نشده است، رویکرد مشابهی با (Z1) دارد و با کاهش تقاضا، به کمترین مقدار خود می‌رسد. کمترین میزان انتشار گاز کربن، یعنی تابع هدف (Z3)، در سناریوی پنجم و جایی رخ داده است که کاهش عرضه و تقاضا موجب کاهش درخور توجه هزینه‌های زنجیره تأمین شده است. همچنین کمترین ریسک انبار، یعنی تابع هدف (Z4)، در سناریوهای دوم و پنجم، مشاهده می‌شود.

جدول ۶-عملکرد تابع هدف اجتماعی (Z2) تحت سناریوهای مختلف

Table 8- Performance of the social objective function (Z2) under different scenarios

سناریو	Z1	Z2	Z3	Z4
۱	۷۳/۵۰۳۲۸	۵۷۹۶۰۰	۹۹۵/۰	۱۸۴/۴
۲	۷۳/۵۰۳۲۸	۲۷۹۶۰۰	۹۹۵/۰	۱۸۴/۴
۳	۸۵/۴۵۲۹۵	۲۵۱۶۴۰	۸۹۵/۰	۷۶۵۶/۳
۴	۷۳/۵۰۳۲۸	۸۷۹۶۰۰	۹۹۵/۰	۱۸۴/۴
۵	۶۷/۴۹۷۷۲	۲۵۶۰۰۰	۹۹۵/۰	۱۸۴/۴

جدول ۵-عملکرد تابع هدف اقتصادی (Z1) تحت سناریوهای مختلف

Table 7- Performance of the economic objective function (Z1) under different scenarios

سناریو	Z1	Z2	Z3	Z4
۱	۶۱/۳۳۰۹۰	۱۱۷۹۰۰۰	۶۶۹/۰	۱۳۸/۳
۲	۹۹/۲۸۸۹۰	۱۰۲۹۰۰۰	۵۶۵/۰	۶۱۵/۲
۳	۸۹/۲۶۰۰۱	۹۲۶۱۰۰	۵۰۸۵/۰	۳۵۳۵/۲
۴	۹۶/۳۷۴۷۸	۱۳۲۹۰۰۰	۷۶/۰	۶۶۱/۳
۵	۶۶/۲۴۵۱۳	۸۷۹۰۰۰	۵۷۹/۰	۶۱۵/۲

جدول ۸- عملکرد تابع هدف ریسک (Z4) تحت سناریوهای مختلف
Table 10- Performance of the risk objective function (Z4) under different scenarios

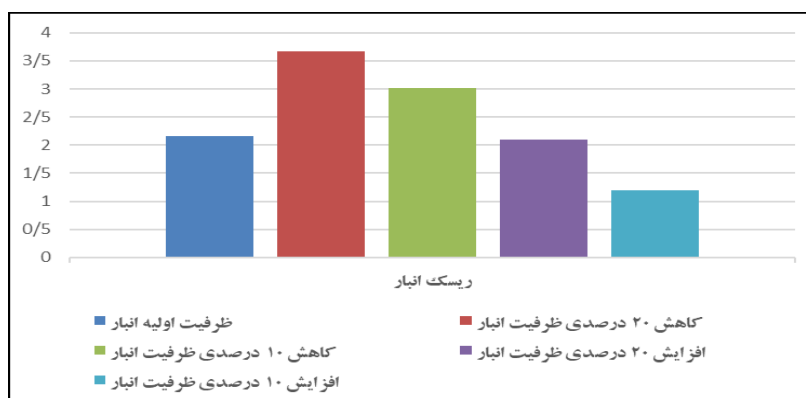
سناریو	Z1	Z2	Z3	Z4
۱	۴۴/۳۳۶۵۷	۱۱۷۹۰۰۰	۵۶۲/۰	۶۱۵/۲
۲	۹۸/۲۹۴۵۷	۱۰۲۹۰۰۰	۴۷۲/۰	۰۹۲/۲
۳	۱۸/۲۶۵۱۲	۹۲۶۱۰۰	۴۲۴۸/۰	۸۵۰/۲
۴	۹۱/۳۷۷۵۶	۱۳۲۹۰۰۰	۶۵۳/۰	۱۳۸/۳
۵	۴۳/۲۵۰۸۰	۸۷۹۰۰۰	۴۶۸/۰	۰۹۲/۲

جدول ۷- عملکرد تابع هدف محیط زیستی (Z3) تحت سناریوهای مختلف
Table 9- Performance of the environmental objective function (Z3) under different scenarios

سناریو	Z1	Z2	Z3	Z4
۱	۶۶/۳۳۷۱۴	۱۱۷۹۰۰۰	۵۵۳/۰	۶۱۵/۲
۲	۷۵/۲۹۵۰۷	۱۰۲۹۰۰۰	۴۶۲/۰	۹۲/۲۰
۳	۹۷/۲۶۵۵۶	۹۲۶۱۰۰	۴۱۵۸/۰	۸۲۸/۱۸
۴	۱۸۳/۷۸۲۱	۱۳۲۹۰۰۰	۶۶۴/۰	۱۳۸/۳
۵	۹۴/۲۵۱۲۲	۸۷۹۰۰۰	۴۵۸/۰	۰۹۲/۲

۴-۲ تجزیه و تحلیل حساسیت و اعتبار سنجی مدل

در این پژوهش، به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و ارزیابی پایداری نتایج آن، تحلیل حساسیت ریسک انبار نسبت به تغییر پارامترهای کلیدی شامل ظرفیت انبار، نوسانات تقاضا، هزینه‌های نگهداری و سطح ایمنی موجودی انجام شده است. برای این منظور، هر پارامتر در بازه‌های مشخصی ($\pm 10\%$ ، $\pm 20\%$) تغییر داده و مدل در سناریوهای مختلف اجرا شده است تا رفتار سیستم در شرایط متغیر و بحرانی، ارزیابی شود. به منظور بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییر ظرفیت انبار و ارزیابی اثر آن بر ریسک انبارداری، ظرفیت انبار در سناریوهای مختلف کاهش و افزایش داده و نتایج حاصل در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- تأثیر تغییر ظرفیت انبار بر مدیریت ریسک انبار

Figure 1 - The impact of changing warehouse capacity on warehouse risk management

شکل (۱)، نمودار تأثیر تغییرات ظرفیت انبار را بر تابع هدف ریسک انبار نمایش می‌دهد و بیان می‌کند که کاهش ظرفیت به طور مستقیم، به افزایش ریسک منجر می‌شود. به ویژه، کاهش ظرفیت به میزان ۲۰٪، بیشترین تأثیر منفی را بر سیستم داشته و ریسک را به بالاترین سطح رسانده است. این امر ناشی از محدودیت فضای ذخیره‌سازی است که انعطاف‌پذیری سیستم را در پاسخ به تقاضاهای متغیر کاهش و احتمال عدم تأمین به موقع یا انباشت غیرمنطقی موجودی را افزایش می‌دهد. در مقابل، افزایش ظرفیت انبار به میزان ۱۰٪ و ۲۰٪، تأثیر مثبتی بر کاهش ریسک داشته است، به ویژه افزایش ۲۰٪ که به کمترین مقدار ریسک منجر شده است. این نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت، پایداری زنجیره تأمین را بهبود می‌بخشد و سیستم را در مواجهه با نوسانات و عدم قطعیت، تقویت کند. علاوه بر این، ظرفیت اولیه عملکرد متعادلی ارائه داده است؛ اما نسبت به سناریوهای افزایش ظرفیت، کارایی

کمتری در کاهش ریسک نشان داده است. این تحلیل تأکید می‌کند در شرایطی که زنجیره تأمین با نوسانات یا عدم قطعیت مواجه است، بهبودسازی ظرفیت انبار نه تنها ریسک عملیاتی را کاهش می‌دهد، عملکرد کل سیستم را نیز بهبود می‌بخشد. تصمیم‌گیرندگان با افزایش ظرفیت انبار یا تعریف استراتژی‌های انعطاف‌پذیر، پایداری و کارایی زنجیره تأمین را بهبود می‌دهند.

۵- بحث

طراحی لجستیک و زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی به دلیل ساختار پیچیده و نیازهای خاص، به یکی از موضوعات نوظهور جهانی تبدیل شده است و تصمیمات مکان‌یابی و توزیع در این حوزه، اهمیت ویژه‌ای برای پایداری بلندمدت دارد (Mignogna et al., 2024).

در این پژوهش، یک مدل بهبودسازی چندهدفه تحت عدم قطعیت عرضه و تقاضا ارائه شد که اهداف آن، شامل هزینه کل، تقاضای تأمین‌نشده، تأثیرات زیست‌محیطی با در نظر گرفتن جنبه‌های پایداری و ریسک انبار است. اضافه کردن ریسک انبار به مدل، به کنترل نوسانات و پایداری عملیاتی کمک می‌کند. مدل با روش LP-metric حل و وزن اهداف با FAHP تعیین شد. استفاده از این رویکرد با مدیریت دقیق عدم قطعیت‌ها، کیفیت تصمیم‌گیری را بهبود می‌دهد و تعادلی میان اهداف مختلف ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی علاوه بر کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی، تأثیرات زیست‌محیطی و ریسک انبار را نیز کاهش می‌دهد. همچنین تغییرات در عرضه و تقاضا، نقش مهمی در عملکرد شبکه و بر ضرورت انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین تأکید دارد. کاهش عرضه و تقاضا، ضمن کاهش هزینه و انتشار، ریسک انبار را افزایش می‌دهد؛ در حالی که افزایش آن، بهره‌وری ظرفیت‌ها را بالا می‌برد، ولی نیازمند مدیریت دقیق هزینه و ریسک است.

نتایج تحلیل حساسیت حاکی از آن است که مدل پیشنهادی در برابر تغییر پارامترهای کلیدی سیستم، از رفتار منطقی و پایداری برخوردار است و خروجی‌های آن به صورت معنادار و تفسیرشدنی تغییر می‌کنند؛ امری که بیانگر اعتبار ساختاری مدل و قابلیت اتکای آن در تصمیم‌گیری‌های راهبردی زنجیره تأمین است.

مقایسه با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که برخلاف تحقیقات متمرکز بر هزینه یا انتشار (Arabi & Yaghoubi, 2025)، این پژوهش با افزودن ریسک انبار به عنوان هدف مستقل، رویکرد جامع‌تری اتخاذ کرده است. همچنین استفاده از FAHP و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، نسبت به پژوهش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی یا الگوریتم‌های فراابتکاری (Momenitabar, 2022; Hosseinalizadeh et al., 2022)؛ مزیت دارد.

۶- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که ادغام هم‌زمان معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و ریسک انبار در یک چارچوب بهبودسازی چندهدفه، اثربخشی تصمیم‌گیری در طراحی و مدیریت زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی را به شکل معناداری ارتقا می‌دهد. این دستاورد نه تنها امکان دستیابی به هزینه کمتر و کاهش آلاینده‌ها را فراهم می‌کند، با مدیریت هوشمند ریسک، تاب‌آوری زنجیره در برابر نوسانات عرضه و تقاضا نیز بهبود می‌یابد. به بیان دیگر، مدل پیشنهادی ابزاری عملی و راهبردی برای سیاست‌گذاران و مدیران صنعتی به کار گرفته می‌شود تا با ایجاد

تعادل میان کارایی اقتصادی، ملاحظات زیست محیطی و پایداری عملیاتی، مسیر توسعه پایدار سوخت های زیستی هموار شود.

این پژوهش، یک مدل بهینه سازی چندهدفه جامع برای زنجیره تأمین سوخت های زیستی ارائه می دهد که به طور هم زمان هزینه کل، تقاضای تأمین نشده، آثار زیست محیطی و ریسک انبارداری را برای اولین بار به عنوان یک هدف مستقل در شرایط عدم قطعیت عرضه و تقاضا در نظر می گیرد. در این چارچوب با ادغام ابعاد اقتصادی، زیست محیطی و ریسک عملیاتی، پایداری و تاب آوری زنجیره تأمین ارتقا می یابد و با بهره گیری از روش سلسه مراتبی وزن اهداف به صورت واقع گرایانه تعیین می شود. همچنین استفاده از روش معیار جامع، امکان دستیابی به راه حل های مصالحه ای را میان اهداف متعارض فراهم و تحلیل سناریو محور نوسانات عرضه و تقاضا، بینش های کاربردی برای بهبود تصمیم گیری و سیاست گذاری را در زنجیره تأمین سوخت های زیستی، به ویژه در بستر بومی ایران، ارائه می کند. پژوهش حاضر با تمرکز بر شرایط بومی ایران، می کوشد بینش های کاربردی و قابل اتکایی برای مدیران و سیاست گذاران حوزه انرژی در جهت توسعه پایدار زنجیره تأمین سوخت های زیستی ارائه دهد.

از محدودیت های این پژوهش به پیش فرض های مدل اشاره می شود که ممکن است با پیچیدگی های دنیای واقع تطابق نداشته باشند؛ این موضوع فرصت هایی را برای بهبود و توسعه مدل های پیچیده تر در تحقیقات آینده فراهم می کند. همچنین تمرکز تحقیق بر ابعاد اقتصادی و بررسی نکردن کامل ابعاد اجتماعی و فرهنگی، نشان دهنده نیاز به تحقیقات جامع تر در این زمینه است.

برای ارتقای تحقیقات آینده در زمینه زنجیره تأمین سوخت های زیستی در ایران، توصیه می شود که دامنه داده ها گسترش یابد و از تکنیک های پیشرفته جمع آوری و تحلیل داده استفاده شود تا نتایج دقیق تری حاصل شود. همچنین استفاده از مدل های بهینه سازی پیچیده تر، از جمله الگوریتم های یادگیری ماشین و مدل های فازی، به بهبود دقت پیش بینی ها و نتایج در زمینه خاص کمک می کند. توجه به ابعاد اجتماعی و فرهنگی، به ویژه تأثیرات آن بر معیشت محلی و جامعه ایرانی، برای درک جامع تر از پایداری زنجیره تأمین در این کشور ضروری است. تحلیل های مقایسه ای با زنجیره های تأمین در کشورهای دیگر نیز، به شناسایی بهترین شیوه ها و سیاست ها برای ایران کمک می کند. علاوه بر این، بررسی تأثیرات بلندمدت استفاده از سوخت های زیستی بر محیط زیست و اقتصاد ایران باید در اولویت قرار گیرد تا سیاست های مؤثری برای توسعه پایدار این منابع، تدوین شود.

References

- Abbasi, T., Tauseef, S., & Abbasi, S. (2012). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3228-3242.
- Abuelnuor, A. A., Abuelnuor, M. A., & Abd El Kawi, O. S. A. (2024). Comparative analysis of slow pyrolysis of sugarcane bagasse and corn stover for renewable energy production. *Discover Energy*, 4(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s43937-024-00058-0>.
- Ahmed, W., & Sarkar, B. (2018). Impact of carbon emissions in a sustainable supply chain management for a second generation biofuel. *Journal of Cleaner Production*, 186, 807-820. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.060>.
- Aliahmadi, S. Z., Barzinpour, F., & Pishvae, M. S. (2021). A novel bi objective credibility based fuzzy model for municipal waste collection with hard time windows. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126364>

- Aliano Filho, A., Cantane, D. R., Isler, P. R., & de Oliveira Florentino, H. (2023). An integrated multi objective mathematical model for sugarcane harvesting considering cumulative degree days. *Expert Systems with Applications*, 232, 120881. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120881>.
- Ambaye, T. G., Vaccari, M., Bonilla Petriciolet, A., Prasad, S., van Hullebusch, E. D., & Rtimi, S. (2021). Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 290, 112627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112627>.
- Arabi, M., & Yaghoubi, S. (2024). A Lagrangian relaxation approach for algae-based biofuel supply chain network design under uncertainty and pricing issue. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(55), 64048-64068.
- Asadi, E., Habibi, F., Nickel, S., & Sahebi, H. (2018). A bi objective stochastic location inventory routing model for microalgae based biofuel supply chain. *Applied Energy*, 228, 2235–2261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.067>.
- Azar, A., & Raoufian, A. (2010). *Optimization of quality function deployment using linear physical programming*. Ministry of Science, Research, and Technology-Tarbiat Modares University.
- Bahmani, P., Sadrabadi, M. H. D., Makui, A., & Jafari-Nodoushan, A. (2024). An optimization-based design methodology to manage the sustainable biomass-to-biodiesel supply chain under disruptions: a case study. *Renewable Energy*, 229, 120626. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120626>.
- Chowdhury, P., Mahi, N. A., Yeassin, R., Chowdhury, N.-U.-R., & Farrok, O. (2025). Biomass to biofuel: Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges. *Energy Conversion and Management: X*, 25, 100889. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100889>.
- Ebrahimi, S. B., & Bagheri, E. (2022). Optimizing profit and reliability using a bi objective mathematical model for oil and gas supply chain under disruption risks. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107849. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107849>.
- Fernández Puratich, H., Rebolledo Leiva, R., Hernández, D., Gómez Lagos, J. E., Armengot Carbo, B., & Oliver Villanueva, J. V. (2021). Bi objective optimization of multiple agro industrial wastes supply to a cogeneration system promoting local circular bioeconomy. *Applied Energy*, 300, 117333. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117333>.
- Ganesan, T., Vasant, P., Sanghvi, P., Thomas, J., & Litvinchev, I. (2020). Random matrix generators for optimizing a fuzzy biofuel supply chain system. *Journal of Advanced Engineering and Computation*, 4(1), 33–50. <https://doi.org/10.25073/jaec.202041.268>.
- Gital, Y., & Bilgen, B. (2024). Biomass supply chain network design under uncertainty, risk and resilience: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 197, 110270. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110270>.
- Han, N., & Um, J. (2024). Risk management strategy for supply chain sustainability and resilience capability. *Risk Management*, 26(2), 1–26. <https://doi.org/10.1057/s41283-023-00138-w>.
- Helal, M. A., Anderson, N., Wei, Y., & Thompson, M. (2023). A review of biomass to bioenergy supply chain research using bibliometric analysis and visualization. *Energies*, 16(3), 1187. <https://doi.org/10.3390/en16031187>.
- Hsu, H.-Y., Hwang, M.-H., & Tsou, P.-H. (2023). Applications of BWM and GRA for evaluating the risk of picking and material-handling accidents in warehouse facilities. *Applied Sciences*, 13(3), 1263. <https://doi.org/10.3390/app13031263>.
- Hosseinalizadeh, R., Shakouri, H., & Izadbakhsh, H. (2022). Planning for energy production from municipal solid waste: An optimal technology mix via a hybrid closed-loop system dynamics-optimization approach. *Expert Systems with Applications*, 199, 116929. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116929>.
- Hu, Y., Wang, J., Yang, Y., Li, S., Wu, Q., Nepovimova, E., Zhang, X., & Kuca, K. (2024). Revolutionizing soil heavy metal remediation: Cutting-edge innovations in plant disposal

- technology. *Science of The Total Environment*, 918, 170577. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170577>
- Huang, X., Ji, L., Xie, Y., & Luo, Z. (2025). Robust optimization of regional biomass supply chain system design and operation with data-driven uncertainties. *Food and Bioproducts Processing*, 149, 176-189. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.11.021>.
- Jakubowski, M. (2022). Cultivation potential and uses of Paulownia wood: A review. *Forests*, 13(5), 668. <https://doi.org/10.3390/f13050668>.
- Jeswani, H. K., Chilvers, A., & Azapagic, A. (2020). Environmental sustainability of biofuels: A review. *Proceedings of the Royal Society A*, 476(2243), 20200351. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0351>.
- Kandpal, V., Jaswal, A., Santibanez Gonzalez, E. D., & Agarwal, N. (2024). Environmental impact assessment and sustainable energy transition. In *Sustainable Energy Transition: Circular Economy and Sustainable Financing for Environmental, Social and Governance (ESG) Practices* (pp. 273–288). Springer.
- Karakosta, C., & Askounis, D. (2010). Developing countries' energy needs and priorities under a sustainable development perspective: A linguistic decision support approach. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.06.003>.
- Kiwjaroun, C., Tubtimdee, C., & Piumsomboon, P. (2009). LCA studies comparing biodiesel synthesized by conventional and supercritical methanol methods. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.04.014>
- Lewis, S. M., Gross, S., Visel, A., Kelly, M., & Morrow, W. (2015). Fuzzy GIS-based multi-criteria evaluation for US agave production as a bioenergy feedstock. *GCB Bioenergy*, 7(1), 84–99. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12100>.
- Maharana, D., Kommadath, R., & Kotecha, P. (2023). An innovative approach to the supply-chain network optimization of biorefineries using metaheuristic techniques. *Engineering Optimization*, 55(8), 1278–1295.
- Momenitabar, M., Ebrahimi, Z. D., & Ghasemi, P. (2022). Designing a sustainable bioethanol supply chain network: A combination of machine learning and meta-heuristic algorithms. *Industrial Crops and Products*, 189, 115848.
- Osmani, A., & Zhang, J. (2017). Multi-period stochastic optimization of a sustainable multi-feedstock second-generation bioethanol supply chain—A logistic case study in Midwestern United States. *Land Use Policy*, 61, 420–450. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.11.033>.
- Pan, A., Xu, S., & Zaidi, S. A. H. (2024). Environmental impact of energy imports: Natural resources income and natural gas production profitability in the Asia-Pacific Economic Cooperation Countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101756. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101756>.
- Qadir, S. A., Al-Motairi, H., Tahir, F., & Al-Fagih, L. (2021). Incentives and strategies for financing the renewable energy transition: A review. *Energy Reports*, 7, 3590–3606. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.057>.
- Rafique, R., Jat, M., & Chudhery, M. A. Z. (2021). Bioenergy supply chain optimization for addressing energy deficiency: A dynamic model for large-scale network designs. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128495>.
- Ransikarbum, K., & Pitakaso, R. (2024). Multi-objective optimization design of sustainable biofuel network with integrated fuzzy analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 240, 122586. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122586>.
- Savoji, H., Mousavi, S. M., Antucheviciene, J., & Pavlovskis, M. (2022). A robust possibilistic bi-objective mixed integer model for green biofuel supply chain design under uncertain conditions. *Sustainability*, 14(20), 13675. <https://doi.org/10.3390/su142013675>.

- Sivamani, S., Selvakumar, S., Rajendran, K., & Muthusamy, S. (2019). Artificial neural network–genetic algorithm-based optimization of biodiesel production from *Simarouba glauca*. *Biofuels*, 10(3), 393–401. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1349272>.
- Suresh, S., Barboza, A. B., Ashwini, K., & Dinesha, P. (2025). Optimization of ANN Models Using Metaheuristic Algorithms for Prediction of Tailpipe Emissions in Biodiesel Engine. *Heat Transfer*, 54(2), 1189–1201. <https://doi.org/10.1002/htj.22936>.
- Tan, Y., Wang, X., & Zheng, Y. (2018). Modeling and daily operation optimization of a distributed energy system considering economic and energy aspects. *International Journal of Energy Research*, 42(11), 3477–3495. <https://doi.org/10.1002/er.4082>.
- Wang, S., Sun, L., & Iqbal, S. (2022). Green financing role on renewable energy dependence and energy transition in E7 economies. *Renewable Energy*, 200, 1561–1572. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.073>.
- Wassie, S. B. (2020). Natural resource degradation tendencies in Ethiopia: A review. *Environmental Systems Research*, 9(1), 1–29. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00178-5>.
- Zarafati, M. E., & Golmohammadi, A. (2021). A mathematical model for optimization in biofuel supply chain network based on microalgae: A case study in Iran. *Proceedings of the 1st National Conference on Optimization and New Solution Methods*, Iran.
- Zhang, Y., & Jiang, Y. (2017). Robust optimization on sustainable biodiesel supply chain produced from waste cooking oil under price uncertainty. *Waste Management*, 60, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.004>.
- Zhou, T., Li, Z., Aviso, K. B., Tan, R. R., Jia, X., & Wang, F. (2024). Multi-objective optimization of straw-based bio-natural gas supply chains considering cost, CO2 emission, and safety. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141759. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.141759>.
- Ziolkowska, J. R. (2014). Optimizing biofuels production in an uncertain decision environment: Conventional vs. advanced technologies. *Applied Energy*, 114, 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.066>.
- Haghighi, A., & Babapour, A. (2018). *Using renewable energy as an effective way to reduce environmental pollution*. Renewable and New Energy.
- Ghadge, A., Er Kara, M., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 669–686. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0368>
- Mignogna, D., Szabó, M., Ceci, P., & Avino, P. (2024). Biomass energy and biofuels: perspective, potentials, and challenges in the energy transition. *Sustainability*, 16(16), 7036. <https://doi.org/10.3390/su16167036>

¹ Linear Programming Metric (Metric)

² Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

³ Biomass Supply Chain Network (BSCN)

⁴ Ambaye et al.

⁵ Chowdhury et al.

⁶ Kandpal et al

⁷ Wassie

⁸ Pan et al.

⁹ Abbasi et al.

¹⁰ Qadir et al.

¹¹ Ghadge et al.

¹² Geographic Information System (GIS)

¹³ Bahmani et al.

¹⁴ Arabi & Yaghoubi

¹⁵ Huang et al.

¹⁶ Zhou et al.

- ¹⁷ Hu et al.
- ¹⁸ Maharana et al.
- ¹⁹ Suresh et al.
- ²⁰ Artificial Neural Network (ANN)
- ²¹ Carbon Monoxide (CO)
- ²² Unburned Hydrocarbons (HC)
- ²³ Nitrogen Oxides (NOx)
- ²⁴ Ebrahimi and Bagheri
- ²⁵ Ziolkowska
- ²⁶ Lewis et al.
- ²⁷ Ottoman and Zhang
- ²⁸ Zhang & Jiang
- ²⁹ Ahmed & Sarkar
- ³⁰ Asadi et al.
- ³¹ Sivamani et al.
- ³² Ganesan et al.
- ³³ Aliahmadi et al.
- ³⁴ Rafique et al.
- ³⁵ Fernández-Puratich et al.
- ³⁶ Abuelnuor et al.
- ³⁷ Savoji et al.
- ³⁸ Aliano Filho et al.
- ³⁹ Hilal et al.
- ⁴⁰ Biomass Supply Chain Network (BSCN)